

# Modélisation et Simulation Numérique des Transferts Thermiques dans un Four à Poterie

L.Balli<sup>#1</sup>, A.Touzani<sup>#2</sup>.

<sup>#</sup>UFR: Modélisation et Calcul Informatique en Conception Mécanique, DSA : Modélisation et Calcul Informatique en Mécanique, Département Génie Mécanique, Spécialité : Mécanique Numérique  
Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Université Mohammed V - Agdal, Rabat, MAROC

<sup>1</sup>balli\_enviro@yahoo.fr

<sup>2</sup>atouzanikia@gmail.com

**Résumé**— La modélisation complète des phénomènes physiques sur le plan thermique dans les équipements industriels et leurs simulations numériques peuvent suggérer les pistes d'amélioration ou de conception pour mieux comprendre et améliorer le fonctionnement des fours à poterie, il est fréquent que les transferts thermiques ne soient pas l'objectif de la conception d'un appareillage mais qu'ils interviennent comme contrainte à respecter.

Une modélisation des phénomènes de transfert de chaleur dans un four à gaz pour la production de la poterie suivie d'une simulation numérique a permis de prédire le comportement thermique du four. Les équations de transfert convectif et radiatif sont résolues à l'aide de la méthode des différences finies permettant la détermination temporelle de la température moyenne à l'intérieur du four.

**Mots clés** — Modélisation, Simulation Numérique, Transferts Thermiques, Four à gaz, Produits Céramiques.

## I. INTRODUCTION

Dans le but d'économiser et de gérer rationnellement la consommation énergétique, les recherches se focalisent actuellement sur l'optimisation et la modélisation des systèmes énergétiques.

Les problèmes de transfert de chaleur en régime transitoire ont fait l'objet de plusieurs études, et dans la littérature on trouve plusieurs méthodes qui ont été mises en œuvre pour faire face à cette problématique [1].

La connaissance du comportement thermique des fours à poterie est un problème difficile et cependant essentiel dans les thématiques de recherche industrielles actuelles. Les cinétiques de cuisson ainsi que la distribution de la température dans l'enceinte et dans les produits traités doivent également être maîtrisées, afin d'améliorer la qualité des produits chauffés en terme de résistance et dureté [2].

L'objectif de cette étude est d'apporter une meilleure connaissance du comportement thermique d'un four à gaz, ainsi que la cuisson des produits céramiques. Cette problématique est primordiale pour les industriels [3].

En outre, ce projet s'attache notamment à la substitution des fours traditionnels polluants en fours à gaz propres, économiques et sécurisés pour la cuisson des objets en terre, en utilisant des simulations numériques reproduisant des cycles thermiques industriels. En ce sens, la modélisation numérique du modèle physique sera présentée à travers des méthodes numériques adaptées.

## II. DEFINITION du PROBLEME

Le four correspondant à notre étude est une enceinte de forme parallélépipédique et de volume  $4.6 \text{ m}^3$ ; il comporte une maçonnerie et une structure isolante dont la nature et l'épaisseur dépendent du niveau de la température interne; et ce afin de réduire les pertes de chaleur à leur strict minimum.

La géométrie est illustrée dans la figure 1.

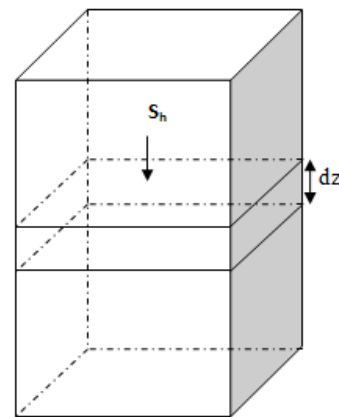


Fig. 1 Configuration géométrique du four à gaz

### III. MODELISATION et SIMULATION NUMERIQUE

#### A. Formulation mathématique du problème

La modélisation a été basée sur les transferts thermiques à l'intérieur du four à savoir: charge, gaz et parois.

L'établissement d'un modèle mathématique à partir d'un bilan thermodynamique permet de déterminer les équations de couplage entre les trois variables:  $T_s(z,t)$ ,  $T_g(z,t)$  et  $T_p(z,t)$

$T_s(z,t)$ : Température moyenne de la charge au point  $z$  à l'instant  $t$ .

$T_g(z,t)$ : Température moyenne du gaz au point  $z$  à l'instant  $t$ .

$T_p(z,t)$ : Température moyenne de la surface interne de la paroi au point  $z$  à l'instant  $t$ .

En vue d'obtenir un système d'équations relativement simples et facilement exploitables, il est indispensable de faire quelques hypothèses simplificatrices qui ont été justifiées en prenant comme références des travaux antérieurs relatifs aux processus semblables [4], [5].

- la charge est homogène,
- L'écoulement du gaz est laminaire et monodimensionnel,
- Les températures du gaz et de la charge sur une section sont définies par leurs valeurs moyennes respectives,
- Les parois du four ont des températures uniformes,
- Les produits à cuire reçoivent la même intensité de chaleur,
- Le phénomène de conduction dans la charge et la paroi du four est négligeable.

Le modèle de régime de température proposé caractérise la montée et le palier indiquant la température maximale. Il permet de déterminer à n'importe quel moment la valeur moyenne de la température du solide et du gaz à l'intérieur du four [6].

La somme de tous les échanges de chaleur entre le volume  $dv$  au point  $z$  et son environnement est égal d'une part à la variation de l'énergie interne  $dQ_i$  au point  $z$  et d'autre part à l'énergie  $dQ_d$  emportée par déplacement de ce volume.

$$dQ_i + dQ_d = \sum_k dQ_k \quad (1)$$

A l'instant  $t$  la variation de l'énergie interne est caractérisée par la relation :

$$\Delta Q_i = m C_p \Delta T \quad (2)$$

Où  $Q_i$  est l'énergie interne,  $m$  la masse de la matière étudiée,  $C_p$  la capacité calorifique à pression constante et  $\Delta T$  la différence de température.

Le phénomène de convection qui se déroule entre la charge et le gaz brûlé est caractérisé par l'expression :

$$\Delta Q = h S \Delta T \quad (3)$$

Où  $h$  le coefficient de transferts thermiques,  $S$  la surface d'échange et  $\Delta T$  la différence de température.

C'est le rayonnement des parois qui augmente la température du solide à l'intérieure du four; la puissance échangée entre deux corps (respectivement de surface  $S_1$ , température  $T_1$  et de surface  $S_2$ , température  $T_2$ ) se met sous la forme [7] :

$$P = S_1 F_{1,2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

Où  $F_{1,2}$  est un nombre adimensionnel appelé facteur de forme qui fait intervenir la géométrie considérée et les émissivités des deux corps et  $\sigma$  constante de Stefan Boltzmann.

A l'extérieur du four il est observé le phénomène de convection à partir des parois du four vers le milieu ambiant.

Le coefficient de transfert extérieur  $h_e$  est exprimé par la relation [8] :

$$h_e = 1.78 (T_{pe} - T_a)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

Avec  $T_{pe}$  la température de la paroi extérieure du four et  $T_a$  la température de l'air ambiant.

En considérant le bilan sur un volume différentiel  $dv = S_h dz$  et dans un intervalle du temps  $dt$  nous avons finalement donc établi une première équation aux dérivées partielles au niveau de la charge.

Bilan thermique sur la charge :

$$\rho_s C_{ps} S_h (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_s(z,t)}{\partial t} = A_{GS} [T_g(z,t) - T_s(z,t)] + B_{ps} (T_p^4 - T_s^4) \quad (6)$$

Avec  $\rho_s$  la densité volumique de la charge,  $C_{ps}$  la Capacité calorifique à pression constante de la charge  $\varepsilon$  : Le taux de vide dans le four et  $S_h$  la Section horizontale du four ( $S_h$  perpendiculaire à  $z$ ).

$A_{GS}$  : Coefficient associé au transfert de chaleur par convection entre la charge et le gaz (J/s .m .°K).

$B_{ps}$  : Coefficient associé au transfert de chaleur par rayonnement entre les parois du four et la charge (J/s .m .°K<sup>4</sup>).

Raisonnant de la même façon que précédemment, nous faisons le bilan énergétique sur un volume élémentaire de gaz:  $dv = S_g dz$  nous avons établi une deuxième équation aux dérivées partielles au niveau du gaz.

Avec  $S_g$  la Surface de la section du four traversé par le gaz

Bilan thermique sur le gaz :

$$S_h \varepsilon \frac{\partial(\rho_g C_{pg} T_g)}{\partial t} + D_{mg} \frac{\partial(C_{pg} T_g)}{\partial z} = A_{Gs} (T_s - T_g) + A_{GT_a} (T_a - T_g) \quad (7)$$

Avec

$\rho_g$  : La masse volumique du gaz,

$C_{pg}$  : La Capacité calorifique à pression constante du gaz,

$D_{mg}$  : Débit massique du gaz,

$S_h$  : La section horizontale du four,

$A_{GT_a}$  : Coefficient associé au transfert de chaleur par convection entre le gaz et le milieu extérieur (J/s .m.°K).

#### B. Résolution numérique

Les équations (6-7) et les conditions aux limites qui leurs sont associées sont discrétisées à l'aide de la méthode des différences finis. Les systèmes d'équations algébriques qui en résultent sont résolus en utilisant la méthode de Range kutta.

#### C. Conditions initiales et aux limites

Conditions initiales :

$$t = 0 ; T_s(z, 0) = 293^\circ K ; T_g(z, 0) = 293^\circ K$$

Conditions aux limites :

$$z = 0 ; T_g(0, t) = 1800^\circ K$$

#### D. Paramètres physiques

La masse volumique est évaluée sur la base des gaz parfaits par [9]:

$$\rho_g = \frac{M_g}{V_0} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T_g} \quad (Kg / m^3) \quad (8)$$

$T_g$  S'exprime en °K et P en bar

$T_0, P_0$  et  $V_0$  : Respectivement la température, la pression et le volume molaire du gaz dans les conditions normales.

$M_g = \sum_i x_i M_i$  : Masse molaire du mélange gazeux.

La viscosité dynamique, la conductivité thermique et la chaleur spécifique des différents composés sont données par les relations suivantes [10]:

La viscosité en fonction de la température se calcule par la formule suivante:

$$\mu = \frac{C_1 T_g^{C_2}}{1 + C_3/T_g + C_4/T_g^2} \quad (Kg / s.m) \quad (9)$$

Formules de conductivité en fonction de la température

$$\lambda = \frac{C_1 T_g^{C_2}}{1 + C_3/T_g + C_4/T_g^2} \quad (J / s.m.°K) \quad (10)$$

En général, les chaleurs spécifiques molaires des différents composés sont données sous forme polynomiale:

$$C_p = C_1 + C_2 \left[ \frac{C_3/T_g}{\sinh(C_3/T_g)} \right]^2 + C_4 \left[ \frac{C_5/T_g}{\cosh(C_5/T_g)} \right]^2 \quad (11)$$

Avec:  $C_1, C_2, C_3, C_4$  et  $C_5$  sont des constantes données de chaque élément pour chaque constituant.

## IV. RESULTATS et DISCUSSIONS

Les résultats numériques obtenus en régime transitoire de la distribution des températures moyennes du gaz dans le four à poterie considéré au cours de son fonctionnement chargé, sont donnés par les figures2 et 3 : La figure2 indique l'évolution des températures moyennes du gaz en fonction du temps à l'intérieur du four dans les différents points schématisés ci-dessous(bas Tg(10), milieu Tg(15), haut Tg(20)) tandis que la figure3 montre la variation des températures moyennes au milieu du four pour les différents débits ( $D_{mg}=0,04$ kg/s,  $D_{mg}=0,05$  kg/s,  $D_{mg}=0,06$  kg/s).

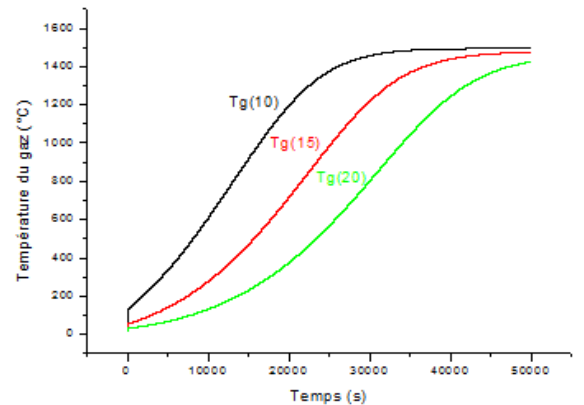


Fig. 2 Variation des températures du gaz en fonction du temps

- Les températures moyennes de cuisson des éléments de poterie brutes à l'intérieur du four augmentent en fonction du temps, et ce conformément à la méthodologie de la conduite générale de cuisson existante dans la littérature pour les fours similaires [6].

- Les températures du gaz dans les différents points du four chargé caractérisent un certain écart-ce qui nous paraît tout à fait logique à cause de l'influence de la charge; la température est maximale en bas du four tout en diminuant progressivement vers le haut.

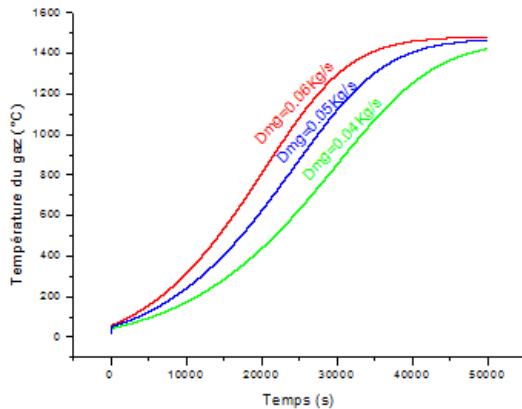


Fig. 3 Températures du gaz en fonction du temps pour différents débits

D'après ces figures, on remarque que la vitesse de montée en température, la température maximale de cuisson et la durée de maintien de celle-ci dépendent essentiellement des débits de gaz brûlés (puissance thermique).

## V. CONCLUSION

Nous avons établi un modèle mathématique du fonctionnement d'un four à poterie permettant de connaître l'évolution temporelle des températures effectives dans le four à l'intérieur duquel existe un système combiné d'échanges thermiques connaissant la puissance thermique (fournie par le gaz butane).

Les profils de température verticaux du gaz ont été déterminés. En effet, le modèle développé permet de caractériser la montée en température et d'apporter une meilleure connaissance du comportement thermique des fours à gaz ainsi que des poteries qui y sont traitées; cela va contribuer à une meilleure programmation de cuisson de divers produits de poterie.

Les résultats obtenus en régime transitoire reflètent le comportement réel d'un four à poterie soit: la température à l'extérieur est la plus basse (température ambiante) et à travers les couches la température augmente jusqu'à obtenir une température maximale à l'intérieur du four.

La simulation numérique de ce modèle a fourni des résultats souhaités conformes à ceux existants dans la littérature pour fours similaires.

## REFERENCES

- [1] S. Benthami, "Modélisation Numérique d'un Four Electrique à Convection Forcée", Thèse, Université du Québec à Trois-Rivières, Québec, Avril 2004
- [2] M. Elie Hachem, "Stabilized Finite Element Method For Heat Transfer And Turbulent Flows Inside Industrial Furnaces", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, France, Septembre 2009.
- [3] E. Hachem, H. Digonnet, E. Massoni, T.Coupez, "Modélisation du procédé de chauffage de pièces dans un four industriel". Disponible (en ligne) <http://www.hal.inria.fr>.
- [4] M. Kassinopoulos, "Modélisation et commande sous optimale d'un four d'industrie céramique", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de sciences, Toulouse, France, Juin 1980.
- [5] H. El Hajjar, "Contrôle et Conduite Numériques d'un Four Tunnel d'Industrie Céramique". Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de sciences, Toulouse, France, Mai 1983.
- [6] O.D. Samah, A. Vianou, E. Sanya, E. K. Atcholi, "Echange thermiques dans un four à combustible eau sous pression et pétrole lampant : modélisation d'un cycle de cuisson", Journal des Sciences Pour l'Ingénieur. pp 11 - 17, 2006.
- [7] Rayonnement et Convection Naturelle. Disponible (en ligne) <http://www.physique-eea.ujf-grenoble.fr>.
- [8] J. Brau, Convection. Disponible (en ligne) <http://www.docinsa.insa-lyon.fr>.
- [9] A. Bouzian, R. Sabouni, "Modélisation d'un four de cuisson", Mémoire, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Université Mohammed V, Rabat, Maroc, 1994-1995
- [10] D. W. Green, R. H. Perry, Perry's chemical engineers' handbook, 8 TH ed.