



**HAL**  
open science

## Modélisation et simulation de l'écoulement réactif en régime laminaire ou turbulent dans un four cylindrique

K. N'Wuitcha, S.W. Igo, K. Atchonouglo, K. Palm, M. Banna, B. Zeghmati

### ► To cite this version:

K. N'Wuitcha, S.W. Igo, K. Atchonouglo, K. Palm, M. Banna, et al.. Modélisation et simulation de l'écoulement réactif en régime laminaire ou turbulent dans un four cylindrique. Environnement, Ingénierie & Développement, 2016, N°72 - N° Spécial LOMÉ, Congrès E3D 2016, pp.1-11. 10.4267/dechets-sciences-techniques.3469 . hal-03160033

**HAL Id: hal-03160033**

**<https://hal.science/hal-03160033>**

Submitted on 4 Mar 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Modélisation et simulation de l'écoulement réactif en régime laminaire ou turbulent dans un four cylindrique

K. N'wuitcha<sup>1,\*</sup>, S.W. Igo<sup>2</sup>, K. Atchonouglo<sup>1</sup>, K. Palm<sup>2</sup>, M. Banna<sup>1</sup>, B. Zeghmati<sup>3</sup>

(1) GPTE-LES, University of Lomé, PO Box 1515, Lomé, Togo

(2) IRSAT/CNRST-Department of Energy, 03 PO Box 7047, Ouagadougou 03, Burkina Faso

(3) LA.M.PS-GME, University of Perpignan Via Domitia, 52 Avenue Paul Alduy, 66860 Perpignan Cedex, France

\*nwuitchakokou@yahoo.fr

## RÉSUMÉ

Le présent travail a pour objectif principal d'optimiser la combustion des composés organiques volatils issus de l'incinération des déchets ménagers solides. Une étude numérique de la combustion des composés organiques volatils en régime laminaire ou turbulent est présentée.

En régime laminaire, les équations de la convection mixte, auxquelles nous avons associé, l'équation de transfert radiatif et un modèle de cinétique globale, ont été proposées et résolues.

En régime turbulent, les équations de transfert couplées au modèle de cinétique globale et à l'équation de transferts radiatifs ont été proposées et résolues en utilisant le code Fluent Software. Pour le modèle de fermeture, nous avons choisi le modèle  $k - \epsilon$ , et pour l'équation de transfert radiatif, la méthode des ordonnées discrètes. L'interaction entre la turbulence et la cinétique chimique est assurée par le modèle Eddy-Dissipation.

Les résultats montrent que le procédé de thermodestruction des composés des fumées est d'autant plus efficace que le débit des fumées est faible. Les paramètres de la turbulence, à savoir l'énergie cinétique turbulente et son taux de dissipation, sont fortement influencés par la combustion et réciproquement, montrant un fort couplage entre la turbulence et la combustion. Les valeurs de ces paramètres augmentent avec l'accroissement du débit massique des fumées. La combustion des composés organiques volatils est plus efficace en régime laminaire qu'en régime turbulent pour ce type d'incinérateur cylindrique.

**MOTS-CLÉS :** déchets ménagers, incinération, composés organiques volatils, combustion, FLUENT, régime laminaire, régime turbulent

## ABSTRACT

The present study aims to optimize volatile organic compounds combustion during municipal solid wastes incineration. A numerical study of volatile organic compounds combustion in laminar or turbulent regime is presented.

In laminar regime, mixed convection equations, associated to radiative transfer equation and a global kinetics model are proposed and solved.

In turbulent regime, transfer equations associated to global kinetics model and radiative transfer equation are proposed and solved using Fluent Software. The standard  $k - \epsilon$  model was used for the modeling of the turbulence phenomena and discrete ordinate method for radiative heat transfer. The turbulence-chemistry interaction is depicted by Eddy-Dissipation model.

The results showed that the efficiency of the combustion of organic compounds decreases with the increase of the flow rate of the smokes. The turbulence parameters such as turbulent kinetic energy and its dissipation rate are strongly affected by the combustion and reciprocally, showing the interaction between combustion and turbulence. These parameters values increase with the augmentation of the flow rate of the smokes. The combustion of volatile organic compounds is more efficient in laminar regime than in turbulent regime, for this kind of cylindrical geometry of the incinerator.

**KEYWORDS :** municipal wastes, incineration, volatile organic compounds, combustion, FLUENT, laminar regime, turbulent regime

# Modélisation et simulation de l'écoulement réactif en régime laminaire ou turbulent dans un four cylindrique

K. N'wuitcha, S.W. Igo, K. Atchonouglo, K. Palm, M. Banna, B. Zeghmati

## INTRODUCTION

Les procédés thermo-chimiques tels que l'incinération ou la carbonisation représentent un moyen fiable de traitement des déchets organiques combustibles si les émissions de fumées sont correctement contrôlées et traitées. Ils conduisent d'une part à la réduction de la masse et du volume des déchets et d'autre part à leur valorisation énergétique par production de chaleur et/ou d'électricité. Toutefois, ces procédés génèrent des émissions gazeuses tels que les oxydes de carbone ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), les oxydes de soufre ( $\text{SO}_2$ ), les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), les produits chlorés (dioxines et furanes), les composés organiques volatils, les hydrocarbures polycycliques aromatiques, les poussières, les métaux lourds, les suies, etc. Le  $\text{CO}_2$  est le principal gaz à effet de serre et les  $\text{NO}_x$  ont des effets sur l'écosystème (pluies acides, pollution photochimique, eutrophisation), sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique ainsi que sur la santé humaine (Balet, 2008 ; Addou, 2009).

Les modes classiques de traitement des fumées (Balet, 2008 ; Addou, 2009) conduisent à la formation de résidus d'épuration qui doivent être manipulés et traités selon leur dangerosité. Dans les procédés de type pyrolyse / carbonisation, la post-combustion des fumées apporte un traitement efficace et économique, comme l'ont montré de nombreux travaux sur la carbonisation du bois (Halouani et Farhat, 2003). Ces auteurs ont élaboré un modèle semi-empirique de l'incinération des fumées issues de trois fours de carbonisation à combustion partielle en fonctionnement décalé, dans un réacteur vertical cylindrique. Les résultats montrent que l'incinération, à environ 1 000 °C, des fumées de carbonisation permet la destruction de 99 % de la masse de polluants à l'exception de  $\text{CO}_2$  et la réduction des émissions de gaz polluants.

Les travaux réalisés au cours des vingt dernières années au CI-RAD-Forêt ont permis d'élaborer un code de calcul basé sur un modèle semi-empirique de carbonisation reposant sur des équations de bilans (Halouani et Farhat, 2003) pour modéliser les émissions de la carbonisation en four à combustion partielle à tirage direct. Les équations de ce modèle ont été établies à partir d'un raisonnement physico-chimique sur les composés entrant dans l'incinérateur et sur les produits formés après combustion. Gargouri (2004) a mené une étude théorique et

expérimentale de l'incinération des fumées de carbonisation du bois. Les équations de transfert ont été résolues en utilisant les algorithmes de Thomas et de Gauss. Les résultats de

la simulation numérique montrent que la température dans l'incinérateur atteint une valeur suffisante pour assurer la thermodestruction totale des polluants organiques présents dans les fumées de carbonisation du bois. L'efficacité de dépollution de 100 %, a été confirmée expérimentalement (Mezerette *et al.*, 1992 ; Girard, 1994 ; Halouani et Farhat, 2003). Palm (2008) a modélisé et simulé la thermodestruction des composés organiques des fumées d'incinération de déchets ménagers. Les résultats montrent que le régime d'écoulement influence considérablement la combustion des éléments polluants des fumées. Abbassi *et al.* (2009) ont étudié numériquement et expérimentalement les transferts par convection-rayonnement dans un four d'incinération des fumées de pyrolyse de la biomasse dans une installation pilote de carbonisation du bois avec récupération et incinération des fumées de pyrolyse.

L'objectif principal de la présente étude est de modéliser et simuler la combustion des composés organiques volatils susceptibles d'être présents dans les fumées d'incinération de déchets municipaux en écoulement laminaire d'une part, puis en tenant compte des interactions entre la combustion et la turbulence.

## I. Formulation du problème physique et mise en équations

### I.1. Problème physique

Le cas traité concerne une fumée qui serait issue de l'incinération de déchets ménagers (Tézanou, 2003) composée de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}$  et  $\text{O}_2$  à des fractions massiques respectives : 0,0635 ; 0,0740 ; 0,0369 ; 0,0264 ; 0,0158 ; 0,81 (N'wuitcha *et al.*, 2014a ; N'wuitcha *et al.*, 2014b).

On considère que la combustion des polluants organiques des fumées (voir Figure 1) est réalisée dans une enceinte cylindrique de diamètre interne  $D = 1$  m et de hauteur  $H = 1$  m munie de deux ouvertures : une ouverture circulaire de diamètre  $d_e = 0,2$  m à la base inférieure pour l'entrée des fumées et une autre de diamètre  $d_s = 0,2$  m à la base supérieure de l'incinérateur par laquelle se fait la sortie des gaz après combustion. Un excès d'air de  $A_0 = 35\%$  a été considéré dans nos calculs.

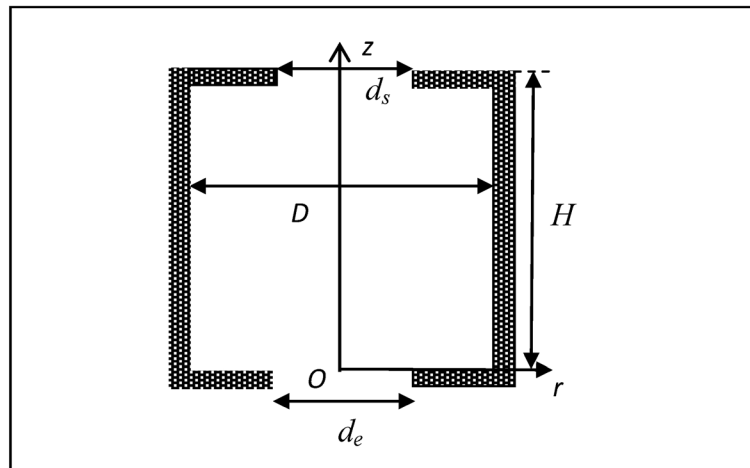


Figure 1. Coupe verticale du four

## 1.2. Équations de transfert

Compte tenu des hypothèses simplificatrices formulées dans (N'wuitcha *et al.*, 2012), les équations qui régissent les transferts dans le four en régime laminaire s'écrivent dans le repère cylindrique (O, r, z) sous la forme générale suivante :

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho v\phi)}{\partial r} + \frac{\partial(U\phi)}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial\phi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\Gamma_{\phi} \frac{\partial\phi}{\partial r} \right) + S_{\phi} + \phi$$

où  $\phi$  représente une grandeur physique : l (équation de continuité), u composante axiale de la vitesse, v composante radiale de la vitesse, T la température,  $Y_i$  la fraction massique de l'espèce chimique  $i$ . En régime turbulent, en se basant sur les hypothèses simplificatrices formulées dans (N'wuitcha *et al.*, 2014a ; N'wuitcha *et al.*, 2014b), les équations de transferts se mettent sous la forme générale ci-dessus. En plus des grandeurs physiques représentées par  $\phi$ , s'ajoutent les paramètres de la turbulence,  $k$ , l'énergie cinétique turbulente et  $\varepsilon$ , son taux de dissipation.  $\rho$  est la masse volumique,  $t$  temps,  $r$  coordonnée radiale,  $z$  coordonnée normale,  $\Gamma_{\phi}$  coefficient de diffusion de  $\phi$  et  $S_{\phi}$  terme source de  $\phi$ .

Les modèles de transfert radiatif et de combustion ainsi que les conditions initiales et aux limites sont décrits dans (N'wuitcha *et al.*, 2012) pour le régime laminaire et dans (N'wuitcha *et al.*, 2014a ; N'wuitcha *et al.*, 2014b) pour le régime turbulent.

## 2. Méthodologie numérique

### 2.1. En régime laminaire

Les équations de transfert sont discrétisées en utilisant la méthode des volumes finis. Les systèmes d'équations algébriques de type tri-diagonal obtenus sont résolus à l'aide de l'algorithme de Thomas associé à une procédure itérative avec un

coefficient de sous-relaxation égal à 0,6 pour les composantes de la vitesse et 0,8 pour la température, les fractions massiques, la pression et la luminance. La procédure itérative est arrêtée lorsque le test suivant est vérifié :

où  $n$  est le nombre d'itérations et  $\varepsilon$  la précision prise égale à  $10^{-4}$ .

$$\max \left( \left| \frac{\phi^n - \phi^{n-1}}{\phi^n} \right| \right) \leq \varepsilon$$

Le critère de convergence est déterminé de telle sorte que le terme source de l'équation de correction de pression soit inférieur à  $10^{-8}$ .

Le modèle de cinétique réactionnelle a été appliqué à la combustion globale en régime laminaire du méthane à proximité d'une paroi isotherme en prenant en compte l'effet Dufour et Soret. Les calculs ont été effectués pour un mélange stœchiométrique avec les fractions massiques initiales suivantes :  $Y_{\text{CH}_4} = 0,055$  ;  $Y_{\text{O}_2} = 0,22$  ;  $Y_{\text{N}_2} = 0,725$ .

Une étude comparative entre nos résultats et ceux de Popp *et al.* (1997) montre un bon accord qualitatif et quantitatif. L'écart relatif moyen entre nos résultats et ceux de Popp *et al.* (1997) est inférieur à 2 %.

### 2.2. En régime turbulent

La procédure numérique utilisée par le code FLUENT, pour la résolution des équations de transfert, est basée sur une méthode implicite des volumes finis. La résolution des systèmes d'équations algébriques ainsi obtenus est réalisée par la méthode d'élimination de Gauss associée à un coefficient de sous relaxation égale à 0,7 pour les vitesses et 0,8 pour l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente. L'équation des transferts radiatifs est, quant à elle, résolue par la méthode des ordonnées discrètes (Kim et Baek, 2005) basée sur

la discrétisation des angles par la méthode des volumes finis. Pour le modèle de cinétique globale, auquel sont associées les interactions entre la turbulence et la cinétique chimique, nous avons considéré une seule équation de combustion globale.

Le code de calcul développé pour résoudre les équations de transferts est validé en comparant nos résultats de calcul avec des résultats expérimentaux des vitesses et des températures pour la convection naturelle turbulente et le transfert de chaleur dans un canal vertical asymétriquement chauffé (Miyamoto, 1986). L'écart relatif observé entre nos calculs et les résultats expérimentaux de Miyamoto (1986) n'excède pas 3,5 % pour la composante verticale de la vitesse et 4 % pour la température (N'wuiacha *et al.*, 2014a).

### 3. Résultats et discussions

#### 3.1. Résultats de simulation en régime laminaire

##### 3.1.1. Champs de température

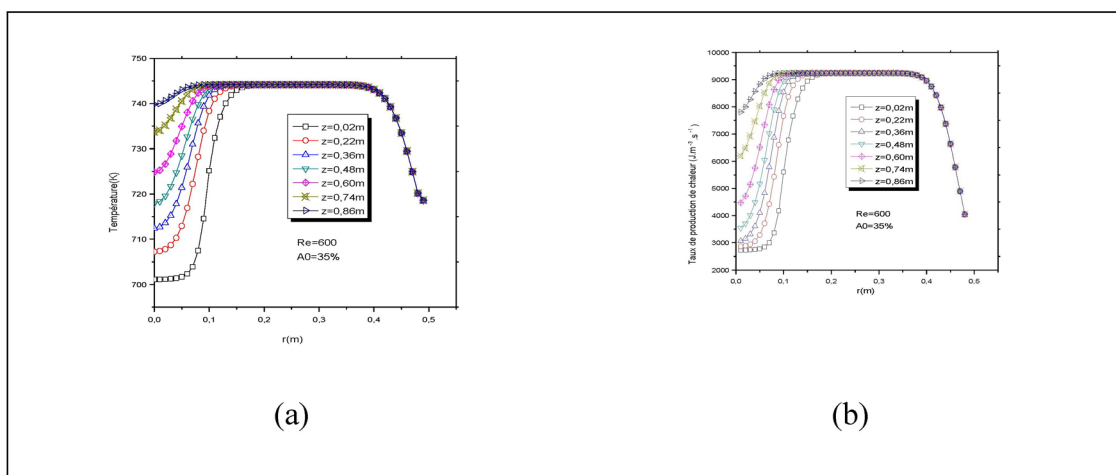
La figure 2 présente l'évolution simulée au cours du temps des profils de température et du taux de production de chaleur dans certaines zones du four en fonction de la distance radiale. Nous constatons qu'en un point donné, les températures et production de chaleur augmentent brusquement en fonction de la distance radiale et tendent asymptotiquement vers des valeurs constantes. Au voisinage de la paroi, la température et les taux de production décroissent lorsque la distance radiale augmente, en raison des pertes de chaleur par convection naturelle entre la face externe de la paroi et le milieu ambiant. La variation de la température et du taux de production de la chaleur est très importante dans les zones localisées à une distance radiale inférieure au rayon de l'orifice d'entrée du four. Dans cette zone, les réactions chimiques sont fortement influencées par les transferts convectifs qui y sont intenses influen-

çant ainsi la distribution de la température à l'intérieur du four.

L'évolution au cours du temps de la température dans certaines zones du four est représentée sur la figure 3. Les fumées engendrent une succession de réactions chimiques exothermiques entre les composants combustibles des fumées et l'oxygène. La température du mélange fumées-oxygène augmente progressivement jusqu'à tendre vers une valeur constante caractérisant l'état d'équilibre entre les apports de chaleur (due aux réactions chimiques) et les déperditions thermiques entre le mélange gazeux et le milieu ambiant.

L'évolution au cours du temps des températures des faces externes et internes de la paroi du four est représentée sur la figure 4. Nous constatons que ces températures augmentent au cours du temps puis tendent asymptotiquement vers les valeurs correspondantes à celle du régime établi. La figure 5.a montre que le nombre de Nusselt local est une fonction croissante de l'ordonnée  $z$ . Le nombre de Nusselt moyen décroît brusquement au cours du temps jusqu'à une valeur minimale puis augmente jusqu'à atteindre une valeur caractéristique de la fin du processus de thermodestruction (Figure 5.b). En effet au début du processus, les températures de la paroi et celle du milieu gazeux sont supposées égales. Il en résulte une valeur du nombre de Nusselt moyen très élevée.

L'évolution des nombres de Nusselt locaux en fonction de  $z$  est linéaire quelle que soit la valeur du nombre de Reynolds (Figure 5.a). Ils sont par définition une fonction croissante de  $z$ . Quelle que soit la valeur du nombre de Reynolds, le nombre de Nusselt moyen diminue brusquement au cours du temps jusqu'à atteindre une valeur minimale, puis augmente pour tendre asymptotiquement vers une valeur d'autant plus élevée que le nombre de Reynolds est grand (Figure 5.b). La diminution au cours du temps du nombre de Nusselt moyen résulte de l'accroissement de la température du mélange gazeux due à la combustion des fumées. Lorsque la combustion est achevée ( $t \approx 10$  s) la température diminue.



**Figure 2. Profil radial de la température du mélange gazeux (a) et du taux de production de chaleur (b) en régime laminaire**

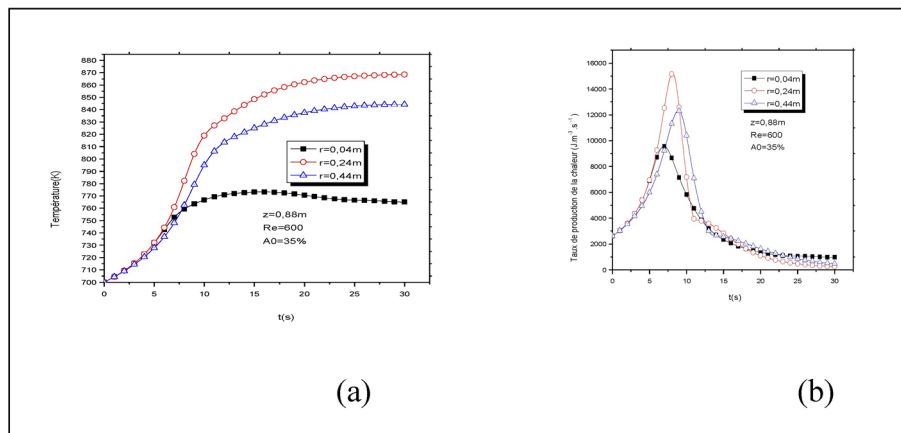


Figure 3. Evolution au cours du temps de la température du mélange gazeux (a) et du taux de production de la chaleur (b) en régime laminaire

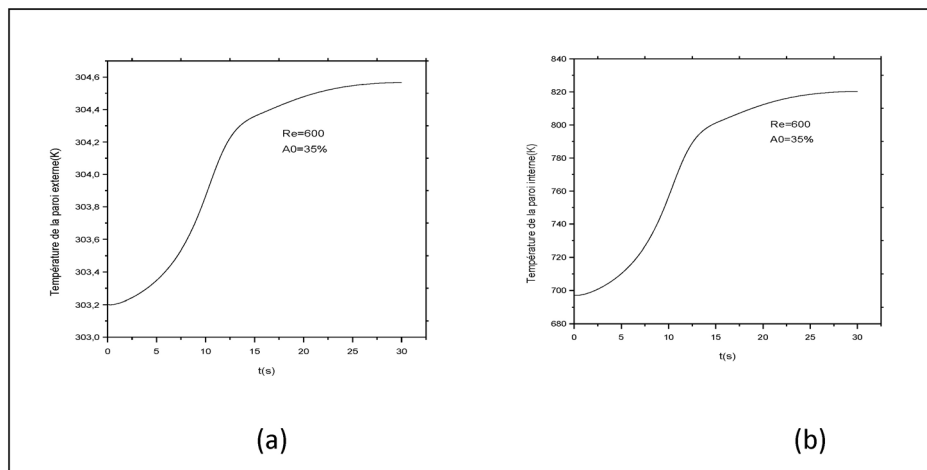


Figure 4. Evolution au cours du temps de la température des faces externe (a) et interne (b) de la paroi du four en régime laminaire

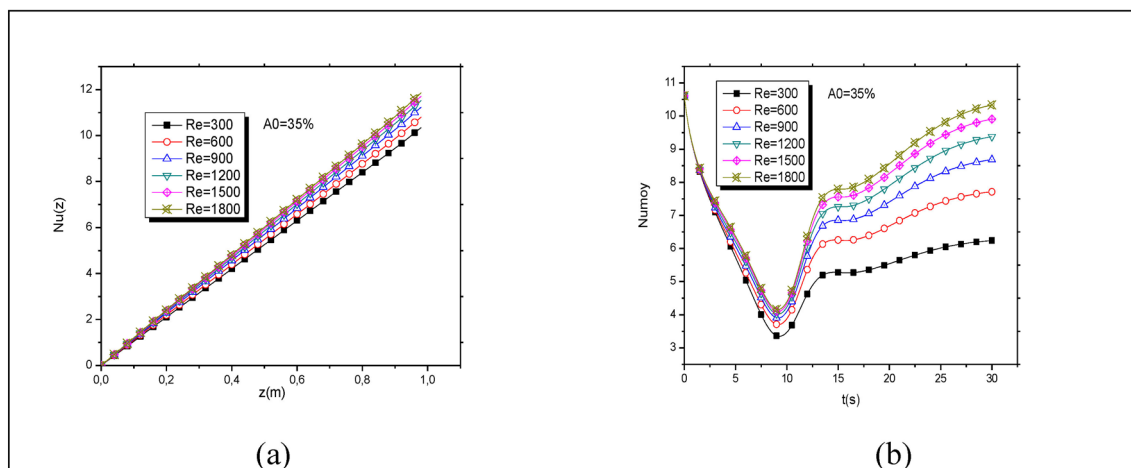


Figure 5. Evolution axiale du nombre de Nusselt local à  $t = 30\text{s}$  (a). Evolution au cours du temps du nombre de Nusselt moyen (b). Influence du nombre de Reynolds

### 3.1.2. Champs de concentration

Les figures 6 et 7 présentent le profil radial des fractions massiques et des taux de production massiques des composants des fumées. Au sein du four, les fractions massiques des composants des fumées et du taux de production massique des composants diminuent brusquement lorsque la distance à l'axe de symétrie de l'incinérateur augmente pour tendre asymptotiquement vers des valeurs constantes. Cette diminution s'explique par la consommation au cours de la combustion des composants réactifs présents dans les fumées. Au voisinage de la paroi, la température décroît lorsque la distance radiale augmente en raison des pertes de chaleur vers le milieu extérieur. Cette baisse de température entraîne un ralentissement des réactions de combustion et conduit à une décroissance de la valeur absolue des taux de production et à une augmentation des fractions massiques des composants des fumées et de l'oxygène au voisinage de la paroi. Les profils des fractions massiques du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) sont similaires à ceux des températures. En effet, l'intensification des transferts thermiques, suite à

la combustion, augmente la thermodestruction des composants polluants des fumées et la consommation de l'oxygène entraînant ainsi, une diminution des fractions massiques et une augmentation en valeur absolue des taux de production des composants polluants des fumées et de l'oxygène. Par contre, les productions de dioxyde de carbone et d'eau augmentent suite aux réactions chimiques. On note de faibles valeurs de fractions massiques des composés combustibles des fumées et des valeurs élevées des fractions massiques des produits formés ( $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ ) loin de la zone principale de l'écoulement qui est située de part et d'autre de l'axe de symétrie du four.

L'évolution au cours du temps des fractions massiques des composants des fumées est présentée sur les figures 8 et 9. Les réactions de combustion provoquent au cours du temps une diminution des fractions massiques des réactifs ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  et  $\text{C}$ ) et de l'oxygène et une augmentation de celle de la vapeur d'eau et celle du dioxyde de carbone. Il est à noter que la valeur absolue du taux de production des composants des fumées citées ci-dessus croît au cours du temps pour tendre asymptotiquement vers zéro.

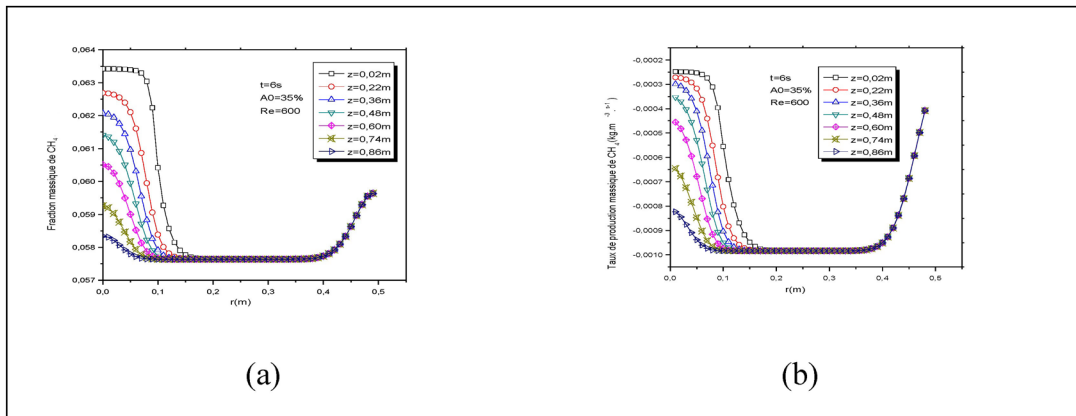


Figure 6. Evolution en fonction de la distance radiale des fractions massiques (a) et du taux de production (b) de  $\text{CH}_4$  à l'instant  $t = 6$  s en régime laminaire

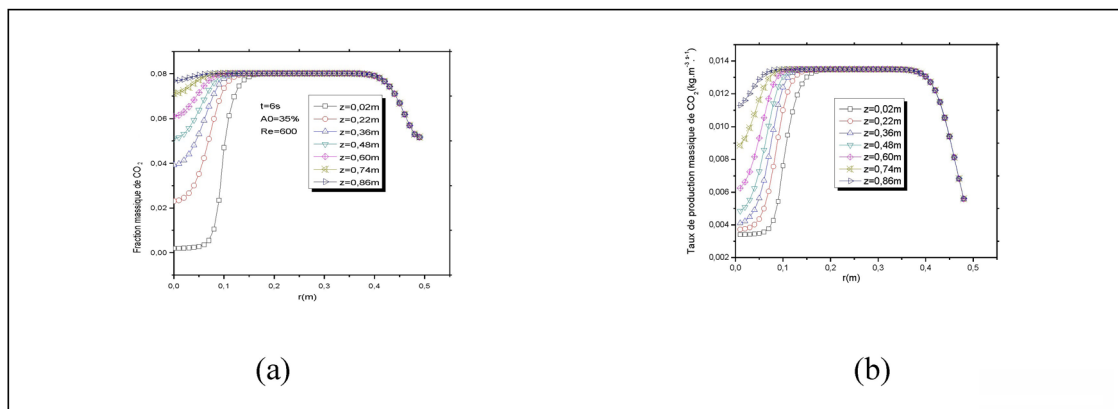


Figure 7. Evolution en fonction de la distance radiale de la fraction massique (a) et du taux de production (b) de  $\text{CO}_2$  à l'instant  $t = 6$  s en régime laminaire

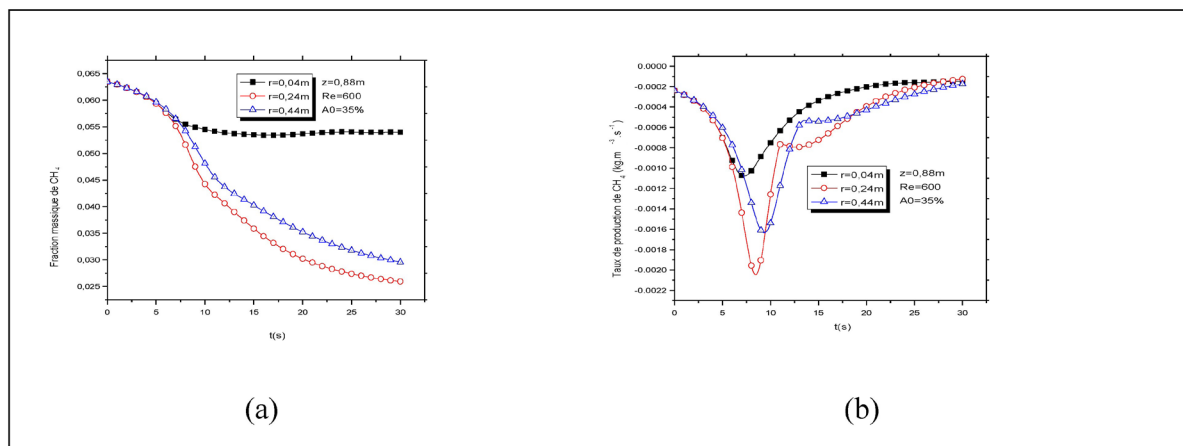


Figure 8. Evolution au cours du temps de la fraction massique (a) et du taux de production (b) de  $\text{CH}_4$  en régime laminaire

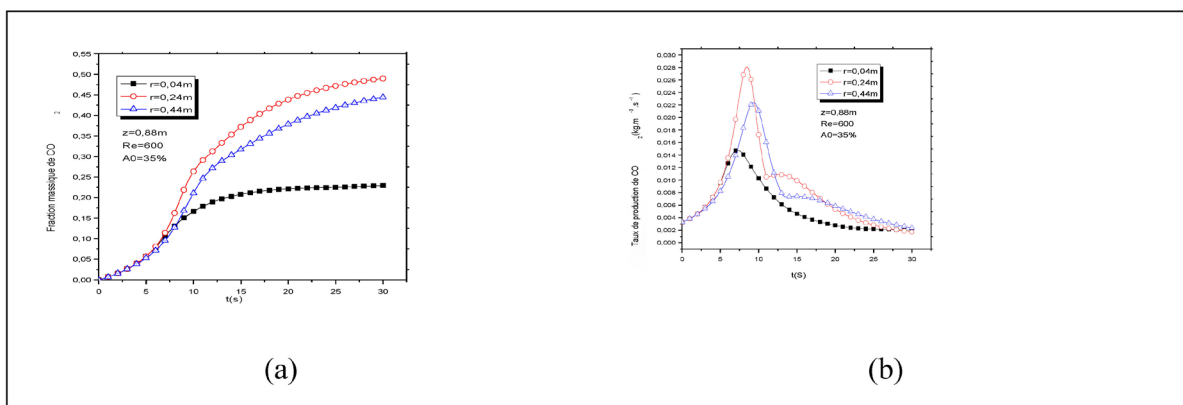


Figure 9. Evolution au cours du temps de la fraction massique (a) et du taux de production (b) de  $\text{CO}_2$  en régime laminaire

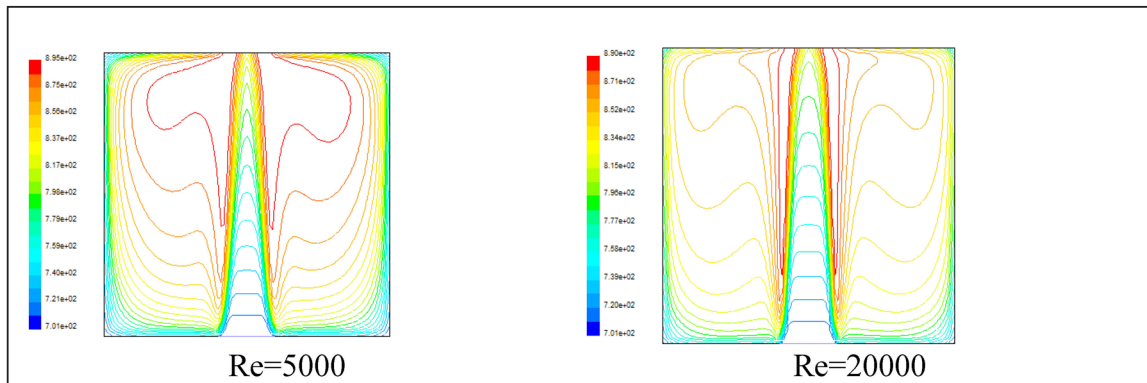
## 3.2. Résultats de simulation en régime turbulent

### 3.2.1. Isothermes

La figure 10 présente la distribution du champ de température pour  $Re = 5\,000$  et  $Re = 20\,000$ . Les isothermes sont localisées de part et d'autre de l'axe de symétrie du four interagissent avec celles localisées au voisinage de cet axe de symétrie pour former un ensemble d'isothermes dont la forme est assimilable à celle d'un panache. Aux voisinages des parois, les isothermes sont parallèles entre elles et à la paroi, structure caractéristique d'un transfert de chaleur par conduction. On observe que les valeurs les plus faibles sont localisées dans la zone de l'écoulement principal caractérisée par des lignes de courant parallèles et dans la partie supérieure du four. La combustion des composants des fumées modifie la forme et la valeur des isothermes, principalement dans les zones situées de part et d'autre de l'écoulement

principal en conservant toutefois leur symétrie par rapport à l'axe de symétrie de l'incinérateur. On observe un accroissement des transferts thermiques de part et d'autre de l'axe de symétrie notamment dans les zones localisées dans la partie supérieure du four où les transferts convectifs confèrent aux isothermes une distribution décrite par des cellules qui occupent tout le demi-espace supérieur du four. Les valeurs de ces isothermes augmentent dans les zones localisées de part et d'autre du plan de symétrie du four où se déroule principalement la combustion des composés des fumées. La valeur de ces isothermes diminue à l'approche des parois verticales et horizontales puisque ces parois sont le siège de déperditions thermiques par conduction-convection avec le milieu extérieur. L'accroissement du nombre de Reynolds provoque, une modification de la structure des isothermes. On observe que l'accroissement du nombre de Reynolds s'accompagne d'une baisse de la valeur des isothermes puisque la valeur maximale est de  $895\text{ K}$  pour  $Re = 5\,000$  et  $890\text{ K}$  pour  $Re = 20\,000$ .





**Figure 10. Distribution des isothermes à  $t = 30$  s en régime turbulent. Influence de la combustion des composés organiques des fumées et du nombre de Reynolds.**

### 3.2.2. Paramètres caractéristiques de la turbulence

#### ENERGIE CINÉTIQUE TURBULENTE

La figure 11 montre que les valeurs maximales de l'énergie cinétique turbulente sont observées de part et d'autre de l'axe de symétrie de l'incinérateur et des parois supérieure et inférieure, notamment au voisinage de l'entrée et de la sortie. Cette distribution rejoint celle des isothermes. Ces observations sont aussi corroborées par l'énergie cinétique turbulente à  $z = 0,5$  m qui présente également une distribution symétrique par rapport à l'axe de symétrie du four (figure 12). Il est à noter que l'énergie cinétique turbulente augmente avec la distance radiale jusqu'à atteindre une valeur maximale à  $0,1$  m de l'axe de symétrie puis décroît jusqu'à une valeur minimale à l'approche des parois.

La distribution et les valeurs de l'énergie cinétique turbulente sont fortement modifiées par la quantité de chaleur dégagée lors de la combustion des composés des fumées. Elle augmente dans les zones localisées au voisinage de l'axe de symétrie, des parois supérieure et inférieure notamment au voisinage des orifices d'entrée et de sortie du four. La chaleur dégagée par la combustion des composés des fumées entraîne, à une hauteur de  $0,5$  m, un accroissement de l'énergie cinétique turbulente, pour une distance supérieure à  $0,2$  m de l'axe de symétrie. L'analyse des figures 11 et 12 montre que, comme pour les isothermes, l'accroissement du nombre de Reynolds entraîne une augmentation des valeurs de l'énergie cinétique turbulente principalement dans les zones situées de part et d'autre de l'écoulement principal, et une modification de leur distribution. Notons que l'accroissement du nombre de Reynolds modifie le profil de l'énergie cinétique turbulente qui conserve toutefois une symétrie par rapport à l'axe de symétrie du four.

#### TAUX DE DISSIPATION DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE TURBULENTE

La distribution du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente et son évolution à une hauteur  $Z = 0,5$  m en fonction de l'abscisse sont représentées respectivement par

les figures 13 et 14. La distribution du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente rejoint celle de l'énergie cinétique turbulente. En effet, à cette hauteur l'énergie cinétique turbulente est maximale à  $0,1$  m de l'axe de symétrie. Au voisinage de l'axe de symétrie du four, elle est minimale, traduisant ainsi une diminution de la turbulence. La structure du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente rejoint celle de l'énergie cinétique turbulente. La quantité de chaleur dégagée lors de la combustion des composants des fumées augmente la valeur du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente principalement dans les zones situées entre l'écoulement principal et les parois verticales où se déroule la combustion des composés des fumées, sans modifier de façon significative sa structure (figure 14).

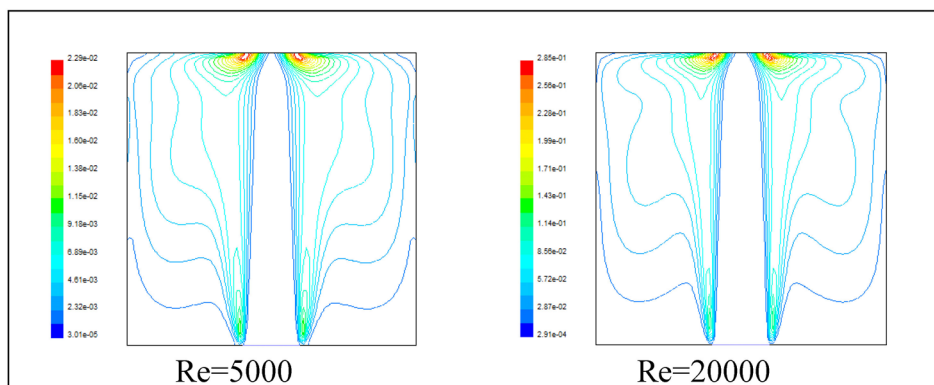
Pour les nombres de Reynolds retenus dans cette étude, les iso-valeurs du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente sont d'autant plus élevées que le nombre de Reynolds est grand (figures 13 et 14). On remarque que la valeur maximale du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente croît avec le nombre de Reynolds (par conséquent avec le débit massique) ce qui est conforme à l'observation faite pour la distribution de l'énergie cinétique turbulente.

#### VISCOSITÉ TURBULENTE

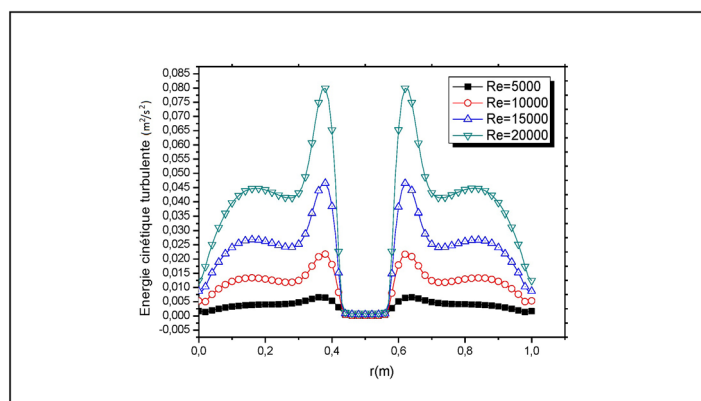
La figure 15 montre que la distribution de la viscosité turbulente qui caractérise le transfert turbulent corrobore celle de l'énergie cinétique turbulente. Ainsi, les valeurs maximales de la viscosité turbulente sont localisées dans les zones où l'écoulement est décrit par des cellules contrarotatives. L'analyse de la figure 16 montre que l'évolution radiale de la viscosité turbulente conformément à celle de l'énergie cinétique turbulente est, pour une hauteur de  $0,5$  m, maximale à  $0,1$  m de l'axe de symétrie du four. La quantité de chaleur dégagée par la combustion des composants des fumées diminue la valeur de la viscosité turbulente. Ce résultat est corroboré par ceux présentés ci-dessus concernant l'énergie cinétique turbulente et son taux de dissipation. L'accroissement du nombre de Reynolds entraîne une augmentation des valeurs des cellules contra-rotatives de la distribution de la visco-

sité turbulente localisée de part et d'autre de l'écoulement principal. La figure 16 montre, de façon analogue aux observations faites pour l'évolution radiale de l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente, que

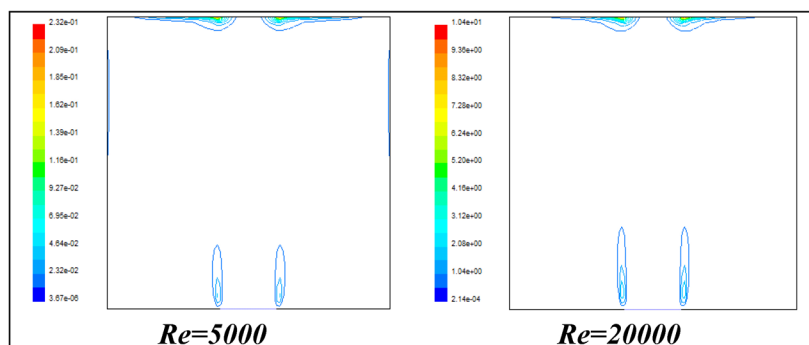
l'accroissement du nombre de Reynolds engendre une augmentation des valeurs de la viscosité turbulente pour une hauteur de 0,5 m.



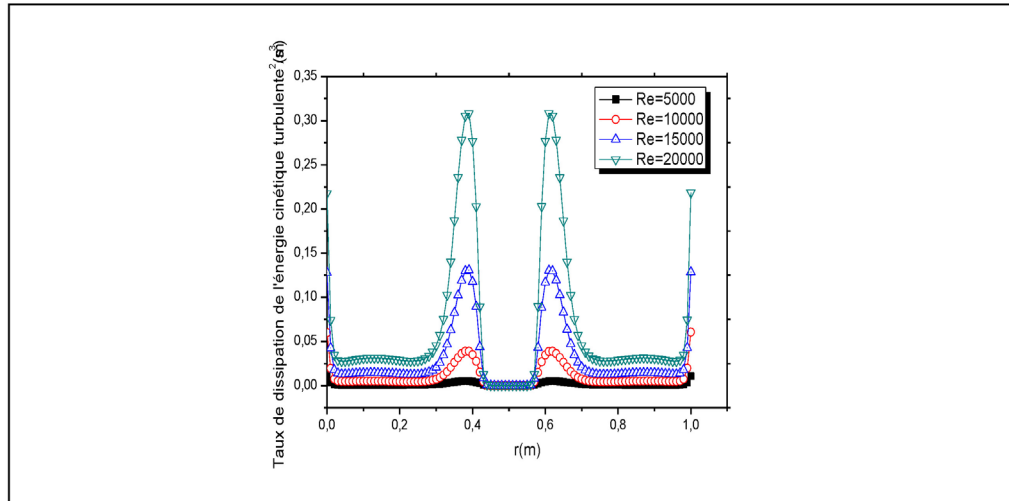
**Figure 11. Distribution de l'énergie cinétique turbulente à  $t = 30$  s. Influence de la combustion des composés polluants des fumées et du nombre de Reynolds.**



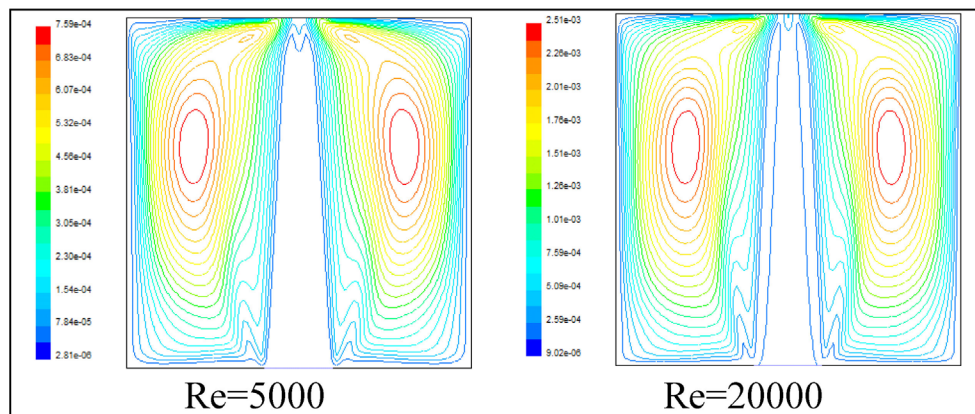
**Figure 12. Evolution radiale de l'énergie cinétique turbulente en  $z = 0,5$  m pour  $t = 30$  s. Influence de la combustion des composés polluants des fumées et du nombre de Reynolds.**



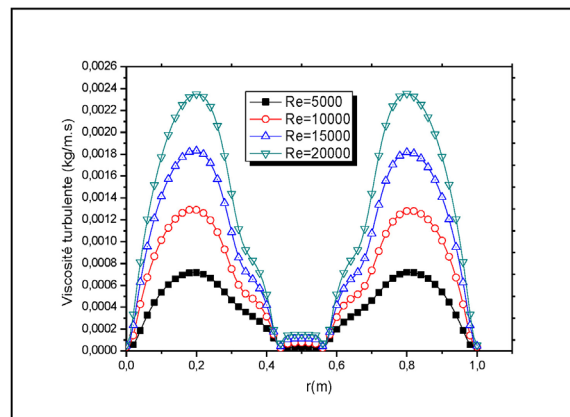
**Figure 13. Distribution du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente à  $t = 30$  s. Influence de la combustion des composés polluants des fumées et du nombre de Reynolds.**



**Figure 14. Evolution radiale du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente en  $z = 0,5$  m pour  $t = 30$  s. Influence de la combustion des composés polluants des fumées et du nombre de Reynolds.**



**Figure 15 Distribution de la viscosité turbulente à  $t = 30$  s. Influence de la combustion des composés polluants des fumées et du nombre de Reynolds**



**Figure 16 Evolution radiale de la viscosité turbulente en  $z = 0,5$  m pour  $t = 30$  s. Influence de la combustion des composés polluants des fumées et du nombre de Reynolds**

## CONCLUSION

Cette étude présente la simulation de la combustion de composés organiques présents dans des fumées de composition jugée représentative de l'incinération de déchets organiques dans un four cylindrique en conditions d'écoulement laminaire ou turbulent. En régime laminaire, les résultats, présentés notamment sous forme de profils de fractions massiques et de température montrent que les composants des fumées ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}$ ) sont détruits quasi quantitativement en une durée très courte dans les conditions de fonctionnement du four considérées dans les calculs.

En régime turbulent, les équations qui régissent l'incinération ont été résolues en utilisant le code de calcul Fluent. La valeur des isothermes est maximale dans la région entre la paroi latérale et l'axe de symétrie du four, montrant que cette partie est la zone principale de combustion des composés des fumées. Les valeurs des grandeurs caractéristiques de la turbulence, telles que l'énergie cinétique turbulente, son taux de dissipation, la viscosité turbulente, sont minimales au voisinage de l'axe de symétrie du four, et aux voisinages de ses parois. Elles sont cependant maximales dans la zone principale de combustion comprise entre les parois et la zone de l'écoulement principal où domine la convection forcée indiquant un fort couplage entre la combustion et la turbulence. Les paramètres de la turbulence augmentent avec l'accroissement du nombre de Reynolds donc du débit massique.

L'étude de sensibilité du modèle a permis de montrer en conditions d'écoulement laminaire ou turbulent l'influence du nombre de Reynolds, et par conséquent du débit massique des fumées à l'entrée du four, sur la distribution des températures et des fractions massiques.

Quel que soit le régime d'écoulement, les résultats de la simulation montrent que la combustion des composants organiques des fumées est d'autant plus efficace que le nombre de Reynolds (ou le débit d'entrée des fumées) est faible. Cependant la combustion est plus efficace en régime laminaire qu'en régime turbulent pour ce type d'incinérateur cylindrique. Pour une meilleure combustion des composés organiques volatils, il serait donc indispensable de pouvoir contrôler la température, le temps de séjour et la turbulence.

## Références bibliographiques

- Abbassi, M. A. (2009) Modélisation des transferts de chaleur par convection-rayonnement dans un four d'incinération des fumées de carbonisation du bois. Thèse de doctorat de l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, discipline Génie Mécanique.
- Addou, A. (2009) Traitement des déchets. Ellipses, Paris, (ISBN 978-2-7298-5078-4).
- Balet, J. (2008) Aide-mémoire-Gestion des déchets. Dunod, Paris, 2<sup>e</sup> édition 2008.
- Gargouri, T. (2004) Etude théorique et expérimentale de la combustion-incinération des effluents atmosphériques engendrés par la combustion du bois. Thèse de doctorat de l'Université de Perpignan.
- Girard, P. (1992) Analytical Performance tests for charcoal Making Technics and Equipment, Holz als Roh-und Werkstoff, 50, pp : 479-484.
- Halouani, K. et Farhat, H. (2003) Depollution of atmospheric emissions of wood pyrolysis furnaces. Renewable Energy, 28, pp : 129-138.
- Kim, M.Y. & Baek, S.W. (2005) Modeling of radiative heat transfer in axisymmetric cylindrical enclosure with participating medium. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative transfer, 90, 377-388.
- Mezerette, C., Girard, P., Vergnet, A.M. (1992) Aspects environnementaux liés à la pyrolyse de la biomasse. Bois et Forêts des Tropiques, 232, pp : 67-80.
- Miyamoto, M., Katoh, Y., Kurima, J. et Saki H. (1986) Turbulent free convection heat transfer from vertical parallel plates. Journal of Heat Transfer, 4, pp : 1593-1598.
- N'wuitcha, K., Banna, M., Igo, S.W., Zeghmati, B., Palm, K. et Chesneau, X. (2012) Numerical analysis of depollution of smoke produced by household wastes incineration. Journal of Heat Transfer, 134, pp : 1-11.
- N'wuitcha, K., Palm, K., Igo, S.W., Atchonouglo, K., Ndiho, A., Ouedraogo, I., Banna, M. ET Zeghmati, B. (2014a) Contribution to environmental protection by reducing pollutants emissions during municipal solid wastes incineration. International journal of scientific & technology research, 3, pp : 315-323.
- N'wuitcha, K., Igo, S.W., Palm, K., Atchonouglo, K., Ndiho, A., Ouedraogo, I., Banna, M. et Zeghmati, B. (2014b) Numerical simulation of turbulence-radiation Interaction in a cylindrical incinerator of the smokes produced by household wastes. International journal of scientific et technology research, 3, pp : 324-331.
- Palm, K. (2008) Modélisation d'un procédé de thermodesstruction des effluents gazeux engendrés par la combustion de déchets ménagers. Thèse de doctorat de l'Université de Perpignan, spécialité Energétique.
- Popp, P. et Baum, M. (1997) Analysis of wall Heat Fluxes, Reaction Mechanisms, and unburnt Hydrocarbons during the Head-on Quenching of a Laminar Methane Flame. Combustion and Flame, 108, pp : 327-348.
- Tezanou, J. (2003) Evaluation environnementale et technique de la gestion des déchets ménagers de Ouagadougou : schémas de gestion et expérimentation de traitement thermique. Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers.