

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahlab Blida

Faculté des Technologie



Mémoire de fin d'études
en vue de l'obtention du diplôme
de Master en Génie Chimique

Thème

**Modélisation de la pyrolyse d'un
déchet ménager en lit fixe**

Réalisé par :

M.ESSARHANE

dirigé par:

Mr D. TOUIL

Promotion 2012-2013

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents

A ma fiancée Romaiassa

A mes frères

A mes sœurs

A toute ma famille

A tous mes Amis pour leurs aide et compréhension et surtout

Pour leur soutien moral.

Mohamed

Remerciements

Je remercie ALLAH tout puissant, maître des cieux et de la terre, qui m'a permis de mener à bien ce travail.

Ce travail est réalisé au de centre de développement d'énergie renouvelable a bouzareah J'exprime ma reconnaissance à Monsieur **Djamel Touil**, pour m'avoir encadré tout le long de ce travail, pour sa patience et ses encouragements, pour l'aide, ces conseils éclairés, et son soutien moral.

Je remercie les membres du jury de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner et de juger mon travail de fin d'étude.

Je remercie également tous les enseignants pour avoir contribué à mon information et particulièrement Dr.OZAN , pour ses orientations et ses conseils ainsi que tous les techniciens et toute l'équipe de chimie industrielle pour leurs aides.

Enfin, mille merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de recherche et de le mener à terme.

Table des matières

Résumé

Nomeclateur

Liste des figures et des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : Gestion et traitement des déchets

Introduction

I.1 Définition de déchet	2
I.2 La gestion des déchets	2
I.2.1 Principe de gestion des déchets.....	2
I.3.. Classification des déchets dans le monde	3
I.3.1.Déchets municipaux	3
I.3.2 Déchets industriels et artisanaux	4
I.3.3. Déchets spéciaux	4
I.4. Classification des déchets solides	4
I.4.1 Suivant leur origine	4
I.4.2 Suivant leur nature	5
I.5. Caractérisation d'un déchet	5
I.6. Les techniques de valorisation des déchets ménagers	6
I.6.1 L'incinération	6
I.6.1.1 Principe de fonctionnement	7
I.6.1.2 Avantages et Inconvénients de l'incinération	8
I.6.2 Le compostage	8
I.6.2.1Principe du compostage	8
I.6.2.2 Avantages et Inconvénients du compostage	9
I.6.3 La méthanisation.....	10
I.6.3.1 Les étapes de digestion anaérobie (méthanisation).....	11

I.6.3.2 Avantages et Inconvénients de la méthanisation.....	11
---	----

Chapitre II :La pyrolyse des déchets

Introduction	12
II.1 Définition	12
II.2 Caractéristiques du procédé de pyrolyse	13
II.2.1 Installations de pyrolyse	13
II.2.2 Types de pyrolyse	14
II.2.2.1 Pyrolyse lente	14
II.2.2.2 Pyrolyse rapide	14
II.3 Procédés de pyrolyse lente des déchets ménagers actuellement développés	14
II.3.1 Le Procédé de pyrolyse Nesa	15
II.3.2 Le Procédé de pyrolyse Thide	16
II.3.3 Le Procédé de pyrolyse WGT	16
II.4 Procédés de pyrolyse rapide des déchets ménagers	17
II.4.1 Procédé PyRos	17
II.4.2 Procédé BTG	18
II.4.3 Procédé Okadora	19
II.5 Avantages et inconvénients du procédé de pyrolyse.....	20

Chapitre III : Modélisation de la pyrolyse d'un lit fixe

Introduction

III.1. Etude bibliographique	21
III.2. Pyrolyse d'un déchet dans un lit fixe	21
III.2.1 Hypothèses du modèle	22
III.3. Développement des équations du modèle	22
III.3.1 Modèle cinétique de la pyrolyse	23
III.3.2 Bilan de matière global sur le gaz	24
III.3.2.1 Bilan de conservation des espèces en phase gazeuse	24
III.3.3 Bilan de matière sur le solide	25
III.3.4 Bilan de quantité de mouvement	26
III.3.5 Conservation du bilan d'énergie	26
III.3.6 Conditions initiales et aux limites	27
III.3.7 Calcul des Propriétés physiques	28

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

Introduction

IV.1. Evolution des paramètres opératoires en fonction de la hauteur du lit.....	29
IV.1.1. La température du solide et du gaz	29
IV.1.2. Fraction massique du solide.....	30
IV.2. Rendement de pyrolyse.....	31
Conclusion générale.....	34

Références bibliographiques

Annexes

Liste des figures

Figure I.1 : Déchet ménager	2
Figure I.2 : Pouvoir calorifique d'un déchet brut en fonction de la fraction MS	6
Figure I.3 : Schéma d'un incinérateur pilote	7
Figure I.4 : Schéma simplifié du processus de compostage	9
Figure I.5 : Voies métaboliques d'une méthanisation	10
Figure II.6 : Schéma réactionnel de la pyrolyse d'un déchet	12
Figure II.7 : Réactifs et Produits de la pyrolyse d'un déchet	13
Figure II.8 : Schéma de principe du procédé Nesa	15
Figure II.9 : Schéma de principe du procédé Thide	16
Figure II.10 : Schéma de principe du procédé WGT	17
Figure II.11 : Schéma de principe du procédé PyRos	18
Figure II.12: Schéma de principe du procédé BTG	18
Figure II.13 : Schéma de principe du procédé Okadora	19
Figure III.1 : Pyrolyse d'un déchet en lit fixe	22
Figure III.2 :Modèle cinétique de la Pyrolyse	22
Figure III.3 : Organigramme de résolution	28
Figure IV.1 : la variation de température de solide	29
Figure IV.2 : la variation de températures du gaz au cours de pyrolyse	30
Figure IV.3:Evolution de la fraction massique de solide	30
Figure IV.4 : Evolution de la fraction massique du gaz de pyrolyse	31
Figure IV.5 :Evolution de la fraction massique de coke	32

Liste des tableaux

Tableau I.1 : paramètres caractéristiques du lit.	
Tableau II .1 : corrélations de quelques propriétés physiques	
Tableau II.2 : propriétés physiques	
Tableau II.3 : composition élémentaire générale des déchets	
Tableau II.4 : analyse approximative des déchets	
Tableau III.1 : Paramètres de la cinétique réactionnelle	23
Tableau III.2 : Constantes k de la cinétique réactionnelle	25

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la gestion et le traitement des déchets. Les techniques de valorisation énergétique les plus courantes sont mises en évidence.

I.1 Définition d'un déchet

Un déchet est tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon. C'est aussi toute matière ou objet indésirable abandonné sur la voie publique. Du point de vue économique un déchet est tout produit ou objet qui n'est plus utile et qui nuit à son détenteur. A titre d'exemple, la figure 1 montre le dépôt d'un déchet ménager.



Fig. I.1. Déchet ménager

I.2. La gestion des déchets

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le tri, le traitement, la réutilisation ou l'élimination des déchets, produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine et l'environnement.

I.2.1. Principe de la gestion des déchets

Il ya plusieurs principes sur la gestion des déchets, dont l'usage varie selon les pays ou les régions. La hiérarchie des stratégies consiste à :

- Réduire
- Réutiliser
- Recycler

Cette hiérarchie encore appelée la règle des 3R a mainte fois changé d'aspect au cours des dix dernières années. Certains experts ont récemment ajouté un « quatrième R » Repenser, qui implique que le système actuel a des faiblesses et qu'un système parfaitement efficace exigerait qu'un regard totalement différent soit porté sur les déchets.

Une autre méthode de réduction des déchets à la source est d'accroître les incitations au recyclage. Plusieurs villes aux USA ont mis en place des taxes dont le montant est fonction des quantités d'ordures déposées qui se sont révélées efficaces pour réduire le volume des déchets urbains. Les méthodes pour produire de nouvelles ressources à partir des déchets sont diverses et nombreuses. A titre d'exemple, on peut extraire les matières premières des déchets, puis les recycler, ou les brûler pour produire de l'électricité. Ces méthodes sont en plein développement, grâce notamment aux apports des nouvelles technologies. Ce processus de valorisation des déchets s'appelle valorisation matière ou recyclage. Dans certains pays en voie de développement, la valorisation des déchets a déjà lieu. Des hommes trient à la main les montagnes de déchets pour récupérer les matériaux qui peuvent être revendus sur le marché de la récupération (ou casse). Ces travailleurs non reconnus appelés collecteurs de déchets est la partie cachée de ce secteur d'activité qui joue un rôle important pour réduire la charge de travail des services municipaux des gestions des déchets.

I.3 Classification des déchets dans le monde

Environ 900 types de déchets sont classés selon leur qualité, leur composition, leur état d'agrégation et leur origine [1]. Trois classes peuvent être distinguées.

I.3.1. Déchets municipaux

Tous les déchets des ménages privés et des déchets assimilables provenant d'institutions publiques et entreprises appartiennent à ce groupe. Les ordures ménagères : sont des déchets produits par les familles et collectées dans des poubelles correspondantes. Les déchets industrielles assimilables aux ordures ménagères correspondent aux déchets produits par les petites ou moyennes entreprises, les magasins, les prestataires de services, qui peuvent être éliminés conjointement avec ou comme les ordures ménagères. Les déchets encombrants sont des déchets de la vie privée de grandes dimensions et ne pouvant pas être collectés dans les poubelles pour ordures ménagères. Les résidus provenant des installations pour les eaux usées, des matières dégrillées, des résidus des dessaleurs et dégraisseurs des stations d'épuration des eaux usées [2]. Les déchets hospitaliers comprennent tous les déchets produits dans des hôpitaux, des cliniques, des cabinets de consultation et d'autres

établissements de service médicale, qui se distinguent qualitativement et /ou quantitativement des ordures ménagères, par exemple :

Les restes de repas, ordures de cuisine, médicaments, produits chimiques, pansements, produits d'usage unique, déchets de l'animalerie, déchets radioactifs.

I.3.2. Déchets industriels et artisanaux

Tous les déchets des entreprises privées et publiques entrent dans cette classe ; Il s'agit des déchets industriels qui sont transportés séparément des déchets de production et des déchets des abattoirs tels que les cadavres, les os, les tripes [2].

I.3.3. Déchets spéciaux

Ce sont les déchets qui ne peuvent pas être traités en commun avec les déchets municipaux et industriels par suite de leur type, composition ou quantité, par exemple les huiles usagées, vieilles voitures, déchets radioactifs, déchets de l'élevage industriel [2].

I.4. Classification des déchets solides

Les déchets sont classés suivant leur origine ou suivant la nature du danger

I.4.1 Classification suivant leur origine

On distingue 4 classes de déchets :

- **Les déchets ménagers**

Les déchets des ménages sont liés à l'activité domestique, ils comprennent les ordures ménagères au sens strict, les encombrants et les déchets de jardinage, ou déchets verts. Seuls les ordures ménagères et les déchets verts sont susceptibles d'être valorisés en agriculture après un traitement adéquat. Dans les villes des pays en développement, la production d'ordures ménagères est très variable, selon les auteurs [3], elle serait en moyenne de l'ordre de 0,75 kg par habitant et par jour

- **Les déchets des marchés**

Les déchets de marchés sont liés à l'activité commerciale. Ils comprennent les ordures issues du commerce des vivres, les emballages, les bouteilles,....

- **Les déchets industriels**

Les déchets industriels proviennent des industries et des usines. Dans cette classe, on cite par exemple les déchets de maïs des Brasseries, les déchets de canne à sucre, etc..

- **Les déchets hospitaliers**

Les déchets hospitaliers comprennent les seringues usées, les poches de sang inutilisables, les médicaments périmés. Il y a aussi les eaux usées, etc..

I.4.2 Classification Suivant leur nature

On distingue 3 grandes classes de déchets solides :

- **Les déchets inertes :**

Les déchets inertes sont les déchets très encombrants, ils représentent 5 % de la production totale des déchets solides. Ce sont en général les débris de chantiers plus ou moins volumineux (gravats, terre, sable,...), les plastiques, les carcasses d'automobiles, les avions,...

- **Les déchets fermentescibles ou biodégradables**

Les déchets biodégradables sont essentiellement constitués de la matière organique animale et végétale. A titre d'exemple, en Cameroun, ils représentent le gros des déchets de Yaoundé avec une proportion de 86%. Ce sont les déchets moins encombrants du fait de leur rapide fermentation aérobie ou anaérobie. Mais par contre très polluants et peuvent provoquer des maladies à travers certains animaux, les mouches, les moustiques et autres [4].

- **Les déchets toxiques :**

Les déchets toxiques sont ceux qui contiennent un poison chimique ou radioactif issus des industries, des laboratoires et des particuliers. Il s'agit des flacons, des médicaments, des piles électroniques [5].

I.5 Caractérisation d'un déchet :

Un déchet est donc composé d'eau (W) et de matière sèche (MS). Cette matière sèche comprend une fraction minérale, des métaux (MM) et une fraction organique(MO). Les cendres (A) concentrent les matière minérales et métaux.

Les procédés de traitement de déchet visent à éliminer ci possible la matière organique et inerte d'une part et la matière minérale et résiduelle (cendres) d'autre part.

L'incinération assure la combustion d'haute température des matières organiques, la pyrolyse et la gazéification en assurent la conversion en combustibles alternatifs, la bio-méthanisation permet la conversion des matières organique fermentescibles en biogaz et le compostage permet la transformation de biomasse en produits d'amendement de sols.

Les trois données essentielles à prendre en considération pour estimer les perspectives d'une opération de traitement sont :

-La teneur en Matière Sèche (MS) du déchet brut (MB)

-La teneur en cendres (A) de la Matière Sèche. On en déduit la fraction organique (MO) de la matière sèche avec :

$$MO = 100 - A \quad (I.1)$$

- Le pouvoir calorifique inférieur de la matière organique (PCI_{MO} en MJ/kg qui confère au déchet sa valeur énergétique). Il est des lors aisé de calculer le PCI en MJ/kg du déchet brut en fonction de ces trois paramètres. En tenant compte de l'énergie de vaporisation de l'eau, égale à 40MJ/Kg.

$$PCI_{Br} = (PCI_{MO} \times MO) \times MS - (40 \times W) \quad (I.2)$$

La figure 2 représente le PCI d'un déchet en fonction de la fraction en MS pour différentes fractions en MO (le PCI_{MO} est estimé ici à 30 MJ/kg).

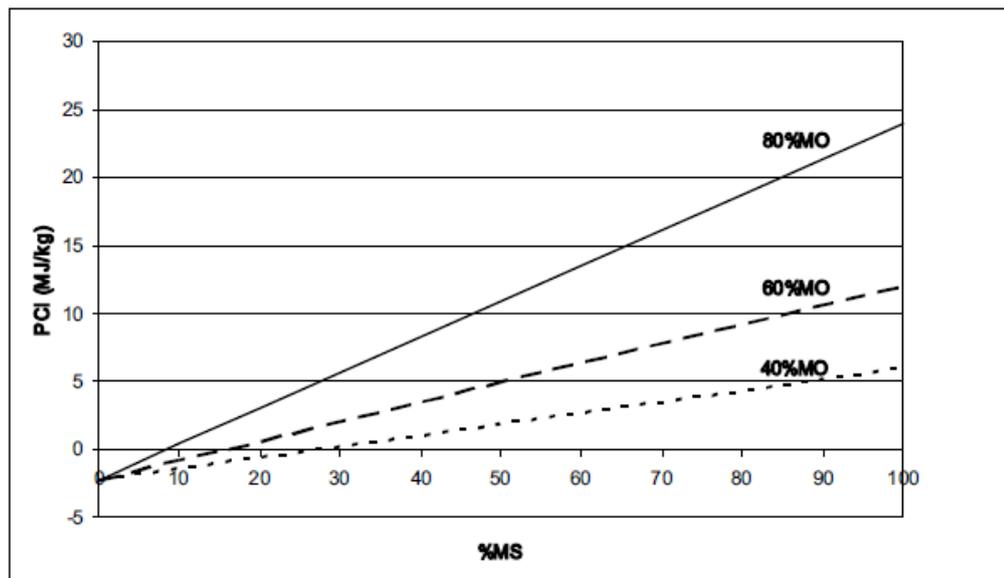


Fig. I.2. Pouvoir calorifique d'un déchet brut en fonction de la fraction MS

I.6. Les techniques de valorisation des déchets ménagers

I.6.1 L'incinération

L'incinération est un mode de traitement et d'élimination des OM très répandu qui permet la réduction d'environ 90 % du volume et 75 % de la masse des déchets et la destruction complète des bactéries. Elle conduit à la formation de scories, appelés mâchefers d'incinération des OM. Elle consiste à brûler les ordures dans un four spécialement adapté à

une température d'environ 850 °C en libérant de la chaleur et de la vapeur, des effluents gazeux (fumées), des mâchefers (30 %) et des cendres volantes (3 - 4 %) [6].

I.6.1.1 Principe de fonctionnement :

Dans un incinérateur, la combustion se déroule dans deux régions distinctes : A l'intérieur du lit circulant sur la grille et dans la région située au-dessus du lit où vont s'oxyder certains composés gazeux émis par ce dernier, en particulier les hydrocarbures et le CO (figure 3).. Il apparaît donc naturel de s'intéresser à chacune de ces zones. A l'intérieur du lit d'OM en combustion, différents processus de transformation de la charge prennent place. Ils incluent une phase de séchage, une étape de pyrolyse produisant un résidu carboné, une étape de combustion hétérogène de ce carbone résiduel et une d'oxydation des gaz de pyrolyse. Les transferts de chaleur se font par conduction, convection et par rayonnement à la surface et à l'intérieur du lit. La combustion est influencée par les caractéristiques du combustible (composition, humidité, PCI), ainsi que par l'environnement thermique à l'intérieur de l'incinérateur. En particulier, le flux de chaleur transmis par rayonnement au niveau des parois joue un rôle essentiel lors des étapes de séchage et d'ignition de la charge.

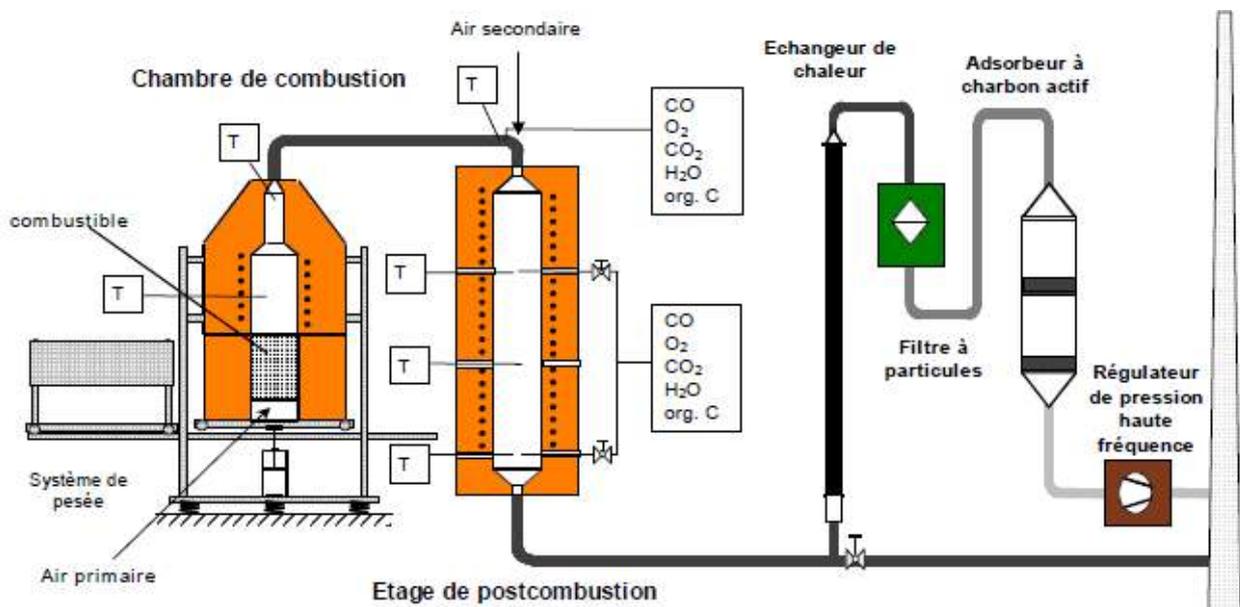


Fig I.3. Schéma d'un incinérateur pilote [7]

I.6.1.2 Avantages et Inconvénients de l'incinération

- **Avantages**

- L'incinération permet de tirer 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 diminue fortement le volume des déchets (90 % de réduction environ) et leur masse (70%environ).
- Le traitement est adapté à toutes sortes de déchets (dangereux et non dangereux, solides et liquides contrairement aux autres modes de valorisation (traitement biologique par exemple)

- **Inconvénients**

L'un des inconvénients majeurs de cette technologie est que ses rejets nécessitent un traitement très onéreux. Seuls les équipements d'épuration des fumées peuvent représenter plus de 30 % du coût total de l'incinérateur. Ainsi, les gaz produits au cours de l'incinération sont dépoussiérés avant d'être rejetés dans l'atmosphère. Plusieurs études ont associé de nombreux problèmes de santé au fait de vivre à proximité d'un incinérateur, ou de travailler dans une de ces installations. Parmi ces problèmes, on a pu répertorier des cancers (aussi bien chez les enfants que chez les adultes), des impacts nocifs sur le système respiratoire, des maladies du cœur, des perturbations du système immunitaire.

I.6.2 Le compostage

Le compostage est un mode de traitement particulièrement adapté aux déchets verts et conduit à la production d'un amendement organique utile pour les sols.

I.6.2.1Principe du compostage

Il est difficile de donner une définition précise et rapide du compost car selon le cas. Les objectifs et les caractéristiques qui lui sont attribués varient. On peut toutefois retenir que le compost est un produit de stabilisation et de traitement aérobie des déchets organiques putrescibles. Le compostage concerne tous les déchets organiques mais surtout les déchets solides et semi - solides. C'est un processus de transformation de matière organique fraîche en une substance organique humifiée, plus stable, appelée « compost » [8].

Le compost est aussi le résultat d'une technique biologique de dégradation de la matière organique qui au terme de son évolution donne des humus, facteurs de stabilité et de fertilité des sols, d'une activité microbiologique complexe survenant dans des conditions particulières. On peut également dire que le compost est un produit organique stable, hygiénique semblable à un terreau, riche en composés humiques et fulviques [9].

En conclusion on peut dire que le compost est le résultat d'un processus de transformation des déchets putrescibles en produit stable et basé sur le principe schématisé par la figure 4.

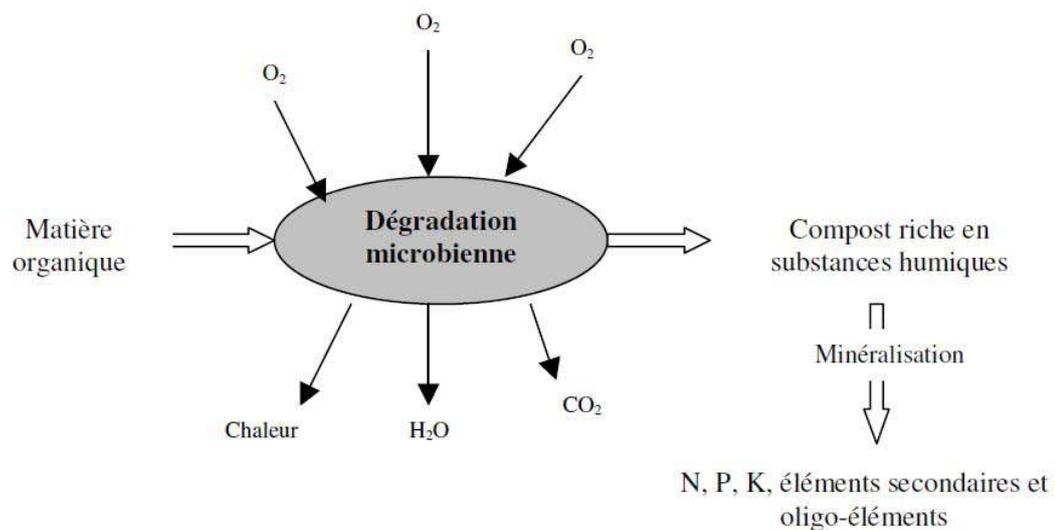


Fig. I.4. Schéma simplifié du processus de compostage

I.6.2.2 Avantages et Inconvénients du compostage

- **Avantages**

- Recyclage de la MO de 30 à 50 % de la masse des OM, et on peut atteindre + de 90 % de la masse des déchets, production du compost (amendement)
- Apport de MO pour la rétention d'eau

- **Inconvénients :**

- Débouchées du produit final
- Risque pour la santé (personnes en contact).
- Grandes quantités d'eau nécessaires.
- Coût de transport important : distance entre sources et site du compostage souvent importante.

I.6.3. La méthanisation

La méthanisation est un processus de digestion anaérobie permettant d'atteindre généralement un double objectif de valorisation énergétique par récupération de méthane (CH_4) et de stabilisation des déchets organiques en vue d'une valorisation matière par sa restitution partielle au sol [10]. Ce mode de traitement est applicable à une large gamme de matériaux organiques cellulotiques, bouse de bovins, fiente de volailles, lisier de porcins, excrément humain, résidus végétaux, fractions organiques fermentescibles. La digestion anaérobie est particulièrement intéressante, non seulement par le fait qu'elle contribue au traitement des déchets organiques et à la gestion de la pollution environnementale, mais aussi parce qu'elle offre, à travers ses 3 principaux produits (le biogaz, le digestât solide et le liquide du digesteur) [11]. La technologie de méthanisation transforme un problème coûteux en une solution profitable.

I.6.3.1 Les étapes de digestion anaérobie (méthanisation)

Les étapes intermédiaires à la formation de méthane sont ici résumées pour faciliter la compréhension de l'ensemble du processus et un contrôle effectif de la mise en opération des digesteurs anaérobies. La figure 5 présente l'ensemble des voies métaboliques, avec leurs groupes de micr-organismes respectifs, en 3 étapes principales :

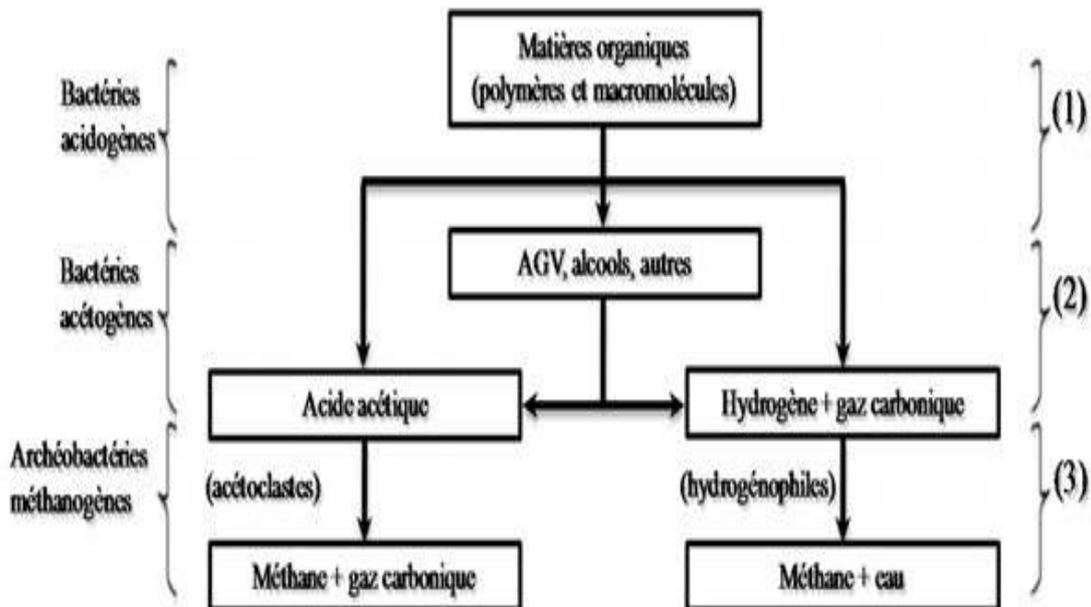


Fig. I.5. Voies métaboliques d'une méthanisation

- **L'hydrolyse et acidogènes :**

Cette étape est réalisée par 2 grands groupes de micro-organismes anaérobies stricts :

- 1- Les micro-organismes dits hydrolytiques (une grande diversité de bactéries et également des champignons dans le cas où l'étape d'hydrolyse serait effectuée en présence d'oxygène) produisent des enzymes hydrolytiques qui dégradent les particules solides et les polymères.
- 2- Les bactéries fermentatives réalisent l'acidogènes ou fermentation des substances monomères organiques en hydrogène.

- **L'acétogénèse**

Les vitesses réactionnelles de l'acétogénèse sont généralement lentes et soumises à des problèmes d'inhibition liée à la présence de l'hydrogène qui modifie l'équilibre thermodynamique des réactions.

- **La méthanogènes**

La méthanogènes est réalisée en condition anaérobie stricte, avec des potentiels d'oxydo-réduction très bas, et suivant 2 voies principales par des archées, du groupe des micro-organismes dits « extrémophiles ».

I.6.3.2 Avantages et Inconvénients de la méthanisation

- **Avantages**

- Valorisation du méthane contribue à la diminution des consommations en énergie fossile.
- Valorisation énergétique du biogaz contribue à la réduction de l'effet de serre et des odeurs (CO₂ effet de serre 21 fois moins grand que CH₄).
- Faible consommation énergétique, consommation de la chaleur produite pour le chauffage des digesteurs.

- **Inconvénients**

- Coûts d'investissement très élevés pour une petite structure.
- Émissions de H₂S, gaz à effet de serre.

Introduction

La pyrolyse des déchets suscite un intérêt grandissant comme alternative possible à l'incinération. Il s'agit de décomposer le déchet à détruire par l'action de la chaleur et en absence d'oxygène. On peut alors parler de décomposition thermique (thermolyse) endothermique du déchet dans une atmosphère où la combustion ne serait pas possible. Par extension on appellera également pyrolyse, les décompositions thermiques de matière organique réalisée en atmosphère pauvre en oxygène c'est dire en atmosphère nettement réductrice.

II.1 Définition

La pyrolyse est la conversion thermochimique du déchet en l'absence d'oxygène. Cette conversion commence à 300°C-550°C et va jusqu'à 700°C [12]. Le déchet se convertit en vapeurs condensable appelées goudrons (vapeur d'eau, aldéhydes, acides acétique, dérivés des sucres..), et en gaz incondensables (CO, H₂, CO₂, CH₄), et en résidu solide riche en carbone, qui contient également des matières minérales.

Les conditions de pyrolyse peuvent être optimisées pour maximiser la production de liquides, solide (char) ou du gaz dont la distribution dépend des conditions expérimentales appliquées, notamment la température et la vitesse de chauffage [12].

Selon le schéma réactionnel figure 6 [12], le déchet est dégradé selon trois réactions primaires compétitives (1,2 et 3). Elles produisent des gaz incondensables, des vapeurs condensables et du char. Les goudrons peuvent subir des réactions secondaires (4,5) pour reformer des gaz ou du char.

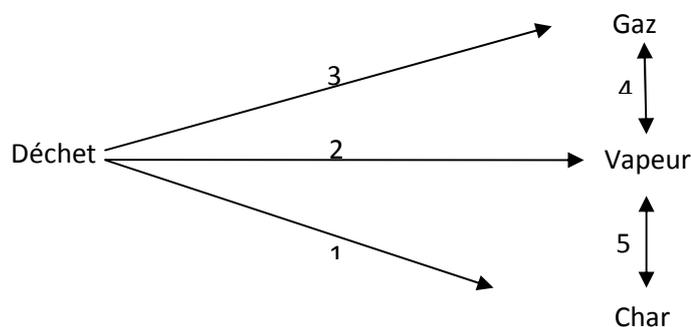


Fig II.6. Schéma réactionnel de la pyrolyse d'un déchet

Les rendements des trois principaux types de produits, et leur compositions chimiques, dépendent de la biomasse (déchet), mais également des conditions opératoire telles que: la température, le temps de séjour de la biomasse, etc.... [13]. La figure 7 suivante donne les réactifs et les produits lors de l'opération de pyrolyse.

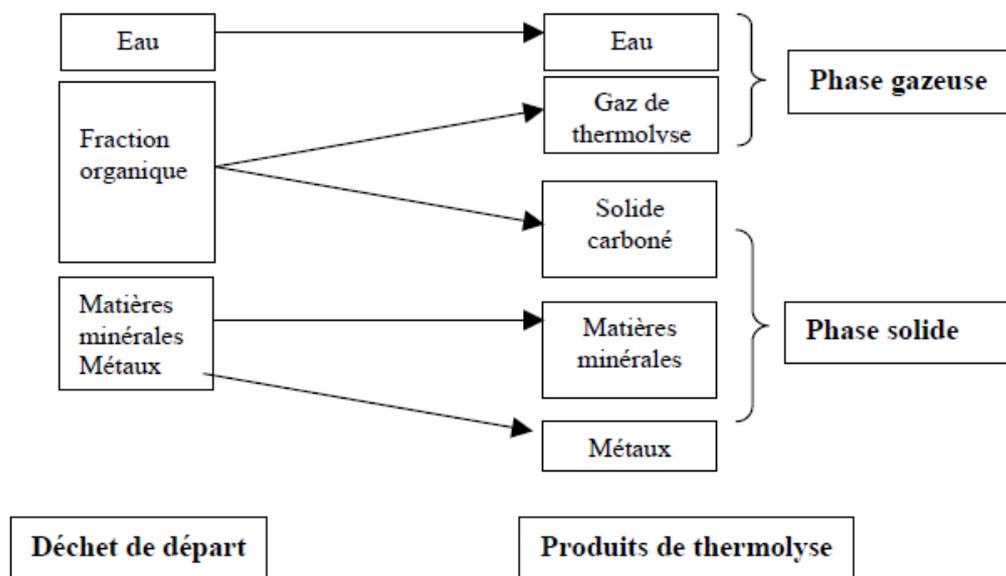


Fig II.7. Réactifs et Produits de la pyrolyse d'un déchet

II.2 Caractéristiques du procédé de pyrolyse

II.2.1 Installations de pyrolyse

Les procédés de pyrolyse s'opèrent en général dans trois types de fours :

❖ Fours verticaux

Les déchets s'écoulent à contre-courant avec les gaz chauds. Les déchets sont d'abord séchés puis pyrolysés. Les résidus sont récupérés en bas du four, tandis que les gaz sont évacués par le haut.

❖ Fours rotatifs

Semblables aux fours verticaux mais la rotation permet un meilleur mélange des déchets ainsi qu'une meilleure transmission interne de la chaleur. Par contre la pyrolyse en fours tournant est une technique délicate à maîtriser en raison des risques d'entrée d'air au niveau des joints tournants.

❖ Fours à lit fluidisé

Ils nécessitent un broyage et un criblage préalable des déchets

II.2.2 Types de pyrolyse

Les différentes technologies de pyrolyse existant peuvent se classer en fonction de la vitesse de montée en température, la température imposée sur le déchet, la pression dans le four et la technique de transfert de chaleur. Ainsi, on distingue deux grandes catégories qui sont la pyrolyse lente basse température et rapide haute température.

L'augmentation du taux de chauffe à basse température, oriente les réactions de pyrolyse vers une augmentation du taux de production du goudron au détriment des gaz et du charbon. Par contre, l'augmentation du taux de chauffage à haute température, oriente la réaction vers une augmentation du taux de production du gaz au détriment des autres produits.

II.2.2.1 Pyrolyse lente :

La pyrolyse lente est une décomposition thermique des déchets, elle se caractérise par une vitesse de chauffage du déchet faible en absence ou défaut d'oxygène ($<50\text{C}^\circ/\text{min}$), jusqu'à des températures de réaction inférieurs à 600°C [14]. Elle conduit classiquement à la formation de charbon, de condensables et de gaz incondensables (surtout du CO_2 et un peu de CO , H_2 et hydrocarbures). Ces fractions peuvent évoluer sous certaines conditions de température et de pression. L'objectif ultime de la pyrolyse lente est la production de charbon, d'où son appellation de procédé de carbonisation. Le rendement de charbon dépend des conditions de pyrolyse.

II.2.2.2 Pyrolyse rapide

La pyrolyse rapide se caractérise par une vitesse de chauffage élevée du déchet en absence d'oxygène. Les caractéristiques principales d'un procédé de pyrolyse rapide [14], sont :

- Une vitesse de chauffage et de transfert thermique élevée qui impose, pour la majorité des procédés, l'utilisation d'une matière première de faible granulométrie.
- Une température de réaction bien maîtrisée voisine de 500°C avec une température des vapeurs comprise entre 400 et 500°C .
- Un court temps de séjour des vapeurs de pyrolyse dans le réacteur ($<2\text{s}$) et un refroidissement rapide pour minimiser les réactions secondaires et tertiaires.

II.3 Procédés de pyrolyse lente des déchets ménagers actuellement développés

A titre d'exemple nous citons ci-après trois exemples de Procédés de pyrolyse lente actuellement développés.

II.3.1 Le Procédé de pyrolyse Nesa

Ce procédé de pyrolyse est basé sur un réacteur à étages multiples (figure 8). Dans le réacteur, les produits à traiter circulent d'étage en étage, de haut en bas, tandis que les gaz circulent généralement à contre-courant. Sur les étages supérieurs, la matière est séchée par l'action des gaz provenant des zones inférieures. Dans cette zone, la température des gaz diminue par transfert de leur chaleur sensible aux produits à traiter. Après avoir été séchés, les produits sont ensuite chauffés sous atmosphère pauvre en oxygène. Dans ces conditions, les matières organiques sont volatilisées pour produire un gaz combustible. La chaleur nécessaire au procédé est produite par la combustion de tout ou d'une partie des matières volatilisées et éventuellement d'un combustible d'appoint. Après l'étape de pyrolyse, les produits ne contiennent plus que des matières minérales et du carbone fixe.

La combustion du carbone fixe est réalisée dans les étages inférieurs du réacteur et requiert un excès d'air. Une partie des gaz provenant de la combustion du carbone fixe remonte vers les zones supérieures, alors que l'autre partie est soutirée et renvoyée directement à la chambre de Postcombustion avec les gaz aspirés du sommet du réacteur. Le procédé de pyrolyse, suivie de la combustion du carbone fixe résiduel permet la séparation des solides et des gaz. Les gaz sont intimement mélangés à l'air par leur admission tangentielle dans la chambre de postcombustion conçue pour assurer l'oxydation complète des matières volatiles à une température supérieure à 850°C et répondre aux normes légales[15].

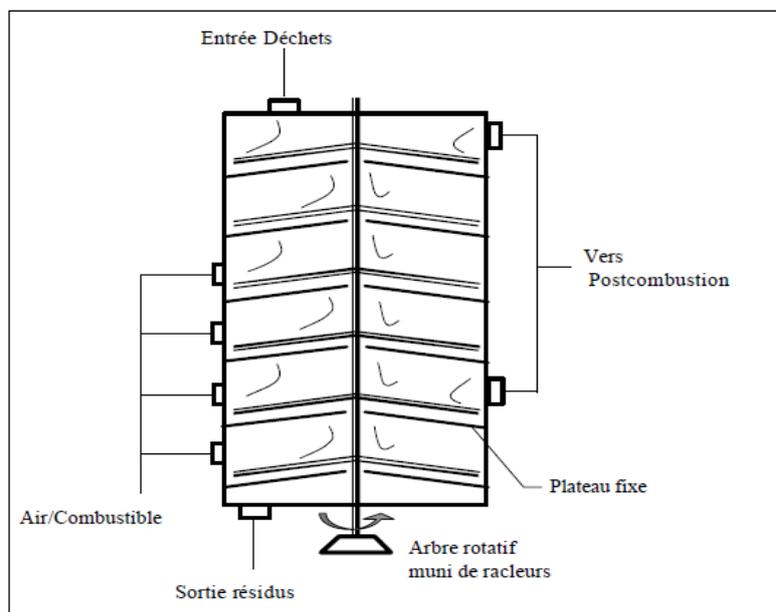


Fig II.8. Schéma de principe du procédé Nesa

II.3.2 Le Procédé de pyrolyse Thide

Le procédé de pyrolyse Thide comporte quatre étapes principales :

- Préparation des déchets
- Phase de pyrolyse
- Traitement des solides carbonés.
- Valorisation énergétique

Le réacteur est un cylindre rotatif équipé d'une double enveloppe fixe en acier réfractaire (figure 9) dans laquelle circulent des fumées chaudes. L'intérieur du cylindre est ainsi porté à une température voisine de 500°C. Au cours de leur progression dans ce cylindre chaud, les déchets subissent une dégradation thermique qui conduit à la formation du gaz de pyrolyse et des solides carbonés. Le gaz, constitué de gaz légers non-condensables, de vapeurs lourdes type goudrons et de vapeur d'eau. Il est extrait du four en continu, dépoussiéré puis dirigé vers une chambre de combustion dans laquelle il est brûlé et produit les fumées chaudes (1100 °C) utilisées pour le chauffage du four[16]. Ce procédé a été développé pour traiter les moyennes capacités (de 20 à 60 000 tonnes/an).

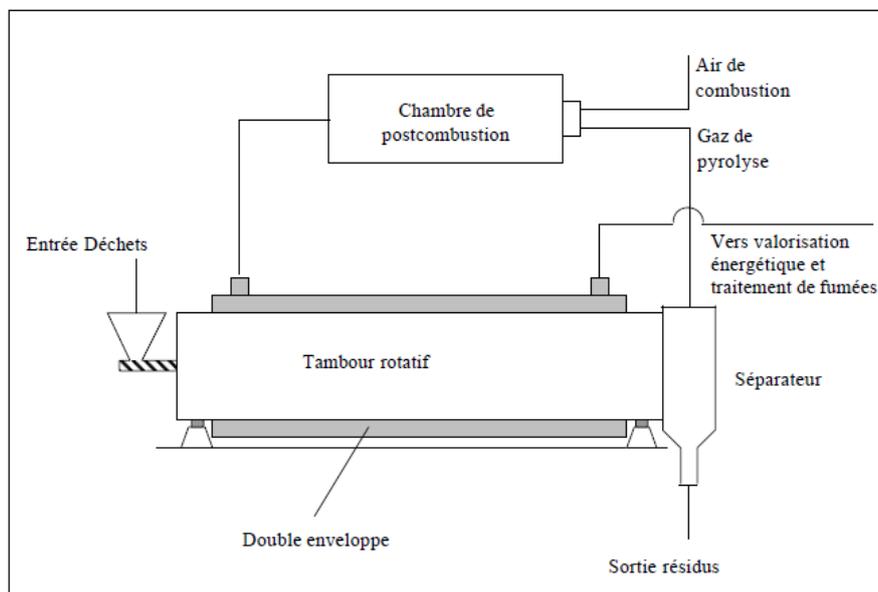


Fig II.9. Schéma de principe du procédé Thide

II.3.3 Le Procédé de pyrolyse WGT

Les matériaux d'alimentation sont soumis à une température élevée dans un environnement en défaut d'oxygène. Avant l'introduction de la matière à traiter, le réacteur est purgé à l'aide

d'un gaz inerte, tel que l'azote. L'alimentation est faite dans un tambour rotatif cylindrique horizontal chauffé en double enveloppe à une température variant entre 750°C et 850 °C (figure 10).

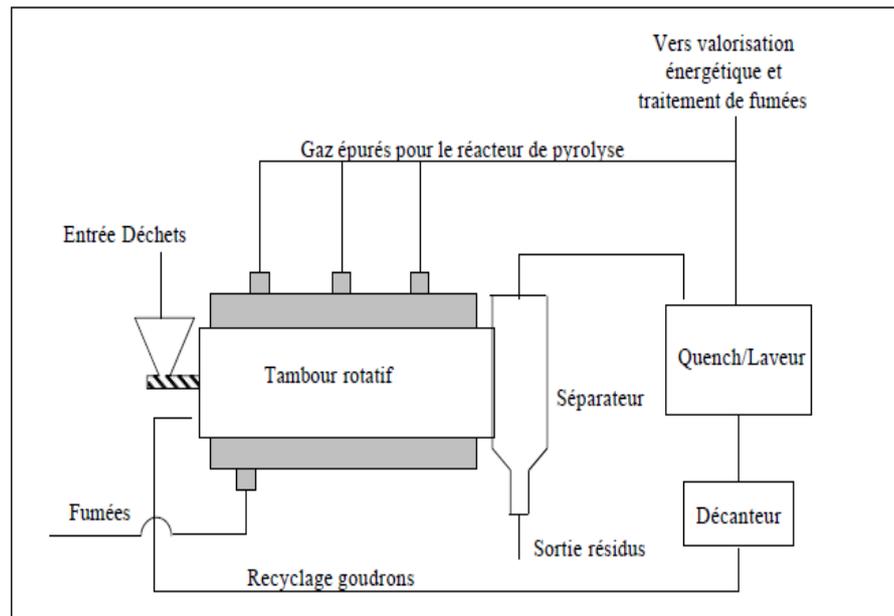


Fig II.10. Schéma de principe du procédé WGT

II.4 Procédés de pyrolyse rapide des déchets ménagers

II.4.1 Procédé PyRos

Le procédé PyRos est un procédé de pyrolyse basé sur un réacteur de pyrolyse cyclonique (figure 11) avec une filtration à chaud des gaz (séparateur de particules rotatif). Un transport pneumatique (gaz inerte) assure l'introduction des particules dans le réacteur. La force centrifuge projette les particules à la périphérie du cyclone où le phénomène de pyrolyse a lieu. Les gaz produits sont évacués par le centre du cyclone à travers le filtre tournant. La température moyenne du procédé varie entre 500-600 °C. Le temps de séjour des gaz dans le réacteur est de 0.5 à 1 sec. Les caractéristiques du réacteur de PyRos sont :

- Taux élevé de transfert thermique
- Faible temps de séjour des gaz,
- Possibilité de contrôle du temps de séjour des particules,
- Conversion des grandes particules,
- Production de gaz filtré,

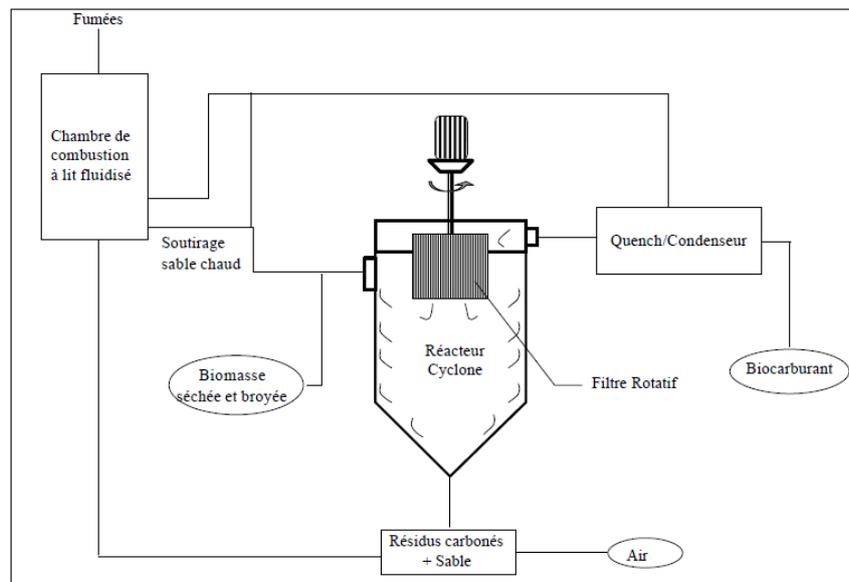


Fig II.11. Schéma de principe du procédé PyRos

II.4.2 Procédé BTG

Le réacteur à cône tournant (300 tr/min) est intégré dans la partie basse d'un système de circulation de sable chaud d'une chambre de combustion du coke, à lit fluidisé circulant (figure 12). Des particules de biomasse à température ambiante et les particules chaudes de sable sont introduites dans la partie inférieure du cône. L'effet rotatif du cône permet leur mélange et leur entraînement vers le haut. Dans ce type de réacteur, le chauffage rapide et le court temps de séjour des gaz peuvent être réalisés. Une partie de la charge est brûlée pour fournir la chaleur nécessaire au processus de pyrolyse [16].

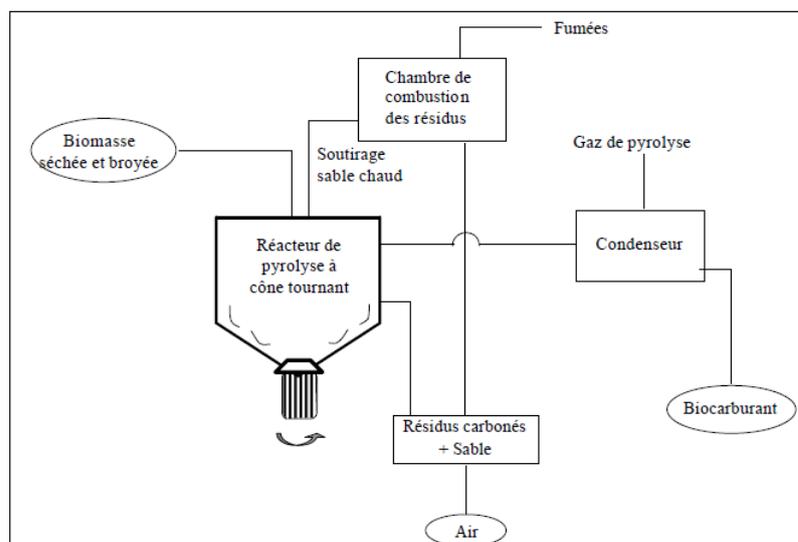


Fig II.12. Schéma de principe du procédé BTG

II.4.3 Procédé Okadora

La pyrolyse rapide s'opère dans un «cyclone» dans lequel la centrifugation est obtenue par une action mécanique d'un plateau tournant muni d'ailerons (figure 13) qui procurent un mouvement ascensionnel. Le chauffage est assuré par une double enveloppe. Ce dispositif permet le traitement de produits très humides ou slurries[16].

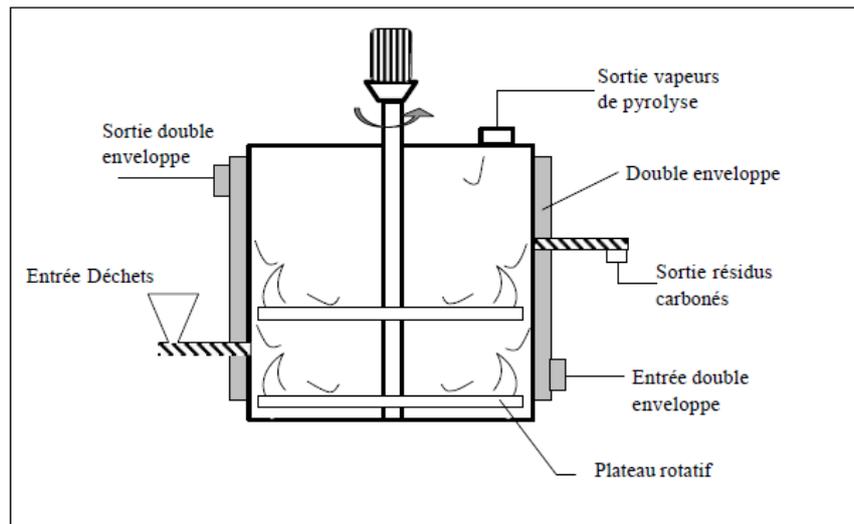


Fig II.13. Schéma de principe du procédé Okadora

II.5. Avantages et inconvénients du procédé de pyrolyse :

• Avantages

- Volume de fumées faible et peu polluées, traitement simplifié,
- Emission de gaz carbonique (principal responsable de l'effet de serre) réduite,
- Les dioxines sont totalement éliminées (absence d'oxygène, captage du chlore),
- Souplesse d'exploitation, supporte des variations de charge de 25 à 125 %,
- Unités de thermolyse modulables, elles peuvent être adaptées pour traiter des volumes de 10.000 à 50.000 tonnes par an.
- La technique de la thermolyse se caractérise par une grande souplesse de fonctionnement (multi matériaux, multi capacités...), et produit moins de résidus ultimes et moins de pollution. Cet argument aura de plus en plus d'importance.
- Valorisation énergétique, elle peut fournir de l'énergie sous forme de gaz et de coke.
- Coût d'une unité de thermolyse simple, le tiers du prix d'un incinérateur.

- **Inconvénients**

- Pouvoir calorifique du résidu solide, le coke de pyrolyse (combustible relativement pauvre).
- Concentration des polluants (type métaux lourds, ...) dans le coke de pyrolyse
Surcoût d'environ 3 à 5% sur le coût global de traitement.
- Valorisation du coke de pyrolyse, résultant d'un déchet, à l'heure actuelle dans des installations relevant de la réglementation sur l'incinération ou la co-incinération (respect des normes d'émissions atmosphériques...nécessitant des investissements (traitement adapté, mesures,)).

Introduction

Ce chapitre sera consacré au développement d'un modèle de pyrolyse d'un déchet correspondant à la dégradation thermique de la matière organique en l'absence d'oxygène. Le procédé de pyrolyse utilise un lit fixe contenant les particules du déchet traversé par un courant gazeux inerte à haute température.

III.1 Etude bibliographique

En générale, la pyrolyse de la biomasse est généralement modélisée par une cinétique apparente sous différentes configurations. Les procédés modernes de pyrolyse utilisent des températures plus élevées pouvant récupérer l'énergie des produits volatils. Nous citons ci-après quelques travaux antérieurs.

Morel et al [17] ont proposé une conversion critique pendant la gazéification du coke. Ces auteurs ont introduit des changements de dimensions particulières dus à la désintégration de la structure du solide.

D'autre part, Villermaux et al [18] ont décrit les effets de rétrécissement, en supposant que la densité sur solide reste constante. Ces auteurs ont représenté le processus de pyrolyse par une réaction unique, en ignorant les réactions secondaires.

Zanzi et al [19] ont étudié la pyrolyse d'un grignon à haute et basse température. Ils ont montré qu'à haute température, l'énergie récupérée dans le produit final est plus importante que celle obtenue dans le cas d'une basse température.

Aussi, Ghabi et al [20] ont modélisé la pyrolyse des noyaux d'olive dans un lit fixe bidimensionnel. Les résultats numériques obtenus sont en bon accord avec les résultats expérimentaux présentés dans la littérature. Ainsi, cette configuration du lit fixe pour la pyrolyse d'un déchet ménager sera considérée dans la suite de cette étude.

III.2 Pyrolyse d'un déchet dans un lit fixe

Le dispositif représenté en figure III.1, concerne l'opération continue de pyrolyse d'un déchet ménager en lit fixe. Afin de faciliter la modélisation numérique du processus de pyrolyse, les particules de déchet sont supposées sphériques de diamètre 4-6mm, disposées dans une enceinte cylindrique verticale. Leur chauffage est assuré par un courant vertical ascendant de gaz inerte chaud à une température de 523°C. La hauteur du lit et le diamètre de la section de l'enceinte sont respectivement 15 et 30cm [21].

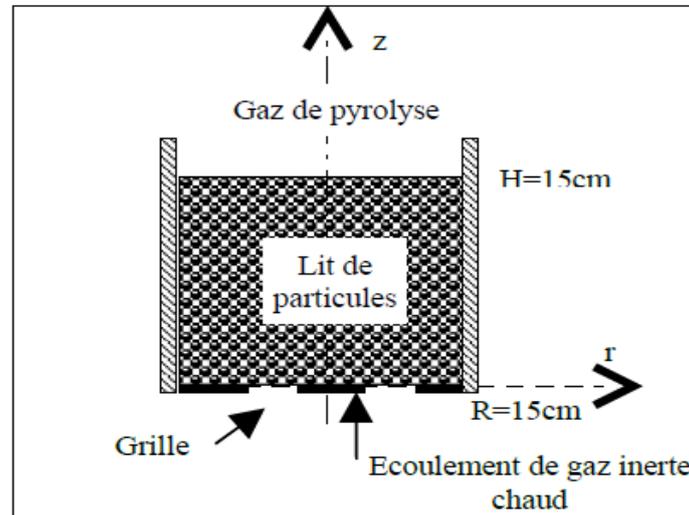


Fig.III.1 Pyrolyse d'un déchet en lit fixe

III.2.1 Hypothèses du modèle

Pour une simplification du modèle, plusieurs hypothèses sont considérées :

- les particules du déchet gardent un volume constant au cours de leur dégradation thermique
- les parois de lit sont adiabatiques
- le régime du procédé est stationnaire
- la vitesse de chauffage est constante

III.3 Développement des équations du modèle

III.3.1 Modèle cinétique de la pyrolyse

La dégradation thermique de la biomasse est modélisée par sa décomposition en trois produits; gaz - regroupant le CO, le CO₂, le CH₄ et le H₂ - goudrons et coke - le résidu solide. Les goudrons subissent également des réactions secondaires produisant gaz et coke [19]. C'est la compétition entre ces réactions qui fixe l'équilibre final. Le mécanisme global est synthétisé par la figure III.2

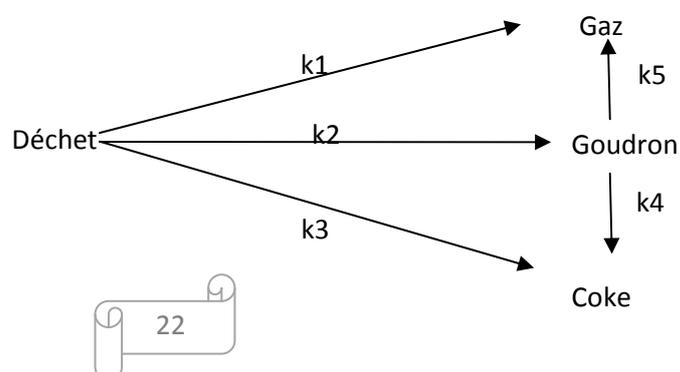
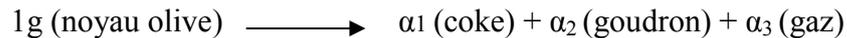


Fig.III.2 Modèle cinétique de la Pyrolyse

En absence de cinétique réactionnelle propre à la pyrolyse d'un déchet ménager, nous utilisons la cinétique proposée pour le noyau d'olives [21]. Le mécanisme réactionnel est constitué des deux réactions suivantes dans lesquelles α_1 , α_2 , α_3 , α_4 et α_5 représentent des coefficients stœchiométriques.



Les taux de réaction correspondants sont respectivement :

$$W_{pyr} = (1-y_c)^\beta \rho_s A_{pyr} \exp(-E_{py}/(RT_s)) \quad (III.1)$$

$$W_{t=} \rho_s A_t (y_t)^\gamma \exp(-E_t/RT_s) \quad (III.2)$$

avec

- W Taux de réaction (kg/m³/s)
- E Energie d'activation (J/mol)
- A Facteur préexponentiel (s⁻¹)
- y Fraction massique
- T Température (K)
- R Constante des gaz parfaits (J/K/mol)
- ρ Masse volumique (kg/m³)
- β, γ Coefficients
- t Goudron
- Pyr Pyrolyse,
- c Coke
- g Gaz
- s Solide

Les valeurs de ces paramètres sont rassemblées dans le tableau III.1 suivant

Tableau III.1 Paramètres de la cinétique réactionnelle [18] .

A_{py}	1.9510^6 s^{-1}	ΔH_t	42 KJ/kg	α_1	0.225
A_t	1.310^5 s^{-1}	ΔH_{py}	255 KJ/kg	α_2	0.120
E_{py}	9.2410^4 J/mol	M_g	31kg/k .mol	α_3	0.5
E_t	1.0710^5 J/mol	M_t	145 kg/k.mol	α_4	0.5
β	0.95	γ	0.95	α_5	0.655

III.3.2 Bilan de matière global sur le gaz

Le bilan global entrée- sortie procédé de pyrolyse donne :

$$m_{\text{entrée}} - m_{\text{sortie}} + m_{\text{prod}} = m_{\text{acc}} = dm/dt \quad (\text{III.3})$$

En considérant le régime est permanent :

$$dm/dt=0 \quad (\text{III.4})$$

D'autre part le flux de matière s'écrit:

$$\phi = \rho v \quad (\text{III.5})$$

En supposant que le système est unidirectionnel

$$(\phi_x, \phi_y) = 0 \quad (\text{III.6})$$

Le bilan de matière s'écrira :

$$[\phi_{z(z)} - \phi_{z(z+dz)}] \varepsilon dx dy + m_{\text{prod}} = 0 \quad (\text{III.7})$$

ε étant la porosité du lit

En divisant l'équation (III.7) par ($\varepsilon dx dy$) et en exprimant le flux de matière par l'équation (III.5) on aura :

$$d(\rho_g \cdot v) / dz = m_{\text{prod}} \quad (\text{III.8})$$

En supposant pour ρ_g une valeur moyenne constante dans l'intervalle [300-800 K], l'équation (III.8) devient

$$\rho_g \cdot d(v) / dz = \dot{m}_{\text{prod}} \quad (\text{III.9})$$

III.3.2.1 Bilan de conservation des espèces en phase gazeuse

Le bilan de matière partiel sur l'espèce a s'écrit :

$$\delta/\delta t(\rho_g \varepsilon y_a) - \text{div}(\phi_{\text{tot}} y_a \varepsilon) + \dot{m}_a = 0 \quad (\text{III.10})$$

En considérant les conditions posées ci-dessus, on aura :

$$- \text{div}(\phi_a \varepsilon) + \dot{m}_a = 0 \quad (\text{III.11})$$

avec

$$\phi_a = \rho_g v + J_a \quad (\text{III.12})$$

J_A : terme de diffusion.

Soit :

$$\phi_a = \rho_g v - \rho_g D_{\text{eff}} (\text{grad } y_a) \quad (\text{III.13})$$

La substitution des équations (III.11) et (III.12) donne

$$\varepsilon \rho_g v \, dy_a/dz = D_{\text{eff}} \rho_g (d^2 y_a/dz^2) + m_a \quad (\text{III.14})$$

III.3.3 Bilan de matière sur le solide

La décomposition du déchet solide et du coke peut s'écrire :

$$\rho_s (dy_s/dz) = -(r_1 + r_2 + r_3) \quad (\text{III.15})$$

$$\rho_c (dy_c/dz) = (r_3 + r_4) \quad (\text{III.16})$$

r : vitesse réactionnelle du modèle cinétique de la pyrolyse

En supposant un ordre nul pour les vitesses r , on aura :

$$\rho_s (dy_s/dz) = -(k_1 + k_2 + k_3) \quad (\text{III.17})$$

$$\rho_c (dy_c/dz) = (k_3 + k_4) \quad (\text{III.18})$$

La constante de vitesse k est donnée par la relation d'Arrhenius

$$k = A \exp(E_a/RT) \quad (\text{III.19})$$

Le tableau III.2 donne les constants de vitesse k_1, k_2, k_3, k_4, k_5

Tableau III.2 Constantes k de la cinétique réactionnelle [21].

k_1	8.10^{-3}
k_2	$4.2 .10^{-3}$
k_3	$3.7 .10^{-3}$
k_4	$3.4.10^{-3}$
k_5	$6..10^{-3}$

III.3.4 Bilan de quantité de mouvement

La conservation de la quantité de mouvement du lit fixe poreux peut être établie par la loi de Darcy généralisée:

$$v = \kappa_R (\delta P / \delta z) / \mu_g \quad (\text{III.20})$$

La pression P est évaluée par l'équation d'état de s gaz parfaits.

$$\rho_g = PM_g / T_g \cdot R \quad (\text{III.21})$$

La combinaison des équations (III.20) et (III.9) donne

$$\rho_g \kappa_R / \mu_g (d^2 P / dz^2) = m_{\text{prod}} \quad (\text{III.22})$$

III.3.5 Conservation du bilan d'énergie

- **Phase gazeuse**

En négligeant le flux thermique par rayonnement et en supposant les parois du lit adiabatiques, le bilan thermique global donne :

$$\rho_g v c_{p_g} dT_g / dz = \lambda_g (d^2 T_g / dz^2) + h_{gs} S (T_s - T_g) + \sum m_a h_a \quad (\text{III.23})$$

La conductivité thermique des particules de gaz λ_g étant très faible, l'équation (III.23) devient :

$$\rho_g v c_{p_g} dT_g / dz = h_{gs} S (T_s - T_g) + \sum m_{a,g} h_{a,g} \quad (\text{III.24})$$

m_a taux de production de l'espèce a au cours de la pyrolyse

c_{p_g} la chaleur spécifique du gaz

h_{gs} coefficient de transfert de chaleur entre la phase gaz-solide

$h_{a,g}$ enthalpie de l'espèce a gazeuse

- **Phase solide :**

L'équation de conservation de l'énergie dans la phase solide est :

$$\text{div}(\lambda_s \text{grad } T_s) + h_{gs} S (T_g - T_s) = \sum \dot{m}_{a,s} h_{a,s} + \Delta H_{py} W_{py} \quad (\text{III.25})$$

En écrivant la conductivité thermique des particules solides λ_s sous la forme:

$$\lambda_s = a' T_s + b' \quad (\text{III.26})$$

L'équation (III.25) devient

$$\lambda_s (d^2T_s/dz^2) + (a'(dT_s/dz) + b') + h_{gs}S(T_g - T_s) = \sum \dot{m}_{a,s} h_{a,s} + \Delta H_{py} W_{py} \quad (\text{III.27})$$

ΔH_{py} étant l'enthalpie de la réaction

$h_{a,s}$ enthalpie de l'espèce a solide

III.3.6 Conditions initiales et aux limites :

Condition initiales :

A $Z=0$ $y_g=0$, $y_c=0$, $y_t=0$ $y_s=1$, $T_g=303$ K, $T_s=303$ K .

pour $z=0$, $T_g=T_\infty=303$ K

Cas du lit fixe : $\lambda_g \delta T_g / \delta z = h_s (T_s - T_\infty)$, $T_g = T_{pyr}$, $\lambda_s \delta T_s / \delta z = h_s (T_s - T_\infty)$

pour $z = H$: on considère un régime établi où les variables ont des gradients nuls

III.3.7 Calcul des Propriétés physiques

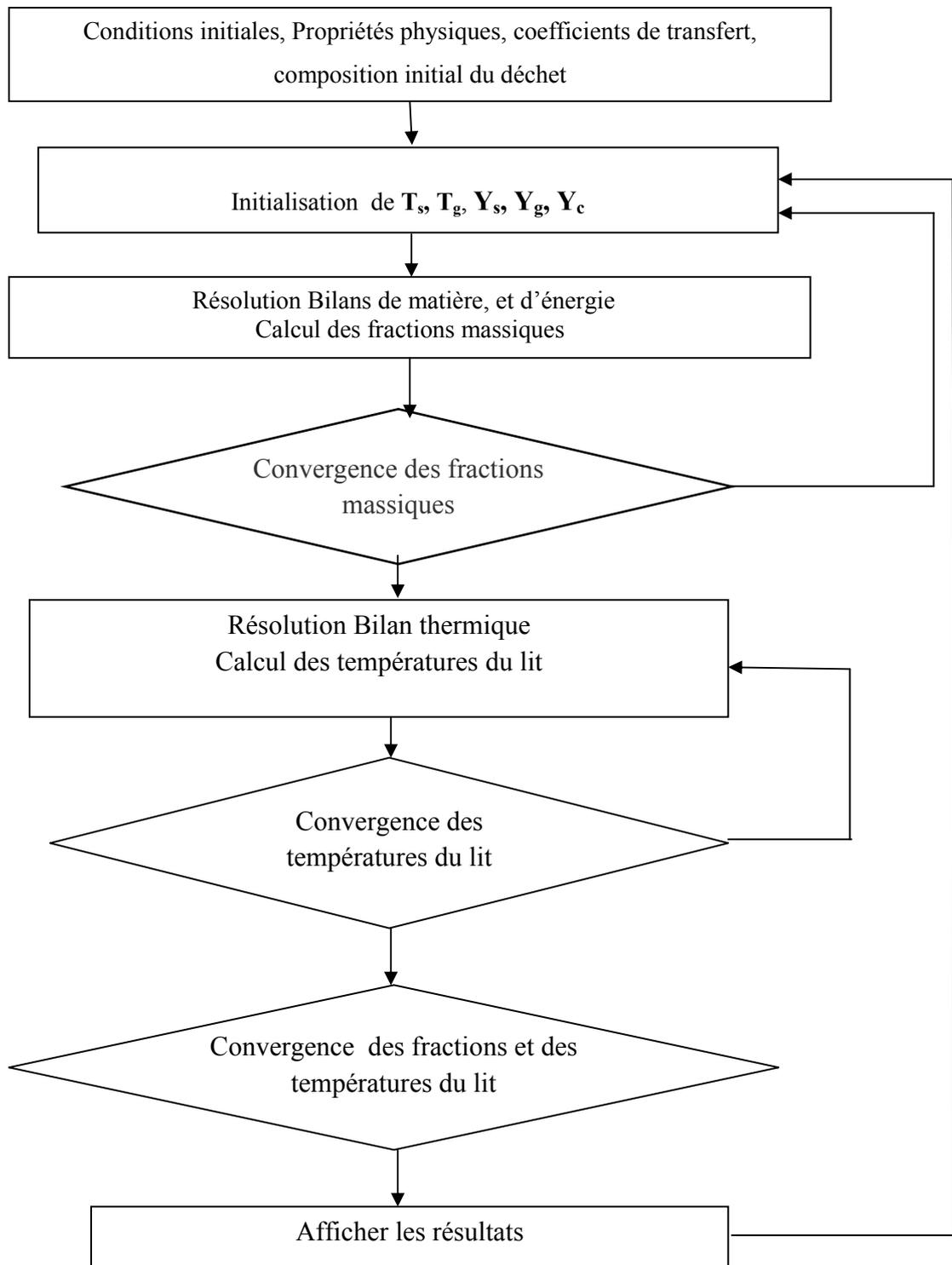
Les propriétés physiques et leurs corrélations semi-empiriques de calcul des différentes substances utilisées lors de notre modélisation numérique sont données en annexe1 [21].

III.4 Résolution numérique

La résolution du système d'équations différentielles qui décrit le fonctionnement du lit fixe nécessite donc la connaissance des variables dépendantes soit à l'entrée ou à la sortie du lit.

Les variables dépendantes du problème sont les températures (T_s , T_g) qui interviennent dans les bilans thermiques, les fractions massiques (Y_s , Y_g , Y_c) qui interviennent dans le bilan de matière, la vitesse et la pression du gaz. La seule variable indépendante, variable d'intégration est la position z depuis l'entrée du lit. La vitesse du gaz a l'entrée de lit sera fixée $v=5$ cm/s [22]. De multiples codes de calcul existent pour intégrer ce type de système différentiel. Nous utilisons la méthode de relaxation qui est beaucoup plus robuste pour résoudre ce type de problème. On peut dire que la méthode de relaxation remplace le problème aux équations différentielles par un problème aux différences finies. Nous utilisons le solveur BVP4C incorporé dans le logiciel Matlab [23], pour résoudre le système d'équations.

La résolution des équations des bilans relatifs à un écoulement unidirectionnel en régime stationnaire fournit les profils de température ainsi que les fractions massiques des produits solides et gazeux de la pyrolyse. La figure III.3 représente l'organigramme de résolution du modèle.

**Figure III.3. Organigramme de résolution**

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les principaux résultats et leurs interprétations. Dans le but de valider notre modèle, les résultats sont comparés par rapport à ceux de la littérature [24, 25].

IV.1. Evolution des paramètres opératoires en fonction de la hauteur du lit

Les principaux paramètres qui influent sur le rendement de la pyrolyse sont :

- la température à laquelle se produit la conversion,
- la vitesse de chauffe de la biomasse
- et la taille des particules.

IV.1.1 La température du solide et du gaz

Les évolutions des températures du solide et du gaz de pyrolyse produit à travers le lit sont présentées sur les figures IV.1 et IV.2. Cette figure met en évidence la propagation progressive du flux thermique à travers le lit en laissant en trace des particules des déchets traitées à des températures jusqu'à 800 K. A travers cette représentation, on constate des valeurs de températures pour le gaz supérieures par rapport à celles du solide. A titre d'exemple la température du solide pour $z=0.1\text{m}$ est de 600°C alors que pour le gaz, elle est proche de 700K , soit un écart de 100K .

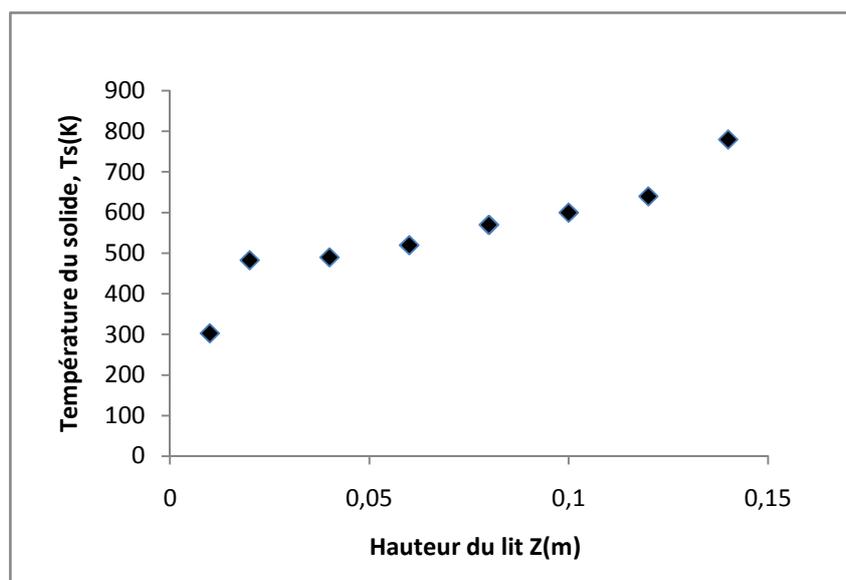


Fig. IV.1. Evolution de la température du solide en fonction de la hauteur du lit

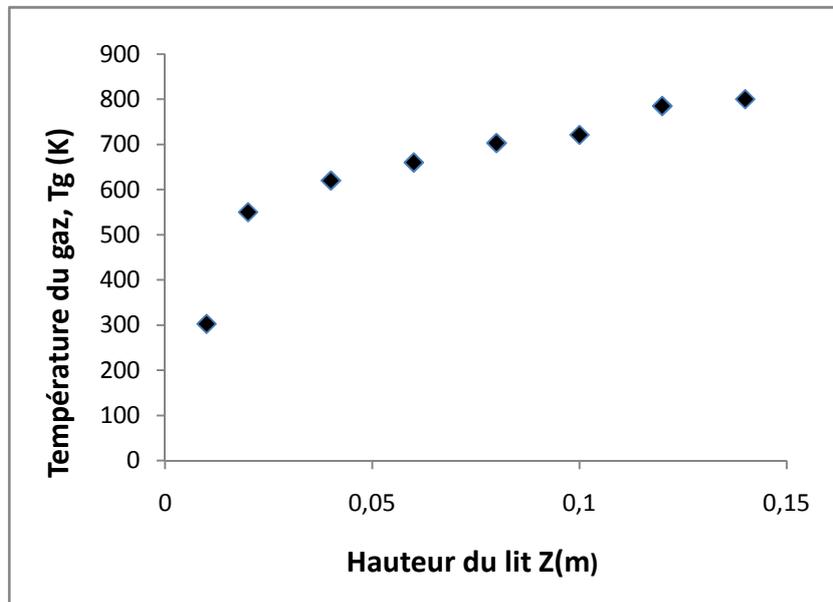


Fig. IV.2. Evolution de la température du gaz produit en fonction de la hauteur du lit

IV.1.2 Fraction massique du solide

La figure IV.3 représente l'évolution de la fraction massique du solide en fonction de la hauteur du lit. On observe une diminution très rapide pour la zone $[0.025, 0.065]$ m, correspondant à l'intervalle de température compris entre 450 et 600 K, ce qui conduit à une conversion en gaz + char très importante.

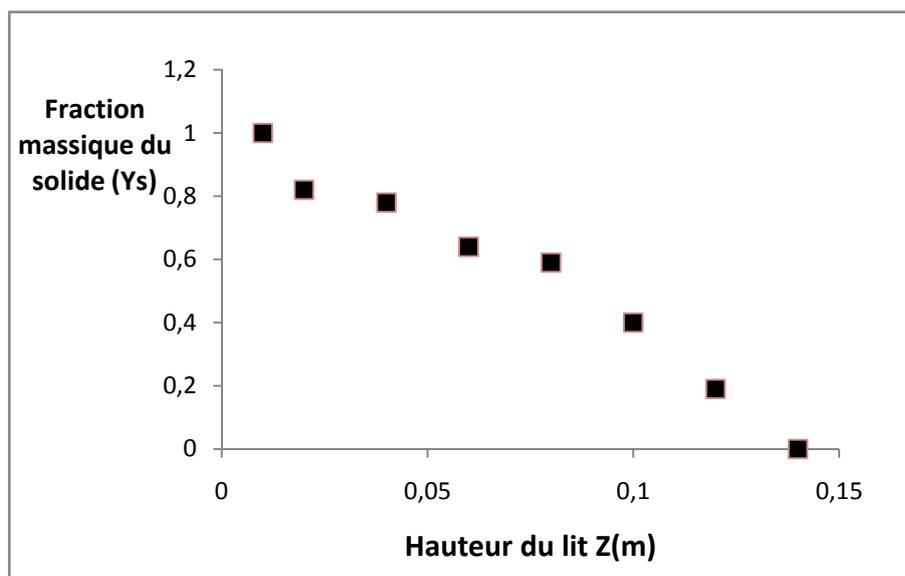


Fig. IV.3. Evolution de la fraction massique du solide

IV.2 Rendement de pyrolyse

Une évolution caractéristique des rendements des produits de pyrolyse en fonction de la hauteur du lit est présentée sur les figures (IV.4, IV.5). L'augmentation de la température d'un échantillon de biomasse provoque la rupture de liaisons chimiques, ce qui conduit à la formation de matières volatiles qui se dégagent, avec pour conséquence une diminution progressive de la masse de l'échantillon.

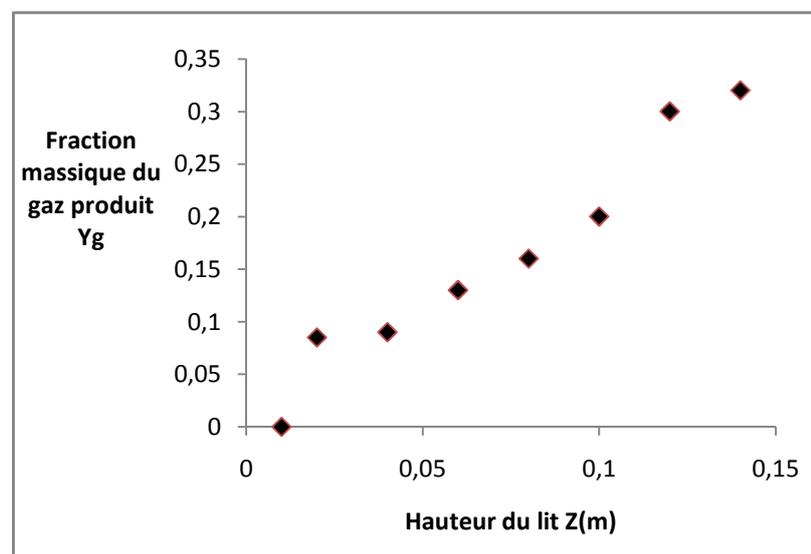
Pour une zone du lit comprise entre $z=0.001$ m et $z=0.05$ m, correspondant à des températures comprises entre 303 et 550 °C, de nombreuses fonctions oxygénées sont converties, ce qui provoque notamment le dégagement de molécules oxygénées, telles que H₂O, CO et CO₂. Simultanément, la structure de la matrice solide devient de plus en plus aromatique, ce qui explique que les atomes de carbone se concentrent dans le char, tandis que les teneurs en oxygène et en hydrogène diminuent. Cette tendance, observée dans de nombreux travaux.

Par ailleurs, le rendement de la pyrolyse augmente avec la hauteur du lit en fonction des paramètres opératoires appliqués. Les principales molécules de gaz incondensables formées sont CO₂ et CO. Notons que les compositions volumiques des gaz de pyrolyse pendant le traitement thermique des déchets sont (H₂, O₂, N₂, CO, CH₄, CO₂) et l'oxygène.

A travers la figure (IV.5) nous constatons que pour une température de 780 K plus de 75% de la masse initiale est convertie en coke.

L'évolution de la fraction massique de gaz pour différentes zones résulte de sa production local et de son transport diffusif et convectif. Nous remarquons aussi que la production de gaz de pyrolyse est augmentée avec l'augmentation de la température.

Figure IV4. Evolution de la fraction massique de gaz de pyrolyse



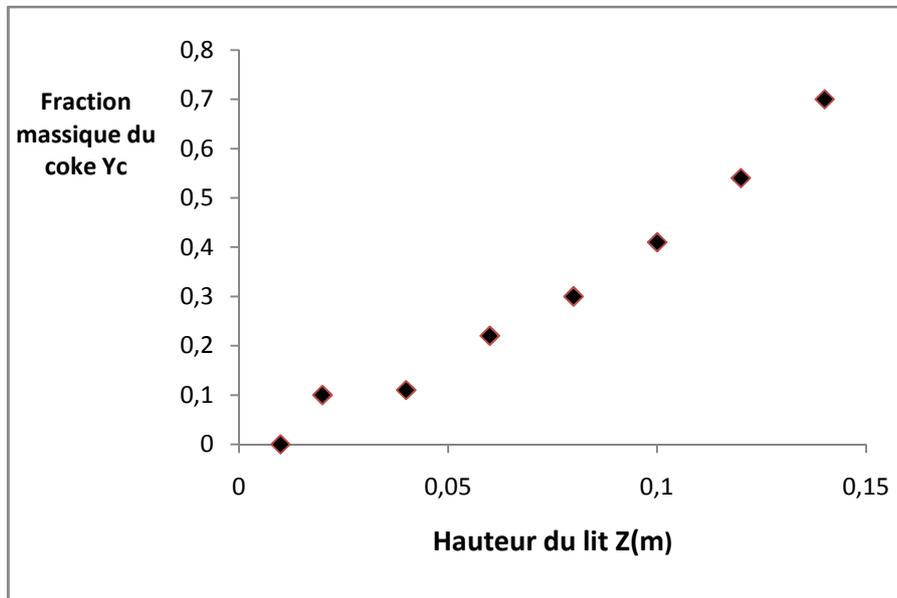


Figure IV5. Evolution de la fraction massique de coke

Pour les autres paramètres qui influent sur le rendement de la pyrolyse (la taille des particules, la vitesse de chauffe) on n'a pas beaucoup de temps pour faire la simulation mais d'après la littérature on prend l'effet de ces paramètres sur le rendement de la pyrolyse.

Influence de la vitesse de chauffe :

La vitesse de chauffe influe sur la prépondérance des différents mécanismes primaires et sur les rendements des produits de pyrolyse. Il a été démontré qu'une vitesse de chauffe faible favorise la carbonisation donc les rendements en char tandis qu'une vitesse de chauffe très élevée ($> 100 \text{ }^\circ\text{C/s}$) facilite la production des matières volatiles par dépolymérisation ou fragmentation.

Lorsque la particule de biomasse est chauffée lentement et qu'un type de liaison chimique est rompu, des réactions de réarrangement se produisent dans les polymères. Celles-ci ont pour conséquence la formation d'une matrice thermiquement plus stable, ce qui conduit à des rendements élevés en char.

Lorsque la particule est chauffée rapidement, dans le cas où la température de conversion n'est pas propice aux réactions de fragmentation, ce qui permet d'obtenir des rendements en huile de pyrolyse pouvant atteindre 75 %.

Taille des particules :

L'augmentation de la taille des particules a pour effet une diminution des rendements en huile de pyrolyse, associée à une augmentation de ceux en char et en gaz, c'est-à-dire le même effet que celui observé lorsque la vitesse de chauffe diminue.

Dans le cas des particules fines est négligeable, ce qui implique une température homogène au sein de la particule. Les réactions primaires de pyrolyse se produisent simultanément dans toute la particule, ce qui limite les possibilités de réarrangement au sein de la matrice et donc les rendements en char est important.

Conclusion générale

Les traitements pyrolytiques, par la réduction considérable des volumes d'effluents gazeux à traiter, restent sûrement une voie d'avenir malgré les nombreux échecs constatés. L'amélioration des connaissances fondamentales dans le domaine ainsi que l'amélioration des procédés s'avèrent nécessaires.

La pyrolyse est un phénomène très complexe qui précède généralement l'étape de la combustion hétérogène. Elle est toujours confondue avec la dévolatilisation (dégagement de matière volatile sous l'effet de la chaleur).

Le présent modèle présenté dans ce travail nous a permis d'analyser le processus de la pyrolyse des particules solides d'un déchet ménager à lit fixe. Les résultats obtenus dans le cas d'une seule particule présentent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux de Pyle et Zaror [24]. Par ailleurs, les résultats trouvés par notre modèle ne sont pas suffisants comparativement à ceux issus d'autres modèles présentés dans la littérature. Nous avons analysé et discuté l'évolution des champs de température, de la matière carbonée ainsi des gaz produits par la pyrolyse.

L'application potentielle de ce modèle réside dans son emploi à la pyrolyse et d'autres types de biomasse et à d'autres configurations.

Par ailleurs, la vitesse de chauffe et la taille des particules étant des paramètres opératoires ayant une influence notable sur le rendement des produits de pyrolyse, nous préconisons comme suite de ce travail la simulation de leur effet sur le processus considéré.

Résumé

Cette étude concerne la modélisation numérique de la pyrolyse d'un déchet ménager. L'application potentielle de ces combustibles réside dans l'usage dans des installations de combustion domestique ou industrielles. Afin de faciliter la modélisation numérique du processus de pyrolyse, les particules de déchet sont supposées disposées dans une enceinte cylindrique verticale. Leur chauffage est assuré par un courant vertical ascendant de gaz inerte chaud. La résolution des équations des bilans relatives à un écoulement unidirectionnel et régime stationnaire. La méthode des différentielles finis a été employée pour discrétisation spatiale du système d'équations. Après sa validation ce modèle a été appliqué a une configuration d'un lit fixe. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les résultats expérimentaux présentés dans la littérature.

Mots clés : Modélisation, pyrolyse, déchet, lit fixe.

Abstract

This study is the numerical modeling of the pyrolysis of municipal solid waste. The potential application of these fuels lies in use in domestic or industrial facilities combustion. To facilitate the digital modeling process pyrolysis, the solid particles are assumed disposed in a vertical cylindrical enclosure. Heating is provided by a vertical current Hot inert gas solving balance equations for a unidirectional steady flow. The finite differential method was used for the spatial discretization of system equations. After Validation this model was applied to a fixed bed configuration. Results are in good agreement with the experimental data presented in the literature.

Keywords: Modeling, pyrolysis, municipal solid waste, fixed bed.

Introduction générale

Chapitre I

Gestion et traitement des déchets

Chapitre II

La pyrolyse des déchets

Chapitre III

Modélisation de procéder de pyrolyse dans un lit fixe

Chapitre IV

Résultats et discussions

Conclusion

Annexes

Introduction générale

Les considérations environnementales liées à la production d'énergie, de plus en plus prises en compte depuis le traité de Kyoto, ainsi que la raréfaction des carburants fossiles permettent de prédire aux énergies renouvelables un développement rapide lors des prochaines années.

A ce titre, les procédés de conversion thermique de la biomasse - pyrolyse et gazéification notamment - constituent une alternative des plus intéressantes pour produire un gaz à partir de la biomasse. Ce dernier peut être utilisé dans de nombreux procédés de production d'énergie comme les chaudières, les turbines ou les moteurs de cogénération. Ces technologies présentent, outre leur caractère peu polluant en termes de NOx, l'avantage de n'émettre aucune dioxine.

De plus, les récents développements incluent l'utilisation de gaz de chauffage et des formes géométriques de plus en plus complexes. Les écoulements à l'intérieur des pyrolyseurs influent ainsi sur le procédé complet et se complexifient.

La modélisation de la pyrolyse, en tant que procédé complet ou étape de la gazéification, devient donc une nécessité pour le développement d'une technologie techniquement et économiquement viable. Le dimensionnement et l'optimisation des installations influent en effet significativement sur leur rendement global.

L'amélioration des connaissances fondamentales dans le domaine ainsi que l'amélioration des procédés s'avèrent nécessaires.

La présente étude a pour objectif la modélisation du processus de pyrolyse d'un déchet ménager dans un lit fixe. Dans cette configuration de procédé, le modèle tient compte du transfert de chaleur et de matière, il inclut un mécanisme chimique détaillé et l'écoulement du gaz est unidirectionnel.

Nomenclature

A : Facteur pré exponentiel (s⁻¹)

C_p : Chaleur spécifique (J/Kg/k)

D : coefficient de diffusion(m²/s)

d_p : Diamètre de pore des particules solides (m)

E : énergie d'activation (J/mol)

W : Taux de réaction (kg/m³/s)

ΔH : Enthalpie de réaction (J/kg)

λ : Conductivité thermique (W/m/K)

h:coefficient de transfert de chaleur (W/m²/K)

α : coefficient stœchiométrique

ε: porosité

κ: perméabilité (m²)

v : vitesse de gaz (m/s)

Y : Fraction massique

T : Température (K)

R : Constante des gaz parfaits (J/K/mol)

ρ : Masse volumique (kg/m³)

β, γ : Coefficients

t : Goudron

Pyr : Pyrolyse

c : Coke

g : Gaz

s : Solide

H : hauteur du lit (m)

S : surface

Z :coordonnée axiale

M :masse molaire

Bibliographie

- [1] **SATAMENOU JOËL** : Efficacité de la collection des déchets ménagères et agriculture Urbaine et périurbaine dans la ville de Yaoundé (mémoire de DEA PTCI)
- [2] **ADEME (2000)**. Déchets municipaux 2^{ème} édition. ADEME éditions, Paris, 11 pages
- [3] **ADEME (1999)**. Composition des ordures ménagères en France (données et référence), 60 pages.
- [4, 5] **Hans-Heinz Frey et al.** Characterization of municipal solid waste combustion in a grate furnace. Research center Karlsruhe GmbH, Institutes of power engineering, Germany. article pour Waste Management 23 (2003) 689–701.
- [6] **GEHRMANN. H.J.BECKMANN, M.JUNG, C.G; FONTANAA**; Proceeding, Session, L'incéneration 2001, ICHM Meeting, brussels, july 2001, 14p.
- [7] **GOH Y.R, SIDDALL R.G., NASSERZADEH V., SWITHEBANK J., LAWRENCED., JONES B.**,Mathematical modeling of the burning bed of a waste Incinerator, Journal of the Institute of Energy,71(1998),110-118.
- [8] **ABOULAM, S.**, Recherche d'une méthode d'analyse du fonctionnement des usines de tr-compostage des déchets ménagers. Thèse de l'INPT N°2216.
- [9] **ADEME, 1998.**”Le compostage des déchets organiques des ménages en Allemagne-Etat de l'art et retours d'expérience » Paris, France .188.
- [10] **SOLAGRO Edition, 2000**,”la méthanisation des déchets ménagers et assimilés”, ISBN2-9509837-1-5.
- [11] **ADEME (2009)**. Méthode de Caractérisation des Ordures Ménagères.
- [12] **GOYAL H.B., DIPTENDU SEAL ET R.C SAXENA** « Bio fuels from thermochemical conversion of renewable resources:A review “ Renewable and Sustainable ENERGY Reviews 12(2008) 504-517.
- [13] **JANSE AMC, WESTERHOUT RWJ, PRINS W.** Modeling of flash pyrolysis Of a single wood particle. Chem. Eng Process 2000; 39(3):239–52.
- [14] **J.M.BOUVIER, F.CHARBEL AND GELUS**,” Gas-solid pyrolysis of Tire Wastes-kinetics and material balances of batch pyrolysis of Used Tires “Resources conservation.
- [15] **H.FREEMAN**; ’innovative Thermal Hazardous organic waste Treatment process”
- [16] **ADEME, 2004**. Pyrolyse – gazéification de déchets solides (*Etude ADEME/PROCEDIS*)
- [17] **J.I. MOREL, N.R. AMUNDSON and S.K. PARK**, “Dynamics of a single particle during Char gasification”, Chemical Engineering Science, 45 (1990) 387-401
- [18] **J. VILLERMAUX, B. ANTOINE, J. LEDE and F. SOULIGNAC**, “A new model for thermal Volatilization of solid particles undergoing fast pyrolysis”, Chemical Engineering Science, 41, (1986) 151-157

- [19] **R. ZANZI, K. SJÖSTRÖM and E. BJÖRNBOM**, “rapid pyrolysis of agricultural Residues et high temperatures”, *Biomass & Bioenergy*, 23 (5) (2002) 357-366
- [20] **GHABI ET AL** « Modélisation et simulation numérique de la pyrolyse du noyau d’olive »
- [21] **K. RAVEENDRAN, A. GANESH and K. C. KHILART**, “Influence of mineral matter on Biomass pyrolysis characteristics”, *Fuel*, 74 (12) (1995) 1812-1822
- [22] **HINDMARSH A.C. ODEPACK**: a systematized collection of ODE solvers. In R. S. Stepleman et al., editors, *Scientific Computing*, pages 55–64. North Holland, Amsterdam,
- [23] **logiciel Matlab**
- [24] **D.L. PYLE and C.A. ZAROR**, “Heat transfer and kinetics in the low temperature Pyrolysis of solids”, *Chemical engineering science*, 39 (1984) 147-158
- [25] **C.H. BAMFORD J.CRANK and D.H. MALAN**, “The combustion of wood”, Part I. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Vol.42 (1946) 166-182.

Annexe 1

Tableau I 1 : paramètres caractéristiques du lit.

Paramètres du lit	Valeurs
Dimensions du lit (H, R)	Hauteur H=15 cm, rayon R=15cm
Taille des particules	Rayon $R_p= 2-3$ mm
Fraction massique	$Y_s= 1$
Température initial du lit T_s	$T_{s0}=303$ K
Température du gaz de balayage a l'entrée	800 K

Tableau II 1 : corrélations de quelques propriétés physiques

Propriété	Corrélation
La conductivité thermique du solide	$\lambda_s=\lambda_{s0}+0.0003(T_s-273.2)$ ($Wm^{-1}k^{-1}$)
La conductivité thermique de coke	$\lambda_c=\lambda_{c0}-0.0001(T_s-273.2)$ ($Wm^{-1}k^{-1}$)
La conductivité thermique du goudron	$\lambda_t=25.77*10^{-3}$ ($Wm^{-1}k^{-1}$)
La chaleur spécifique de solide	$Cp_s=1112.0+4.85(T_s-273.2)$ ($J.kg^{-1}k^{-1}$)
La chaleur spécifique du coke	$Cp_c=1003.2+2.09(T_s-273.2)$ ($J.kg^{-1}k^{-1}$)
La chaleur spécifique de l'eau	$Cp_{eau}=4.18$ ($J.kg^{-1}k^{-1}$)

Annexe 2

Tableau II 2 : propriétés physiques

Variable	valeur	Variable	Valeur	Variable	Valeur
h_s	$0.7 \text{ Wm}^{-2}\text{k}^{-1}$	μ	3.10^{-5} $\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$	d_{pores}	1.10^{-5} m
λ_g	0.026 $\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$	ρ_s	650 Kg.m^{-3}	ϵ_r	0.95
λ_{s0}	0.11 $\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$	T_∞	303 k	ϵ	0.4
λ_{c0}	0.071 $\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$	h_{gs}	$6.4 \text{ Wm}^{-2}\text{k}^{-1}$	ϵ_p	1.10^{-5}

Tableau II 3 : composition élémentaire générale des déchets

	%	C[%]	H[%]	S[%]	O[%]	N[%]	Eau[%]	Cendres[%]
Matières organique	77,5	17,825	2,325	0,3875	13,95	0,6975	34,875	7,44
Papier-carton	5,0	1,75	0,25	0,01	1,7	0,005	0,9	0,385
plastique	4,0	2,24	0,32	0,012	0,36	0,032	0,6	0,436
Textiles	3,0	1,02	0,15	0,009	0,81	0,09	0,75	0,171
Autres (non combustible)	10,5	—	—	—	—	—	—	100

Annexe 3

Tableau II 4 : analyse approximative des déchets

Composant	PCI (MJ/Kg)	C[%]	H[%]	S[%]	O[%]	N[%]	Eau[%]	Cendres[%]
Valeurs	[6-8]	28,835	3,045	0,4185	16,29	0,8245	37,9415	18,934

Tableau III.1 Paramètres de la cinétique réactionnelle [18] .

A_{py}	$1.9510^6 s^{-1}$	ΔH_t	42 KJ/kg	α_1	0.225
A_t	$1.310^5 s^{-1}$	ΔH_{py}	255 KJ/kg	α_2	0.120
E_{py}	$9.2410^4 J/mol$	M_g	31kg/k .mol	α_3	0.5
E_t	$1.0710^5 J/mol$	M_t	145 kg/k.mol	α_4	0.5
β	0.95	γ	0.95	α_5	0.655

Tableau III.2 Constantes k de la cinétique réactionnelle [20].

k_1	8.10^{-3}
k_2	$4.2 .10^{-3}$
k_3	$3.7 .10^{-3}$
k_4	$3.4.10^{-3}$
k_5	$6..10^{-3}$

Annexe 4

Tableau IV.1 résultat de la résolution

Z	T _s	T _g	Y _s	Y _g	Y _C
0.01	303	303	1	0	0
0.02	482	568	0.82	0.085	0.1
0.04	489	619	0.78	0.09	0.11
0.06	520	678	0.64	0.13	0.22
0.08	570	703	0.59	0.16	0.30
0.1	603	722	0.4	0.2	0.41
0.12	622	783	0.19	0.3	0.54
0.14	793	804	0	0.32	0.7

Le taux de production de pyrolyse :

W=0.83