



Université Libanaise
Faculté des Sciences

MEMOIRE

En vue de l'obtention du

MASTER PROFESSIONNEL

En

Physique Energétique

Présenté et Soutenu par :

Mayas Al MASRI

Le 27 Sept. 2018

Titre

**Etude comparative entre les différentes méthodes de
traitement des déchets solides stockés et quotidiens.
Application sur la décharge de Tripoli.**

Encadrant : Dr. Marwan JARKAS

Lecteurs : Pr. Ahmad ELMOLL

Dr. Nasser AL-KHATIB

Remerciements :

Nulle œuvre n'est exaltante que celle réalisée avec le soutien moral et financier de nos proches. Je profite de cet espace pour les remercier tous.

Je remercie « Dieu », notre créateur de m'avoir donné la force et le courage afin d'accomplir ce travail.

J'adresse mes grands remerciements à l'université Libanaise Faculté des Sciences. Je tiens également à remercier mon Docteur « MARWAN JARKASS » qui est proposé le thème de ce projet, pour son conseil, son encouragement et son dirige dès le début jusqu'à la fin de ce travail, ainsi que son connaissances théoriques et pratiques, et son longue expérience dans ce domaine qui est donné un coup de pouce à mon travail.

Mes remerciements vont également aux Messieurs : Docteur Nasser ELKHATIB et Prof. Ahmad ELMOLL de l'intérêt qu'ils ont bien voulu me témoigner en participant au jury.

Finalement, Je ne pourrais terminer mes remerciements sans me retourner vers les personnes qui me sont les plus chers, qui sans eux aucune réussite n'aurait été possible. J'adresse de tout mon cœur mes remerciements à mes parents et à mon marie Bilal, mes voisins en Istanbul, et mes amies à l'université libanaise. Je leur suis infiniment reconnaissant pour leur amour et leur soutien moral.

Résumé :

Ces dernières décennies, la majorité des pays sont concentrée sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation. La valorisation énergétique des déchets au Liban présente de plus en plus un besoin impeccable puisque leur élimination par enfouissement a causé des problèmes sur l'environnement et sur la santé des citoyens surtout à Tripoli. La déchetterie de Tripoli ne peut plus contenir des quantités supplémentaires de déchets, elle a commencé à contaminer le sol par les lixiviats, l'air par les gaz toxiques dégager et l'eau de mer.

L'application des différentes méthodes de valorisation énergétique des déchets : Méthanisation, Incinération et gazéification par torche à Plasma, sur la déchetterie de Tripoli, est alors nécessaire. Un calcul de la puissance électrique et thermique est alors menée, puis les avantages et les inconvénients sont alors présentée pour mener une comparaison entre les différentes méthodes et choisir la plus convenable pour être appliquer à la déchetterie de Tripoli. Le calcul est alors mené sur la quantité des déchets présenter pour l'année 2017.

Premièrement, l'application de la méthanisation sur la déchetterie de Tripoli a générée 20 MW de puissance thermique ce qui est équivalent à 5 MW de puissance électrique. Deuxièmement, l'application de l'incinération a générée 31 MW de puissance thermique équivalent à 7 MW de puissance électrique. Finalement, l'application de plasma a générée 48 MW de puissance thermique, 13.5 MW de puissance électrique.

Le calcul a montré alors que la valorisation des déchets par plasma est la plus convenable. Elle a présenté aussi les avantages suivants :

- La meilleure puissance électrique $13.5 \text{ MW} > 7 \text{ MW}$ (puissance électrique par incinération) $> 5 \text{ MW}$ (puissance électrique par méthanisation).
- Plusieurs avantages par rapport aux autre méthodes :
 - Les produits solides obtenus par la valorisation par plasma peuvent être utiliser comme matériaux de construction par contre ceux obtenues par incinérations sont toxiques.
 - Possible de valoriser sans triage par contre la méthanisation a besoin d'un triage ce qui est presque impossible puisque la montagne des déchets à Tripoli est ancienne.
 - Possible de valoriser les matières organiques, les papiers, les cartons et le plastique par contre la méthanisation ne permet que la valorisation des matières organique.
 - Pas d'émission de gaz toxique.

C'est la raison pour laquelle la valorisation par plasma des déchets présentés à la déchetterie de Tripoli est la plus convenable puisqu'elle présente le meilleur rendement électrique et présentant plus d'avantages que les autres méthodes.

Mots clés : Valorisation énergétique, déchetterie de Tripoli, Méthanisation, Incinération, gazéification par torche à Plasma.

Table de matières

| | |
|---|-----------|
| List des figures | 6 |
| List des tableaux | 7 |
| INTRODUCTION GENERAL | 8 |
| CHAPITRE 1 | 11 |
| METHODES DE VALORISATION DES DECHETS | 11 |
| 1.1. Introduction | 11 |
| 1.1.1. Principe de fonctionnement de la méthanisation | 12 |
| 1.1.2. Les différentes technologies | 15 |
| 1.1.3. Paramètres physico-chimiques de la méthanisation | 16 |
| 1.1.4. Choix de l'intrant | 17 |
| 1.1.5. Intérêt environnemental de la méthanisation | 18 |
| 1.2. Le Compostage : | 20 |
| 1.2.1. Définition : | 20 |
| 1.2.2. Le processus de compostage | 20 |
| 1.2.3. Les différents composts | 22 |
| 1.3. Incinération | 23 |
| 1.3.1. Définition | 23 |
| 1.3.2. Fonctionnement d'un four d'incinération à grille | 24 |
| 1.3.3. Paramètre de l'incinération | 25 |
| 1.3.4. Récupération de chaleur et dispositif de traitement des gaz | 26 |
| 1.4. Plasma | 29 |
| 1.4.1. Définition | 29 |
| 1.4.2. Principe de fonctionnement | 30 |
| 1.5. Pyrolyse | 34 |
| 1.5.1. Définition | 34 |
| 1.5.2. Types de pyrolyse | 35 |
| 1.5.3. Procédés de pyrolyse rapide | 35 |
| CHAPITRE 2 | 38 |
| Application des méthodes de valorisation sur la déchetterie de Tripoli | 38 |
| 2.1. Introduction | 38 |
| 2.2. Production et gestion des déchets au Liban | 39 |
| 2.3. Production et composition des déchets solides à Tripoli | 40 |
| 2.4. Valorisation des déchets à tripoli | 42 |

| | |
|--|-----------|
| 2.4.1. Méthanisation | 42 |
| 2.4.2. Incinération | 44 |
| 2.4.3. Plasma | 48 |
| CHAPITRE 3 | 51 |
| Comparaison entre les méthodes de valorisation appliquées sur la déchetterie de Tripoli | 51 |
| 3.1. Introduction | 51 |
| 3.2. Avantage et inconvénients des différentes méthodes de valorisation | 51 |
| 3.2.1. Méthanisation | 51 |
| 3.2.2. Incinération | 52 |
| 3.2.3. Le procédé de gazéification de déchets par torche à plasma | 53 |
| 3.3. Comparaison entre les différentes méthodes | 55 |
| 3.4. Conclusion | 56 |
| CONCLUSION GENERALE | 57 |
| Annexe 1 | 59 |
| Références | 61 |

List des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Histoire de la méthanisation [2] | 12 |
| Figure 2 : Un schéma à échelles différentes [2] | 12 |
| Figure 3 : Principe de fonctionnement de la méthanisation en macro et micro échelles [2] | 13 |
| Figure 4 : Principales voies de dégradation et nature des populations microbiennes de la digestion [3] | 15 |
| Figure 5 : Potentiel du méthanogène provenant des matières brutes [1]. | 18 |
| Figure 6 : La méthanisation dans le cycle du carbone [4] . | 19 |
| Figure 7 : Evolution théorique de la température durant le compostage en milieu tempéré [5]. | 21 |
| Figure 8 : Représentation schématique des principaux transferts de chaleur et de matière au sein du compost. [6] | 22 |
| Figure 9 : Les différents types de composts urbains. [6] | 23 |
| Figure 10 : Schéma d'ensemble de l'UIOM de Strasbourg [7] | 25 |
| Figure 11 : Diagramme présentant le principe de fonctionnement d'un réacteur plasma [9] | 32 |
| Figure 12 : Réacteur de gazéification Plasma [9] | 32 |
| Figure 13 : Flux de processus typique pour la gazéification au plasma [9] | 33 |
| Figure 14 : Schéma simplifié de la pyrolyse [11] | 34 |
| Figure 15 : Schéma d'écoulement représentatif de la pyrolyse des déchets | 34 |
| Figure 16 : Influence de la vitesse de chauffage sur la teneur en gaz, vapeurs condensables et char [16] | 35 |
| Figure 17 : Schéma du procédé pilote utilisé par Dynamotive [16] | 36 |
| Figure 18 : Composition des déchets au Liban [14] | 38 |
| Figure 19 : Variation de la quantité de déchets placée dans le décharge de Tripoli entre 2001 et 2017 | 41 |
| Figure 20: Graphe montrant la quantité produite de biogaz et de méthane en m3/j pour les années de 2001 jusqu'a 2017 | 44 |
| Figure 21 : Graphe montrant la puissance réelles produites par méthanisation. | 44 |
| Figure 22 : Graphe montrant la puissance réelles (KW) produites par incinération. | 47 |
| Figure 23 : Graphe montrant la puissance réelles (KW) produites par plasma. | 50 |
| Figure 24 : Pourcentage d'électricité de district (en MW) | 56 |

List des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Composition des fumées d'incinération d'ordures ménagères en sortie de chaudière. [12] | 28 |
| Tableau 2 : Différence entre Gaz et Plasma | 30 |
| Tableau 3 : Vue d'ensemble de DSM dans les principales villes [14] | 40 |
| Tableau 4 : Quantité de déchets placée dans le décharge à Tripoli en kg | 41 |
| Tableau 5 : Valeur de puissance électrique produit par méthanisation en (kw). | 43 |
| Tableau 6 : Pouvoir calorifique des différentes composantes des déchets..... | 45 |
| Tableau 7 : Valeur de puissance électrique produit par incinération en (Kw)..... | 46 |
| Tableau 8 : Valeurs de puissance électrique produit par plasma en (KW) | 49 |
| Tableau 9 : Comparaison entre les différentes méthodes de valorisation : méthanisation, incinération et plasma | 55 |
| Tableau 10 : Pouvoir calorifique des différents matières (1) | 59 |
| Tableau 11 : Pouvoir calorifique des différents matières (2) | 60 |

INTRODUCTION GENERAL

Selon le Code de l'Environnement, un déchet est défini comme suit : « 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 » d'où tout élément qui est abandonné est un déchet. Cela ne veut pas dire que cet élément est inutilisable, en l'état ou après modification. Seuls les déchets qualifiés d'ultimes sont réellement inutilisables et doivent être stockés pour éviter la pollution de l'environnement.

Pour réduire les effets des déchets sur l'environnement, la santé humaine, etc... la gestion des déchets est alors indispensable. Elle se définit par la collecte, le transport, le traitement, la réutilisation ou leur élimination. Des efforts bien remarquables ont été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation.

La quantité des déchets, est considérablement développée avec la révolution industrielle du XIX^e siècle et la société de consommation du XX^e siècle, produits par les activités humaines. Même que si le mot qui les désigne à un concept négatif, ils ne présentent pas pour autant une fatalité : ils peuvent être réduits au moment de la fabrication, transformés en d'autres produits, et peuvent être aussi une source importante d'énergie. Les sources des déchets sont multiples : Les filières des exploitations minières, du bâtiment, de l'automobile, du nucléaire produisent des déchets qui réclament des traitements particuliers. Beaucoup d'autres, comme les ordures ménagères, les matières combustibles ou putrescibles, peuvent être recyclés ou valorisés sous forme d'énergie par plusieurs méthodes. Par suite les déchets peuvent être traités par Enfouissement, Incinération, Plasma, Compostage, Méthanisation, Mise en décharge et Recyclage. Les manières de gérer les déchets diffèrent selon qu'on se trouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou un commerçant.

Le Liban est l'un des pays en voie de développement où les déchets ont présenté un sérieux problème. La responsabilité directe de la gestion des déchets dans la région de Beyrouth et une grande partie de la grande région du Mont Liban, ainsi que Tripoli revient au CDR, et dans une moindre mesure, aux ME et MIM. Le rôle des municipalités dans ces domaines est limité à la surveillance des travaux d'une société privée sous contrat par le CDR pour les services de gestion des déchets solides. Dans le reste du Liban, les municipalités constituent actuellement la principale autorité responsable de la collecte et de l'élimination des déchets.

Le but principal de notre projet est de mener une étude détaillée sur les différentes méthodes de traitement de déchets et de choisir la méthode la plus convenable à les valoriser à Tripoli en prenant compte de leur quantité, leur type, l'efficacité énergétique et le financement disponible.

La démarche de ce travail est la suivante :

- Présentation du problème des déchets dont Tripoli est exposé.
- Comparaison entre les différentes méthodes de traitement des déchets.
- Etudes permettant de choisir la convenable méthode de valorisation applicable à la déchetterie de Tripoli.

Dans le but de présenter et de détailler notre projet ce manuscrit est organisé comme suit :

Après ce chapitre introductif, le chapitre 1 présentera une étude bibliographique concernant notre problématique sur les méthodes de valorisation des déchets : Incinération, méthanisation, gazéification par torche à plasma, compostage et pyrolyse.

Dans le chapitre 2, les contributions principales de ce travail seront détaillées, où le problème des déchets à Tripoli sera étudié, ainsi qu'une application des 3 méthodes présenté dans le chapitre 1 sur la déchetterie de Tripoli sera mené.

L'objectif du chapitre 3 est de présenter les résultats obtenus par le calcul pour les méthodes présentés dans les chapitres précédents. Leur performance sera alors comparée du point de vue énergétique, environnementale et financière.

Le dernier chapitre sera réservé pour les conclusions générales obtenues dans le cadre de ce travail en terminant sur quelques perspectives concernant cette étude.

CHAPITRE 1

METHODES DE VALORISATION DES DECHETS

1.1. Introduction

Ces dernières décennies, la majorité des pays sont concentrée sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation.

La gestion des déchets concerne tous les types de déchets (qu'ils soient solides, liquides ou gazeux). Les manières de gérer les déchets diffèrent selon la nature du pays, qu'on se trouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou un commerçant. La gestion des déchets non toxiques pour les institutions dans les agglomérations est habituellement sous la responsabilité des autorités locales, tandis que la gestion des déchets des commerçants et industriels est sous leur propre responsabilité (parfois toxique).

Dans ce chapitre, nous faisons une étude détaillée sur les différentes méthodes de valorisations des déchets qui sont respectivement : La Méthanisation, le Compostage, la technologie de gazéification par torche à plasma, l'Incinération et le Pyrolyse.

Définition

La méthanisation est définie comme un processus de dégradation par des bactéries de matière organique en milieu anaérobie (sans oxygène). Ce processus a pour but de créer du méthane à partir de déchets. La technique présentée dans ce qui suit correspond à la première génération de méthanisation : la méthanisation anaérobie. Il existe deux types de méthanisation de première génération : la méthanisation en ISDND (décharge) et la méthanisation par digesteur.

On s'intéresse à la méthanisation par digesteur. Elle est généralement utilisée dans les exploitations agricoles et territoriales. Cette technique consiste à amener les déchets à base de matière organique à traiter dans un digesteur pour la transformer d'une part en biogaz et d'autre part en digestat [1].

la Figure 1 ci-dessous présente quelques éléments de l'histoire de la digestion anaérobie depuis sa découverte et sa formalisation par « Alessandro Volta » en 1776 jusqu'à nos jours [2].

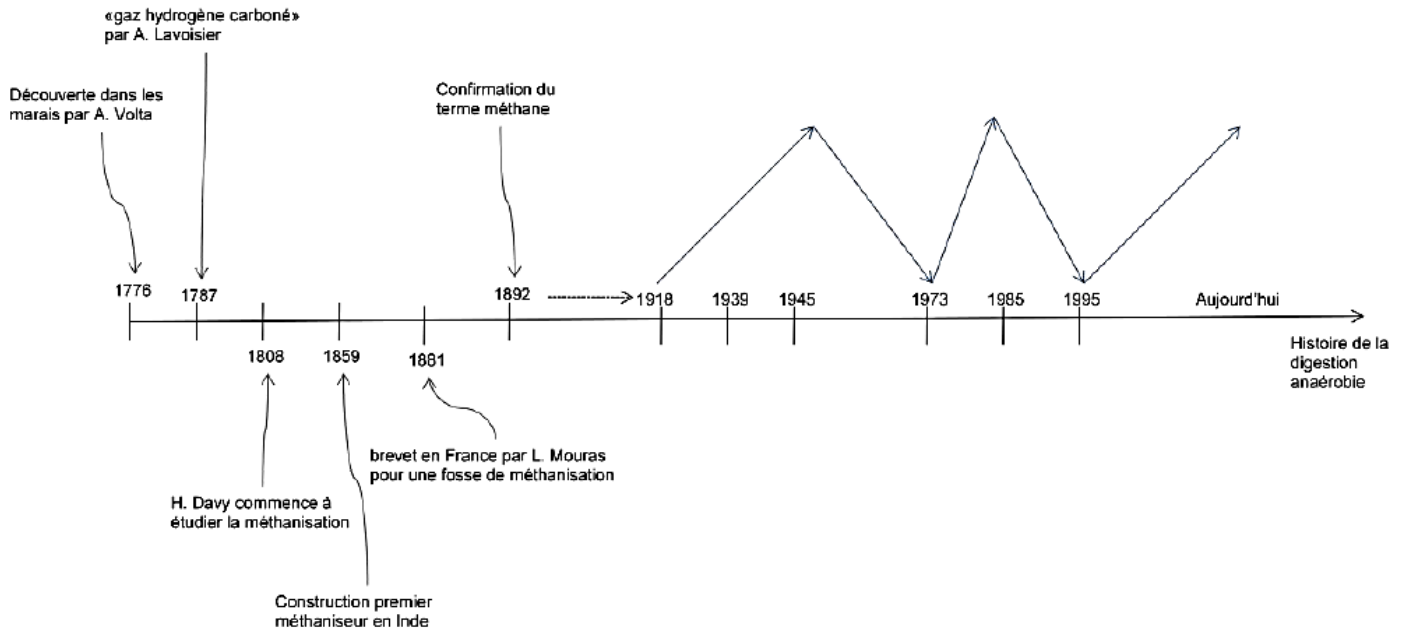


Figure 1 : Histoire de la méthanisation [2]

1.1.1. Principe de fonctionnement de la méthanisation

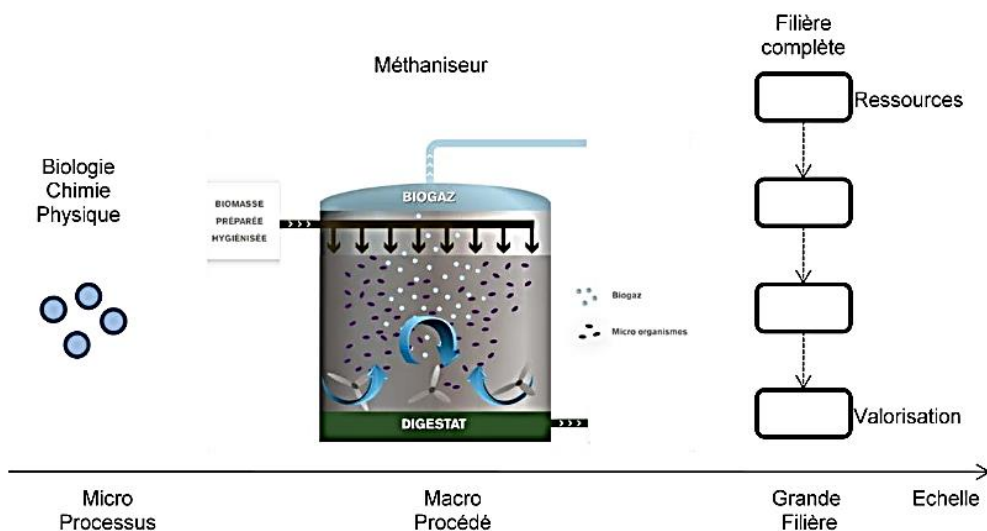


Figure 2 : Un schéma à échelles différentes [2]

La méthanisation doit être considérée comme une étape constitutive d'une filière complète à grande échelle. Le procédé (issu d'un ensemble de plusieurs éléments se

déroulant à l'échelle microscopique) est macroscopique à l'échelle du méthaniseur (Voir Figure 2).

La relation entre les bactéries et les substrats dans l'enceinte fermée est présentée sous la macro-échelle (le méthaniseur) (Voir Figure 3) et la micro-échelle éclaire sur les processus en jeu.

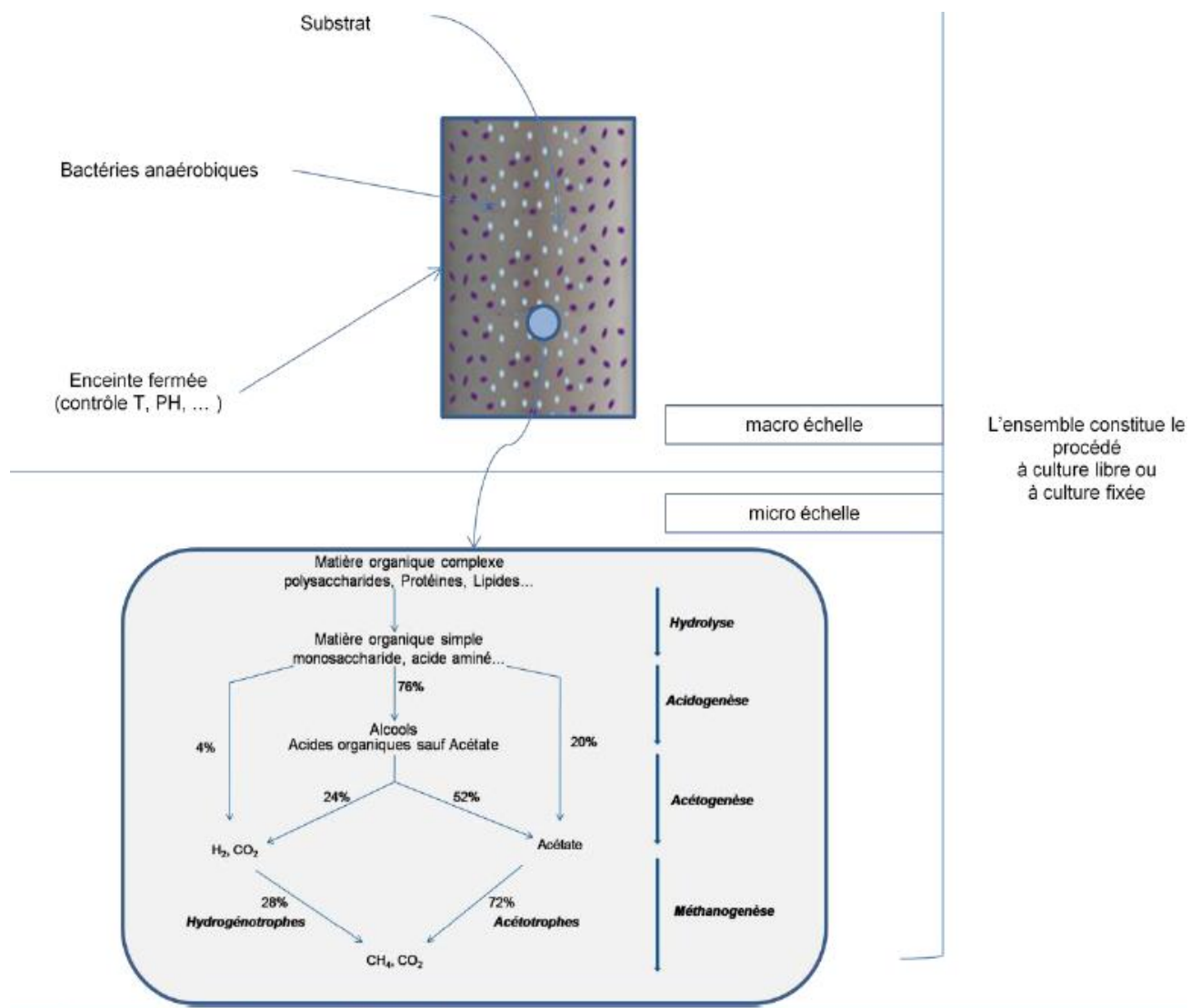


Figure 3 : Principe de fonctionnement de la méthanisation en macro et micro échelles [2]

À l'échelle macroscopique dans le méthaniseur, le biogaz produit, en absence d'oxygène, est un gaz combustible un mélange de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂). Les bactéries anaérobies ont tendance à produire du CH₄ et du CO₂ à

partir de la matière organique contrairement aux bactéries aérobies qui oxydent la matière organique en CO₂ et H₂O.

Ce procédé comporte plusieurs étapes :

- **Hydrolyse** : Hydrolyse des biopolymères (protéines, lipides, hydrates de Carbone, ...) en monomères et oligomères hydrosolubles.

- **Acidogénèse** : Les bactéries acidogènes transforment les produits de l'hydrolyse en acides gras volatils (AGV), en acides organiques, en hydrogène et CO₂.

- **Acétogénèse** : Consiste à transformer les produits de l'acidogénèse (sauf l'acétate) en acétate. Elle se déroule suivant deux métabolismes : les acides organiques sont transformés par l'acétogènes en acétate, CO₂ et H₂ ; l'hydrogène et le CO₂ sont combinés en acétate par les homoacétogènes ;

- **Méthanogénèse** : dernière étape du processus de dégradation, forme le méthane suivant deux métabolismes. L'acétate est transformée en méthane et CO₂ par les méthanogènes acétotrophes alors que les méthanogènes hydrogénotrophes combinent hydrogène et CO₂ pour former du méthane et de l'eau.

Chaque composé formé lors d'une de ces étapes biochimiques correspond au substrat utilisé lors de l'étape suivante. Une communauté bactérienne particulière est spécifiée à chacune de ces étapes (voir figure 4).

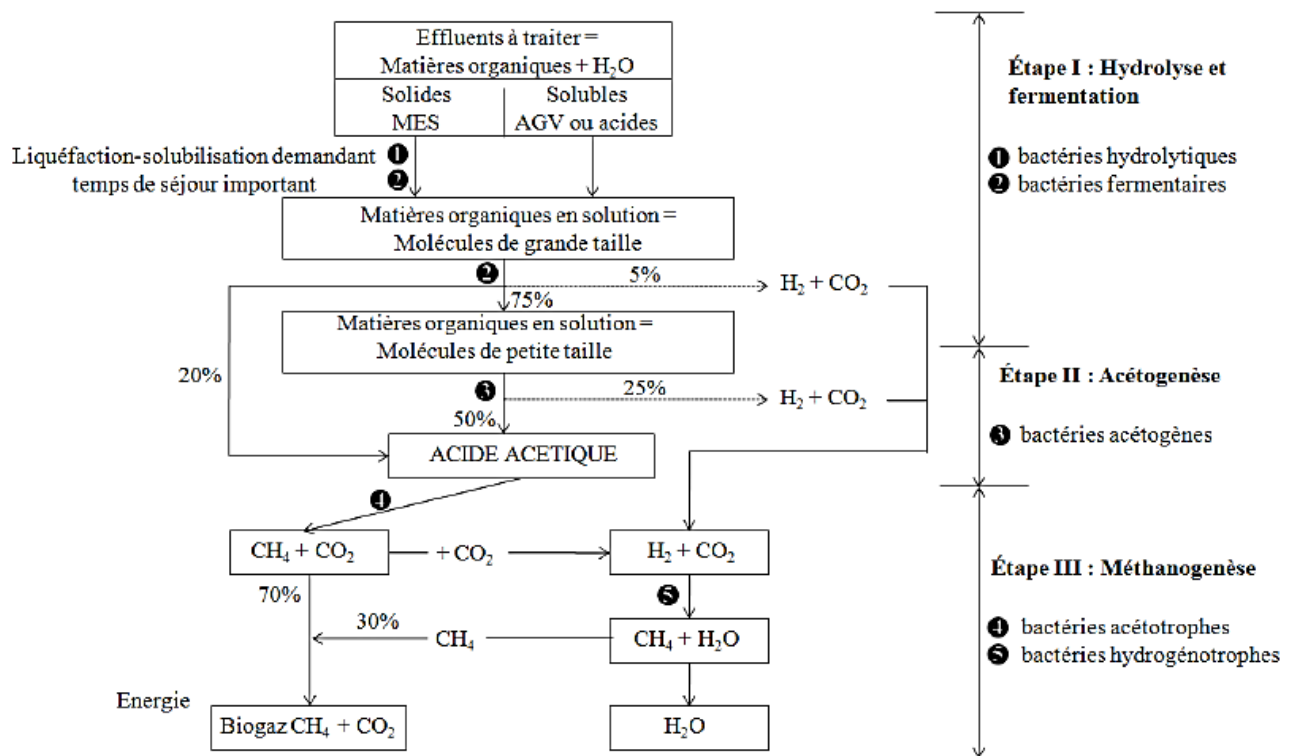


Figure 4 : Principales voies de dégradation et nature des populations microbiennes de la digestion [3]

1.1.2. Les différentes technologies

Il existe deux techniques de méthanisation :

- La voie liquide : utiliser pour les mélanges d'intrants inférieur à 15% de matière sèche et elle permet une alimentation automatique du digesteur (pompage). Elle permet une bonne homogénéisation des substrats et donc elle produit de biogaz de qualité. Cette technique nécessite de digesteurs à grands volumes mais a l'avantage de brasser les substrats.
- La voie sèche : utiliser pour les mélanges d'intrants compris entre 15% et 40% de matière sèche mais elle ne permet pas une alimentation automatique (pelletage). Cette technologie a l'avantage de réduire la taille du digesteur, en plus, la possibilité de méthaniser les substrats sans étape de dilution. Notons que le fonctionnement du digesteur dans cette voie est complexe car les intrants sont non brassés alors que certains composants (Lixiviats) nécessitent d'être "Re-circulés".

1.1.3. Paramètres physico-chimiques de la méthanisation

Pour assurer un déroulement optimal de la méthanisation, on doit contrôler différents paramètres, et un suivi continu de ces paramètres est nécessaire pour maintenir la stabilité du processus et des qualités et quantités de biogaz et de digestat produits.

a) Température de digestion

La méthanisation peut être appliquée à plusieurs températures, notamment psychrophile, mésophile ou thermophile.

- **Psychrophile** : température comprise entre 5°C et 25°C : normalement utilisée dans les méthaniseur fonctionnant à la température ambiante. Cette technique a besoin des longs temps de rétention.
- **Mésophile** : température comprise entre 35 et 45°C. C'est le cas le plus stable et le plus facile à maîtriser. 20% de la chaleur générée par le biogaz est utilisée pour chauffer le digesteur. Cette température est la plus appliquée, utilisée pour la méthanisation à la ferme.
- **Thermophile** : température comprise entre 50 et 65°C. Les temps de séjour dans le digesteur sont plus courts que les deux autres températures. On peut par suite produire plus de biogaz pour un temps donné. Elle oblige à effectuer un suivi plus contraignant et à hygiéniser¹ certains intrants. 35% de la chaleur générée par le biogaz est utilisée pour chauffer le digesteur.

b) Potentiel hydrogène pH

La communauté bactérienne méthanogène est sensible aux variations de pH pour cela il est considéré comme un paramètre chimique important. Cette communauté a besoin d'un milieu neutre avec une valeur de pH comprise entre 6,5 et 8,5 pour obtenir un fonctionnement optimal. Une acidification dans le méthaniseur peut être causée par l'accumulation d'acides gras volatils ou d'hydrogène et inhiber ainsi la méthanisation. Par conséquent, il est très

¹ Traitement préalable par stérilisation ou pasteurisation des sous-produits animaux de catégorie 3.

important de suivre la valeur de pH et de l'ajuster si nécessaire en injectant de l'Hydroxyde de Sodium (normalement sous forme liquide) pour baisser l'acidité.

c) Homogénéité de substrat

Pour optimiser les conditions de la méthanisation il est important d'assurer un bon contact entre les micro-organismes et la biomasse traitée, en évitant les gradients de température dans le digesteur. Pour assurer cette homogénéité plusieurs voies sont disponibles : un brassage mécanique, une recirculation de substrat ou une recirculation sous pression du biogaz produit.

1.1.4. Choix de l'intrant

Les intrants : sont les déchets qui vont constituer la "matière première" pour effectuer la méthanisation. Ils ont un pouvoir méthanogène variable²(voir figure 5).

L'intrant doit être privés de déchets toxiques et antibiotiques (c.à.d. avoir un bon fonctionnement bactérien). En plus, le fonctionnement du méthaniseur ne doit pas être perturber lors de l'apport des intrants dans le digesteur, il doit être le plus constant possible. Les éléments ligneux et métalliques sont à éliminer, c'est pourquoi un tri sélectif des déchets est obligatoire sur les unités de méthanisation.

L'étude de la construction de structures de stockage est également nécessaire afin d'assurer un débit d'intrants constant sur l'année. Tous les intrants ne sont pas disponibles tout au long de l'année, prenons l'exemple des intrants agricoles, il est donc recommandé de dimensionner le méthaniseur en fonction de cette contrainte. Plusieurs intrants ne peuvent pas être stockés, pour ne pas risquer de perdre leur pouvoir méthanogène.

² Quantité en m3 de méthane produit par tonne de matière brute

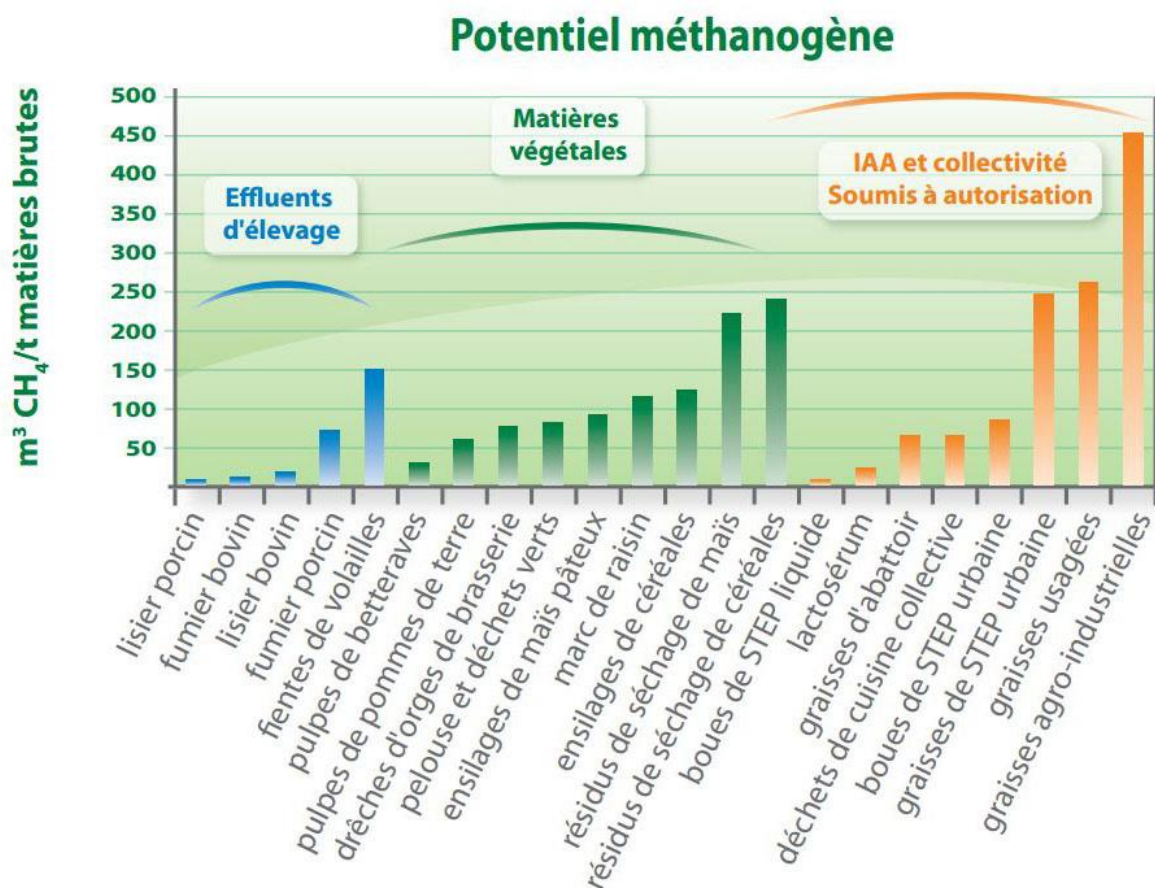


Figure 5 : Potentiel du méthanogène provenant des matières brutes [1].

1.1.5. Intérêt environnemental de la méthanisation

La digestion anaérobie présente de nombreux intérêts, de nature à la fois environnementale ou économique. Tout d'abord, la digestion anaérobie est un mode de traitement éprouvé des rejets organiques qui permet aussi de produire un gaz très énergétique. Cette production de biogaz renouvelable (semblable au gaz naturel) constitue une source d'énergie différenciée, qui peut se substituer (dans la limite des quantités produites) aux énergies fossiles (essence non renouvelables) à court et moyen terme. La méthanisation permet de créer un « puits de carbone » (Voir Figure 6), elle évite alors le déstockage de carbone fossile qui contribue à l'augmentation de gaz carbonique dans l'atmosphère (puisque le carbone fossile est « piégé » dans les sous-sols de la planète).

En effet, la méthanisation permet de stocker du carbone, soit dans le sol sous forme d'amendement organique, soit en centre de stockage si le retour au sol n'est pas

possible. Le carbone ainsi stocké n'est pas immédiatement généré dans l'atmosphère suivant le cycle du carbone (c'est le cas pour l'incinération). Le CO_2 , présent dans les déchets subissant la méthanisation (Voir figure 6 étape 4), sera soit évacué dans les sols (étapes 10) à travers le digestat (étape 6) soit vers l'air à partir de la production de l'énergie du biogaz produit par méthanisation (étapes 5 et 7).

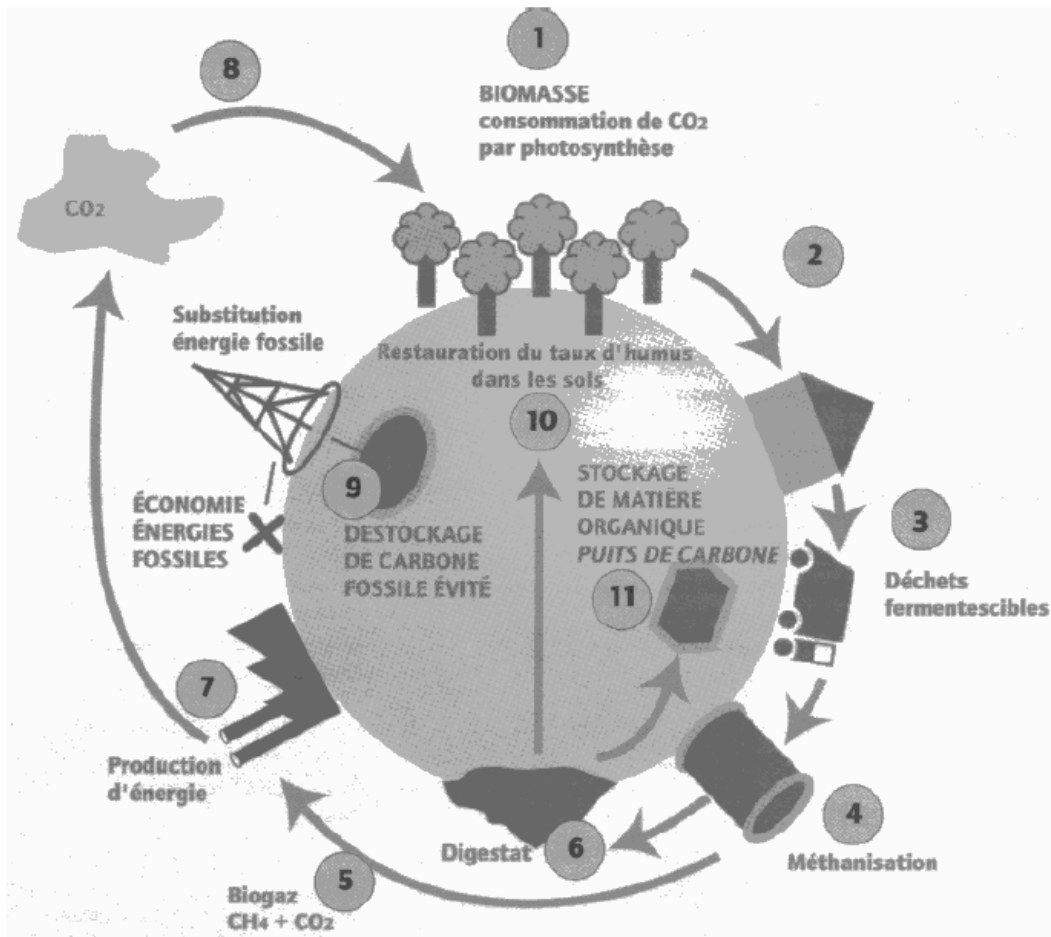


Figure 6 : La méthanisation dans le cycle du carbone [4].

1.2. Le Compostage :

1.2.1. Définition :

Un processus naturel de dégradation ou de décomposition des matières organiques par les microorganismes dans des conditions bien définies, telles que : les résidus de culture, les déchets animaux, les restes alimentaires, certains déchets urbains et déchets industriels appropriés. Une fois le processus de compostage terminé, il produit le compost, source importante de matière organique (MO) qui peut être appliqué aux sols. La matière organique du sol présente un rôle important dans la durabilité de la fertilité, et donc pour une production agricole durable³.

Depuis les lointaines civilisations égyptienne (Martin, 2000), romaine (Allain, 1902), et d'Extrême-Orient (Aubert C., 1993), le compostage s'applique. Le compost a un rôle nutritif pour les plantes et les sols agricoles. Anciennement, seuls les déchets végétaux et fumiers d'animaux sont compostés, il se pratiquait à petite échelle, chacun compostait chez soi. La modernisation des sociétés a conduit à d'importants changements des volumes des déchets à gérer. Plutôt au niveau planétaire que national, les impacts environnementaux liés à la gestion des déchets sont devenus une priorité. Ainsi le compostage prend une nouvelle dimension : Un service rendu à la société permettant de détourner une part des déchets organiques vers une valorisation biologique (initialement orientée vers du stockage ou vers l'incinération).

1.2.2. Le processus de compostage

Selon Mustin et al. (1987), la façon de déroulement du compostage aérobique est la suivante :

La phase oxydative (ou de décomposition) débute avec des températures inférieures à 45°C (voir figure 7). Grâce aux sucres et acides aminés disponibles présents dans la matière organique labile, les organismes présents se multiplient rapidement. La conséquence de cette forte activité est une élévation considérable de la température. Dans la plupart des cas, durant les deux premiers jours la température peut atteindre rapidement les 70 à 80°C. L'activité des populations microbiennes mésophiles est

³ Définition présentée par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO)

présente à des températures trop élevées, il leur succède alors d'autres populations microbiennes et fongiques dites thermophiles, qui effectuent à très haute température une importante minéralisation de la matière organique.

Au-delà de 70°C, seules les enzymes sécrétées dans les phases précédentes se présentent encore à la dégradation. La décomposition des fibres végétales par les champignons prédomine lors de cette phase. Des composés organiques complexes dégradés en plus petites molécules par certains microorganismes peuvent être utilisés par d'autre type de microorganismes, cet effet de synergie permet une croissance microbienne efficace [5] (Voir Figure 7).

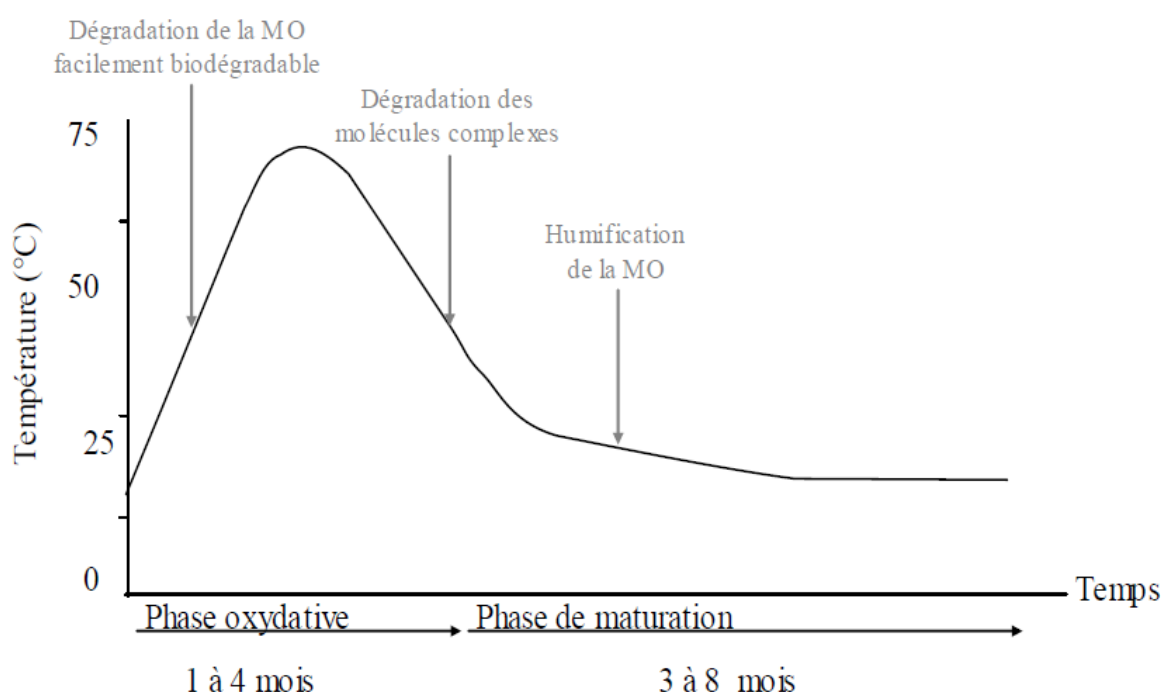


Figure 7 : Evolution théorique de la température durant le compostage en milieu tempéré [5].

La phase de maturation débute par un refroidissement (retour à la température ambiante) du compost qui sera marqué par le ralentissement de l'activité microbienne. Les processus d'humification⁴ dominent et aboutissent à la formation d'humus, dont les acides humiques, qui sont des composés très résistants à la dégradation. Le produit final du compostage est l'humus, il se compose de substances stables et peu biodégradables. Les particules qui

⁴ Réactions secondaires de condensation et polymérisation

composent le compost final sont de petites tailles et homogènes, sa texture est homogène, ayant une couleur brune foncé à noir. L'humification de la matière organique se déroule majoritairement en phase de maturation et se traduit par une réorganisation et une condensation des constituants organiques non minéralisés. L'humus est composé principalement à partir de lignine, de polysaccharides et de composés azotés. Cette humification est difficile à mettre en évidence avec le suivi des fractions biochimiques seules (Voir Figure 8).

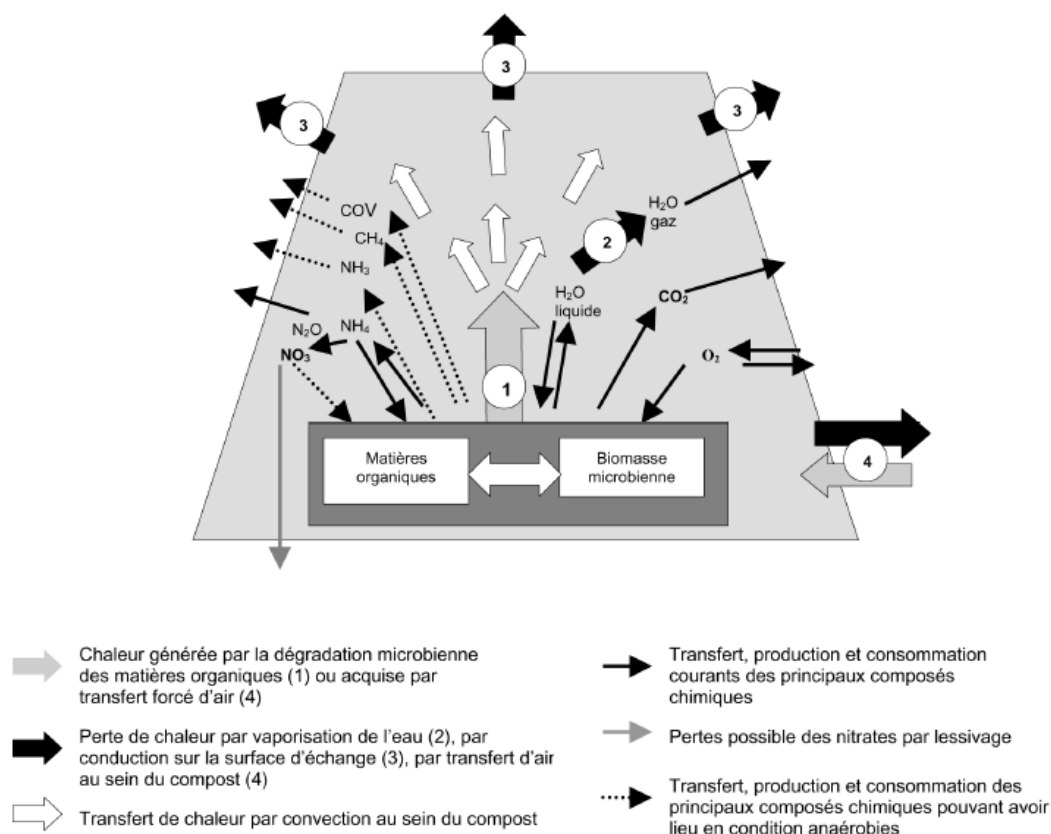


Figure 8 : Représentation schématique des principaux transferts de chaleur et de matière au sein du compost. [6]

1.2.3. Les différents composts

a. Les composts d'origine urbaine

On remarque ces dernières années que l'efficacité des traitements des déchets urbains par compostage est considérablement améliorée. Cette amélioration est atteinte grâce à la mise en place des collectes sélectives. Les composts urbains sont remportés à partir d'une gamme hétérogène de matériaux. On peut répartir les déchets urbains compostables en cinq catégories (voir figure 9).

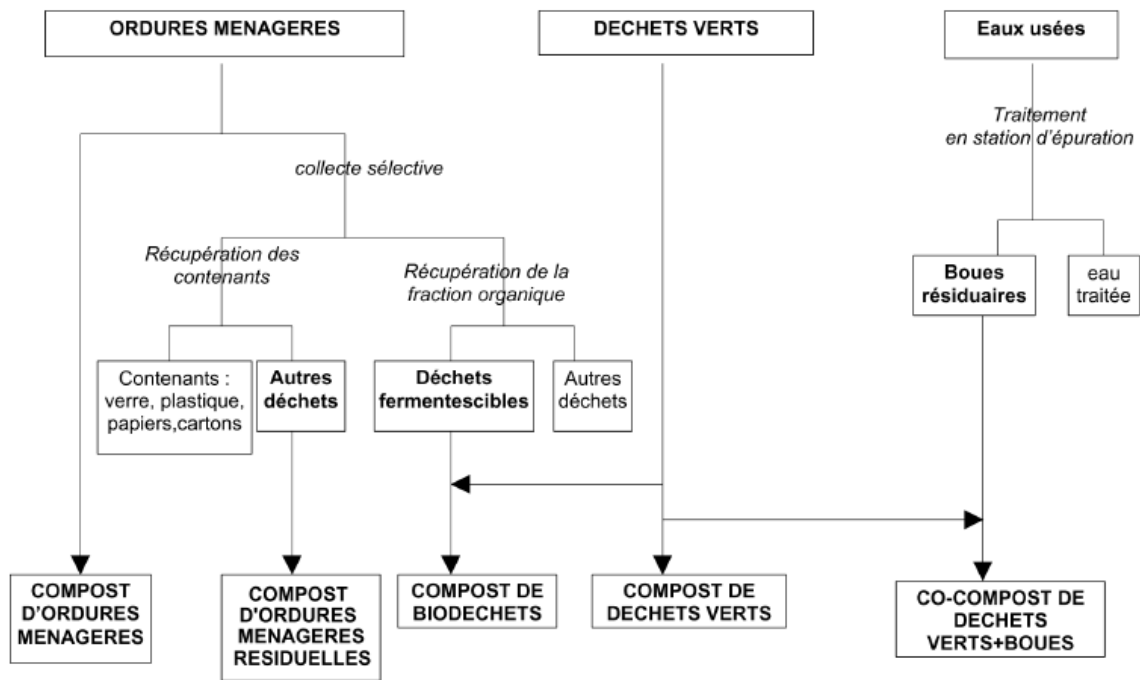


Figure 9 : Les différents types de composts urbains. [6]

b. Les composts d'effluents d'élevage

Composter les effluents d'élevage est une méthode courante et ancienne. Le compost obtenu à partir de fumier de bovins est le compost d'effluent d'élevage le plus courant, mais des composts à partir de fumier d'ovins, de porcs et de volailles, et à partir de lisier de porcs sont également réalisés.

c. Les composts de déchets industriels et agricoles

Pour les industries agro-alimentaires il s'agit principalement du compostage de déchets de sucreries de la filière betteravière, et pour l'industrie hors agro-alimentaire des déchets de papeteries.

1.3. Incinération

1.3.1. Définition

L'incinération est définie comme un processus de traitement thermique des déchets qui implique la combustion de substances organiques contenues dans les déchets. L'incinération et d'autres systèmes de traitement des déchets à haute température sont présentés comme « traitement thermique » des déchets. Les produits obtenus par incinération des déchets sont : cendres, gaz de la grille et chaleur.

Les constituants inorganiques des déchets forment la cendre et peut prendre la forme de grumeaux solides ou de particules transportées par les gaz de combustion. Un traitement des gaz de combustion est nécessaire pour les nettoyer des polluants gazeux et particulaires avant qu'ils ne soient dispersés dans l'atmosphère. La chaleur ainsi générée par l'incinération peut être utilisée pour générer de l'énergie électrique.

1.3.2. Fonctionnement d'un four d'incinération à grille

Une usine d'incinération d'ordures ménagères comprend les blocs suivants (Voir Figure 10) :

- Une fosse de réception et de stockage des déchets (numéro 1).
- Un ensemble trémie-goulotte de chargement et d'alimentation du four,
- Un dispositif de chargement des déchets dans le four (poussoir pneumatique où alimenteur à tiroirs). (Numéro 2)
- Une surface de chauffe (grille), le plus souvent inclinée et équipée de dispositifs de brassage de la charge et de décendrage. (Numéro 3)
- Un ensemble de ventilateurs, assurant l'injection d'air primaire (sous la grille), d'air secondaire (chambre de postcombustion) et éventuellement d'air de refroidissement latéral (chambre primaire de combustion).
- Un dispositif d'évacuation des mâchefers en extrémité de grille. (Numéro 8)
- Une chambre de postcombustion en parois réfractaires située au-dessus de la grille.
- Une chaudière permettant de récupérer une partie de la chaleur dégagée par la combustion. (Numéro 9)
- Un système d'épuration des fumées et de traitement des gaz de combustion (électrofiltres, tours de lavage...). (Numéro 7 et 5)
- Une cheminée.

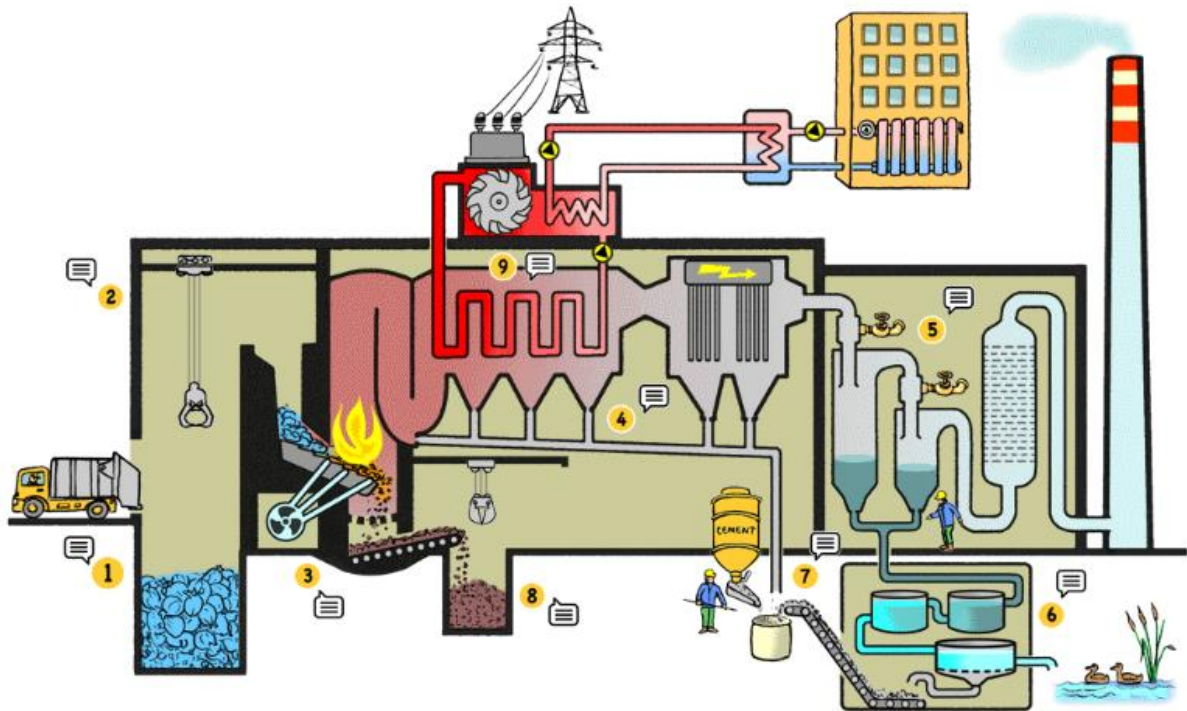


Figure 10 : Schéma d'ensemble de l'UIOM

La qualité de la répartition des déchets sur la grille, l'efficacité de retournement, ainsi qu'une température suffisante dans la chambre de postcombustion, permet l'obtention d'une bonne qualité de combustion afin d'assurer le meilleur contact combustible/comburant, sur une température suffisante en zone de séchage-pyrolyse (préchauffage de l'air primaire et rayonnement intense).

1.3.3. Paramètre de l'incinération

Les 3 paramètres fondamentaux devant être respectés sont résumées par La "règle des 3 T" :

- Température de combustion : Afin de détruire les polluants gazeux, la Température de combustion dans la chambre de postcombustion doit être régulée et adéquate (comprise entre 850 et 1200°C). La température de combustion doit être suffisante pour permettre le séchage puis l'inflammation des ordures à leur arrivée sur la grille. Pour des considérations de tenue mécanique de la grille, des matériaux réfractaires constituant la chambre de combustion ainsi que des différents éléments de la chaudière (vaporisateur,

surchauffeur, économiseur), la température ne doit pas dépasser 1200°C. Notons que la puissance thermique dissipée par ces échangeurs étant fixée.

- **Le Temps de séjour** : il doit être suffisant dans le four (de 45 minutes à 1 heure pour les déchets et de 2 à 4 secondes pour les gaz à partir de la zone de postcombustion). Après la dernière injection d'air de combustion les fumées ont besoin d'un temps de séjour minimal de 2 secondes à une température minimale de 850°C avec une concentration minimale de 6 % en oxygène, de façon contrôlée et homogène, dans les conditions les plus défavorables de fonctionnement, ces valeurs sont imposées par La réglementation.
- **Turbulence** : Un écoulement de gaz fortement turbulent est nécessaire dans la chambre de postcombustion. L'injection à grande vitesse d'air secondaire (50 à 80 m.s⁻¹) dans le foyer au moyen de buses de quelques centimètres de diamètre garantie cette turbulence. Cette injection est indispensable pour assurer le mélange intime des gaz de combustion et de l'air frais, ce qui théoriquement permettant l'oxydation des imbrûlés que des polluants gazeux.

1.3.4. Récupération de chaleur et dispositif de traitement des gaz

Le refroidissement des fumées de combustion sera par passage dans une chaudière. Cette chaudière est généralement composée de conduites d'eau (insérées dans les parois du four), d'un ou plusieurs vaporisateurs, d'une surchauffeur et d'un économiseur directement placés dans l'écoulement gazeux. La vapeur d'eau surchauffée est alors produite à travers ces échangeurs, qui sera ensuite détendue dans un turbo-alternateur pour produire de l'électricité. On peut aussi alimenter un réseau de chauffage urbain (cogénération) par l'eau chaude récupérée en sortie du turbo-alternateur.

Les fumées générées par l'incinérateur subissent un dépoussiérage soit par séparation électrique en phase sèche ou humide, soit par filtration mécanique (filtres à manches) ou par lavage. L'équipement le plus utilisé est l'électrofiltre, mode de dépoussiérage par séparation électrique. Il consiste à faire passer les gaz entre deux électrodes soumises à une différence de potentiel. Les fumées acides refroidies sont neutralisées en utilisant un base (CaOH, Na₂CO₃). Les procédés de neutralisation se différencient

les uns des autres essentiellement par la température des fumées et le taux d'humidité du milieu dans lequel a lieu la réaction de neutralisation des gaz.

Les nouvelles réglementations imposent la mise en place d'une épuration supplémentaire des gaz. Elle impose alors l'ajout d'ammoniaque ou d'urée pour réduire les NOx (dénox) et l'utilisation d'un charbon actif pour le piégeage des métaux lourds. La mise en place, en aval, d'un procédé de traitement par voie catalytique (SCR) permet de combiner la réduction des NOx avec celle des dioxines et furanes.

Les Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération d'Ordures Ménagères ou REFIOM sont constituées des cendres collectées sous la chaudière, des poussières récupérées sous les filtres et des résidus d'épuration des gaz.

1.3.5. Flux de matière générés par l'incinération

Les résidus solides de l'incinération d'une tonne d'ordures ménagères, selon le procédé d'épuration des gaz utilisé, sont constitués de 250 à 300 kg de mâchefers et de 25 à 50 kg de REFIOM.

Les mâchefers sont composés de SiO₂ majoritairement (25 à 50 %), d'Al₂O₃ (11 à 27 %) et de CaO (10 à 15 %) et dans une moindre mesure de Fe₂O₃ (2 à 10 %), MgO (2 à 5 %), Na₂O (2 à 4 %), K₂O (1 à 4 %) et P₂O₅ (1 à 6 %). Ils ont un caractère basique (LE GOUX et LE DOUCE, 1995). Les tests de lixiviation sous lesquelles sont soumis les mâchefers permettent de les classer en catégorie :

- V : mâchefers valorisables immédiatement essentiellement en technique routière.
- M : mâchefers valorisables après stockage temporaire en centre de maturation et après de nouveaux tests de lixiviation.
- S : stockage définitif en décharge de classe II.

Les REFIOM présentent un fort potentiel polluant. Notamment dû à la présence de métaux lourds (souvent sous la forme de sels solubles) fortement lixiviables et en concentration importante. Dans le but de les stabiliser, ils subissent des traitements physico-chimiques ou thermiques (enrobage dans du ciment, du bitume ou vitrification), puis ils sont généralement stockés dans des décharges de classe I.

70 % de la masse initiale du déchet se retrouve sous forme gazeuse, essentiellement CO₂ et H₂O, espèces qui représentent les produits finaux des réactions de

combustion. Le tableau 1 donne les compositions moyennes des fumées d'incinération et leurs teneurs en polluants en sortie de chaudière, avant tout système de dépollution.

Tableau 1 : Composition des fumées d'incinération d'ordures ménagères en sortie de chaudière. [12]

| <i>Composés</i> | <i>Concentration volumique %</i> |
|--------------------------|----------------------------------|
| <i>N₂</i> | 65 à 70 |
| <i>O₂</i> | 7 à 13 |
| <i>CO₂</i> | 6 à 12 |
| <i>H₂O</i> | 10 à 16 |
| <i>Polluants</i> | <i>mg Nm⁻³</i> |
| <i>CO</i> | 40 à 100 |
| <i>Poussières, suies</i> | 1500 à 7000 |
| <i>HCl</i> | 800 à 2000 |
| <i>HF</i> | 0,5 à 2 |
| <i>SO_x</i> | 20 à 200 |
| <i>NO_x</i> | 150 à 500 |
| <i>Organochlorés</i> | 0,0001 |
| <i>Métaux lourds</i> | 5 à 10 |

Le fonctionnement du four de combustion en défaut d'air affecte la formation de CO c'est-à-dire à de mauvaises conditions opératoires ou à un régime de fonctionnement transitoire (mise en marche, arrêt d'un four). Pour réduire la concentration en CO, il faut augmenter les débits en air primaire ou secondaire. Cependant, cet ajout d'air ne doit pas provoquer une chute importante de la température. Il est nécessaire d'asservir l'excès d'air et la température de combustion, et d'assurer un bon mélange des ordures ménagères sur la grille afin d'éviter les hétérogénéités de combustion et minimiser au mieux la formation de CO.

L'origine des métaux lourds dans les déchets ménagers est très variée. PRUDENT, 1992, a réalisé un bilan des espèces métalliques possibles d'être apportées par les diverses catégories d'ordures ménagères :

- fongicides et additifs de peintures pour bois : CuSO₄, ZnCl₂, ZnCrO₄, CdS et ZnO
- encres d'imprimeries : PbCrO₄, PbMoO₄, CrSO₄
- agents de blanchiment pour papier : ZnS₂O₄
- textiles : Na₂Cr₂O₇, MnCrO₄
- plastiques : pigments à base de Zn, Cr, Pb, Cd, catalyseurs de polymérisation (composés organométalliques)
- métaux ferreux : éléments d'alliage (Cr, Ni), de traitement de surface (Zn, Cr)

- verres : PbO, Cr₂O₃, CrO₃

- batteries : PbO₂, Cd-Ni

1.4. Plasma

1.4.1. Définition

Le plasma est un quatrième état de matière similaire au gaz dans lequel une certaine partie des particules est ionisée. Sous l'effet de chauffage, le gaz dissocie ses liaisons moléculaires, en le transformant en atomes constitutifs.

Cependant, le chauffage supplémentaire du gaz peut également conduire à une ionisation (une perte ou un gain d'électrons) des molécules ou des atomes du gaz, ce qui le transforme en plasma, contenant des particules chargées : des ions positifs et des électrons négatifs.

Le plasma se rend électriquement conducteur, il répond fortement aux champs électromagnétiques grâce à la présence d'un nombre non négligeable de porteurs de charge. Le plasma est considéré comme un état distinct de la matière, il a donc des propriétés bien différentes de celles des solides, des liquides ou des gaz et.

Comme le gaz, le plasma n'a pas une forme définie ou un volume défini, à moins d'être enfermé dans un récipient ; Il peut former des structures telles que des filaments, des faisceaux et des couches doubles sous l'influence d'un champ magnétique, contrairement au gaz. Bien qu'il soit étroitement lié à la phase gazeuse dans la mesure où il n'a pas de forme ni de volume définis, il diffère de plusieurs façons, représenté dans le tableau suivant (Tableau 2).

La technologie de la torche à plasma :

La torche à plasma consiste à provoquer un arc électrique (une sorte d' « étincelle ») entre une cathode et une anode et à y injecter un gaz de manière à créer un plasma (état particulier de la matière) aux alentours de 1500 degré . Elle peut servir à vitrifier des déchets dangereux. Une torche à plasma est un dispositif permettant d'ioniser le gaz en présence qui devient hautement réactif et destructif

La torche à plasma constitue un outil avec une efficacité allant jusqu'à 85%. Appliquée au traitement des déchets, une torche à plasma permet une destruction totale du déchet : les composés organiques sont totalement transformés en gaz de synthèse

(syngas) et les composés inorganiques sont transformés en un verre inerte qui peut être valorisé et revendu.

Tableau 2 : Différence entre Gaz et Plasma

| Propriété | Gaz | Plasma |
|----------------------------|---|--|
| Conductivité électrique | Très lent L'air est un excellent isolant jusqu'à ce qu'il se décompose en plasma au champ électrique Points forts supérieurs à 30 kilovolts Par centimètre. | Habituellement très élevé à plusieurs égards, La conductivité du plasma peut être traité comme infini. |
| Espèces indépendantes | Un Toutes les particules de gaz se comportent d'une manière similaire, influencé par gravité et par collisions avec un autre. | Deux ou trois Les électrons, les ions, les protons et les neutrons peuvent être distingués par le signe et la valeur de leur charge ainsi qu'ils se comportent indépendamment dans plusieurs circonstances, avec différentes vitesses en vrac et les températures, permettant phénomènes tels que nouveaux types de vagues et instabilités. |
| Distribution de la vitesse | Maxwellien Les collisions conduisent généralement à une vitesse maxwellien distribution de tous les gaz particules, avec très peu particules relativement rapides. | Souvent non-Maxwellien Les interactions collisionnelles sont souvent faible dans les plasmas chauds et le forçage externe peut conduire le plasma loin de l'équilibre local et plomb a une population importante de particules exceptionnellement rapides. |
| Interactions | Binaire Les collisions à deux particules sont la règle, trois corps les collisions sont extrêmement rares. | Collectif ones, ou mouvement organisé de plasma, sont très important parce que les particules peuvent interagir longuement s'étend à travers l'électricité et des forces magnétiques. |

1.4.2. Principe de fonctionnement

Le plasma est formé en chauffant un gaz à des températures très élevées où les molécules et l'atomisation sont souvent considérées comme un état de matière. Le

degré d'ionisation, décrit comme la proportion d'atomes ayant des électrons perdus ou gagnés, est principalement contrôlé par la température. Le plasma est généralement neutre, mais à mesure que les particules chargées se déplacent, elles génèrent des courants électriques avec des champs magnétiques. En résumé, le plasma est un gaz ionisé à haute température qui est à la fois thermiquement et électriquement conducteur.

La gazéification au plasma, alimentée par une source d'énergie externe, fonctionne à des températures très élevées dans un environnement anarchique d'oxygène pour décomposer les déchets d'entrée en molécules élémentaires.

Les produits du procédé sont un gaz de synthèse et un matériau vitreux (type verre) inerte, appelé scories. La technologie du plasma décompose presque tous les matériaux, à l'exclusion des éléments radioactifs, sur leur forme élémentaire. C'est ici que la gazéification au plasma offre des avantages environnementaux significatifs par rapport à la gazéification conventionnelle. La gazéification est un procédé agissant à haute température (500–2 000 °C selon la technologie) par lequel la matière solide à base de carbone est convertie en hydrogène (H₂), monoxyde de carbone (CO) et dioxyde de carbone (CO₂) par une série de réactions.

En raison des températures très élevées, les composés toxiques tels que les dioxines sont complètement décomposés en éléments chimiques inoffensifs. Étant donné que la gazéification conventionnelle ne fonctionne pas à des températures très élevées, les cendres et les charbons restants (matière de biomasse restante ne se décomposent pas complètement) peuvent encore être manipulés comme déchets dangereux lors de l'élimination définitive. La gazéification par plasma est un bon processus pour éliminer les déchets dangereux, avec une application utile qui permet d'éliminer les déchets médicaux. Il présente également des impacts environnementaux plus faibles en termes d'émissions atmosphériques et de toxicité des lixiviats de scories par rapport à d'autres processus, comme l'incinération. On a montré que les scories vitrifiées produites à partir d'une variété de déchets ont des lixiviats faibles, peuvent donc être classées comme des déchets inertes, ce qui signifie qu'ils peuvent être disposés en toute sécurité dans une décharge ou utilisés comme matériaux de construction, tels que les sols à utiliser dans la route Lits comme remplisseur [8].

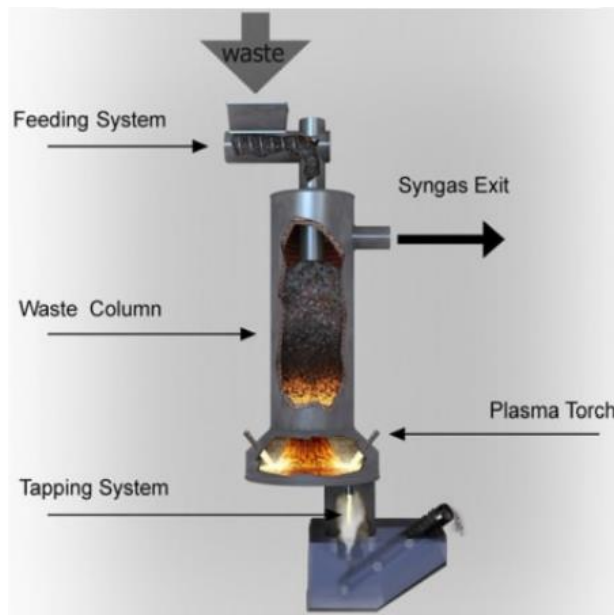


Figure 12 : Réacteur de gazéification Plasma [9]

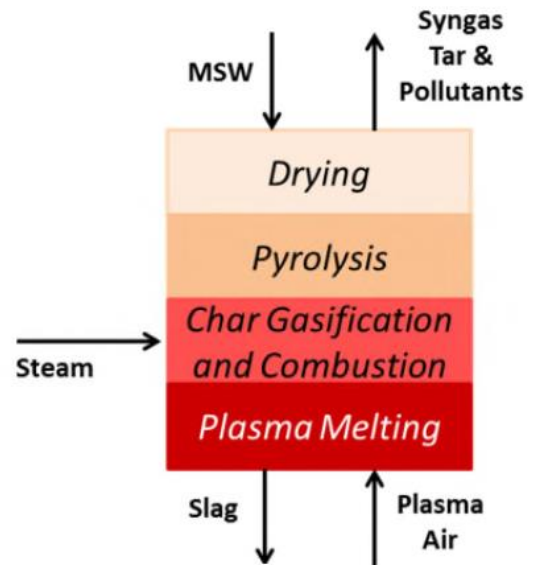


Figure 11 : Diagramme présentant le principe de fonctionnement d'un réacteur plasma [9]

La caractéristique architecturale distinctive pour un système de gazéification au plasma est le four à gaz de plasma qui comporte deux torches à plasma au fond de la chambre du four. Les torches à plasma sont alimentées par un approvisionnement en énergie externe.

Comme pour d'autres systèmes de gazéification, le système de gazéification au plasma aura un système d'alimentation, très probablement avec un broyeur pour prétraiter les déchets, l'équipement pour manipuler le laitier (pour le four à plasma) ou le cendres et le charbon (pour un four de gazéification), le système de traitement du gaz de synthèse et un système de surveillance et de contrôle. La figure 12 montre un réacteur typique de gazéification à plasma. La figure 11 montre une séquence d'étapes de processus de traitement thermique que le MSW traverse à partir du haut vers le bas du four de gazéification au plasma. Le gaz de synthèse résultant s'écoule vers le haut et est recueilli à travers le gaz de synthèse Figure 12 - Réacteur de gazéification des plasmas. Le laitier est collecté en bas. En complément du contrôle de la température et de l'air plasma, la vapeur est souvent introduite dans la gazéification pour améliorer la production d'hydrogène gazeux.

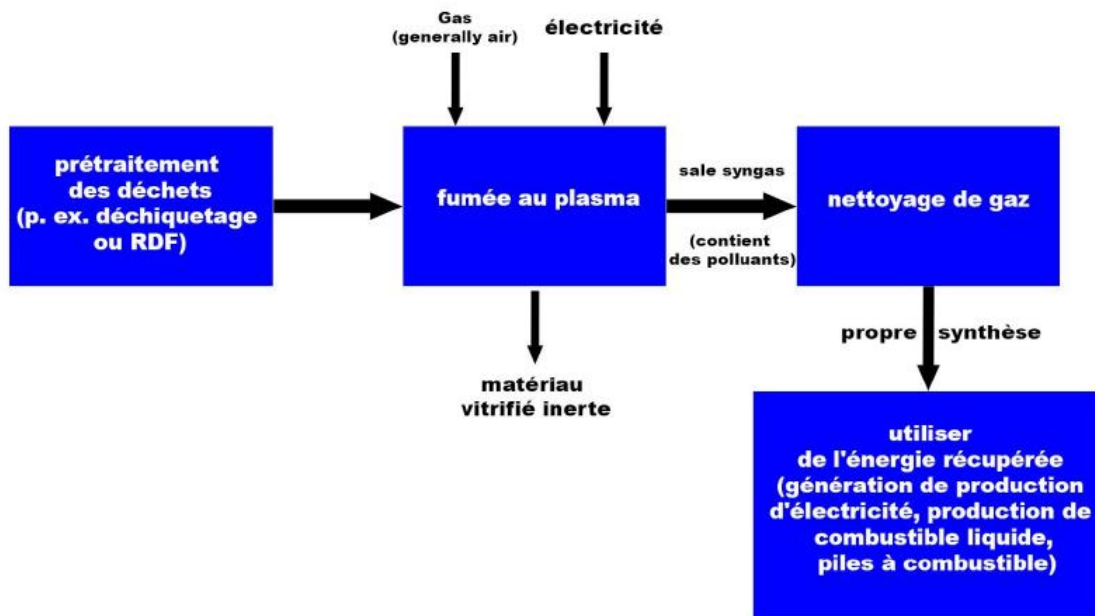


Figure 13 : Flux de processus typique pour la gazéification à plasma [9]

La figure 13 fournit une vue légèrement plus large du processus de gazéification au plasma en montrant l'étape de prétraitement, la (des) étape(s) du processus de nettoyage du gaz de synthèse, en utilisant les technologies de contrôle de la pollution de l'air et la dernière étape de l'utilisation de l'énergie récupérée, que ce soit pour l'électricité production ou production de carburant liquide. Un inconvénient de la gazéification au plasma est qu'une grande quantité d'électricité est nécessaire pour faire fonctionner les torches à plasma. U. Aréna a constaté que la consommation électrique par rapport à l'énergie de sortie brute produite à partir de la conversion des déchets (c.-à-d., La valeur de chauffage plus la chaleur sensible du gaz de synthèse) était de l'ordre de 15 à 20% [10]. Les résultats de certaines analyses effectuées avec diverses matières premières de déchets à l'aide du modèle GasifEq (décrit plus en détail dans la section suivante) suggèrent que la consommation d'électricité pourrait être de l'ordre de 15 à 40% de l'énergie de sortie brute produite. Les résultats excluent les résultats de l'analyse des déchets alimentaires dont on constate une consommation d'électricité beaucoup plus élevée.

1.5. Pyrolyse

1.5.1. Définition

La pyrolyse est une transformation en l'absence de produits oxydants. Sous l'action de la chaleur, elle décompose les déchets en trois phases principales dont l'importance varie suivant les conditions opératoires :

- Un produit gazeux non condensable ;
- Un produit gazeuse condensable, elle-même séparée en 2 phases : une phase aqueuse et une phase organique, les goudrons ;
- Un produit solide : le char, composé majoritairement de carbone.

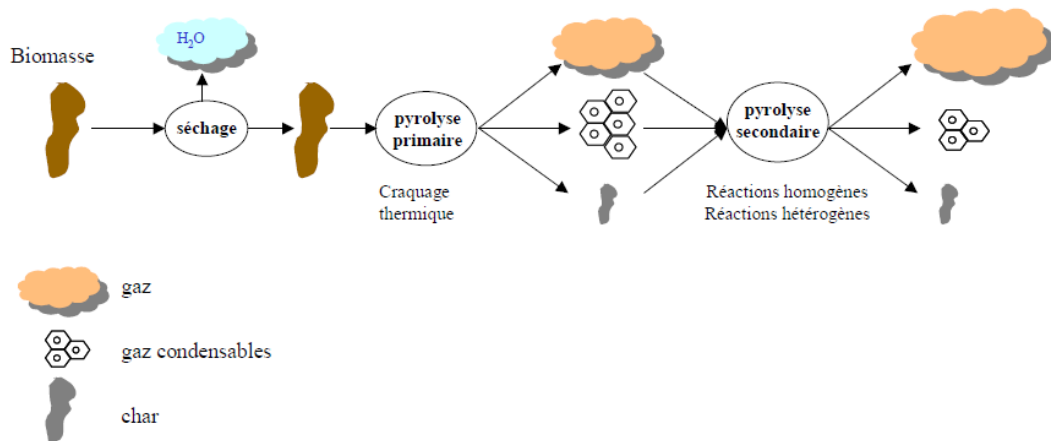


Figure 14 : Schéma simplifié de la pyrolyse [11]

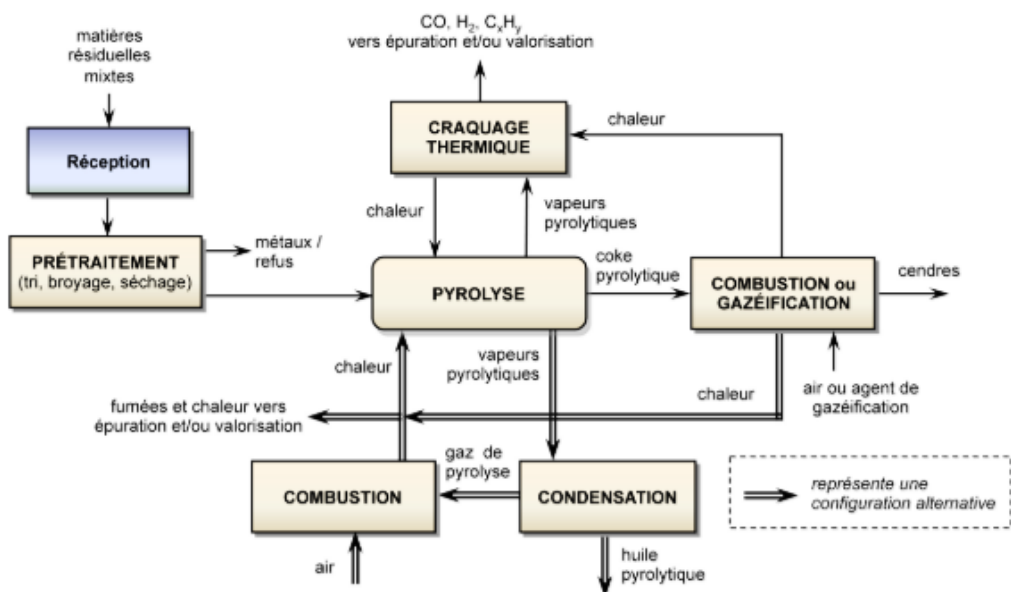


Figure 15 : Schéma d'écoulement représentatif de la pyrolyse des déchets

1.5.2. Types de pyrolyse

On distingue généralement trois grands types de pyrolyse [11]:

- La pyrolyse lente est généralement réalisée à des températures comprises entre 550 et 950 K, avec des vitesses de chauffage comprises entre 0,1 et 1 K/s.
- La pyrolyse rapide est généralement réalisée à des températures comprises entre 850 et 1250 K, avec des vitesses de chauffage comprises entre 10 et 200 K/s.
- La pyrolyse flash est généralement réalisée à des températures comprises entre 1050 et 1300 K, avec des vitesses de chauffage supérieures à 1000 K/s.

La Figure 16 représente l'influence de la vitesse de chauffage sur la teneur en gaz, vapeurs condensables et char, et ce pour les deux températures de 500 °C et 1000 °C.

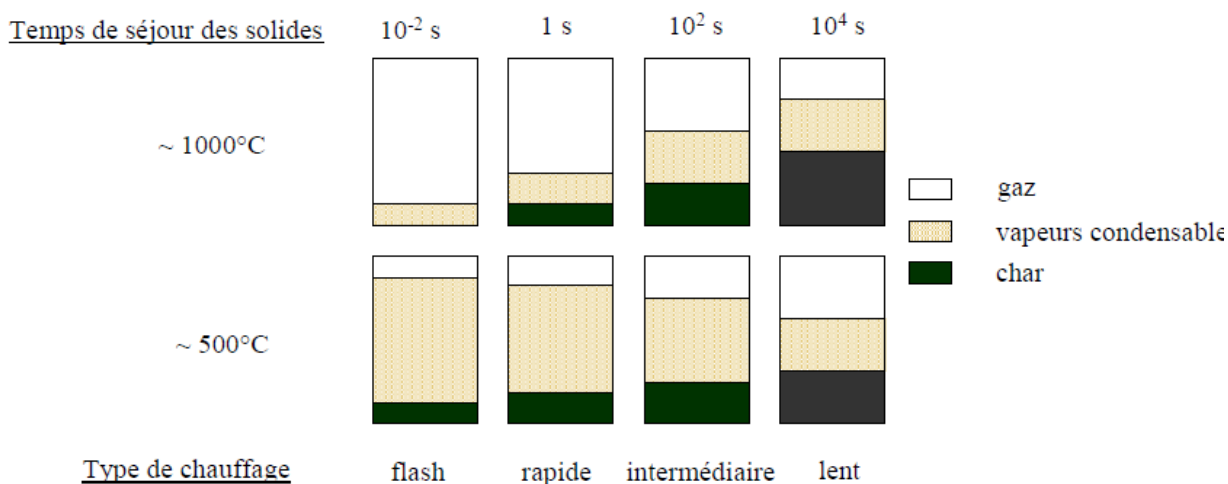


Figure 16 : Influence de la vitesse de chauffage sur la teneur en gaz, vapeurs condensables et char [16]

1.5.3. Procédés de pyrolyse rapide

La pyrolyse rapide nécessite un transfert rapide d'énergie entre les déchets et le milieu environnant dans un temps caractéristique de l'ordre de la seconde. Plusieurs types de réacteurs et de procédés ont été développés pour satisfaire cette contrainte. Il existe trois types de moyens de transfert :

- Chauffage par gaz ou matériau caloporteur : gaz inerte ou vapeur d'eau, billes métalliques, sable, métaux fondus, sels fondus ;
- Chauffage direct par contact à la paroi : le transfert de chaleur se fait à travers les parois du réacteur ;

- Oxydation partielle : un débit d'oxygène assure une combustion partielle des déchets.

Certains procédés utilisent une combinaison de deux systèmes. Très souvent, on distingue donc :

- Les procédés avec caloporteurs : prenons l'exemple le lit fluidisé dense, le lit fluidisé circulant et le cône rotatif.
- Les procédés sans caloporteurs : prenons l'exemple du réacteur à flux entraîné (oxydation partielle) et le réacteur cyclone (chauffage paroi).

Le procédé BioTherm est un procédé de pyrolyse rapide en réacteur à lit fluidisé appartenant à la société Dynamotive. La Figure 17 représente le schéma de principe du procédé. La biomasse est la matière première utilisée essentiellement telle que de la sciure de bois ou de l'écorce et des sous-produits agricoles comme la canne à sucre ou la paille de blé. La matière première est rapidement chauffée dans le réacteur entre 450°C et 500°C en absence d'oxygène [11].

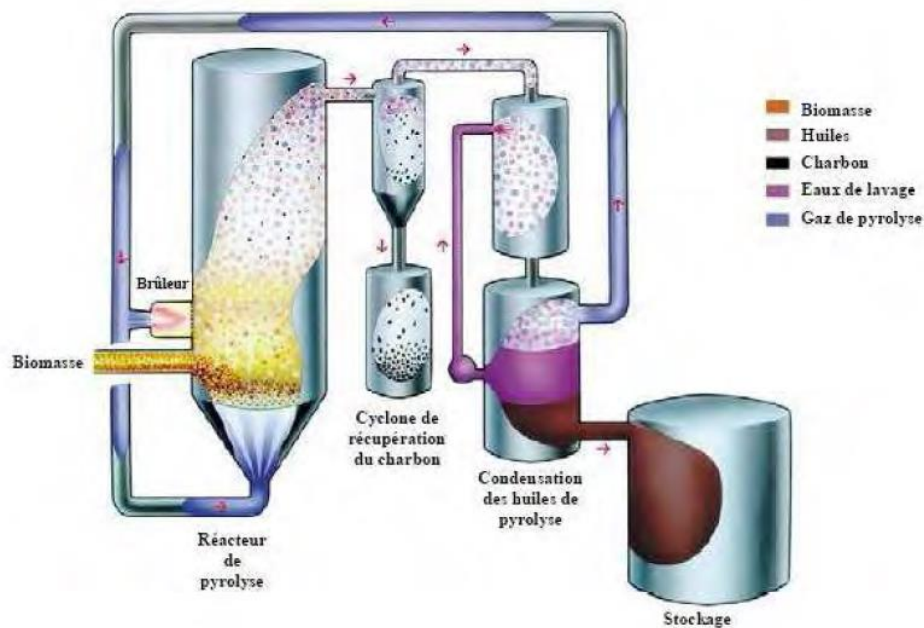


Figure 17 : Schéma du procédé pilote utilisé par Dynamotive [16]

Les produits de la pyrolyse sont l'huiles de pyrolyse (qui sortent du réacteur sous forme de vapeurs), un gaz non condensable et du char. Un cyclone est utilisé pour séparer la phase solide de la phase gazeuse. Le char est récupéré et les gaz sont rapidement refroidis dans une tour par l'intermédiaire d'un liquide de refroidissement. Les huiles de pyrolyse sont collectées dans un réservoir. Les gaz non

condensables sont employés dans le réacteur de pyrolyse comme gaz vecteur et comme combustible pour fluidiser et chauffer le lit.

CHAPITRE 2

Application des méthodes de valorisation sur la déchetterie de Tripoli

2.1. Introduction

Le Liban a une population de 5,6 millions d'habitants en 2013 produisant 2 040 000 tonnes de déchets solides municipaux (MSW) par an. La composition des déchets est majoritairement organique (plus de 50%), ce pourcentage varie entre zones urbaines et rurales, ainsi qu'entre l'été et l'hiver, les papiers/cartons et plastiques constituent une part importante ainsi que le verre et le métal (Voir figure 18).

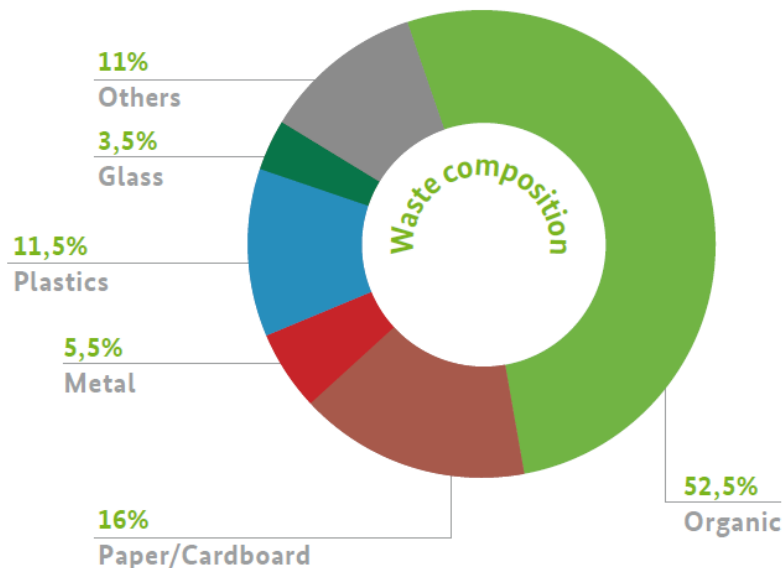


Figure 18 : Composition des déchets au Liban [14]

La production de déchets solide par habitant varie entre environ 0,7 kg / p / j dans les zones rurales et entre environ 0,85 et 1,1 kg / p / j dans les zones urbaines, avec des taux d'humidité supérieurs à 60%. La moyenne nationale pondérée est estimée à environ 0,95 kg / p / j. La production de déchets augmente de 1,65% en moyenne dans l'ensemble du pays, mais cette croissance est très inégalement répartie [14].

Nous présentons dans ce chapitre la participation de Tripoli dans la production des déchets ainsi que les méthodes utiliser actuellement pour le traitement des différents types de déchets et nous présentons finalement une application détaillée des méthodes de valorisation énergétique déjà présenté dans le chapitre précédent.

2.2. Production et gestion des déchets au Liban

La quasi-totalité des déchets solide ménagers générés au Liban est collectée par des transporteurs publics ou privés (99% dans les zones rurales, 100% dans les zones urbaines) ; Cependant, la méthode de gestion des déchets varie d'une zone à l'autre : 8% sont recyclés, 15% sont compostés (pourcentage croissant puisque plusieurs stations déjà construites seront bientôt mises en service), 51% sont mises en décharge et 26% sont mises en décharge à ciel ouvert [14].

En l'absence d'une stratégie de gestion des déchets solide (GDS) pour le pays, le secteur de la GDS est marqué par des extrêmes : un système de GDS a été développé (Plan d'urgence investissements) relativement avancé dans le Grand Beyrouth et le Mont Liban (à l'exclusion de Jbeil). Les systèmes de gestion des déchets se caractérisent généralement par des approches primitives de collecte et de vidange en dehors du Grand Beyrouth et du Mont Liban (hors Jbeil) à l'exception de quelques villes principales et villages sélectionnés : une usine de tri et une décharge sanitaire à Zahlé, réhabilitée à Tripoli, ainsi que de petites usines de compostage qui ont été exécutées dans des villages sélectionnés grâce au financement de l'USAID. En outre, un certain nombre d'usines de tri et de compostage de petite et moyenne taille ont été mis en place par l'OMSAR grâce à un financement de l'UE. A Saïda, un digesteur anaérobie a été mis en place pour traiter les déchets municipaux de la ville, qui a démarré en 2013. Divers projets ont également été entrepris pour réhabiliter les sites d'élimination des déchets.

Au cours des 20 dernières années, une augmentation significative de la quantité de déchets est détectée puisque les gens quittaient les zones rurales pour vivre dans les grandes villes comme Beyrouth, Saïda, Tripoli.

La production estimée de déchets journalier au Liban (surtout à Tripoli), les opérateurs de collection et de disposition ainsi que le type de traitement sont résumés dans le tableau suivant (selon les estimations du ministère de l'Environnement) :

Tableau 3 : Vue d'ensemble de DSM dans les principales villes [14]

| Région | Tonnage journalier de DSM | Operateur de collection | Operateur de disposition des DSM | Type de traitement |
|---|---------------------------|--|---|--|
| Grand Beyrouth & Mont Liban (sauf Jbeil) | 2850 | Secteur privée (Sukleen – operateur local) | Secteur privée (Sukomi – operateur local) | Tri (1700 t / j à Qarantina et 1150 t / j à Amroussieh) Enlèvement et emballage (Qarantina et Amroussieh) Compostage (300 t / j en corail) Élimination dans une décharge sanitaire (2500 t / j à Naameh (2) et 120 t / j de matière inerte et des articles volumineux dans des sanitaires Bsalim) |
| district de Zahleh (en partie - ville de Zahleh et 18 municipalités environnantes) | 180 | Secteur privée – (Operateur local) | Secteur privée – (Operateur local) | Tri et élimination dans un site d'enfouissement sanitaire |
| Tripoli | 350 | Secteur privée (Lavajet) | Secteur privée (Batco – operateur local) | Mise au rebut dans un dépotoir contrôlé (mais sans doublure) |
| districts de Saida et Jezzine (en partie) | 300 | Secteur privée (NTCC – operateur local) | Secteur privée (NTCC – operateur local) | Élimination dans un établissement nouvellement géré |

2.3. Production et composition des déchets solides à Tripoli

Composition des déchets solides à Tripoli

À Tripoli, la plupart des déchets sont constitués de matière organique.

52,5% : matières organiques

16% : papier et carton

11,5% : plastique

3,5% : verre

5,5% : métal

9% : textile

3% : matériaux inertes

La quantité de déchets placée dans le décharge à Tripoli augmente de plus en plus à travers les années. Les valeurs sont placées dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Quantité de déchets placée dans le décharge à Tripoli en kg

| année | déchets (Kg) |
|-------|--------------|
| 2001 | 93749740 |
| 2002 | 101082160 |
| 2003 | 103886900 |
| 2004 | 97893100 |
| 2005 | 107101960 |
| 2006 | 108221180 |
| 2007 | 104631480 |
| 2008 | 107820720 |
| 2009 | 102866540 |
| 2010 | 114419280 |
| 2011 | 119371020 |
| 2012 | 123342020 |
| 2013 | 129818088 |
| 2014 | 139496320 |
| 2015 | 149456320 |
| 2016 | 159000000 |
| 2017 | 164250000 |

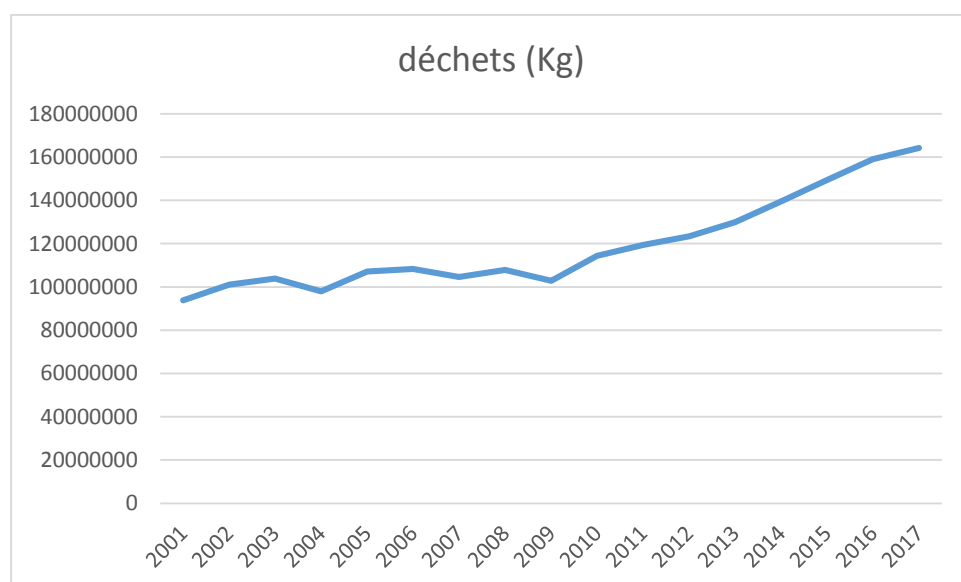


Figure 19 : Variation de la quantité de déchets placée dans le décharge de Tripoli entre 2001 et 2017

2.4. Valorisation des déchets à tripoli

2.4.1. Méthanisation

La production d'énergie par méthanisation pour l'année 2017

La méthanisation d'une tonne de déchets fermentescibles à 40 % de matière sèche donne 100 m³ de biocarburant contenant 2/3 de méthane et 1/3 de gaz carbonique ;

Les déchets dans la déchetterie de tripoli sont formés de 52.5% de matières organique, et par suite si la production de déchets était de 450 T/j (en 2017) alors la quantité de matières organiques est égale à :

$$450 \text{ T/j} \times 0.525 = 237 \text{ T/j}$$

Puisque chaque tonne de déchets fermentescibles produit 100 m³ de biogaz alors on aura :

$$237 \text{ T/j} \times 100 \text{ m}^3/\text{T} = 23700 \text{ m}^3/\text{j de biogaz}$$

Ce qui est équivalent à 15800 m³/j de méthane (les 2/3 du biogaz produit).

D'où la production de méthane par an sera égale à :

$$5800 \text{ m}^3/\text{j} \times 365 \text{ j} = 5767000 \text{ m}^3/\text{an.}$$

Sachant que chaque m³ de méthane est capable de produire 9.7 kwh d'électricité, on peut calculer la valeur de puissance estimée qui sera égale à :

$$5767000 \text{ (m}^3/\text{an)} \times 9.7 \text{ (Kwh/m}^3) = 55\,940 \text{ (Mwh/an)}$$

$$55\,940 \text{ (Mwh/an)} / (365 \times 24 \text{ h}) = 6 \text{ MW}$$

D'où la puissance réelle est :

$$P_{\text{réel}} = 6\text{Mw} \times 0.8 = 4.8 \text{ Mw}$$

Le courant électrique est égal à : $I = P/U = 4.8 \times 10^6 \text{ (w)} / 220 \text{ (V)} = 21 \times 10^3 \text{ A.}$

Production de l'énergie par méthanisation pour les années entre 2001-2017

Le tableau ci-dessous montre les valeurs obtenus pour le même calcul sur les années entre 2001 et 2017 :

Tableau 5 : Valeur de puissance électrique produit par méthanisation en (kw).

| année | T/jour | matière organique T | m3 de biogaz/j | m3 de méthane/j | m3 méthane /an | kWh/an | kW | P _{elect} réel (kw) |
|-------|----------|---------------------|----------------|-----------------|----------------|----------|----------|------------------------------|
| 2001 | 256.8493 | 134.8458904 | 13484.58904 | 8989.726027 | 3281250 | 31828125 | 3633.348 | 2906.678 |
| 2002 | 276.937 | 145.3919178 | 14539.19178 | 9692.794521 | 3537870 | 34317339 | 3917.504 | 3134.004 |
| 2003 | 284.6219 | 149.4265068 | 14942.65068 | 9961.767123 | 3636045 | 35269637 | 4026.214 | 3220.971 |
| 2004 | 268.2 | 140.805 | 14080.5 | 9387 | 3426255 | 33234674 | 3793.913 | 3035.13 |
| 2005 | 293.4301 | 154.0508219 | 15405.08219 | 10270.05479 | 3748570 | 36361129 | 4150.814 | 3320.651 |
| 2006 | 296.4959 | 155.6603425 | 15566.03425 | 10377.35616 | 3787735 | 36741030 | 4194.181 | 3355.345 |
| 2007 | 286.6603 | 150.4966438 | 15049.66438 | 10033.10959 | 3662085 | 35522225 | 4055.048 | 3244.039 |
| 2008 | 295.3973 | 155.0835616 | 15508.35616 | 10338.90411 | 3773700 | 36604890 | 4178.64 | 3342.912 |
| 2009 | 281.8247 | 147.9579452 | 14795.79452 | 9863.863014 | 3600310 | 34923007 | 3986.645 | 3189.316 |
| 2010 | 313.4767 | 164.575274 | 16457.5274 | 10971.68493 | 4004665 | 38845251 | 4434.389 | 3547.511 |
| 2011 | 327.0438 | 171.6980137 | 17169.80137 | 11446.53425 | 4177985 | 40526455 | 4626.308 | 3701.046 |
| 2012 | 337.9233 | 177.409726 | 17740.9726 | 11827.31507 | 4316970 | 41874609 | 4780.207 | 3824.165 |
| 2013 | 355.6658 | 186.7245205 | 18672.45205 | 12448.30137 | 4543630 | 44073211 | 5031.188 | 4024.951 |
| 2014 | 382.1808 | 200.6449315 | 20064.49315 | 13376.32877 | 4882360 | 47358892 | 5406.266 | 4325.013 |
| 2015 | 409.4685 | 214.9709589 | 21497.09589 | 14331.39726 | 5230960 | 50740312 | 5792.273 | 4633.818 |
| 2016 | 435.6164 | 228.6986301 | 22869.86301 | 15246.57534 | 5565000 | 53980500 | 6162.158 | 4929.726 |
| 2017 | 450 | 236.25 | 23625 | 15750 | 5748750 | 55762875 | 6365.625 | 5092.5 |

On peut alors présenter les résultats obtenus sur les graphes suivants :

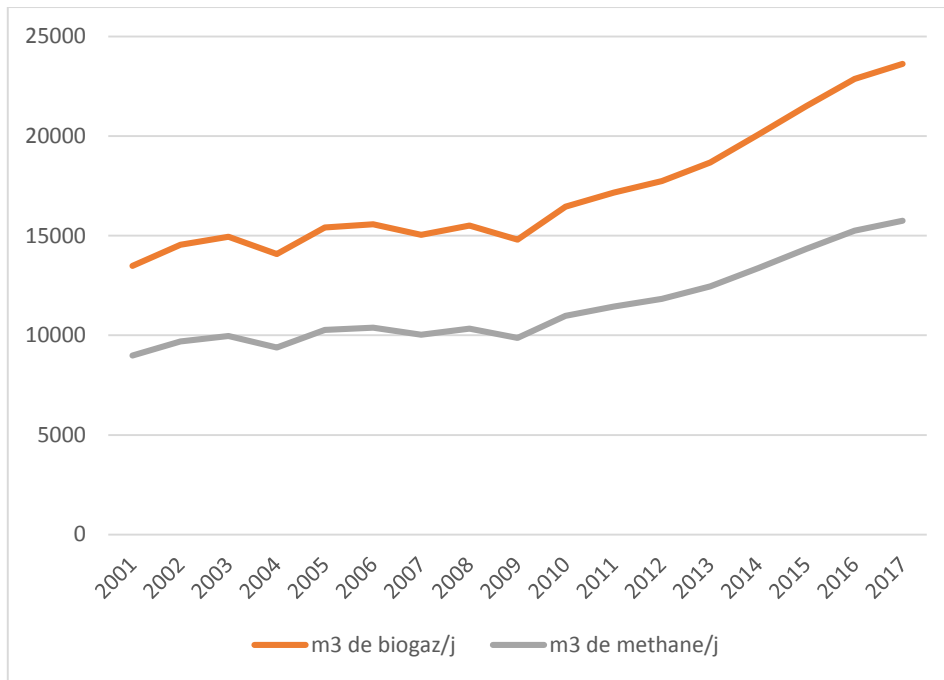


Figure 20: Graphe montrant la quantité produite de biogaz et de méthane en m3/j pour les années de 2001 jusqu'a 2017

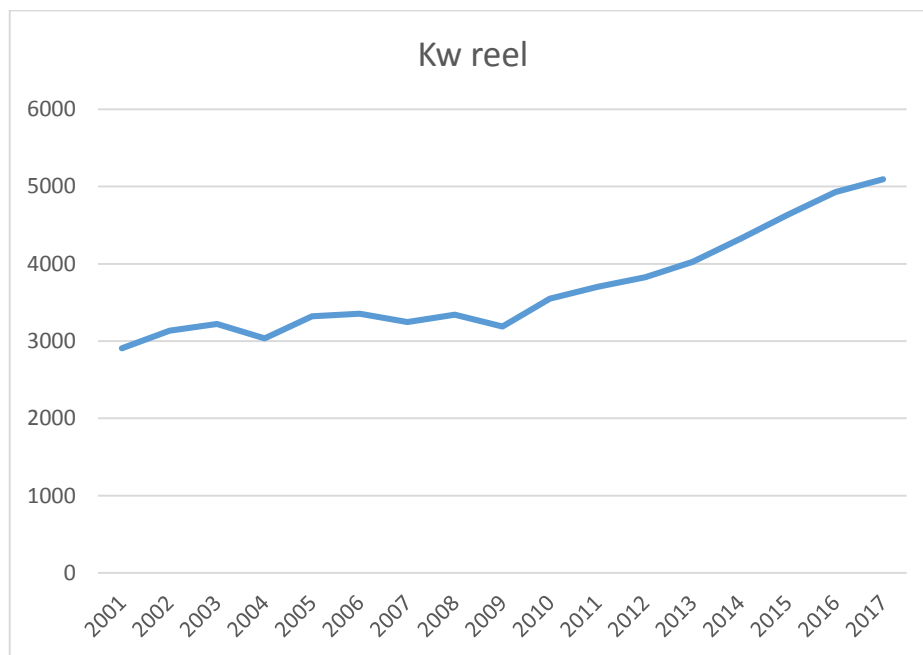


Figure 21 : Graphe montrant la puissance réelles produites par méthanisation.

2.4.2. Incineration

Le pouvoir calorifique des composants des déchets à la déchetterie de Tripoli sont présentés dans le tableau ci-dessous (Voir Annexe 1) :

Tableau 6 : Pouvoir calorifique des différentes composantes des déchets.

| | Humide | Kcal/Kg | Sec | Kcal/Kg |
|----------------------|--------|---------|-------|---------|
| | KJ/kg | | KJ/kg | |
| Carton | 9516 | 2300 | 15695 | 3800 |
| Papier | 9991 | 2400 | 14496 | 3500 |
| Déchets putrescibles | 4246 | 1000 | 15773 | 3800 |
| Plastiques | 22883 | 5500 | 30939 | 7400 |

Puisque les déchets dans la déchetterie à Tripoli sont formés majoritairement de matières organique (52.5 %), de papiers et du carton (16%), de plastique (11.5%) et de métal (5.5%), on peut alors calculer leurs pouvoir calorifique.

1 tonne de déchets à un PCI égale à :

$$(0.525 * 4246 + 0.16 * (9991+9516) / 2 + 0.115 * 22883) (kj/kg) * 1000 (kg/T) = 6 421 255 \text{ kj/T} = 1784 \text{ KWh/T}$$

Le rendement de récupération d'énergie par la chaudière est de 50 à 80 % (« l'incinération des déchets ménagers », page 96) ; on retiendra 75%.

Une tonne de déchets fournit donc :

$$1784 \times 0,75 = 1338 \text{ KWh utilisables}$$

Le taux de disponibilité des fours est de 80 % à 85 % - source : entretiens avec des industriels ; soit 7000 ou 7500 heures de fonctionnement par an, bien que des chiffres supérieurs soient parfois avancés.

Pour l'année 2017, on a 164250 T de déchets présenter dans la déchetterie de Tripoli.

D'où on peut calculer la puissance obtenue par incinération :

$$P = 164250 (T) * 1338 (KWh/T) / 7000 (h/an) = 31 \text{ MW thermique.}$$

Si le but était de produire le maximum possible d'électricité, on peut calculer la puissance électrique produite à partir du rendement de la turbine (considérée égale à 0.35). D'où la puissance électrique pour l'année 2017 sera :

$$P_{elec} = 31 \text{ MW} * 0.35 = 11 \text{ MW.}$$

Comme l'autoconsommation en électricité est de 20% de la production (c.à.d. 11MW * 0.2 = 2.2 MW), la quantité vendue sera égale à 8.8 MW * 0.8 = 7.04 MW.

Les valeurs obtenues par le calcul sont placées dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Valeur de puissance électrique produit par incinération en (Kw)

| année | déchets T | T/jour | kWh/an | kW th | kW elec | P réelle (kw) |
|-------|-----------|----------|-----------|----------|----------|---------------|
| 2001 | 93750 | 256.8493 | 125437500 | 17919.64 | 6271.875 | 4014 |
| 2002 | 101082 | 276.937 | 135247716 | 19321.1 | 6762.386 | 4327.927 |
| 2003 | 103887 | 284.6219 | 139000806 | 19857.26 | 6950.04 | 4448.026 |
| 2004 | 97893 | 268.2 | 130980834 | 18711.55 | 6549.042 | 4191.387 |
| 2005 | 107102 | 293.4301 | 143302476 | 20471.78 | 7165.124 | 4585.679 |
| 2006 | 108221 | 296.4959 | 144799698 | 20685.67 | 7239.985 | 4633.59 |
| 2007 | 104631 | 286.6603 | 139996278 | 19999.47 | 6999.814 | 4479.881 |
| 2008 | 107820 | 295.3973 | 144263160 | 20609.02 | 7213.158 | 4616.421 |
| 2009 | 102866 | 281.8247 | 137634708 | 19662.1 | 6881.735 | 4404.311 |
| 2010 | 114419 | 313.4767 | 153092622 | 21870.37 | 7654.631 | 4898.964 |
| 2011 | 119371 | 327.0438 | 159718398 | 22816.91 | 7985.92 | 5110.989 |
| 2012 | 123342 | 337.9233 | 165031596 | 23575.94 | 8251.58 | 5281.011 |
| 2013 | 129818 | 355.6658 | 173696484 | 24813.78 | 8684.824 | 5558.287 |
| 2014 | 139496 | 382.1808 | 186645648 | 26663.66 | 9332.282 | 5972.661 |
| 2015 | 149456 | 409.4685 | 199972128 | 28567.45 | 9998.606 | 6399.108 |
| 2016 | 159000 | 435.6164 | 212742000 | 30391.71 | 10637.1 | 6807.744 |
| 2017 | 164250 | 450 | 219766500 | 31395.21 | 10988.33 | 7032.528 |

On peut alors présenter les résultats obtenus sur les graphes suivants :

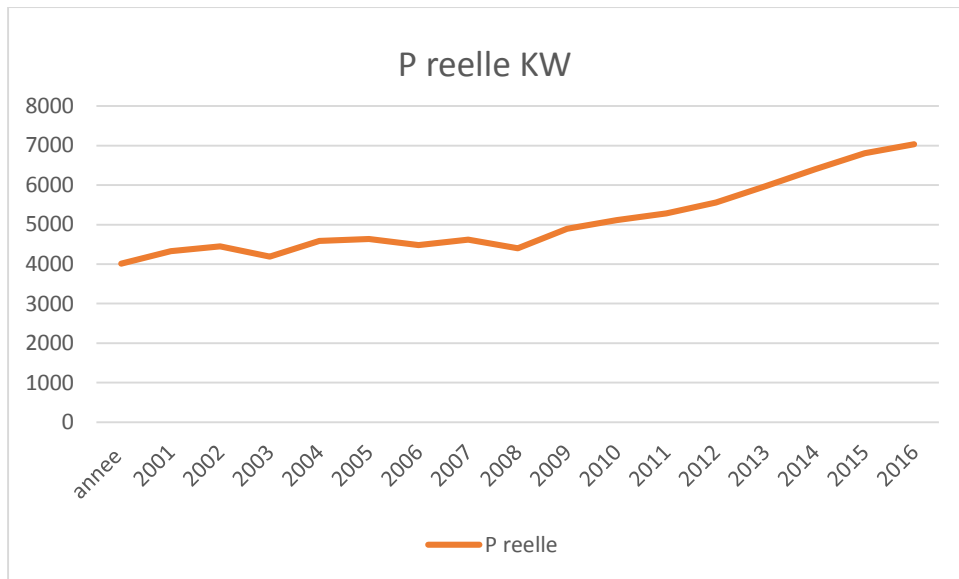


Figure 22 : Graphe montrant la puissance réelles (KW) produites par incinération.

Pour calculer la masse de fumées obtenue lors de l'incinération d'un kg de déchets on utilisera l'expression suivante [15]:

$$P_f = (A+1) - x/100 = (3 + 1) - 0.3 = 3.7 \text{ kg de fumée/ kg de déchets}$$

Avec : P_f : kg de fumée par kg de déchets

A (kg d'air réel/ kg de déchets) = $(0.24 * I_p + 0.25) * \lambda = 3 \text{ kg}$ (I_p en MJ/kg considérée égale à 8 MJ/kg et λ facteur caractérisant l'excès d'air nécessaire suppose égale à 1.4) [16]

X en pourcentage est la teneur en cendres (considérée égale à 30%)

D'où pour l'année 2017 on a :

Masse de fumée = $P_f * \text{Masse des déchets} = 3.7 \text{ (kg fumée/ kg déchets)} * 164250000 \text{ (kg déchets)} * 0.795 = 483\,141 \text{ T de fumée.}$

On calculera alors la composition des fumées :

N_2 (65 %) : $483\,141 * 0.65 = 314\,041 \text{ T}$

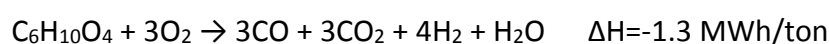
O_2 (7 %) : $483\,141 * 0.07 = 33\,819 \text{ T}$

CO_2 (12%) : $483\,141 * 0.12 = 57\,976 \text{ T}$

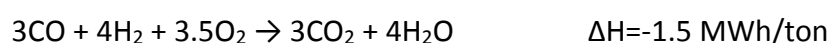
H_2O (10%) : $483\,141 * 0.1 = 48\,314 \text{ T}$

2.4.3. Plasma

La technologie du plasma thermique peut produire des températures extrêmement élevées en l'absence ou presque d'O₂, avec des matières organiques et d'autres matériaux. Les produits organiques sont convertis en gaz de synthèse et en d'autres matériaux dissociés en éléments chimiques constitutifs qui sont ensuite collectés et vitrifiés pour produire un laitier inerte semblable à du verre ; la plupart des métaux lourds et alcalins (à l'exception du mercure, du zinc et du plomb, qui peuvent se vaporiser à des températures élevées et être retenus dans les cendres volantes et le gaz de synthèse) sont retenus dans les scories vitrifiées. Les scories vitrifiées obtenues après refroidissement peuvent être utilisées comme matériaux de construction. La réaction de gazéification simple des déchets en utilisant le plasma thermique peut être exprimée comme suit [17] :



Le produit principal de la gazéification au plasma des déchets solides municipaux est un gaz de synthèse à valeur calorifique faible à moyenne composé de CO et de H₂, comme le montre l'équation ci-dessus. Ce gaz peut être brûlé pour produire de la chaleur et de la vapeur, ou récuré chimiquement et filtré pour éliminer les impuretés avant la conversion en divers combustibles liquides ou produits chimiques industriels. Le gaz de synthèse brûle selon les équations suivantes.



D'où on peut calculer l'énergie thermique produite par les déchets de l'année 2017 (164250 T de déchets) :

$164250 \text{ (T)} * 0.795 * 1300 \text{ (KWh/T)} / (7000) \text{ (h/an)} = 24.2 \text{ MW}$ d'énergie thermique provenant de la gazéification par plasma.

Où : 0.795 représente les matières organiques (0.525), papier, carton (0.16) et plastiques (0.115).

Ensuite on calcul l'énergie thermique récupérer par la combustion du syngas obtenue : $164250 \text{ (T)} * 0.795 * 1500 \text{ (KWh/T)} / (7000) \text{ (h/an)} = 28 \text{ MW}$ d'énergie

thermique par combustion de syngas. Nous aurons alors l'énergie thermique total obtenue égale à 52.2 MW dont 3.9 MW serviront à alimenter les système (torches à plasma et auxiliaires), laissant environ 48 MW d'énergie thermique nette disponible pour produire d'électricité par un système de turbine (rendement considérée égale à 0.35). D'où la puissance électrique pour l'année 2017 sera : $P_{elec} = 48 \text{ MW} * 0.35 = 16.8 \text{ MW}$. La puissance réelle sera égale à $16.8 \text{ MW} * 0.8 = 13.5 \text{ MW}$.

Les valeurs obtenues par le calcul sont placées dans le tableau suivant :

Tableau 8 : Valeurs de puissance électrique produit par plasma en (KW)

| année | déchets T | Puissance électrique (kw) | Puissance réel (kw) |
|-------|-----------|---------------------------|---------------------|
| 2001 | 93750 | 9069.375 | 7255.5 |
| 2002 | 101082 | 9885.4266 | 7908.34128 |
| 2003 | 103887 | 10197.6231 | 8158.09848 |
| 2004 | 97893 | 9530.4909 | 7624.39272 |
| 2005 | 107102 | 10555.4526 | 8444.36208 |
| 2006 | 108221 | 10679.9973 | 8543.99784 |
| 2007 | 104631 | 10280.4303 | 8224.34424 |
| 2008 | 107820 | 10635.366 | 8508.2928 |
| 2009 | 102866 | 10083.9858 | 8067.18864 |
| 2010 | 114419 | 11369.8347 | 9095.86776 |
| 2011 | 119371 | 11920.9923 | 9536.79384 |
| 2012 | 123342 | 12362.9646 | 9890.37168 |
| 2013 | 129818 | 13083.7434 | 10466.99472 |
| 2014 | 139496 | 14160.9048 | 11328.72384 |
| 2015 | 149456 | 15269.4528 | 12215.56224 |
| 2016 | 159000 | 16331.7 | 13065.36 |
| 2017 | 164250 | 16916.025 | 13532.82 |

On peut alors présenter les résultats obtenus sur les graphes suivants :

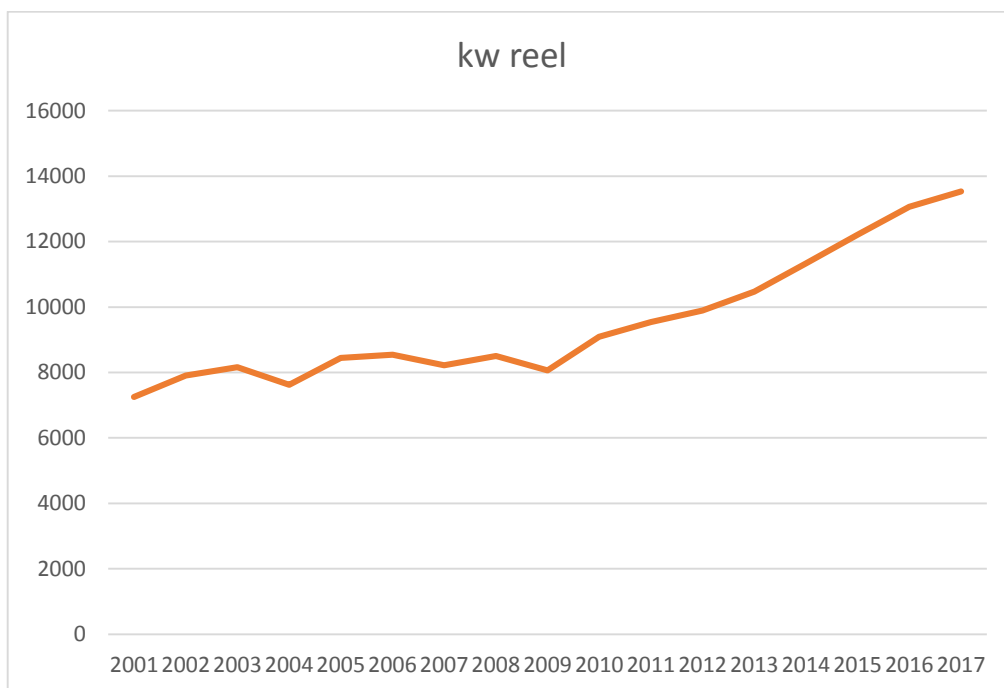


Figure 23 : Graphe montrant la puissance réelles (KW) produites par plasma.

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes méthodes de valorisation énergétique des déchets et nous avons appliqué ces méthodes sur la déchetterie à Tripoli. Les résultats ainsi obtenus seront comparés dans le chapitre suivant afin de trouver la méthode la plus convenable pour la déchetterie à Tripoli.

CHAPITRE 3

3. Comparaison entre les méthodes de valorisation appliquées sur la déchetterie de Tripoli

3.1. Introduction

L'objectif de notre étude est de limiter les nuisances et les risques liés à la caractère dangereux, fermentescible ou encombrant des déchets, qui causent des impacts sanitaires ou environnementaux. Cependant, la gestion des déchets fait intervenir des procédés qui peuvent affecter le cadre de vie des populations, ce qui génère des tensions. La gestion des déchets représente aujourd'hui un véritable enjeu tant financier, en raison de l'augmentation croissante des coûts de gestion des déchets qu'environnemental, lie d'une part au risque d'insuffisance des méthodes de traitement à moyen terme, et d'autre part au gaspillage des matières premières.

3.2. Avantage et inconvénients des différentes méthodes de valorisation

3.2.1. Méthanisation

Pour valoriser énergétiquement par méthanisation la montagne de déchets présenter à la déchetterie de Tripoli un prétraitement, difficile d'être réalisé dans les conditions actuelle, est nécessaire. Nous présentons alors dans ce paragraphe les avantages et les inconvénients de la méthanisation.

Avantages

La méthanisation de déchets organiques présente de nombreux avantages, notamment :

- Une double valorisation de la matière organique et de l'énergie ; c'est l'intérêt spécifique à la méthanisation par rapport aux autres filières.
- Une diminution de la quantité de déchets organiques à traiter par d'autres filières.
- Une diminution des émissions de gaz à effet de serre par substitution à l'usage d'énergie fossiles ou d'engrais chimiques.

- Un traitement possible des déchets organiques gras ou très humides.
- Sur les grandes unités, une limitation des émissions d'odeurs a priori du fait de digesteur hermétique et de bâtiment clos équipé de traitement d'air performant.

Inconvénients

Le choix de la méthanisation nécessite de prendre soin des points suivants lors de la conception du projet :

- S'assurer de la maîtrise de la ressource des déchets à méthaniser
- Vérifier la valorisation énergétique possible du biogaz : valorisation chaleur sur site en cas de cogénération, injection possible ou non dans le réseau de gaz naturel.
- Mise en place d'un traitement des excédents hydriques du processus pour les grosses installations.
- Disponibilité suffisante des capitaux pour investir dans l'installation.

3.2.2. Incinération

La valorisation des déchets par incinération est applicable sur les déchets présentés à la déchetterie de Tripoli mais les valeurs énergétiques obtenues seront plus petites que celle obtenue théoriquement à cause de la dégradation des déchets avec le temps. Nous présentons dans ce paragraphe les avantages et les inconvénients de l'incinération.

Avantages

Les points forts de l'incinération sont :

- Traitement adapté à toutes sortes de déchets (dangereux, non dangereux, solides et liquides) ;
- Diminue fortement le volume des déchets (70% de réduction environ) et leur masse (70% environ pour les déchets ménagers et assimilés), produit des mâchefers valorisables ;
- Réduit les déchets à enfouir ou à mettre en décharge ;

- Permet de trier le meilleur parti du contenu énergétique des déchets en produisant de la chaleur susceptible d'alimenter un réseau de chaleur urbain et/ou d'être transformée en électricité ; elle participe à la réduction de l'utilisation de ressource fossiles.

Inconvénients

Les points faibles de l'incinération sont :

- Elle est peu adaptée à la composition des déchets du Liban, à 60% organiques (restes d'aliments, très riches en eau).
- Le budget pour équiper le Liban en incinérateurs est lourds (plus d'un milliard de dollars selon des sources concordantes).
- L'incinération est une stratégie extrêmement centralisée, profitant à un petit groupe de personnes, contrairement au système de tri et de recyclage, dont les bénéfices se répartissent sur un grand nombre de personnes.
- L'incinération est polluante et source d'émanations de dioxine (gaz cancérigène), même dans ses versions les plus modernes (Voir tableau 1).
- L'incinération produit des cendres toxiques (30% des déchets incinérée), qu'il faut stocker dans une décharge remplissant des critères très spécifiques. Ils ont besoin de traitement.

3.2.3. Le procédé de gazéification de déchets par torche à plasma

La valorisation des déchets par gazéification peut être appliquée sans problèmes sur la montagne de déchets à Tripoli. Nous présentons dans ce paragraphe les avantages et les inconvénients de la valorisation des déchets par gazéification par plasma.

Avantages

Les points forts du plasma sont les suivantes :

- La technologie de gazéification par plasma permet de réduire les gaz à effet de serre.

- Vitrification de mâchefer d'incinérateur de déchets hospitaliers-incinération/vitrification de déchets radioactifs-vitrification des résidus de l'incinération, REFIOM (Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération d'Ordures Ménagères).
- Il n'est pas nécessaire de trier les déchets. Ils sont jetés en vrac ou en contenants entiers dans le four à arc électrique ou pompés s'ils sont liquides. Le triage se fait automatiquement dans la fournaise.
- Le gaz de synthèse, obtenu à la fin Avoir à la fin (SynGaz), est valorisable par plusieurs façons et selon le besoin (on rendement énergétique)
- Le procédé est bien adapté à la production optimisée d'électricité
- Enfin, sur le plan environnemental, le procédé de gazéification par plasma permet la production d'électricité avec un ratio CO₂/kWh faible comparé aux installations d'incinération.

Inconvénients

Les points faibles de gazéification par plasma sont les suivantes :

- Le coût d'investissement reste élevé devant le coût d'enfouissement (CET).
- La qualité des déchets traités induit la nécessité de nettoyage fréquent des réacteurs
- Il faut réunir trois facteurs pour que cela soit rentable :
 - 1- Grande usine (coût de transport, de fonctionnement et d'entretien réduit), traitement 100-150 tonnes/jour (-> vitrification).
 - 2- Production d'électricité par cycle combiné (gaz et turbine à vapeur -> gazéification).
 - 3- Avoir des subventions (aide de l'état, prix de traitement faible) définir vitrification

3.3. Comparaison entre les différentes méthodes

Le tableau suivant présente une comparaison entre les différentes méthodes de valorisation de déchets pour l'année 2017 :

| Méthodes de valorisation | Puissance thermique | Puissance électrique | Avantages | Inconvénients |
|-----------------------------------|---------------------|----------------------|---|---|
| Méthanisation | 20 MW | 5 MW | <ul style="list-style-type: none"> - Traitement des déchets organiques gras ou très humides. - Double valorisation de la matière organique et de l'énergie. - Limitation des émissions d'odeurs. | <ul style="list-style-type: none"> - Vérifier la valorisation énergétique possible du biogaz. - Mise en place d'un traitement des excédents hydriques. - Contamination possible des sols. |
| Incinération | 31 MW | 7 MW | <ul style="list-style-type: none"> - Traitement adaptés à toutes sortes de déchets. - Permet de trier le meilleur parti du contenu énergétique des déchets. - Diminue fortement le volume des déchets. | <ul style="list-style-type: none"> - Peu adaptée à la composition des déchets du Liban. - Produit des cendres toxiques. - Polluante et source d'émanations de dioxine (gaz cancérigène) Voir <u>Tableau 1</u>. |
| Gazéification par torche à Plasma | 48 MW | 13.5 MW | <ul style="list-style-type: none"> - Vitrification de mâchefer. - Réduit les gaz à effet de serre. - Pas nécessaire de trier les déchets. | <ul style="list-style-type: none"> - Coût d'investissement reste élevé. - Faut réunir trois facteurs pour qu'elle soit rentable. |

Tableau 9 : Comparaison entre les différentes méthodes de valorisation : méthanisation, incinération et gazéification par torche à plasma.

3.4. Conclusion

Après le calcul de la puissance électrique produite par les différentes méthodes de valorisation des déchets et la comparaison des avantages et des inconvénients de ces méthodes, on peut conclure que la valorisation de déchets par gazéification par plasma à la déchetterie de Tripoli est la méthode de valorisation la plus rentable et la plus convenable en tenant compte les conditions à laquelle est soumis la montagne de déchets (humidité, difficulté de triage, ...).

On peut calculer alors la région que peut alimenter par le courant électrique l'installation de gazéification par plasma à Tripoli. La figure ci-dessous présente le pourcentage d'électricité nécessaire pour chaque district à Tripoli :

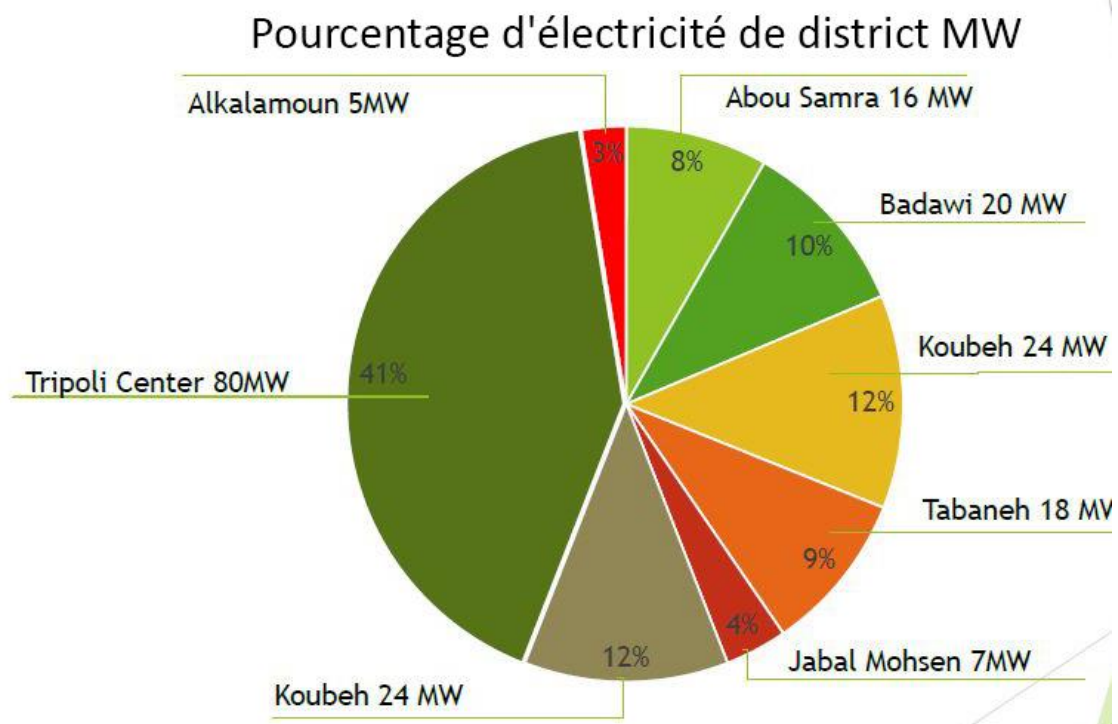


Figure 24 : Pourcentage d'électricité de district (en MW)

La méthode de valorisation par gazéification par plasma produit 13.5 MW d'électricité ce qui est capable d'alimenter les districts de Alkalamoun (5 MW) et de Jabal Mohsen (7 Mw). En plus, elle sera capable d'éliminer relativement la montagne de déchets et les mâchefers seront utiliser comme matière de construction.

CONCLUSION GENERALE

Afin de résoudre à long terme le problème de déchets ménager au Liban, le début doit être avec l'amélioration des capacités de tri à la source et de compostage dans les usines existantes à Tripoli, Beyrouth et au Mont-Liban, la taxation de produits comme les sacs en plastique, l'amélioration de la qualité des recyclables et du compost. En vue de réduire le volume des déchets inertes (ceux qui restent après le tri, le recyclage et le compost), la technique de traitement thermique sera efficace du point de vue énergétique.

La valorisation énergétique des déchets au Liban présente de plus en plus un besoin impeccable puisque leur élimination par enfouissement a causé des problèmes sur l'environnement et sur la santé des citoyens surtout à Tripoli (décharge à ciel ouvert). La déchetterie de Tripoli ne peut plus contenir des quantités supplémentaires de déchets, elle a commencé à contaminer le sol par les lixiviats, l'air par les gaz toxiques dégager et l'eau de mer.

Le but de notre projet est de faire une étude comparative sur les différentes méthodes de valorisation énergétique des déchets : Méthanisation, Incinération et gazéification par Plasma, sur la déchetterie de Tripoli. Un calcul de la puissance électrique et thermique est alors menée, puis les avantages et les inconvénients sont alors présentée pour mener une comparaison entre les différentes méthodes et choisir la plus convenable pour être appliquée à la déchetterie de Tripoli.

Le calcul montre alors que la valorisation des déchets par plasma est la plus convenable puisqu'elle a présenté :

- La meilleure puissance électrique $13.5 \text{ MW} > 7 \text{ MW}$ (puissance électrique par incinération) $> 5 \text{ MW}$ (puissance électrique par méthanisation).
- Plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes :
 - Les produits solides obtenus par la valorisation par plasma peuvent être utilisés comme matériaux de construction par contre ceux obtenus par incinérations sont toxiques.

- Possible de valoriser sans triage par contre la méthanisation a besoin d'un triage ce qui est presque impossible puisque la montagne des déchets à Tripoli est ancienne.
- Possible de valoriser les matières organiques, les papiers, les cartons et le plastique par contre la méthanisation ne permet que la valorisation des matières organique.
- Pas d'émission de gaz toxique.

C'est vrai que la valorisation des déchets par gazéification par torche à plasma présente plus d'avantages que d'autre méthodes, il est indispensable de dire que le coût de l'installation de cette méthode reste très cher pour être réalisée à Tripoli.

Nous présentons dans ce qui suit quelques perspectives :

- Etude financier sur le coût d'installation de chaque méthode de valorisation de déchets et sur la possibilité d'être appliqué à Tripoli.
- Etude sur d'autre méthode de valorisation tel que : le Pyrolyse, la gazéification, le compostage, etc.
- Etude de l'influence des conditions des déchets déjà présenter à la déchetterie (humidité, possibilité de triage, etc.) sur le rendement thermique et électrique des méthodes de valorisation.
- La vitrification des déchets consiste à chauffer les déchets à une température telle que la fraction non-combustible du déchet fonde (c'est-à-dire à une température supérieure au point de fusion). Ce liquide est ensuite refroidi. Le refroidissement est généralement brutal, pour donner lieu à un produit s'apparentant à un verre (structure amorphe) dénommé "vitrifiat".

Annexe 1

Tableau 10 : Pouvoir calorifique des différents matières (1)

| Pouvoir calorifique (Mcal / Kg) | | | Pouvoir calorifique (Mcal / Kg) | | | Pouvoir calorifique (Mcal / Kg) | | |
|------------------------------------|----------------------------|---------|------------------------------------|---------------|---------|------------------------------------|------------------|---------|
| matériaux et matières | | Mcal/kg | matériaux et matières | | Mcal/kg | matériaux et matières | | Mcal/kg |
| Beurre | | 9 | Chlorure | PVC dur | 5 | Fibres | coco, paillason | 6 |
| Bois | bouleau | 4 | Chocolat | | 6 | | tissus en balles | 4 |
| | conifères | 4 | Coke | | 8 | | de raphia | 4 |
| | contreplaqué | 4 | Colle | | 9 | Foin | libre | 4 |
| | hêtre | 5 | Copeaux | | 4 | | compressé | 4 |
| Bornéol | | 10 | Coton | | 4 | Fromage | gras 45% | 4 |
| Briquettes | | 5 à 8 | Crésol | | 8 | | maigre | 4 |
| Butane | | 11 | Crotonaldé. | | 8 | Fulmicoton | | 2 |
| Butanol | | 8 | Cuir | | 5 | Furan | | 6 |
| Câbles | 4x25mm ² +isol. | 0.8 | Cyclohaptè. | | 11 | Gazoil | | 10 |
| Câbles | ml | 1.2 | Cyclohexa. | | 11 | Gaz | d'éclairage | 4 |
| Cacao | en poudre | 4 | Cyclopenta. | | 11 | Glycérine | | 5 |
| Café | | 4 | Cyclopropa. | | 12 | Goudron | | 9 |
| Caféine | | 5 | Déchets | de tourbe | 4 | Graisses | | 10 |
| Calcium | | 1 | Diamyléthe. | | 10 | Guttapercha | | 11 |
| Camphène | | 11 | Dichlorben. | | 4 | Heptane | | 11 |
| Camphre | | 9 | Dicyanure | | 5 | Hexaline | | 8 |
| Caoutchouc | | 10 | Diathylanin. | | 10 | Hexaméthylène | | 11 |
| | en plaques | 10 | Diéthylcarb. | | 10 | Hexane | | 11 |
| | pneus | 6 | Diéthylcéto. | | 8 | Houille | coke de bornéol | 9 |
| Carbone | | 8 | Diéthyléter | | 9 | | chauffage | 10 |
| Carbure | d'alumine | 4 | Diéthylmalo | | 5 | | de colza | 10 |
| Carbure | de calcium 80% | 4 | Dipentène | | 11 | | de créosote | 9 |
| Carton | | 4 | Diphényl | | 10 | | diesel | 11 |
| Carton | bitumé sablé | 4 | Droguerie | solvants | 5 | | de foie | 9 |
| | non sablé | 5 | Dynamite | 75% | 1 | | gazoil | 10 |
| | imprégné toit. | 5 | Ebonite | | 8 | | goudron | 11 |
| | ondulé | 4 | Ecorces | de chêne | 4 | | graines coton | 9 |
| Celluloïd | | 4 | Engrais | sulfa.d'ammo. | 0.5 | | huile graissage | 11 |
| Quinquina | | 2 | | urée | 2 | | de lin | 9 |
| Céréales | | 4 | | de corne | 4 | | minérale | 10 |
| Cétanol | | 10 | | saplêtre | 8 | | de navette | 10 |
| Citron | | 11 | Esprit de vin | | 8 | | d'olives | 10 |
| Charbon | houille | 8 | Ethane | | 12 | | de paraffine | 10 |
| | coke de houille | 7 | Ether | amylique | 10 | | végétale | 10 |
| | anthracite | 8 | | éthylrique | 8 | Hydride | d'aluminium | 5 |
| | lignite | 5 | Extrait | de malt | 3 | Hydrogène | | 34 |
| | briquettes | 8 | Farine | en vrac | 4 | Hydrure | magnésium | 4 |
| Charbon | de bois | 7 | | compressée | 4 | | sodium | 2 |
| Chiffon | | 4 | Fibres | soie | 4 | Lait | en poudre | 4 |

Tableau 11 : Pouvoir calorifique des différents matières (2)

| Pouvoir calorifique (Mcal / Kg) | | | Pouvoir calorifique (Mcal / Kg) | | | Pouvoir calorifique (Mcal / Kg) | | |
|------------------------------------|------------------|---------|------------------------------------|---------------------|---------|------------------------------------|----------------|---------|
| matériaux et matières | | Mcal/kg | matériaux et matières | | Mcal/kg | matériaux et matières | | Mcal/kg |
| Laine | de bois | 4 | Panneaux | agglomé. Bois | 2 | Sucre | | 4 |
| | compressée | 5 | Pneus | mélange | 6 | | de cane | 4 |
| Liège | en plaques | 4 | Poissons | séchés | 3 | Sulfite | de carbonyle | 2 |
| | granulés | 4 | Polyamide | | 7 | Sulfure | de carbone | 3 |
| Lignite | briquettes | 5 | Polycarbona. | | 7 | Tabac | | 4 |
| Lin | | 4 | Polyester | sans fibre | 6 | Tétrahydroben. | | 11 |
| Linoléum | | 5 | | 30% fibr. Verre | 4 | Tétraline | succédané | 11 |
| Livres | et dossiers | 4 | Polyéthylène | | 10 | Thé | | 4 |
| Magnésium | | 6 | Polyformadé | | 4 | Toluol | | 10 |
| Maïs | en poudre | 4 | Polyisobuty | | 11 | Tourbe | | 6 |
| Malt | | 4 | Polypropylèn | | 11 | Triacétate | | 4 |
| Matières synt | feuilles | 4 | Polystyrène | en forme | 10 | Urée | | 2 |
| | mousse | 4 | | en mousse | 10 | Vêtements | | 4 à 5 |
| | plaques | 4 | Polyuréthane | | 6 | | sur tringlages | 120/ml |
| Méthane | | 12 | Polyvinyle | | 5 | Viande | séchée | 6 |
| Méthanol | | 4 | Potage | aux légumes | 4 | White spiti | | 10 |
| Moxyde | de carbone | 4 | | jus de rôti | 4 | | | |
| | de carb. Sulfur. | 2 | | bouillon | 3 | | | |
| Nitrile | d'acétone | 7 | Poudre | de chasse | 0.8 | | | |
| Nitrocellulose | | 2 | | explosive | 1 | | | |
| Noisettes | | 4 | Propane | | 11 | | | |
| Noix de coco | séchées | 5 | Propionate | de polyvinyl | 6 | | | |
| Nougat | | 4 | P V C | | 5 | | | |
| Octane | | 11 | Raisins | grains | 4 | | | |
| Œufs | blancs, poudre | 5 | Résine | | 10 | | | |
| Ordures | | 2 | | de crésol | 6 | | | |
| Paille | | 4 | | de phénol | 6 | | | |
| | de bois | 4 | | synthétique liquid. | 10 | | | |
| Paillettes | en bois | 88 | | d'urée | 5 | | | |
| Palettes | en garniture | 92 | Rhum | 75% | 5 | | | |
| Panneaux | partic .bois dur | 4 | Rognure | de corne | 4 | | | |
| | tendre | 4 | Résine | plaques synthét. | 5 | | | |
| Pentane | | 12 | Sciure | fraïche | 4 | | | |
| Papier | en vrac | 4 | Sital | | 4 | | | |
| | compressé | 4 | Sodium | | 1 | | | |
| Paraffine | | 11 | Soie | | 5 | | | |
| Pétrole | | 10 | | d'acétate | 4 | | | |
| Phénol | | 8 | | de viscose | 4 | | | |
| | résine | 6 | Sol | revêtement PVC | 5 | | | |
| Phénylacrolé. | | 8 | Soufre | | 2 | | | |
| Phosphore | | 6 | Stéarine | | 10 | | | |

Références

- [1] Marylène Perrot-Audet, DDT de l'Ain «Les principes de la méthanisation,» juin 2016 .
- [2] Essam ALMANSOUR, «Bilans énergétiques et environnementaux de filières biogaz : Approche par filière-type,» Ecole doctorale : Sciences Physiques pour l'Ingénieur, 2011.
- [3] Jin Bai ZHANG, «PROCEDE DE TRAITEMENT ANAEROBIE DES BOUES ET,» INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE, 2011.
- [4] J. BOLLON, «Etude des mécanismes physiques et de leur influence sur la cinétique de méthanisation en voie sèche : essais expérimentaux et modélisation,» Ecole doctorale de Chimie de Lyon (Chimie, Procédés, Environnement), 2013.
- [5] J. FAVERIAL, «COMPOSTAGE ET VERMICOMPOSTAGE DES EFFLUENTS D'ELEVAGE. UNE ALTERNATIVE DURABLE POUR LE RECYCLAGE DES DECHETS D'ORIGINE ANIMALE.,» L'Université des Antilles, 2016.
- [6] C. FRANCOU, «STABILISATION DE LA MATIERE ORGANIQUE AU COURS DU COMPOSTAGE DE DECHETS URBAINS : Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - Recherche d'indicateurs pertinents,» INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON ECOLE DOCTORALE ABIES, 2003.
- [7] Y. MENARD, «Modélisation de l'incinération sur grille d'ordures ménagères et approche thermodynamique du comportement des métaux lourds,» Institut National Polytechnique de Lorraine, 2003.
- [8] E. Gomez, D. Amutha Rani, C.R. Cheeseman, D. Deegan, M. Wise, A.R. Boccaccini., «Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review.,» Journal of Hazardous Materials 161 : 614-626., 2009.
- [9] L. Gray, «Plasma Gasification as a Viable Waste-to-Energy Treatment of Municipal Solid Waste,» Rensselaer Hartford, USA, 2014.
- [10] C.A. Aceves-Lara, E. Trably, J.-R. Bastidas-Oyenadel, I. Ramirez, E. Latrille, J.-P. Steyer, «Production de bioénergies à partir de déchets: Exemples du biométhane et du biohydrogène,» J. Société Biol. 202 177 189, 2008.
- [11] C. Couhert, «Pyrolyse flash à haute température de la biomasse ligno-cellulosique et de ses composés : production de gaz de synthèse,» Paris, 2007.
- [12] Groupe de Travail PyroGaz du CSF Eco-Industries VID, «PYROLYSE ET GAZEIFICATION, UNE FILIERE COMPLEMENTAIRE POUR LA TRANSITION ENERGETIQUE ET LE DEVELOPPEMENT DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE,» Juin 2015.
- [13] «les techniques thermiques : pyrolyse, thermolyse et Gazeification,» Centre Emile Bernheim, 2007, Y Solvay Business School, Université Libre de bruxelles.

- [14] Marwan Rizkallah, Sweep-Net, Mr. Bassam Sabbagh, «COUNTRY REPORT ON THE SOLID WASTE MANAGEMENT IN LEBANON,» SWEEP-NET, 2014.
- [15] Adel Mourtada, Gilbert Menguy, «Transmission de la chaleur,» Universite Libanaise , Beyrouth , 1998.
- [16] Christian Guilte , «Combustion reelles, Combustibles complexes.,» Octobre 2013 .
- [17] Youngchul Byun, Moohyun Cho, Soon-Mo Hwang and Jaewoo Chung , «Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW),» 2012.