

Modélisation et simulation numérique de la pyrolyse du noyau d'olive

C. GHABI^{1,*}, H. BENTICHA¹, M. SASSI²

¹*Laboratoire d'études des systèmes thermiques et énergétiques,
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 5000 Tunisie*

²*The Petroleum Institute, P.O. Box 2533, Abu Dhabi, UAE*

(Reçu le 13 Octobre 2005, accepté le 09 Avril 2006)

* Correspondance, courriel : ghabichekib@yahoo.fr

Résumé

Cette étude est motivée par une volonté nationale de maîtriser la consommation de l'énergie fossile. Elle entre dans le cadre d'un Projet National Mobilisateur (PNM) de valorisation des grignons. L'étude consiste à la simulation numérique de la pyrolyse d'un sous-produit d'olive. Les produits du présent traitement thermique contiennent des composés solides riches en carbone et des composés gazeux condensables (goudron) et non condensable (hydrocarbures). L'application potentielle de ces combustibles réside dans l'usage dans des installations de combustion domestiques ou industrielles. Ainsi et afin de faciliter la modélisation numérique du processus de pyrolyse, les particules de grignon 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 de bilans relatives à un écoulement diphasique bidimensionnel réactif et non stationnaire, fournit les profils de température ainsi que ceux des produits solides et gazeux de la pyrolyse. Associée à une interpolation hybride, la méthode des volumes finis a été employée pour la discrétisation spatiale du système d'équations. Pour la résolution des équations algébriques, nous avons utilisé la méthode de Bi-Gradient Conjugué et Stabilisé (Bi-CGStab). Après sa validation ce modèle a été appliqué à une configuration d'un lit fixe. Les résultats numériques obtenus sont en bon accord avec les résultats expérimentaux présentés dans la littérature.

Mots-clés : *Modélisation, pyrolyse, noyaux d'olive, lit fixe, bidimensionnel.*

Abstract

Numerical modeling and simulation of olive cake pyrolysis

The present study is motivated by the Tunisian government, to control the consumption of biomass energy. It is a Mobilizing National Project (PNM) of valorization of the olive waste products. This study proposes a numerical simulation of the pyrolysis process. We consider a cylindrical enclosure of wood particles, and a hot gas circulating from the bottom to the top. The pyrolysis products can be used in domestic or industrial combustion installations. The system of all unsteady and reactive equations is resolved by the finite volume method with a hybrid spatial interpolation and an implicit one for time. All algebraic equations are resolved by using the Bi-Conjugate Gradient Stabilized and Normalized method (Bi-CGStab). The obtained model is validated in several experimental cases for one biomass particle data taken from literature. This model is applied to predict the pyrolysis phenomenon in a fixed bed of particles. Using the proposed numerical model the time space evolutions of temperature, char fraction, gas mass fraction, and the rate of gas production are presented and discussed. In this configuration, the obtained numerical results are greatly agree with the experimental data.

Keywords : *Modeling, pyrolysis, olive cake, fixed bed, two-dimensional.*

Nomenclature

A	Facteur préexponentiel (s^{-1})	<i>Symboles grecs</i>	
C_p	Chaleur spécifique (J/kg/K)	ε	Porosité
D	Coefficient de diffusion (m^2/s)	ε_r	Emissivité
d	Diamètre (m)	ρ	Masse volumique (kg/m^3)
h	Coefficient de transfert de la chaleur ($W/m^2/K$)	\dot{w}	Taux de réaction ($kg/m^3/s$)
R	Constant des gaz parfaits (J/K/mol)	λ	Conductivité ($W/m/K$)
R	Rayon du lit (m)	κ	Perméabilité (m^2)
H	Hauteur du lit (m)	η	Coefficient Stoechiométrique
u	Vitesse de gaz (m/s)	ΔH	Enthalpie de réaction (J/kg)
r	Coordonnée radiale	<i>Indices</i>	
z	Coordonnée axiale	w	Paroi

<i>Y</i>	Fraction massique	<i>c</i>	Coke
<i>T</i>	Température (K)	<i>g</i>	Gaz
<i>E</i>	Energie d'activation (J/mol)	<i>s</i>	Solide
<i>S</i>	Surface	<i>t</i>	Goudron
<i>M</i>	Masse molaire	<i>P</i>	Particule ou pore
		<i>pyr</i>	Pyrolyse

1. Introduction

La pyrolyse correspond à la dégradation thermique de la matière organique en l'absence d'oxygène. Elle conduit à la formation des composés solides riches en carbone et des composés gazeux condensables (goudron) et non condensables (hydrocarbures).

Beaucoup de travaux, [1-12], ont développé des modèles pour la pyrolyse de biomasse. La majorité de ces modèles à quelque peu d'exception n'incluent pas l'impact du rétrécissement des particules sur le procédé de leur pyrolyse. Ils supposent que les particules gardent un volume constant au cours de leur dégradation thermique. Par ailleurs, des expériences ont été entreprises pour de grandes particules de biomasse par Chan et al. [13] et Lee et al. [14]; Ils ont traduit le rétrécissement d'une couche de coke par la propagation du front de pyrolyse dans le solide. Morel et al. [15] ont modélisé les changements des dimensions particulières dus à la désintégration de la structure du solide. Ces auteurs ont proposé une conversion critique pendant la gazéification du coke. Villermaux et al. [16] ont décrit les effets de rétrécissement en supposant que la densité du solide reste constante. Certains chercheurs ont modélisé le processus de pyrolyse par une réaction unique en ignorant les réactions secondaires. L'identification des réactions réelles de la pyrolyse de la biomasse est extrêmement complexe en raison de la formation de plusieurs produits intermédiaires. La pyrolyse de la biomasse est généralement modélisée sur la base de la cinétique apparente. Différents schémas cinétiques sont employés par divers chercheurs dont certains sont cités auparavant.

La pyrolyse du bois permet de le transformer en gaz combustible, produits condensables (eau et goudrons) et du charbon actif de bois. Elle correspond à la décomposition thermique du matériau cellulosique sous vide ou en présence de gaz inerte.

Les procédés traditionnels de pyrolyse se déroulent à des températures allant de 300 à 600 K et produisent du charbon de bois. Ce dernier se caractérise par une faible densité et par un PCI élevé. Toutefois, il ne contient que 30 à 50 % de l'énergie initiale du bois. Le reste est perdu dans les produits volatils lors de la carbonisation. Les procédés modernes de pyrolyse utilisent des températures plus élevées pouvant récupérer l'énergie des produits volatils. Ils mènent à la production de produits liquides qui, du fait de leur acidité, doivent être traités avant d'être utilisés comme combustibles éventuels.

Enfin, la pyrolyse rapide à haute température (de 700 à 900 K) permet de transformer 10 % de l'énergie contenue dans le bois utilisé en combustible solide et 60 % en combustible gazeux de bonne qualité (gaz de synthèse riche en hydrogène et en monoxyde de carbone. Techniquement, il serait donc possible de transformer ce gaz de synthèse en méthane ou en méthanol (utilisable comme carburant).

Zanzi et al. [17] ont étudié la pyrolyse du grignon à haute et à 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 de basse température.

Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier, par simulation numérique, la pyrolyse des grignons en analysant déterminant les produits de ce processus. Pour cela, nous considérons une configuration axisymétrique (**Figure 1**). Il s'agit d'un lit fixe composé de particules sphériques de grignon contenues dans un cylindre vertical. Ce lit est traversé par un courant ascendant de gaz inerte chaud.

Un code de calcul numérique a été développé dans le but de résoudre le système d'équations régissant le problème considéré. La résolution des équations de bilan relatives à un écoulement diphasique bidimensionnel réactif et non stationnaire fournit les profils de température ainsi que ceux des produits solides et gazeux de la pyrolyse.

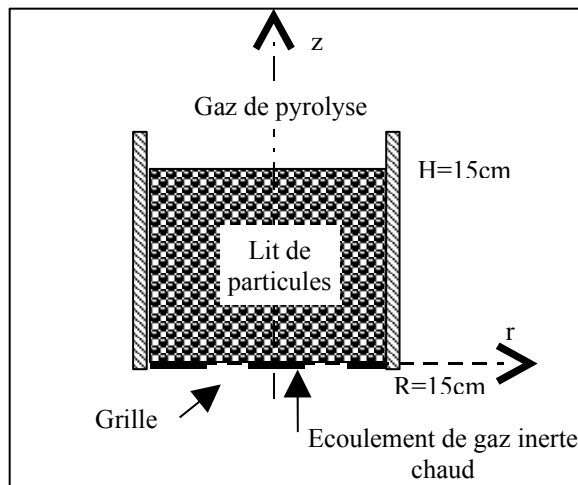


Figure 1 : Description du dispositif

Tableau 1 : Paramètres caractéristiques du lit

Paramètres du lit	valeurs
Dimensions du lit (H, R)	Hauteur $H = 15\text{cm}$ Rayon $R = 15\text{cm}$
Tailles des particules	Rayon $R_p = 2-3 \text{ mm}$
Fractions massiques	Cellulose 0.5, Bois 0.5
Température initiale du lit T_s	303K
Température du gaz de balayage à l'entrée T_{pyr}	800K

2. Mise en équation du problème

2-1. Equations de conservation

Les équations de conservation de masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie des deux phases dans le lit de particules solides sont les suivantes :

L'équation de conservation de la masse dans la phase gazeuse

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_g) + \text{div}(\rho_g \vec{u}_g) = \dot{m} \tag{1}$$

\dot{m} étant le taux de production de gaz (production des hydrocarbures par la pyrolyse).

L'équation de conservation des espèces dans la phase gazeuse

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_g Y_\alpha) + \text{div}(\varepsilon \rho_g \vec{u}_g Y_\alpha) = \text{div}(D_{eff} \rho_g \overline{\text{grad} Y_\alpha}) + \dot{m}_\alpha \tag{2}$$

\dot{m}_α : C'est le taux de production de l'espèce α au cours de la pyrolyse

Bilan de quantité de mouvement

En assimilant le lit à un milieu poreux, la conservation de la quantité de mouvement peut être assurée par la loi de Darcy généralisée :

$$\vec{u}_g = -\frac{K_R}{\mu_g} (\overline{\text{grad} P} - \rho_g \vec{g}) \tag{3}$$

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

L'équation de conservation de l'énergie dans la phase gazeuse

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_g C_p T_g) + \text{div}(\rho_g \vec{u}_g C_p T_g) = \text{div}(\lambda_{eff} \overline{\text{grad} T_g}) + h_{gs} S(T_s - T_g) + \sum_{\alpha} \dot{m}_\alpha H_{s,\alpha} + \dot{Q}_{rad,g} \tag{4}$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t}((1-\varepsilon)\rho_s C_{p_s} T_s) = \text{div}(\lambda_s \overline{\text{grad} T_s} + \vec{q}_{rad,s}) + h_{gs} S(T_g - T_s) - \sum_{\alpha} \dot{m}_{\alpha} H_{\alpha} + \Delta H_{ca} \dot{w}_{ca} \quad (5)$$

L'équation de conservation de la masse dans la phase solide

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s Y_s) = -(\dot{r}_1 + \dot{r}_2 + \dot{r}_3) \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_c Y_c) = \dot{r}_3 + \dot{r}_4 \quad (7)$$

2-2. Conditions initiales et aux limites

Le domaine étudié dans le présent travail est représenté par la **Figure 1**. Les conditions initiales et aux limites sont données par les relations qui suivent.

Conditions initiales :

$$A t = 0_s \quad Y_g = 0, \quad Y_t = 0, \quad Y_c = 0, \quad Y_s = 1 \quad (8)$$

$$T_g = 303K, \quad T_s = 303K \quad (9)$$

Conditions aux limites

Sur l'axe $r=0$

$$\left. \frac{\partial T_g}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial T_s}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial Y_{\alpha}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (12)$$

Sur la paroi $r=R$

$$\lambda_{g,eff} \left. \frac{\partial T_g}{\partial r} \right|_{r=R} = \delta (h_w (T_w - T_g) + \sigma \varepsilon_r (T_w^4 - T_g^4)) \quad (13)$$

$$\lambda_{s,eff} \left. \frac{\partial T_s}{\partial r} \right|_{r=R} = \delta (h_w (T_w - T_s) + \sigma \varepsilon_r (T_w^4 - T_s^4)) \quad (14)$$

Avec $\delta = 1$ pour une seule particule et $\delta = -1$ ou 0 pour le cas d'un lit de particule.

$$\left. \frac{\partial Y_{\alpha}}{\partial r} \right|_{r=R} = 0 \quad (15)$$

Face basse $z=0$

Cas particule simple :

$$T_g = T_{\infty} \quad (16)$$

$$\lambda_{efs} \frac{\partial T_s}{\partial z} = h_s (T_s - T_\infty) \tag{17}$$

Cas du lit fixe :

$$T_g = T_{pyr} \tag{18}$$

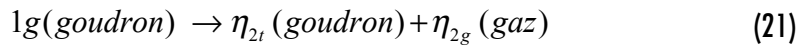
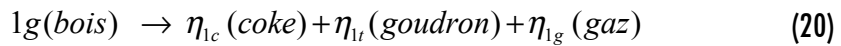
$$\lambda_{efs} \frac{\partial T_s}{\partial z} = h_s (T_s - T_\infty) \tag{19}$$

Face haute z=H

On considère un régime établi où toutes les variables ont des gradients nuls.

2-3. Mécanisme réactionnel de la pyrolyse

En absence de mécanisme réactionnel de pyrolyse propre aux grignons et en admettant que la composition chimique des grignons est voisine de celle du bois, nous avons utilisé un schéma cinétique proche de celui du bois. Ce schéma est constitué des deux réactions suivantes :



Les taux de réaction correspondants sont respectivement :

Pyrolyse du solide : $\dot{w}_{py} = (1 - Y_c)^\beta \rho_s A_{py} \exp(-E_{py} / (RT_s))$ (22)

Réaction du goudron : $\dot{w}_t = \rho_s A_t (Y_t)^\gamma \exp(-E_t / (RT_s))$ (23)

Les constantes relatives à ces vitesses de réactions, les enthalpies de réaction correspondantes et les coefficients stoechiométriques sont données par le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Paramètres de la cinétique réactionnelle

Variable	Valeur	Variable	Valeur	Variable	Valeur
A_{py}	1.9510^6 s^{-1}	ΔH_t	42 kJ/kg	η_{1g}	0.225
A_t	1.310^5 s^{-1}	ΔH_{py}	255 kJ/kg	η_{1t}	0.120
E_{py}	9.2410^4 J/mol	M_g	31 kg/kmol	η_{2t}	0.5
E_t	1.0710^5 J/mol	M_t	145 kg/kmol	η_{2g}	0.5
β	0.95	γ	0.95	η_{1c}	0.655

2-4. Propriétés physiques

Les propriétés physiques des grignons utilisées lors de la simulation numériques sont déduites de leur valeur à la température initiale (300K) du lit [9,10,20] et des corrélations proposées par la référence [10]. Ces valeurs et ces corrélations sont récapitulées dans les **Tableaux 3 et 4**.

Tableau 3 : Corrélations de quelques propriétés physiques

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

Tableau 4 : Propriétés physiques

Variable	Valeur	Variable	Valeur	Variable	Valeur
h_s	0.7 Wm ⁻² K ⁻¹	μ	3.10 ⁻⁵ kg.m ⁻¹ s ⁻¹	d_{pore}	1.10 ⁻⁵ m
λ_g	0.026 Wm ⁻¹ K ⁻¹	ρ_s	650 kg.m ⁻³	ϵ_r	0.95
λ_{s0}	0.11 Wm ⁻¹ K ⁻¹	T_∞	303 K	ϵ	0.4
λ_{c0}	0.071 Wm ⁻¹ K ⁻¹	h_w	6.4 Wm ⁻² K ⁻¹	ϵ_p	1.10 ⁻⁵

3. Méthode numérique

La modélisation du processus de pyrolyse aboutit à un système d'équations aux dérivées partielles. La résolution de ce système s'avère difficile. Pour, nous faisons y remédier nous avons fait recours à l'outil numérique. L'intégration dans l'espace a été réalisée par la méthode des volumes finis développée initialement par Patankar et Spalding [21]. Dans cette méthode le domaine est divisé en des volumes de contrôle non nécessairement uniformes. La méthode des volumes finis présente la caractéristique de conserver la forme physique des équations lors de sa mise en œuvre.

Les équations du système sont dans un premier temps intégrées numériquement sur un volume de contrôle grâce à cette méthode. Le système d'équations différentielles aux dérivées partielles est ainsi transformé en un système d'équations algébriques. Ce

dernier étant fonction non seulement des valeurs des variables au point considéré, mais aussi des points voisins. La résolution du système a été réalisée moyennant la méthode itérative de Bi-Gradient Conjugué et Stabilisé introduite par Vorst [22].

L'équation de bilan, relative à une grandeur extensive donnée, s'écrit sous sa forme générale :

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} \phi) = \text{div}(\overline{\Gamma \text{grad}}(\phi)) + S \tag{24}$$

Après la discrétisation de cette équation, on obtient l'équation algébrique suivante :

$$A_p \phi_p = A_w \phi_w + A_e \phi_e + A_n \phi_n + A_s \phi_s + S_\phi \tag{25}$$

4. Résultats

4-1. Validation

Dans le but de valider notre modèle, nous avons comparé nos résultats (**Figures 1 et 2**) aux résultats trouvés par d'autres modèles et aux résultats expérimentaux relatifs à une seule particule solide de forme cylindrique soumise à un flux de chaleur latéral. Dans ce cas, la modélisation du lit fixe est appliquée à une seule particule. Tous les paramètres sont conservés. Les espaces entre les particules sphériques du lit sont remplacés par les pores de la particule unique. Les caractéristiques physiques de la particule et les conditions opératoires sont données par le **Tableau 5**. Deux cas de figure, correspondant aux deux températures, des parois latérales, 753 et 643K, sont traités. Dans les deux cas les résultats obtenus par le présent modèle présente un bon accord avec les résultats de Pale et Zaror [18]. Notons de même que nos résultats sont apparemment plus proches de l'expérience que les résultats obtenus par les modèles proposés par Jalan et Srivastava [19] d'une part et par Bamford [1] d'autre part.

Tableau 5 : Paramètres caractéristiques de particule

Paramètres	valeurs
Dimension de particule	Hauteur = $3 \cdot 10^{-2} \text{m}$ Diamètre = $1.1 \cdot 10^{-2} \text{m}$
diamètre des pores d_p	$5 \cdot 10^{-5} \text{m}$
Fractions massiques Y	Cellulose 0.5, Bois 0.5
Température initiale de particule	303K
Température du gaz de balayage à l'entrée T_{in}	303K
Vitesse du gaz à l'entrée U_{in}	$5 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

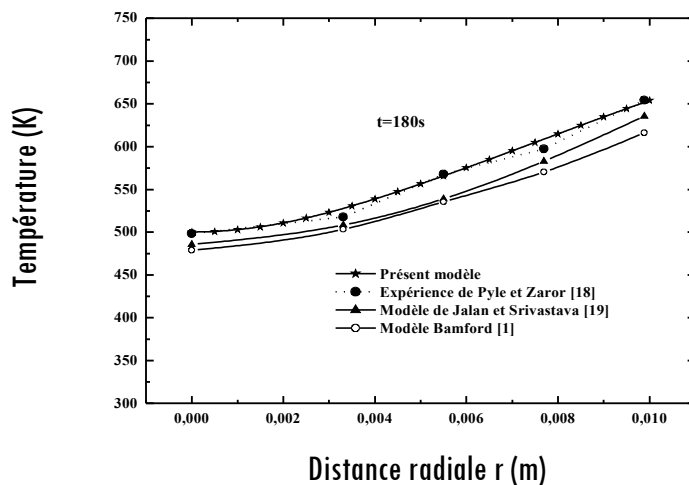


Figure 2 : *Profile de température en fonction de la distance radiale pour une particule cylindrique ($R=0.011m$, $T_0=303K$, $T_w=753K$, $t=180s$)*

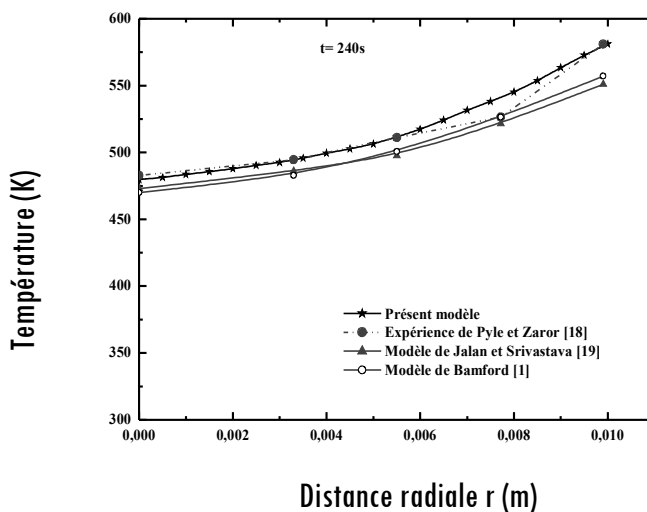


Figure 2 : *Profile de température en fonction de la distance radiale pour une particule cylindrique ($R=0.011m$, $T_0=303K$, $T_w=643K$, $t=240s$)*

4-2. Simulation de la pyrolyse dans un lit fixe

La finalité du présent modèle est de montrer son efficacité dans un cas pratique d'un lit fixe, nous l'avons appliqué à des particules de bois disposés dans un cylindre vertical (*Figure 1*).

4-2-1. Cas où la vitesse de gaz de chauffage est faible

Le traitement thermique des particules de bois, constituant ce lit, est assuré par un courant ascendant de gaz inerte (azote) chaud entrant par la face inférieure du cylindre. La température étant de 800K alors que la vitesse U_0 avait été choisie égale à 5 cm.s^{-1} dans un premier cas et à 10 cm.s^{-1} dans le second cas.

La pyrolyse de ces particules de bois est envisagée pour la fabrication de charbon actif. L'utilisation de charbons actifs intervient lors de traitements de l'eau ou de l'air pour l'élimination par adsorption de polluants organiques, de métaux et d'odeurs. Il est aussi utilisé comme combustible.

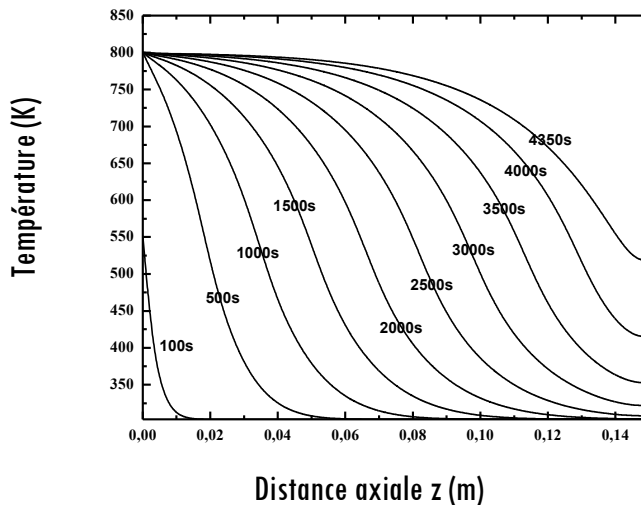


Figure 3 : Evolution de la température de gaz, $U_0 = 5 \text{ cm/s}$

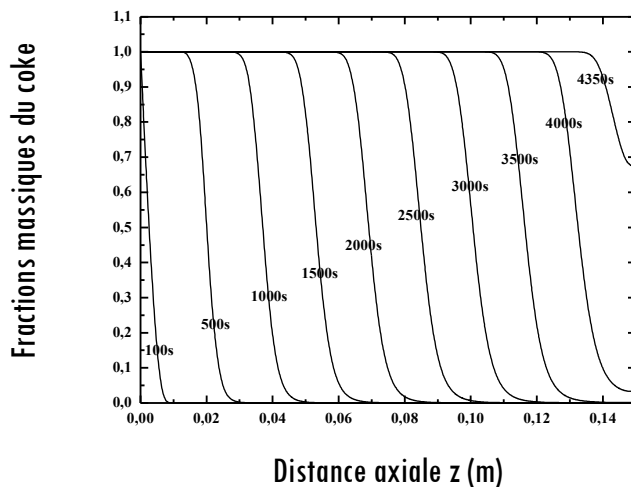


Figure 5 : Evolution de la fraction massique du coke, $U_0 = 5 \text{ cm/s}$

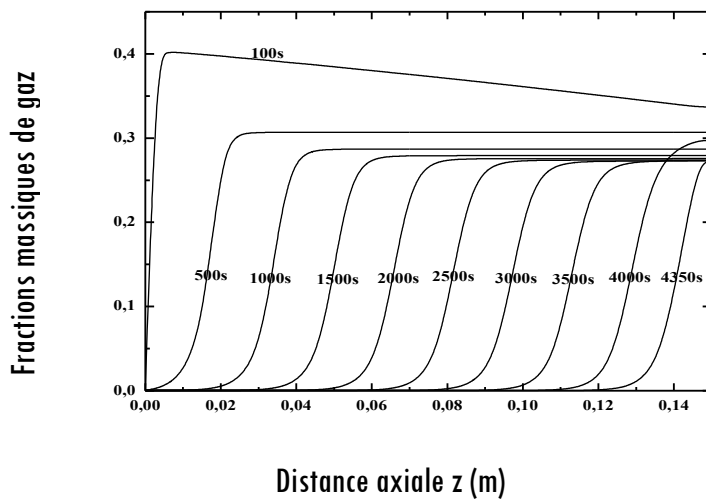


Figure 6 : Evolution de la fraction massique du gaz, $U_0 = 5 \text{ cm/s}$

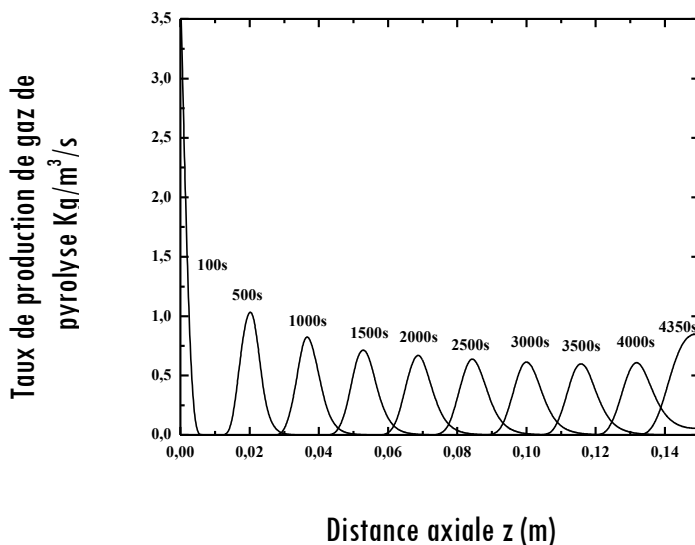


Figure 7 : Evolution du taux de production de gaz de pyrolyse, $U_0 = 5 \text{ cm/s}$

L'évolution spatio-temporelle des températures à travers le lit est présentée sur la **Figure 4**. Cette figure met en évidence la propagation progressive de l'onde thermique à travers le lit en laissant en trace des particules de bois traitées à une température de 800 K. La **Figure 5** représente l'évolution axiale de la fraction massique du coke. Nous constatons qu'au bout de 4350 s plus que 97 % de la masse initiale est convertie en coke. L'évolution axiale de la fraction massique de gaz à différents instants (**Figure 6**) résulte de sa production locale et de son transport diffusif et convectif. Sur la **Figure 7**, est donnée l'évolution spatio-temporelle du taux de production de gaz. Nous remarquons qu'à tout instant la production de gaz par la pyrolyse est localisée à la position de l'onde thermique (**Figure 4**). Au début le gaz est omniprésent presque le long du lit, tandis qu'à la fin, il existe en haut du lit, et en faible quantité.

4-2-2. Cas où la vitesse de gaz de chauffage est moyenne

A fin d'élucider l'effet de la vitesse du courant de gaz inerte, nous avons suivi l'évolution spatio-temporelle de la pyrolyse pour une deuxième vitesse plus grande ($U_0 = 10 \text{ cm.s}^{-1}$). A cette vitesse l'onde thermique (**Figure 8**) est plus rapide que dans le cas traité auparavant. En effet, au bout de 1000 s, le front de la pyrolyse est à $z = 0,04 \text{ m}$ dans le cas où la vitesse est prise égale à 5 cm.s^{-1} alors qu'il est à $z = 0,06 \text{ m}$ dans ce second

cas. L'accélération de l'onde thermique est traduite par une conversion du bois en coke plus rapide (**Figure 9**). En séquelle, le temps nécessaire pour convertir plus que 97 % de la masse initiale est réduit à 2550s. Par ailleurs, l'augmentation de la vitesse du courant de gaz inerte a modifié les profils axiaux de la fraction massique de gaz (**Figure 10**). En effet, quoi qu'elle la coordonnée spatio-temporelle dans le lit, le niveau maximum de la fraction massique de gaz est atténuée. Cette diminution s'explique par un transport convectif plus important que dans le premier cas. Sur la **Figure 11** nous avons suivi l'évolution spatio-temporelle du taux de production de gaz, dans ce second cas. Nous remarquons qu'à tout instant la production de gaz par la pyrolyse est aussi localisée à la position de l'onde thermique (**Figure 8**) mais elle plus importante que dans le premier cas. Cette augmentation s'explique par un flux thermique convectif plus important. Il en résulte par conséquence une augmentation de la température.

4-2-3. Effets de la perte latérale de la chaleur

Pour dégager l'effet des pertes thermiques à travers les parois latérales sur l'évolution spatiale du processus de pyrolyse, nous avons représenté, pour différents instants, les états thermochimiques du lit. Les **Figures 12-14** présentent les contours isothermes à différents instants. Nous constatons une baisse de température près des parois latérales. Cette baisse de température est d'autant plus prononcée que le temps avance.

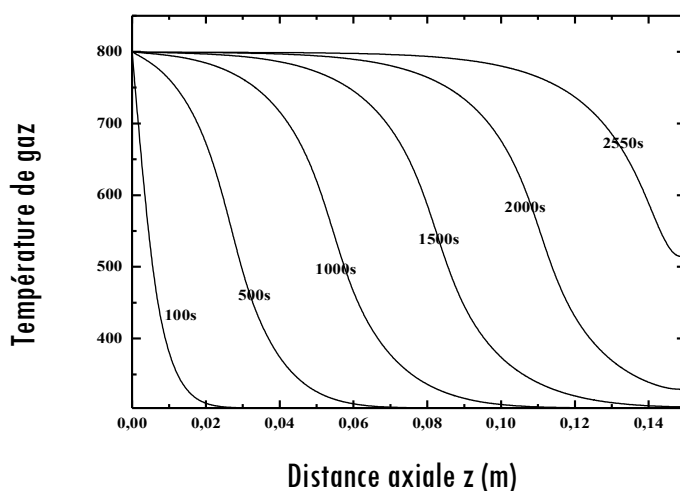


Figure 8 : Evolution de la fraction massique du gaz, $U_0 = 10\text{cm/s}$

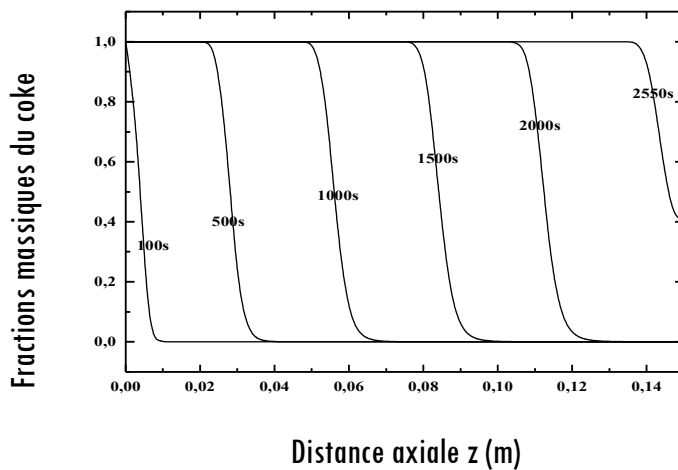


Figure 9 : Evolution de la fraction massique du coke, $U_0=10$ cm/s

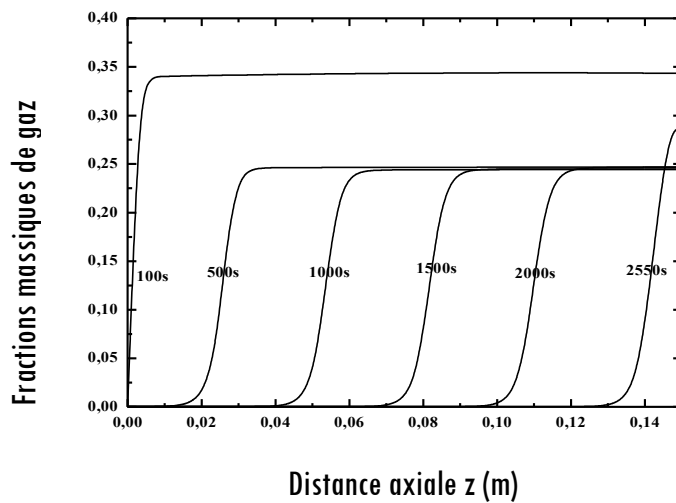


Figure 10 : Evolution de la fraction massique du gaz, $U_0=10$ cm/s

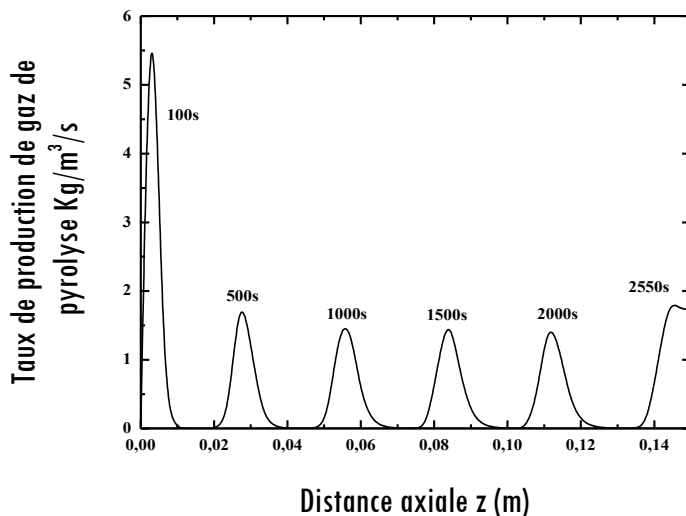


Figure 11 : Evolution du taux de production de gaz de pyrolyse, $U_0 = 10 \text{ cm/s}$

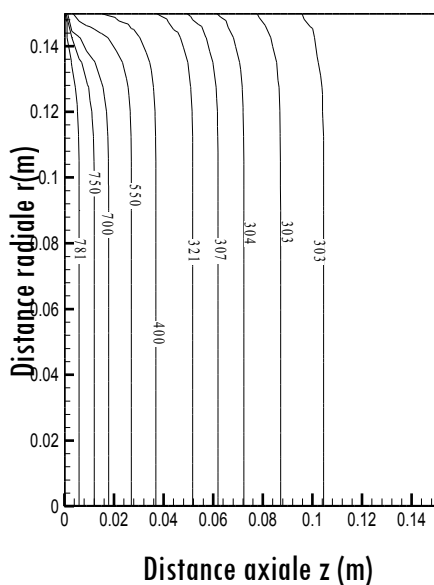


Figure 12 : Evolution du champ de la température de gaz, $t = 500 \text{ s}$, $U_0 = 10 \text{ cm/s}$

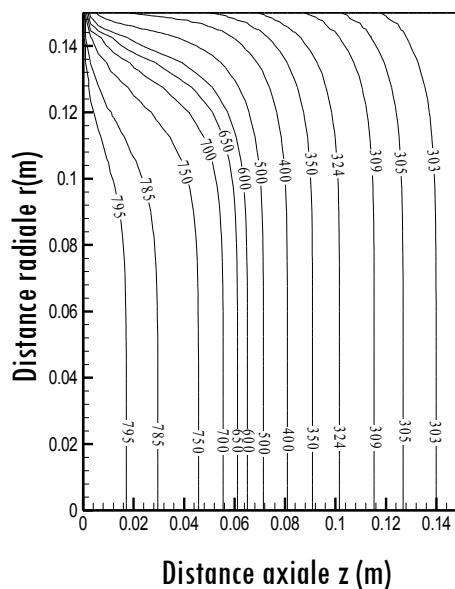


Figure 13 : Evolution du champ de la température de gaz, $t = 1250 \text{ s}$, $U_0 = 10 \text{ cm/s}$

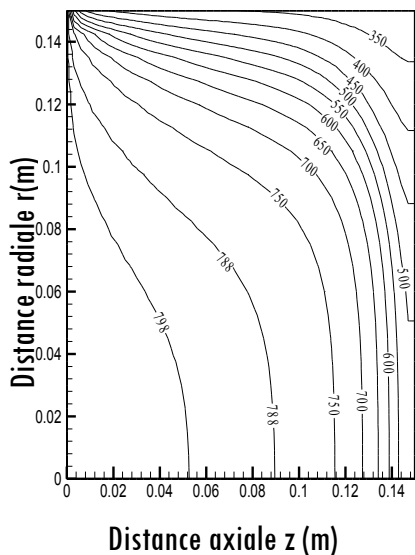


Figure 14 : Evolution du champ de la température de gaz, $t=2550s$, $U_0=10\text{ cm/s}$

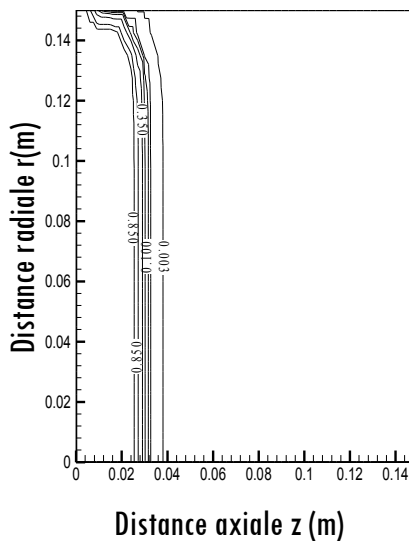


Figure 15: Evolution du champ de fraction massique du coke, $t=500s$, $U_0=10\text{ cm}$

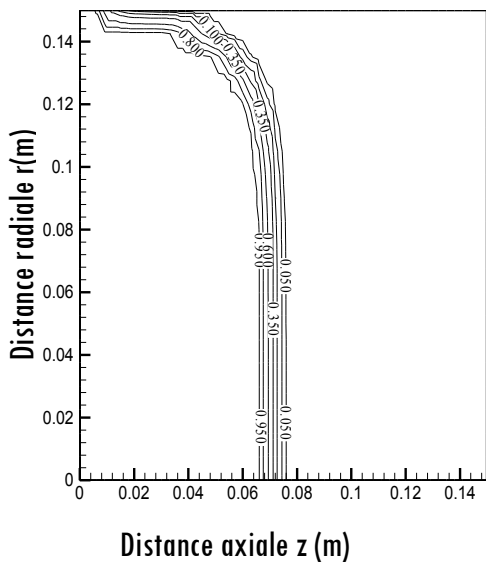


Figure 16: Evolution du champ de fraction massique du coke, $t=1250s$, $U_0=10\text{ cm/s}$

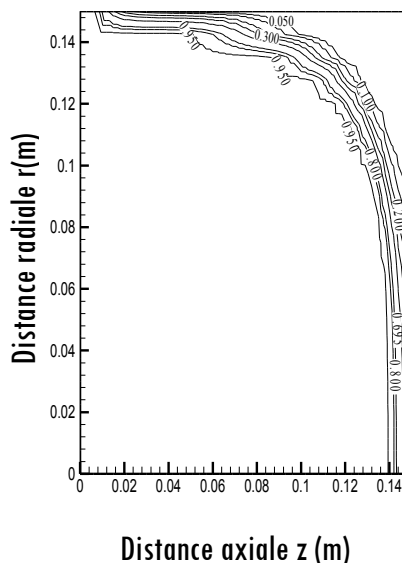


Figure 17: Evolution du champ de fraction massique du coke, $t=2550s$, $U_0=10\text{ cm/s}$

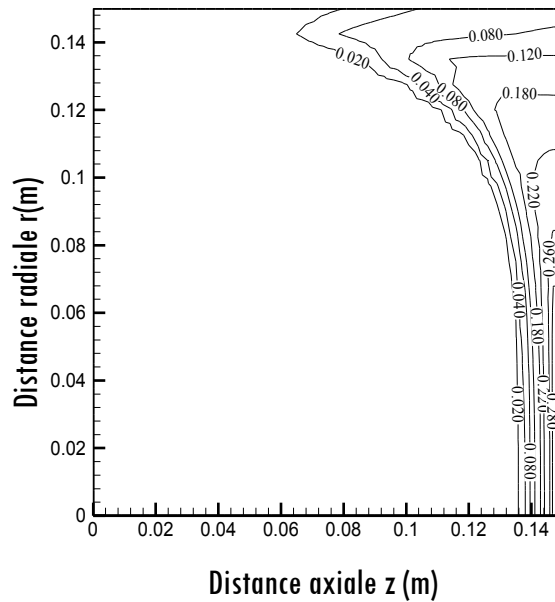


Figure 20 : Evolution du champ de fraction massique de gaz, $t=2550s$, $U_0=10\text{ cm/s}$

V. Conclusion

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 nous a permis de simuler et d'analyser le processus de la pyrolyse des particules solides. Les résultats obtenus dans le cas d'une seule particule présentent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux de Pyle et Zaror [18]. Par ailleurs, les résultats trouvés par notre modèle demeurent plus satisfaisants comparativement à ceux issus d'autres modèles présentés dans la littérature [1,19]. Ensuite, ce modèle a été appliqué dans une configuration originale de pyrolyse des particules solides par un écoulement d'un gaz inerte chaud. Nous avons analysé et discuté l'évolution spatiale et temporelle des champs de température, de la matière carbonée ainsi des gaz produits par la pyrolyse. Aussi l'effet de la vitesse de gaz à l'entrée est discuté. L'application potentielle de ce modèle réside dans son emploi à la pyrolyse d'autres types de biomasse et à d'autres configurations.

Références

- [1] - 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.
- [2] - L.T. FAN, L.S. FAN, K. MIYANAMI, T.Y. CHEN and W.P. WALAWENDER, "A mathematical model for pyrolysis of a solid particles effect of the Lewis number", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 55 (1977) 47-53.
- [3] - K. MIYANAMI, L.S. FAN and W.P. WALAWENDER, "A mathematical model for pyrolysis of a solid particle effects of the heat of reaction", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 55 (1977) 317-325
- [4] - W.R. CHAN, M. KELBON, and B.B. KRIEGER, "Modeling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of large biomass particle", *Fuel* 64 (1985) 1505-1513
- [5] - K.W. RAGLAND, J.C. BOERGER and A.J. BAKER, "A model of chunk wood combustion". *The Forest Products Journal* 38 (2) (1988) 27–32
- [6] - S.S. ALVES and J.L. FIGUEIREDO, "A model for pyrolysis of wet wood", *Chemical Engineering Science*, 44 (1989) 2861-2869
- [7] - J.J. SAASTAMOINEN, "Model for drying and pyrolysis in an updraft gasifier", *In: Bridgwater, A.V. (Ed.) Advances in Thermochemical Biomass Conversion*, Blackie, London, (1993) 186-200
- [8] - C. Di BLASI, "Analysis of convection and second any reaction effects within porous solid fuels undergoing pyrolysis", *Combustion Science and Technology*, 90 (1993) 315-340
- [9] - C. Di BLASI, "Numerical simulation of cellulose pyrolysis", *Biomass and Bioenergy*, 7 (1994) 87-98
- [10] - C.A. KOUFOPANOS, N. PAPAYANNAKOS, G. MASCHIO and A. LUCCHESI, "Modelling of the pyrolysis of biomass particles. Studies on kinetics, thermal and heat transfer effects", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 69 (1991) 907-915
- [11] - K.M. BRYDEN, "Computational modeling of wood combustion", *Ph.D. thesis*, University of Wisconsin-Madison, (1998)
- [12] - M.J. HAGGE, K.M. BRYDEN, "Modeling the impact of shrinkage on the pyrolysis of dry biomass", *Chemical Engineering Science* 57 (2002) 2811–2823
- [13] - W.R. CHAN, M. KELBON and B. KRIEGER BROCKETT, "Single-particle pyrolysis correlations of reaction products with process conditions". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 27 (1988) 2261-2275
- [14] - C.K. LEE, R.F. CHAIKEN and J.M. SINGER, "Charring pyrolysis of wood in fires by laser simulation", *In: Proceedings of the 16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, (1976) 1459-1470

- [15] - 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
- [16] - 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
- [17] - R. ZANZI, K. SJÖSTRÖM and E. BJÖRNBOM, "rapid pyrolysis of agricultural residues at high temperatures", *Biomass & Bioenergy*, 23 (5) (2002) 357-366
- [18] - 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
- [19] - R.K. JALAN and V.K. SRIVASTAVA, "Studies on pyrolysis of a single biomass cylindrical pellet - kinetic and heat transfer effects", *Energy Conversion and Management*, 40 (1999) 467-494
- [20] - K. RAVEENDRAN, A. GANESH and K. C. KHILART, "Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics", *Fuel*, 74 (12) (1995) 1812-1822
- [21] - PATANKAR and SPALDING, "Numerical heat transfer and fluid flow", *Hemisphere publishing corporation*, (1980)
- [22] - H. A. VAN DER VORST, "The Performance of Fortran Implementations for Preconditioned Conjugate Gradients on Vector Computers", *Parallel Computing*, 3 (1) (1986) 49-58