

Modélisation des Transferts de Chaleur et de Masse d'un Écoulement Laminaire Réactif dans une Enceinte Cylindrique.

**Kalifa Palm^{1,2,3*}, Issaka Ouédraogo^{2,3}, Alioune Ouédraogo²,
Xavier Chesneau³, Belkacem Zeghamati³**

¹*Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT)/Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), 03 BP 7047 Ouagadougou 03. Burkina-Faso*

²*Université de Ouagadougou, département de physique, Laboratoire de Chimie Organique et Physique Appliquée UFR/SEA, 03 BP 7021 Ouagadougou 03. Burkina-Faso.*

³*Université de Perpignan, laboratoire LAMPS-GME, 52 avenue Paul Alduy, 66860 Perpignan. France.*

(Reçu le 08/11/2007 – Accepté après corrections le 30/06/2008)

Résumé

L'incinération des déchets industriels, agricoles ou d'ordures ménagères engendre une pollution atmosphérique importante caractérisée par des rejets de gaz polluants (CO, CO₂, CH₄, C₂H₄, H₂O...etc.). Parmi les techniques de dépollution de ces effluents, la thermodestruction s'avère être efficace.

Ce travail est consacré à la modélisation des transferts dans un incinérateur cylindrique lors de la thermodestruction des effluents atmosphériques produits par la combustion d'ordures ménagères. Ces transferts sont régis par les équations classiques de la convection forcée en régime laminaire et celle d'un modèle de cinétique chimique globale. Ces équations et les conditions aux limites qui leur sont associées, sont adimensionnées à l'aide de variables caractéristiques, puis discrétisées par une méthode implicite aux différences finies. Les systèmes d'équations algébriques obtenus sont résolus par les algorithmes de Thomas et de Gauss. Nous analysons l'influence de l'augmentation du débit des fumées sur les transferts de chaleur et de masse et sur l'efficacité de la dépollution par l'incinération de ces fumées.

Mots clés : incinération, dépollution, effluents, modélisation, transferts.

Summary

The burning of industrial, agricultural wastes to ashes generates a significant air pollution characterized by the emissions of chemical compounds such as CO, CO₂, CH₄, C₂H₄, H₂O,..... Among the depollution technologies of these components, thermodestruction is effective.

This work is devoted to a modelling of thermodestruction in a cylindrical incinerator of gas waste produced by the combustion of garbage. Dimensionless transfer equations are solved using an implicit numerical scheme, Thomas and Gauss algorithms. We analyze the influence of inlet smoke mass rate on heat and mass transfers and the depollution efficiency of the fumes thermodestruction.

Keywords: burning, depollution, effluents, modelling, transfers.

* Auteur de correspondance : palm_kalifa@hotmail.com

Nomenclature

C_p : Capacité calorifique du mélange fumées-air ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
 d : Diamètre de l'incinérateur (m)
 D : Coefficient de diffusion (m^2s^{-1})
 E : Energie d'activation (J mol^{-1})
 g : Accélération de la pesanteur (= $9,81 \text{ m s}^{-2}$)
 h : Coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
 H : Hauteur de l'incinérateur (m)
 ΔH : Enthalpie (kJ mol^{-1})
 Q : Chaleur dégagée lors d'une combustion ou de réaction (kJ)
 M : Masse molaire (kg mol^{-1})
 n : Nombre de moles (mole)
 ΔH_0^{298} : Enthalpie standard de combustion à 298 K (kJ mol^{-1})
 k : Constante des vitesses de réaction ($\text{m}^3\text{mol}^{-1}\text{s}^{-1}$)
 k_0 : Facteur de fréquence ou pré-exponentiel ($\text{m}^3 \text{mol}^{-1}\text{s}^{-1}$)
 P : Pression dynamique (Pa)
 r : Ordonnée radiale (m)
 U : Composante radiale de la vitesse (m s^{-1})
 V : Composante axiale de la vitesse (m s^{-1})
 \dot{W} : Vitesse globale de combustion des fumées (s^{-1})
 x : Fraction molaire
 Y : Fraction massique
 z : Ordonnée axiale (m)
 R : Constante des gaz parfaits (= $8,314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$)

R_t : Résistance thermique de l'isolation (W^{-1}K)
 T : Température (K)

Nombres adimensionnels

Re : Nombre de Reynolds
 Pr : Nombre de Prandtl
 Sc : Nombre de Schmidt

Lettres grecques

ρ : Masse volumique du mélange air-fumées (kg m^{-3})
 σ : Vitesse de disparition ou d'apparition de l'espèce (s^{-1})
 ψ : Fonction de courant (m^2s^{-1})
 λ : Conductivité thermique ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
 μ : Viscosité dynamique du mélange ($\text{Kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)

Indices :

amb : Ambient.
e : Entrée de l'incinérateur.
F : Fluide
i : Types d'isolation.
inci : Incinérateur
k : Espèces présentes dans les fumées.
pe : Paroi extérieure.
pi : Paroi intérieure.
réa : Réaction de combustion des fumées.
s : Sortie de l'incinérateur.

1. Introduction

L'élimination des ordures ménagères est un problème majeur pour les villes en raison notamment de l'accroissement de l'urbanisation et de la quantité des déchets produits par les consommateurs. Parmi les techniques de traitement des déchets, le traitement thermique est très répandu malgré la pollution atmosphérique qu'il engendre ^[1,2]. En effet, les fumées produites par l'incinération des déchets ménagers comportent de nombreux polluants tels que CO, CO₂, CH₄, NO, NO₂,..... etc ^[1,2]. Ainsi, une étude de Bahillo et al. ^[3] sur l'incinération en Espagne des déchets de chaussures en cuir, montre que 60% de ces ordures se transforment en fumées composées de NO, NO₂, NH₃, SO₂, Cr₂O₂, Cr₂O₃, SiO₂ et des gaz carbonés. Les émissions d'effluents atmosphériques produits par l'incinération de déchets des emballages à feu contrôlé sont composées de CO, CO₂, SO₂, NO, NO₂ avec des particules de Hg, Cd, HCl, HF, HBr, NH₃, Ni, Cr, Mn, Cu, Co et Sb qui sont toxiques et nuisibles à l'environnement ^[2]. Pour lutter contre la pollution de l'environnement, il s'avère indispensable de pallier à ces rejets en agissant par exemple, sur la technique de traitement des déchets pour réduire les polluants des fumées ou en procédant au traitement des fumées afin qu'elles soient non polluantes pour l'environnement. La thermodestruction s'avère être une des techniques efficaces de dépollution de ces effluents atmosphériques. Elle peut être associée à la production d'électricité par cogénération ^[4] et répond aux caractéristiques de centrales d'incinération des déchets dont le fonctionnement peut s'effectuer en charge partielle ou en surcharge. L'analyse des méthodes de minimisation des émissions de dioxines des systèmes d'incinération des ordures municipales montre que la plupart de ces centrales émettent des dioxines au-dessus

des limites fixées par les normes de 1996 ^[1].

Dans la suite, nous nous limiterons à quelques rappels bibliographiques concernant les transferts provoqués par la combustion de combustibles gazeux.

Une étude numérique de transferts engendrés par la combustion d'un mélange fuel-oxygène dans une enceinte cubique montre que les vitesses à laquelle les produits de la combustion se forment et la température moyenne des gaz augmentent rapidement au cours du temps ^[5]. Les équations de transfert sont résolues par une méthode explicite aux différences finies et la méthode de Runge-Kutta d'ordre 3.

La combustion de gaz volatiles (CH₄ et C₃H₈) de lit fluidisé avec un brûleur, conduit à la formation de polluants tels que CO et C₂H₄ dont les concentrations diminuent au fur et à mesure que les zones considérées se trouvent localisées au voisinage de l'extrémité supérieure de la flamme ^[6]. En outre, la température de la flamme peut atteindre des valeurs supérieures à 2500 K.

Pour mettre en évidence l'influence du modèle de combustion, des transferts radiatifs et de la convection forcée turbulente sur les flammes produites par la combustion de propane dans une enceinte parallélépipédique compartimentée, G.H. Yeoh et al ^[7] ont procédé à une étude numérique des transferts engendrés par cette combustion en résolvant les équations de transfert par une méthode implicite aux différences finies ^[8]; l'adéquation entre les champs de pression et de vitesse étant assurée par l'algorithme SIMPLE ^[9]. Ainsi leurs résultats montrent que le modèle de combustion d'une flamme laminaire conduit à une détermination rigoureuse des fractions massiques de CO et CO₂ produits par cette combustion et que les transferts radiatifs et turbulents intensifient la combustion. Francesco S. Marra ^[10] décrit une étude numérique de la dynamique de propagation d'une flamme de méthane dans une enceinte cylindrique. Le modèle

proposé est basé sur une approche d'écoulement pseudo – compressible, avec une méthode de projection pour dériver une équation elliptique qui caractérise les perturbations de la pression. Ses résultats montrent la propagation de la flamme pour différentes combinaisons de la géométrie de l'incinérateur et des conditions initiales. Ces quelques rappels bibliographiques montrent que l'optimisation du fonctionnement d'un incinérateur destiné à la thermodestruction des effluents atmosphériques produits par la combustion de déchets nécessite la maîtrise des transferts et de la cinétique chimique qui régissent ce processus.

Cet article est consacré à une modélisation des transferts lors de la thermodestruction dans un incinérateur cylindrique des fumées produites par la combustion d'ordures ménagères. Les transferts engendrés par les réactions chimiques liées à la thermodestruction des principaux composés des fumées (CO, CO₂, CH₄, C₂H₄, H₂O) sont couplés aux transferts de chaleur, de masse et d'impulsion. L'un des buts de cette étude est d'analyser l'efficacité de l'incinération des fumées issues de la combustion d'ordures ménagères.

2. Schéma conceptuel de la modélisation

L'incinérateur est un cylindre vertical, de dimensions H=1 m, d=1 m, muni d'une entrée et d'une cheminée situées respectivement sur les parties inférieure et supérieure de ce cylindre (de=ds=0,20 m) (figure 1).

Les fumées produites par la combustion des ordures ménagères entrent dans le four par le conduit inférieur et les gaz engendrés par leur incinération sont rejetés à l'extérieur à travers la cheminée.

Nous considérons les fumées composées d'un mélange simple de gaz (déchets triés) dont la composition est selon le tableau suivant (Tableau I) :

Tableau I : Composition des fumées d'incinération de déchets triés pré mélangées avec de l'air.

Fraction massique	Composition
Y_{air}	0,6918
Y_{CO}	0,00389
Y_{CO_2}	0,1738
Y_{H_2O}	0,12251
Y_{CH_4}	0,003
$Y_{C_2H_4}$	0,005

Les parois de l'incinérateur sont en briques réfractaires, isolées par une couche de laine de verre emprisonnée à l'intérieur d'une tôle en acier (figure 2).

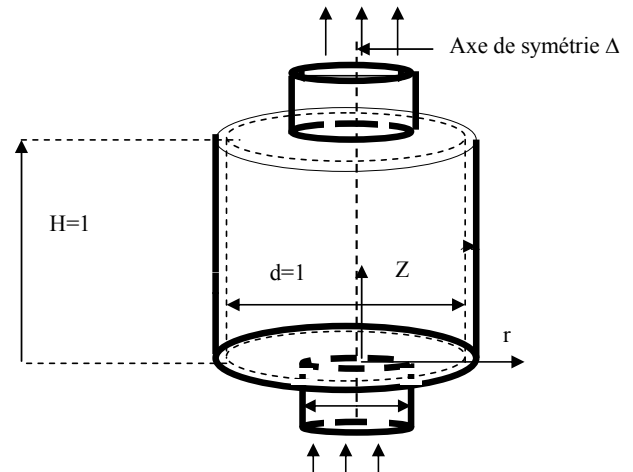


Figure 1 : Schéma du système et référentiel

Tableau II : Caractéristiques de la paroi du four

	Briques	Tôle	Laine de verre
Epaisseur (m)	0,1	0,005	0,1
Conductivité (W/m K)	0,17	60	0,0172

Soit (O, r, z) le référentiel associé à l'incinérateur, tel que l'origine O soit localisée au centre de sa base, l'ordonnée z comptée positivement dans le sens opposé

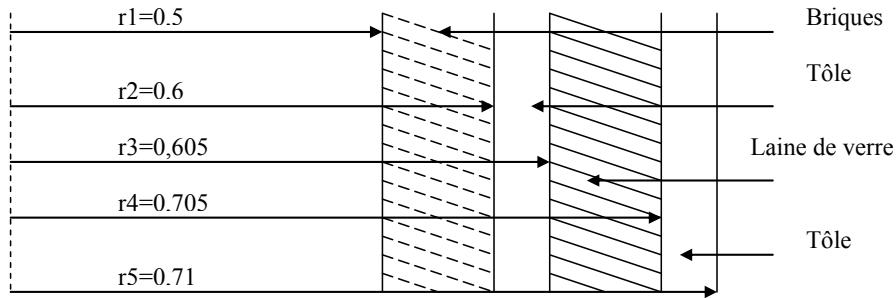


Figure 2 : Composition de la paroi du réacteur

au vecteur accélération de la pesanteur et l'abscisse r perpendiculaire à l'axe $[Oz]$. Posons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La dissipation visqueuse est négligeable.
- La composition des fumées est homogène.
- Les effets Dufour et Soret sont négligeables.
- Le gradient de pression suivant l'axe $[Or]$ est négligeable.
- Le système présente une symétrie de révolution par rapport à l'axe $[Oz]$.
- L'air est composé d'oxygène O_2 à 21% et d'azote N_2 à 79%.

3. Formulation mathématique

3.1 Equations de transfert

Compte tenu des hypothèses simplificatrices formulées ci-dessus, les équations de conservation de la masse, du mouvement, d'énergie et de diffusion des espèces s'écrivent dans le référentiel (O, r, z) :

• Equation de continuité :

$$\frac{\partial U^*}{\partial r^*} + \frac{\partial V^*}{\partial z^*} + \frac{U^*}{r^*} = 0 \quad (1)$$

• Equation du mouvement :

► Composante suivant $[O,r]$:

$$\rho^* \left(\frac{\partial U^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial U^*}{\partial r^*} + V^* \frac{\partial U^*}{\partial z^*} \right) = \frac{1}{\text{Re}} \mu^* \left[\left(\frac{\partial^2 U^*}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial U^*}{\partial r^*} - \frac{U^*}{r^{*2}} \right) + \frac{\partial^2 U^*}{\partial z^{*2}} \right] \quad (2)$$

► Composante suivant $[O,z]$:

$$\rho^* \left(\frac{\partial V^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial V^*}{\partial r^*} + V^* \frac{\partial V^*}{\partial z^*} \right) = - \frac{\partial P^*}{\partial z^*} + \frac{1}{\text{Re}} \mu^* \left(\frac{\partial^2 V^*}{\partial r^{*2}} + \frac{\partial^2 V^*}{\partial z^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial V^*}{\partial r^*} \right) - \rho^* g \frac{de}{V_0^2} \quad (3)$$

• Equation d'énergie :

$$\rho^* C_p^* \left(\frac{\partial T^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} + V^* \frac{\partial T^*}{\partial z^*} \right) = \frac{1}{\text{Pr}} \frac{1}{\text{Re}} \lambda^* \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial r^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) + Q_{\text{rea}}^* \quad (4)$$

• Equation de diffusion des espèces :

$$\frac{\partial Y_k^*}{\partial t^*} + U^* \frac{\partial Y_k^*}{\partial r^*} + V^* \frac{\partial Y_k^*}{\partial z^*} = \frac{1}{\text{Sc}} \frac{1}{\text{Re}} D_k^* \left(\frac{\partial^2 Y_k^*}{\partial r^{*2}} + \frac{\partial^2 Y_k^*}{\partial z^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial Y_k^*}{\partial r^*} \right) + \sigma_k^* \quad (5)$$

Avec :

$$z^* = \frac{z}{de} \quad ; \quad r^* = \frac{r}{de} \quad ; \quad \rho^* = \frac{\rho}{\rho_0} \quad ;$$

$$U^* = \frac{U}{V_0} \quad ; \quad V^* = \frac{V}{V_0} \quad ; \quad P^* = \frac{P}{V_0^2 \rho_0}$$

$$\mu^* = \frac{\mu}{\mu_0} \quad ; \quad C_p^* = \frac{C_p}{C_{p0}} \quad ; \quad T^* = \frac{T}{T_0} \quad ;$$

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad ; \quad t^* = \frac{V_0 t}{de} \quad ; \quad D_k^* = \frac{D_k}{D_{k0}}$$

$$Q_{\text{rea}}^* = \frac{Q_{\text{rea}}}{\rho_0 C_{p0} T_0 V_0}$$

$$H^* = \frac{H}{de} \quad ; \quad d_s^* = \frac{d_s}{de} \quad ; \quad \sigma_k^* = \frac{c_{k0} V_0}{de} \sigma_k \quad ;$$

$$h_{\text{air}}^* = \frac{h_{\text{air}} d_e}{\lambda_0} \quad ; \quad R_t^* = R_t \frac{\lambda_0}{de}$$

Le coefficient de diffusion des espèces D_k^* est évalué en prenant l'azote comme le composé majoritaire.

Les conditions initiales et aux limites adimensionnelles s'écrivent :

► Conditions initiales

$$\forall t^* < t_0^* \quad U^* = V^* = 0; T^*_{inci} = 1 ;$$

$$Y_k = Y_{air-fumées}$$

► Conditions aux limites

$$\forall t^* \geq t_0^*$$

• Entrée : $0 \leq r^* \leq \frac{1}{2}$

$$V^* = 1 ; U^* = 0 ; Y_k = Y_{entrée} ; T^* = T^*_{entrée} ;$$

$$P^* = -\frac{1}{2} \rho^* \quad (6)$$

• Sortie : $0 \leq r^* \leq \frac{1}{2}$

$$\frac{\partial V^*}{\partial z^*} = 0 ; \frac{\partial U^*}{\partial z^*} = 0 ; \frac{\partial Y_k}{\partial z^*} = 0 ; \frac{\partial T^*}{\partial z^*} = 0 ;$$

$$\frac{\partial P^*}{\partial z^*} = 0. \quad (7)$$

• Parois verticales :

$$r^* = \frac{d}{2} \quad 0 \leq z^* \leq \frac{H}{de}$$

$$U^* = 0 ; V^* = 0 ; \frac{\partial Y_k}{\partial r^*} = 0 ;$$

$$-2\pi H r_1 \lambda^* \left(\frac{\partial T^*}{\partial r} \right) = \frac{1}{R_i^*} (T_{pi}^* - T_{pe}^*) = 2\pi H r_5 h_{air}^* (T_{pe}^* - T_{amb}^*)$$

(8)

• Parois horizontales :

$$\frac{1}{2} \leq r^* \leq \frac{d}{2} \quad z^* = 0 \quad \text{ou} \quad z^* = \frac{H}{de}$$

$$U^* = 0 ; V^* = 0 ; \frac{\partial Y_k}{\partial z^*} = 0 ; \frac{\partial T^*}{\partial z^*} = 0 \quad (9)$$

• Axe de symétrie : $r^* = 0 \quad 0 \leq z^* \leq \frac{H}{de}$

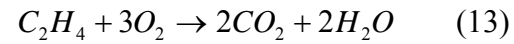
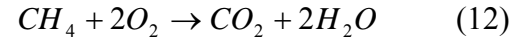
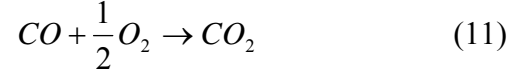
$$\frac{\partial P^*}{\partial r^*} = 0 ; \quad \frac{\partial V^*}{\partial r^*} = 0 ; \quad \frac{\partial T^*}{\partial r^*} = 0 ; U^* = 0 ;$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial r^*} = 0. \quad (10)$$

3.2 Modèle cinétique :

Les fumées produites par l'incinération des déchets ménagers contiennent essentiellement du CO₂, CO, H₂O, CH₄, C₂H₄, et du NO_x. Nous supposons que les composés azotés ont été éliminés par

filtration et la cinétique chimique décrite à l'échelle macroscopique, ainsi les réactions chimiques complètes de la combustion des composés CO, CH₄, C₂H₄ présents dans les fumées produites par l'incinération des déchets ménagers sont caractérisées par :



Les vitesses de réaction de ces trois réactions chimiques ne peuvent être utilisées séparément puisque la vitesse de réaction de chaque espèce de combustible dépend de la fraction massique locale de l'oxygène. Cette dernière est fonction de l'état d'avancement des autres réactions dites concurrentes. Pour pallier ce problème, nous considérons un modèle de cinétique global, permettant de coupler les vitesses des trois réactions chimiques décrites ci-dessus.

$$\dot{W} = -k Y_{O_2} \frac{\rho(T)}{M_{O_2}} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) : \quad \text{Vitesse globale de combustion des fumées}^{[11]} \quad (14)$$

Avec :

$$k = \sum_i x_i k_i, \quad k_i = k_{0i} \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right),$$

$$Y = \sum_i Y_i, \quad M = \sum_i x_i M_i, \quad E = \sum_i x_i E_i. \quad (15)$$

Pour chaque combustible, les valeurs des constantes cinétiques sont reportées dans le Tableau III :

Tableau III : valeurs des constantes cinétiques^[12]

Composants i	$k_{0i} (10^{11})$ $m^3 mol^{-1} s^{-1}$	E_i / R (K) T < 1073 K	E_i / R (K) T > 1073 K
Ethylène C_2H_4	37	22 753	27 679
Hydrogène H_2	2,45	19 551	23 855
Monoxyde de carbone CO	22,3	19 655	20 734
Méthane CH_4	7	30 196	31 706
Carbone C_{gaz}	2,5	21890	21890

La chaleur de combustion des composants retenus dans cette étude est supposée être égale à la somme des chaleurs dégagées lors des différentes combustions de ces composants. Ainsi, pour les réactions (11-13), il vient ^[13] :

$$\Delta H_{CO} = \Delta H_{0CO}^{298} + \int_{298}^T \left(M_{CO_2} C_{p_{CO_2}} - M_{CO} C_{p_{CO}} - \frac{1}{2} M_{O_2} C_{p_{O_2}} \right) dT \quad (16)$$

Et $Q_{CO} = n_{CO} \Delta H_{CO}$.

$$\Delta H_{CH_4} = \Delta H_{0CH_4}^{298} + \int_{298}^T \left(M_{CO_2} C_{p_{CO_2}} + 2M_{H_2O} C_{p_{H_2O}} - M_{CH_4} C_{p_{CH_4}} - 2M_{O_2} C_{p_{O_2}} \right) dT \quad (17)$$

$$\Delta H_{C_2H_4} = \Delta H_{0C_2H_4}^{298} + \int_{298}^T \left(2M_{CO_2} C_{p_{CO_2}} + 2M_{H_2O} C_{p_{H_2O}} - M_{C_2H_4} C_{p_{C_2H_4}} - 3M_{O_2} C_{p_{O_2}} \right) dT \quad (18)$$

Ainsi, $Q_{CH_4} = n_{CH_4} \Delta H_{CH_4}$,

$Q_{C_2H_4} = n_{C_2H_4} \Delta H_{C_2H_4}$.

Finalement, la quantité de chaleur de la combustion totale lors de l'incinération de CO, CH₄, C₂H₄ obéit à la relation suivante :

$$Q_{rea} = Q_{CO} + Q_{CH_4} + Q_{C_2H_4} \quad \text{et} \quad Q'_{rea} = \frac{Q_{rea}}{H S \Delta t}$$

avec $S = \pi \frac{d^2}{4}$ (19)

3.3 Résolution numérique

La résolution numérique des équations (1-5) associées aux conditions aux limites (6-10) est effectuée par une méthode implicite aux différences finies, dans laquelle le terme de concentration axiale est discrétisé en utilisant des différences amont, les autres termes par des différences centrées ^[14,15].

Les systèmes d'équations algébriques déduits de cette discrétisation peuvent s'écrire, après linéarisation, comme suit

$$A_{i,j} \Phi^{n+1}_{i-1,j} + B_{i,j} \Phi^{n+1}_{i,j} + C_{i,j} \Phi^{n+1}_{i+1,j} = E_{i,j}$$

Avec $i=2$ à $N-1$ et $j=2$ à $M-1$ (20)

$A_{i,j}$, $B_{i,j}$, $C_{i,j}$ et $E_{i,j}$ sont des coefficients algébriques et $\Phi=U, V, T$ ou Y_k .

Le système d'équations algébriques (20) pour les équations d'énergie, de diffusion des espèces et la composante de l'équation du mouvement suivant l'axe [O,r) associés aux conditions aux limites est de type tridiagonal. Il est résolu par l'algorithme de Thomas. Pour la composante de l'équation du mouvement suivant [O,z), il conduit avec les conditions aux limites associées à cette équation à un système algébrique de type $N \times M+1$ qui a été résolu par l'algorithme de Gauss. Le critère de convergence adopté est basé sur l'écart relatif entre deux itérations successives de la vitesse, de la température et de la fraction massique de l'oxygène qui doit être inférieur à 10^{-4} .

Le régime permanent est supposé atteint lorsque l'écart entre le nombre de Nusselt moyen calculé à l'itération k et celui à l'itération $k-1$ est inférieur à 10^{-4} .

4. Résultats et discussions

4.1 Comparaison avec des travaux antérieurs :

Afin de comparer les résultats de notre code de calcul à ceux de Najam et al ^[16], nous avons procédé à une étude de la convection mixte dans une cavité, en forme de « T », munie de deux ouvertures coaxiales et de parois chauffées par un flux de chaleur uniforme de densité constante (figure 3).

Une comparaison entre les lignes de courant et les isothermes obtenues par notre code numérique et celles de Najam et al ^[16] montre un accord qualitatif et quantitatif très satisfaisant (figures 4 et 5, tableau IV). En effet, l'écart maximal observé entre les valeurs maximales des

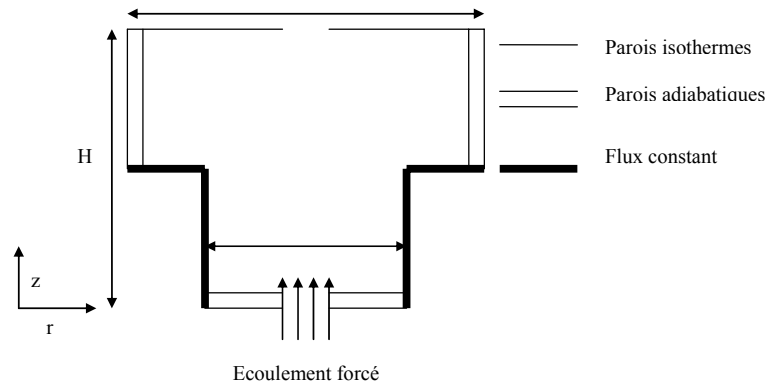
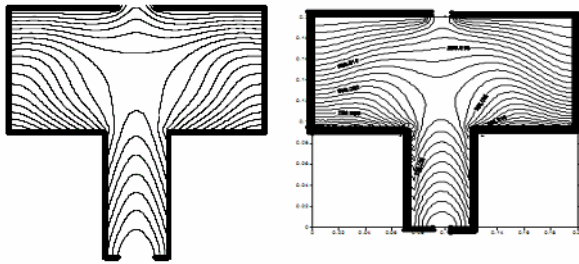


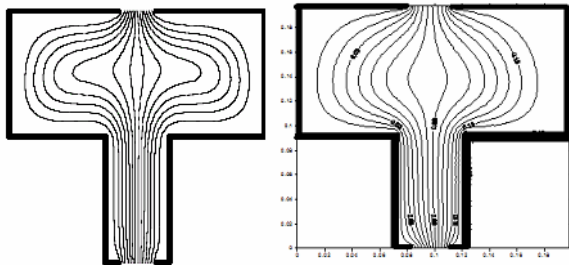
Figure 3 : Schéma de l'enceinte

fonctions de courant déterminées par notre modèle et celui de Najam n'excède pas 3% ; pour les valeurs minimales, il n'excède pas 0,5%.



a) Modèle de Najam et al b) Notre modèle

Figure 4 : Lignes de courant pour Re=65



a) Modèle de Najam et al. b) Notre modèle

Figure 5 : Isothermes pour Re = 65

Tableau IV : Valeurs maximales et minimales de la fonction de courant.

Ra	Notre modèle	Modèle Najam et al
10^3	$\psi_{ext} = 0,025$	$\psi_{ext} = 0,024$
10^4	$\psi_{ext} = 0,79$	$\psi_{ext} = 0,77$
10^5	$\psi_{min} = -12,07$	$\psi_{min} = -12,12$
	$\psi_{max} = 9,15$	$\psi_{max} = 8,93$
	$\psi_{ext} = 9,56$	$\psi_{ext} = 9,49$

Nous avons comparé les résultats déduits de notre modèle de cinétique réactionnelle avec ceux de Popp et al ^[17] en procédant à une étude de la combustion du méthane en régime laminaire à proximité d'une paroi maintenue à une température constante ^[17]. Les calculs ont été effectués avec les fractions massiques initiales du mélange stoechiométrique suivantes : $[Y_{CH_4}] = 0,055$; $[Y_{O_2}] = 0,22$; $[Y_{N_2}] = 0,725$.

Une étude comparative entre nos résultats et ceux de Popp et al ^[17] (figure 6) montre que, sans tenir compte de la fraction massique du dioxyde de carbone, l'écart relatif moyen entre nos résultats et ceux de Popp et al est de l'ordre de 4%. L'écart important observé, pour les fractions massiques du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau en fin de formation, résulte de l'hypothèse que nous avons retenue, à savoir que la combustion est complète et qu'il n'y a pas d'apparition de monoxyde de carbone et que les effets Dufour et Soret sont négligeables.

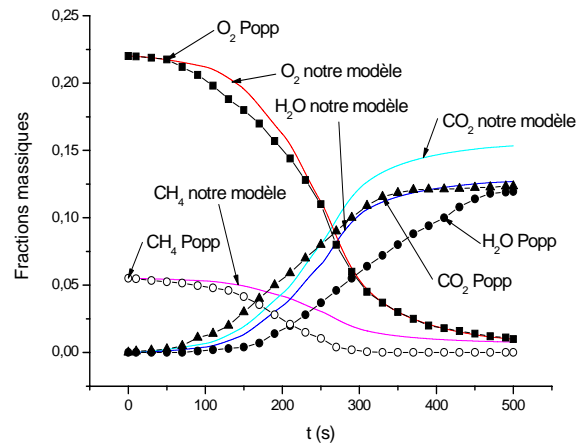


Figure 6 : Evolution au cours du temps des fractions massiques des principales espèces présentes dans la combustion du méthane.

4.2 Analyse des résultats

Les calculs ont été effectués pour des valeurs du nombre de Reynolds variant entre 500 et 1750. L'écoulement est décrit, entre l'entrée et la sortie de l'incinérateur, par un tube de courant dans lequel les lignes sont parallèles entre elles (figure 7). On observe la présence de zones de recirculation de part et d'autre de l'axe de symétrie de l'incinérateur. Cette structure démontre que l'écoulement principal se déroule au voisinage de l'axe de symétrie. L'accroissement du nombre de Reynolds ne s'accompagne pas d'une modification de la structure mais d'une intensification de la convection entre l'axe de symétrie et le reste de l'incinérateur.

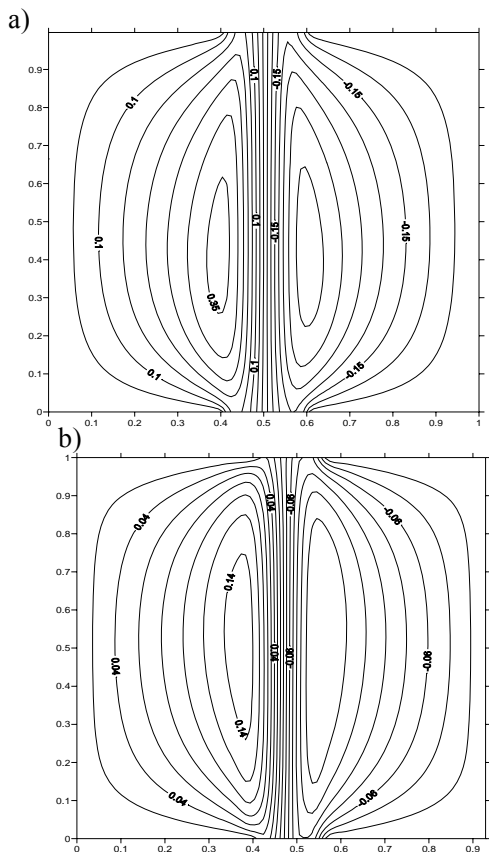


Figure 7 : Lignes de courant ; a) Re=500 ; b) Re=1750

Les isothermes sont représentées dans la figure 8. Nous notons une forme régulière pour de petits nombres de Reynolds (500).

Par contre, pour des valeurs plus élevées de ce nombre, les lignes se déforment, s'étirent, en présentant deux cellules (supérieure et inférieure) qui traduisent une augmentation de la combustion à l'approche de la sortie de l'incinérateur. Au voisinage des parois, les isothermes qui atteignent leurs valeurs maximales décrivent des lignes verticales, parallèles à ces parois, signifiant ainsi que les transferts thermiques s'effectuent principalement par conduction.

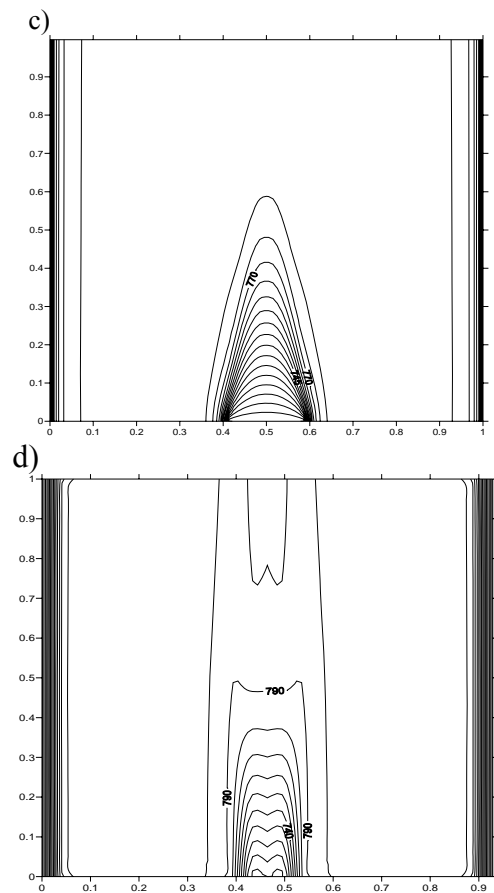


Figure 8 : Isothermes ; c) Re=500 ; d) Re=1750

Les isoconcentrations de l'oxygène suivent les mêmes déformations que les isothermes puisque les valeurs des nombres de Prandtl et de Schmidt sont voisins ($Pr=0.85$ et $Sc=0.91$) (figure 9). Pour de grands nombres de Reynolds, il y a aussi formation de deux cellules dans la zone supérieure et inférieure de l'incinérateur. Contrairement aux isothermes, les valeurs les plus basses sont localisées à l'extérieur de l'écoulement principal, lieu où se

déroule la combustion des composants des fumées, qui s'effectue autour du plan médian de l'incinérateur. La chaleur dégagée par l'incinération des fumées provoque une élévation de la température pariétale d'autant plus importante que le nombre de Reynolds est grand et par conséquent le débit des fumées introduites dans l'incinérateur est élevé (figures 10).

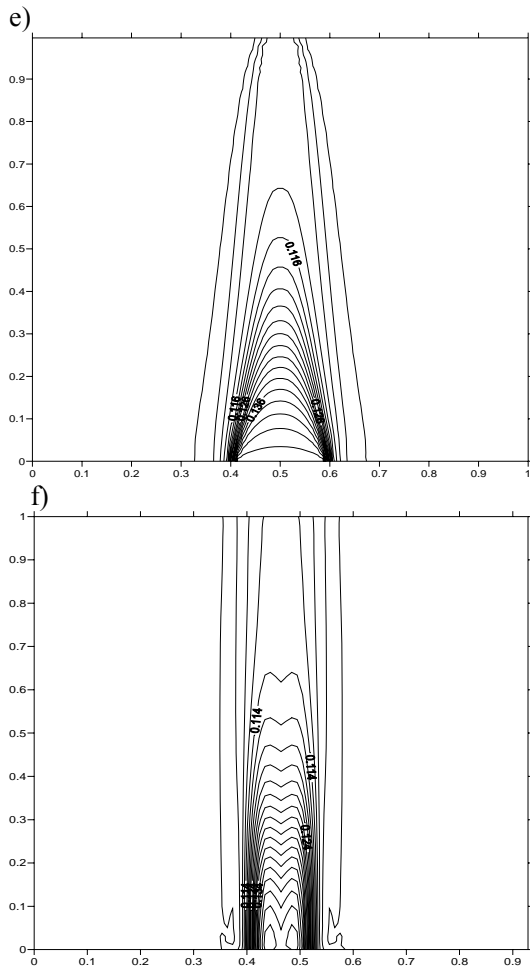


Figure 9: Isoconcentrations de l'oxygène ; e) Re=500 ; f) Re=1750

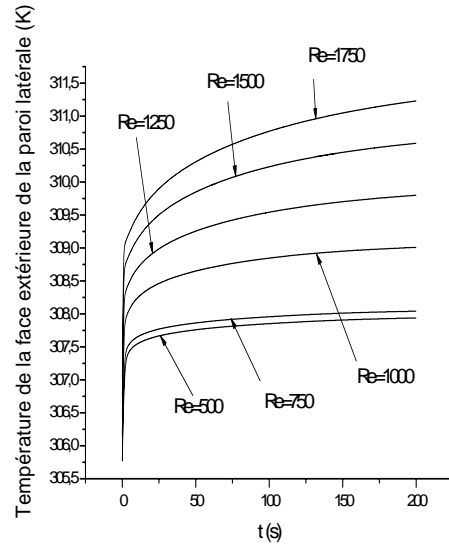
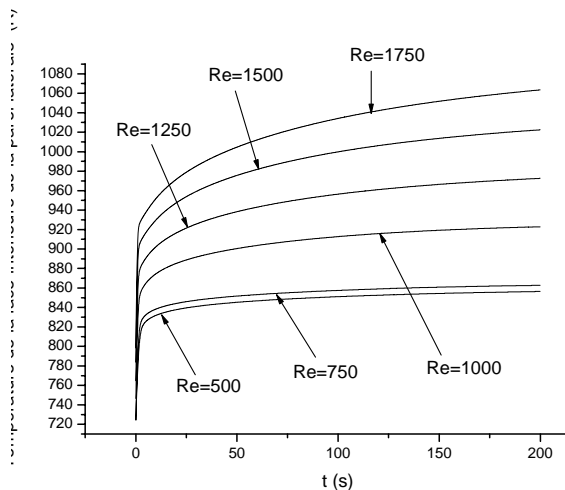
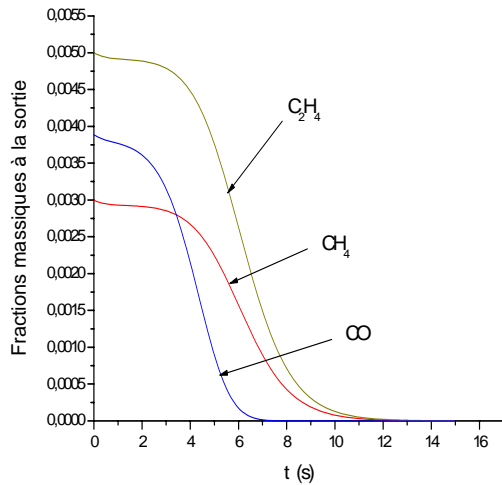


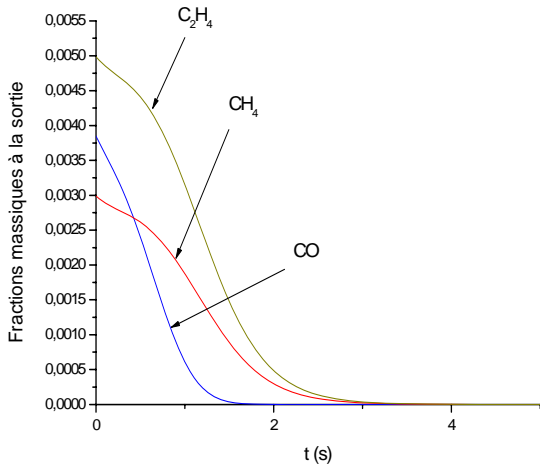
Figure 10 : Evolution au cours du temps de la température g) de la face intérieure h) de la face externe de la paroi latérale à $z=0,294$ m.

Quant au bilan de la combustion, la figure 9 montre que tous les combustibles disparaissent rapidement (en une dizaine de secondes) à la sortie de l'incinérateur en produisant de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone. Aussi, aucun des gaz nocifs dégagés par la combustion des ordures ménagères ne se retrouve donc dans l'atmosphère au bout de quelques secondes de fonctionnement. Pour une concentration de composants des fumées, l'accroissement du débit de fumée influence de façon significative le temps de thermodestruction. En effet, pour un nombre de Reynolds égal à 500, le temps de thermodestruction du C_2H_4 passe de 11 s à 3 s pour un nombre de Reynolds égal à 1000. Ce système d'incinération des fumées produites par la combustion d'ordures ménagères s'avère donc efficace pour la dépollution de ces fumées.

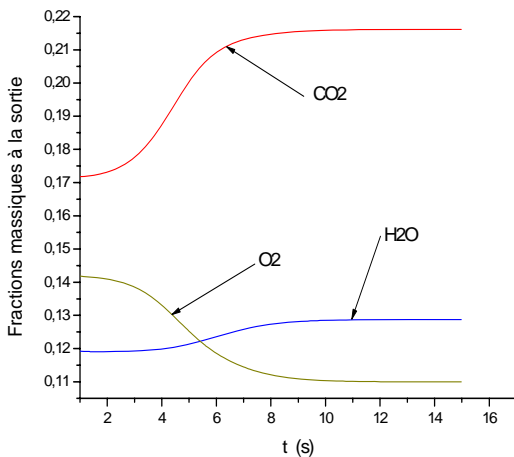
i)



j)



k)



l)

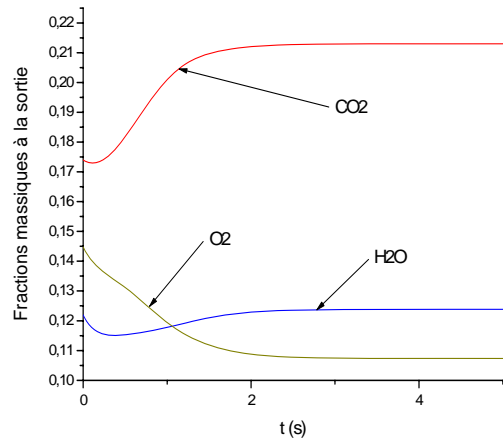


Figure 11 :i), k) Re=500 ; j), l) Re=1000
Production et thermodestruction de gaz à la sortie de l'incinérateur au cours du temps.

5. Conclusion

Nous avons procédé à une étude numérique de l'incinération des fumées produites par la combustion d'ordures ménagères. Après avoir comparé les résultats de notre modèle avec ceux de Najam et al ^[16] et ceux de Popp et al ^[17], nous avons analysé, en adoptant un modèle de cinétique chimique globale, l'influence du débit des fumées sur les distributions de lignes de courant, d'isothermes et d'isoconcentrations et sur l'évolution au cours du temps de la composition des fumées. Ainsi, nous avons montré que :

- les températures pariétales et des fumées augmentent avec le débit.
- Les composés polluants de ces fumées sont détruits très rapidement.

Ce modèle d'incinération des fumées produites par la combustion des déchets ménagers s'avère donc efficace.

Bibliographie

- [1] Gordon Mc Kay. Dioxin characterisation, formation and minimization during municipal solid waste. (MSW) incineration: review. Chemical Engineering Journal (2002) 86, p 343-368.

- [2] Nammari D. R. N., Hogland W., Marques M., Nimmermark S., Moutavtchi V. Emissions from a controlled fire in a municipal solid waste bales. *Waste Management* (2004) 24, p 9-18.
- [3] Bahillo A., Armesto L., Cabanillas A., Otero J. Thermal valorization of footwear leather wastes in bubbling fluidized bed combustion. *Waste Management*, 24 (2004), p 935-944.
- [4] Olsommer B., Dupreux Y., Von Sparkovsky M., Van Gilst J. Simulation numérique d'un four d'incinération d'ordures industriel couplé à une chaudière à circulation naturelle. *Revue Générale de Thermique* (1997) 36, p135-148.
- [5] Bortoli A. L. Mixing and chemical reacting flow simulation inside square cavities. *Applied Numerical Mathematics* (2003) 47, p 295-303.
- [6] Raj A. Srinivasan, Suresh Sriramulu, Sivakumar Kulasekaran and Pradeep K. Agarwal. Mathematical modeling of fluidized bed combustion -2 : combustion of gases. *Fuel* (1998) 77, p 1033-1049.
- [7] G.H. Yeoh, R.K.K. Yuen, S.M. Lo, D.H. Chen. On numerical comparison of enclosure fire in a multi - compartment building. *Fire Safety Journal* (2003) 38, p 85-94.
- [8] Stone H. L. Iterative solution of implicate approximation of multidimensional partial differential equations. *SIAM Jour. Numer. Anal* (1968) 5, p 530-558.
- [9] Patankar S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. Mc Graw-Hill (1980), New-York;
- [10] Francesco S. Marra. Numerical study of premixed laminar flame propagation in a closed tube with a full Navier-Stokes approach. Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute (1996), p 907-913.
- [11] Bergeron C. A., Hallet W. L. H. Autoignition of single droplets of two-component liquid fuels. *Science and Technique* (1989) 65, p 181-194.
- [12] Kulasekaran S., Linjewile T. M., Agarwal P. K. Mathematical modelling of fluidized bed combustion 3. Simultaneous combustion of char and combustible gases. *Fuel* (1999) 78, p 403-417.
- [13] Oturan M.A., Robert M. Thermodynamique chimique. Presse universitaire de Grenoble, 1997.
- [14] Euvrard D. Résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Edition Dunod, 3^{ème} édition, 1994.
- [15] Saadjan E. Phénomènes de transport et leurs résolutions numériques. Polytechnica, 1998.
- [16] Najam M., El Alami M., Oubarra A. Heat transfer in a « T » form cavity with heated rectangular blocks submitted to a vertical jet: the block gap effect on multiple solutions. *Energy Conversion and Management* (2004) 45, p 113-125.
- [17] Popp P., Baum M. Analysis of wall heat fluxes, reaction mechanisms and unburnt hydrocarbons during the head-on quenching of a laminar flame. *Combustion and Flame* (1997) 108, p 327-348.