



Description mathématique des réactions de dégradation des déchets ménagers par pyrolyse

K.MOUSSI^{#1}, M.ESSARHANE^{*2}, D.TOUIL^{#2}

^{#1} Centre de Développement des Energies Renouvelables. Division Bioénergie et Environnement.
BP 62 Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340, Alger, Algérie.

k.moussi@cder.dz

^{*2} Université Saad-Dahleb, Blida. Laboratoire Energie et Pollution de l'air, FSI

Résumé— Cette étude a pour objet la modélisation numérique de la pyrolyse d'un déchet ménager. 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 stationnaire permet d'obtenir l'évolution axiale de la température, de la concentration du solide, du résidu carboné (coke) et du gaz de pyrolyse. La méthode des différentielles finies a été employée pour discrétisation spatiale du système d'équations. Après sa validation ce modèle a été appliqué à une configuration d'un lit fixe. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les résultats expérimentaux présentés.

Keywords— Modélisation, pyrolyse, déchet, lit fixe

I. INTRODUCTION

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.

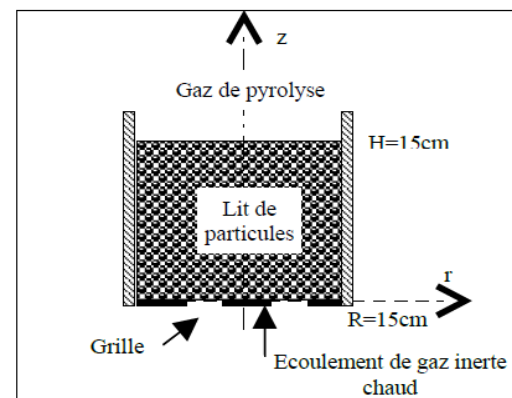


Fig.1 : Pyrolyse d'un déchet en lit fixe.

Le dispositif représenté en figure 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. Les paramètres caractéristiques du lit sont indiqués dans le tableau 1[1].



TABLEAU 1
PARAMETRES CARACTERISIQUEQ 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 à l'entrée	800 K

II. DEVELOPPEMENT DES EQUATIONS DU MODELE

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 [3]. C'est la compétition entre ces réactions qui fixe l'équilibre final. Le mécanisme global est synthétisé par la figure 2.

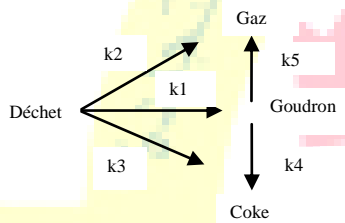
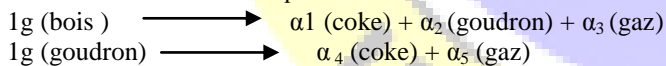


Fig.2 : Modèle cinétique de la Pyrolyse.

En absence de cinétique réactionnelle propre à la pyrolyse d'un déchet ménager et en admettant que la composition chimique d'un déchet ménagère est voisine de celle du bois, nous utilisons la cinétique proposée pour le bois [1]. Le mécanisme réactionnel est constitué de 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 :

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

$$W_t = \rho_s A_t (y_t)^\gamma \exp(-E_t/(RT_s)) \quad (2)$$

Les valeurs des paramètres de la cinétique réactionnelles sont rassemblées dans le tableau 2 suivant :

TABLEAU 2
PARAMETRES DE LA CINETIQUE REACTIONNELLE [2].

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	31 kg/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

2. Bilan de matière global sur le gaz

Le bilan global entrée- sortie dans le procédé de pyrolyse donne :

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

En considérant le régime est permanent :

$$dm/dt=0 \quad (4)$$

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

$$\phi = \rho v \quad (5)$$

En supposant que le système est unidirectionnel

$$(\phi_x, \phi_y)=0 \quad (6)$$

Le bilan de matière s'écrit :

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

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

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

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

$$\rho_g \cdot d(v) / dz = m_{\text{prod}} \quad (9)$$

2.1 Bilan de conservation des espèces en phase gazeuse

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

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

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

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

Avec $\phi_a = \rho_g v + J_a$ (12)

Soit: $\phi_a = \rho_g v - \rho_g D_{\text{eff}} (\text{grad } y_a)$ (13)

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

$$\varepsilon \rho_g v dy_a / dz = D_{\text{eff}} \rho_g (d^2 y_a / dz^2) + \dot{m}_a \quad (14)$$

3. Bilan de matière sur le solide

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

$$\rho_s (dy_s / dz) = - (r_1 + r_2 + r_3) \quad (15)$$

$$\rho_c (dy_c / dz) = (r_3 + r_4) \quad (16)$$

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

$$\rho_s (dy_s / dz) = - (k_1 + k_2 + k_3) \quad (17)$$

$$\rho_c (dy_c / dz) = (k_3 + k_4) \quad (18)$$

La constante de vitesse k est donnée par la relation d'Arrhenius $k = A \exp(E_a/RT)$ (19)

Le tableau 3 donne les constants de vitesse k_1, k_2, k_3, k_4, k_5

TABLEAU 3
CONSTANTES k DE LA CINETIQUE REACTIONNELLE [1]

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
8.10^{-3}	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$

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 :

$$v = \kappa_R (\delta P / \delta z) / \mu_g \quad (20)$$



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



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

$$\rho_g = PM_g / T_g R \quad (21)$$

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

$$\rho_g K_R / \mu_g (d^2P/dz^2) = m_{prod} \quad (22)$$

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 :

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

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

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

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

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

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

$$\lambda_s = a'T_s + b' \quad (26)$$

L'équation (25) devient

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

6. Conditions initiales et aux limites :

Condition initiales :

$$A Z=0 \quad y_g=0, \quad y_c=0, \quad y_t=0 \quad y_s=1, \quad T_g=303 \text{ K},$$

$$T_s = 303 \text{ K}, \quad T_g = T_\infty = 303 \text{ K}$$

Conditions aux limites :

$$z = 0, \quad T_g = T_{pyr}, \quad (28)$$

$$\lambda_g \delta T_g / \delta z = h_s (T_s - T_\infty), \quad (29)$$

$$\lambda_s \delta T_s / \delta z = h_s (T_s - T_\infty) \quad (30)$$

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

7. Calcul des Propriétés physiques

Les propriétés physiques des déchets ménagers et leurs corrélations semi-empiriques de calcul des différentes substances utilisées [1] lors de notre modélisation numérique sont récapitulées dans les tableaux suivants :

TABLEAU 4
PROPRIETES PHYSIQUES

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

TABLEAU 5
ANALYSE APPROXIMATIVE DES DECHETS.

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

TABLEAU 6
COMPOSITION ELEMENTAIRE GENERALE DES DECHETS

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

TABLEAU 7
CORRELATIONS DE QUELQUES PROPRIETES 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	$C_{p_s} = 1112.0 + 4.85(T_s - 273.2)$ (J.kg ⁻¹ k ⁻¹)
La chaleur spécifique du coke	$C_{p_c} = 1003.2 + 2.09(T_s - 273.2)$ (J.kg ⁻¹ k ⁻¹)
La chaleur spécifique de l'eau	$C_{p_{eau}} = 4.18$ (J.kg ⁻¹ k ⁻¹)

III RESOLUTION NUMERIQUE

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 à l'entrée de lit sera fixée $v=5\text{cm/s}$ [4]. 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 [5], 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.

IV. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Dans le but de valider notre modèle, les résultats sont comparés par rapport à ceux de la littérature [6, 12]. 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.

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 4 et 5. Ces figures mettent 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°K alors que pour le gaz, elle est proche de 700K, soit un écart de 100K.

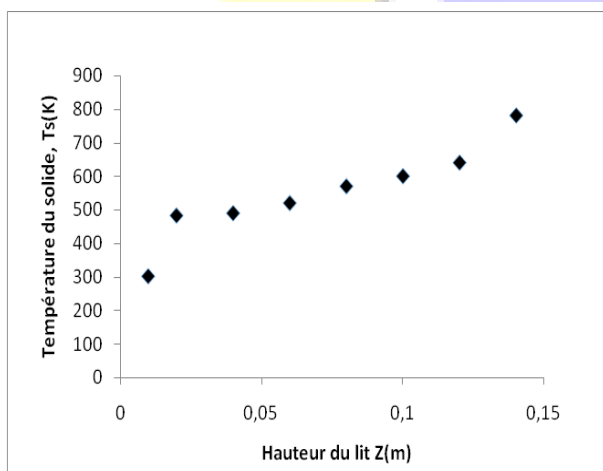


Fig.4 : Evolution de la température du solide en fonction de la hauteur du lit.

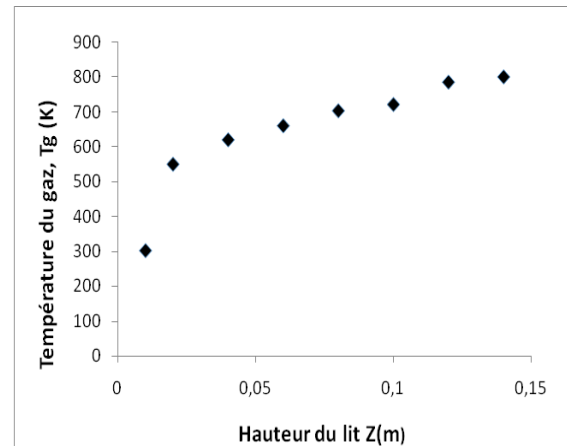


Fig.5 : Evolution de la température du gaz produit en fonction de la hauteur du lit.

2. Fraction massique du solide

La figure 6 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.

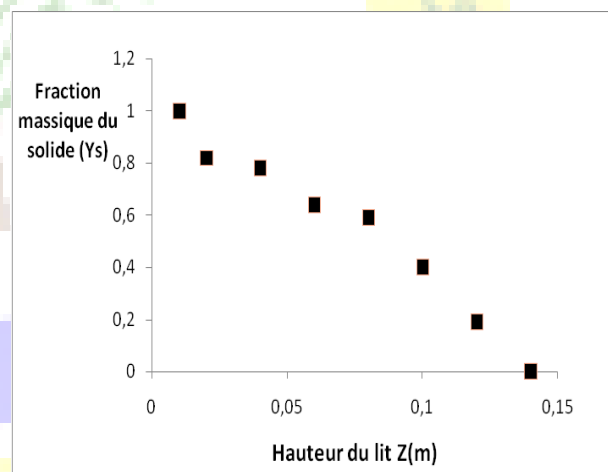


Fig.6 : Evolution de la fraction massique du solide

3. Rendement de pyrolyse

Une évolution caractéristique des rendements des produits de pyrolyse en fonction de la hauteur du lit est présentée sur les figures (7, 8). 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.



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



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(8) 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 locale et de son transport diffusif et convectif. Nous remarquons aussi que la production du gaz de pyrolyse augmente avec l'augmentation de la température.

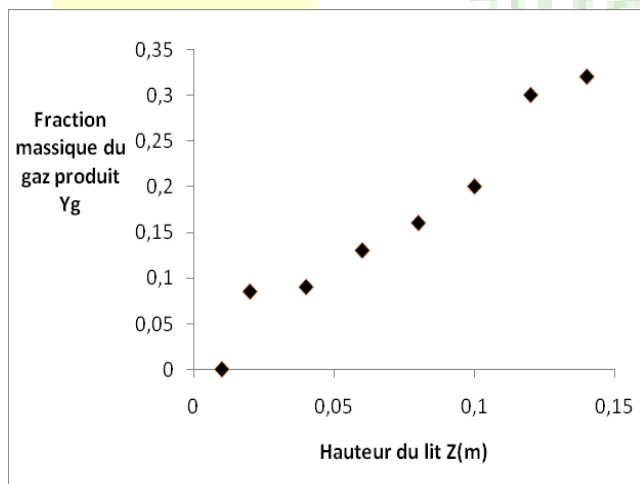


Fig.7 : Evolution de la fraction massique de gaz de pyrolyse

Faute de temps l'étude de l'influence d'autres paramètres (ex : la taille des particules, la vitesse de chauffe) sur le rendement de la pyrolyse n'a pas été fait mais déduit d'après une étude bibliographique extensive .

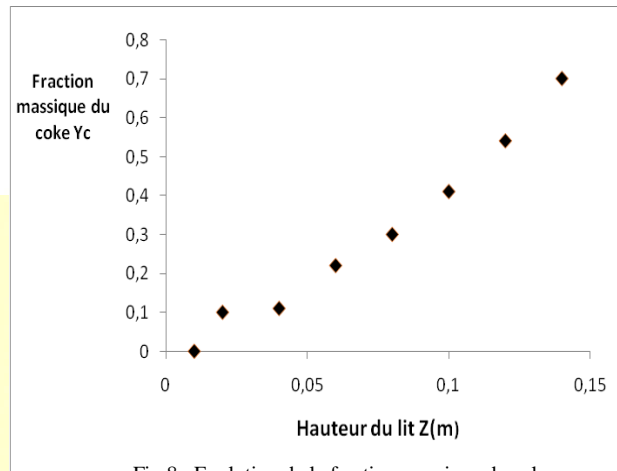


Fig.8 : Evolution de la fraction massique de coke

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 °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.



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



V. CONCLUSIONS

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 trouvés par notre modèle présentent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux de Pyle et Zaror [6]. 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.

REFERENCES

- [1] K. RAVEENDRAN, A. GANESH AND K. C. KHILART, "INFLUENCE OF MINERAL MATTER ON BIOMASS PYROLYSIS CHARACTERISTICS", FUEL, 74 (12) (1995) 1812-1822
- [2] 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
- [3] R. ZANZI, K. SJÖSTRÖM AND E. BJÖRNBOM, "rapid pyrolysis of agricultural Residues at high temperatures", Biomass & Bioenergy, 23 (5) (2002) 357-366
- [4] 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,
- [5] logiciel Matlab
- [6] 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 [7] C.H. BAMFORD J.CRANK AND D.H. MALAN, "The combustion of wood", Part I.Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Vol.42 (8946) 166-182.
- [7] GOH Y.R, SIDDALL R.G., NASSERZADEH V., SWITHEBANK J., LAWRENCE., JONES B.,Mathematical modeling of the burning bed of a waste Incinerator, Journal of the Institute of Energy,71(1998),110-118. [9] ADEME (2009). Méthode de Caractérisation des Ordures Ménagères.
- [8] 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.

- [9] JANSE AMC, WESTERHOUT RWJ, PRINS W. Modeling of flash pyrolysis Of a single wood particle. Chem. Eng Process 2000; 39(3):239-52.
- [10] 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.
- [11] H.FREEMAN; "innovative Thermal Hazardous organic waste Treatment process"
- [12] 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.

NOMENCLATURE

A : Facteur pré exponentiel (s⁻¹).
Cp : Chaleur spécifique (J/Kg.k).
D : Coefficient de diffusion (m²/s).
d_p : Diamètre de pore des particules solides (m).
E : Energie 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 .