

ETUDE DES ECHANGES THERMIQUES DANS UN FOUR A GAZ POUR LA CUISSON DES PRODUITS CERAMIQUES

L. Balli¹, A. Touzani¹, J. Moumouh²

(1) *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.*

(2) *Equipe de Thermodynamique Appliquée et Combustibles Solides, Département Génie des Procédés industriels, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Université Mohammed V - Agdal, Rabat, Maroc.*

E-mail: balli_enviro@yahoo.fr

Résumé

Le produit céramique résulte du fait que la cuisson des pâtes argileuses et de pièces façonnées provoquent une modification fondamentale de leurs propriétés. On obtient un matériau avec des caractéristiques excellentes et diversifiées. Dans l'industrie céramique, le traitement thermique des produits à base d'argile constitue par conséquent le stade le plus important. Le choix de la source d'énergie et la technique de cuisson sont déterminants pour la conception du four. Aussi, ces éléments comptent parmi les principaux facteurs qui influent sur la qualité du produit.

La distribution de la température dans le four à gaz et dans les produits traités doivent également être maîtrisés, afin d'améliorer la qualité des produits chauffés en terme de résistance et dureté. C'est pour ces raisons que nous avons expliqué les échanges thermiques dans le four céramique. Ainsi nous proposons une modélisation simplifiée qui permet de déterminer la variation temporelle de la température moyenne à l'intérieur du four considéré.

Mots clés: Cuisson, Echanges thermiques, Four à gaz, Modélisation, Produits céramiques.

Abstract

The ceramic product is obtained after firing clay bodies formed following a fundamental change in their properties. It acquires excellent and diverse characteristics. The choice of the energy source and the firing technique are critical to the design of the furnace. Also, these are the main factors that influence the quality of the product. The temperature distribution in the gas furnace and the treated products must also be controlled to improve the quality of the heated products in terms of strength and hardness. It is for these reasons that we have explained the thermal exchanges in the ceramic furnace. Thus we propose a simplified model that determines the temporal variation of the average temperature inside the oven considered.

Keywords: Ceramic products, Firing, Gas furnace, Heat Exchanges, Modeling.

1- INTRODUCTION

Au Maroc, les terres argileuses, notamment céramiques, sont essentiellement utilisées pour la confection des matériaux de construction traditionnelle et moderne, ainsi que pour la confection de nombreux articles de poterie. La majorité des produits céramiques sont issus de matières premières minérales silico-alumineuses compactées et consolidées par frittage [1].

Dans le domaine de l'énergie, le Ministère de l'Artisanat prend conscience que les études empiriques ne sont plus suffisantes pour aboutir à des produits innovants et concurrentiels. Ils reconnaissent qu'il est de plus en plus nécessaire de s'appuyer sur une meilleure connaissance des phénomènes physiques pour progresser.

Ainsi, les efforts de reconversion des fours traditionnels en fours à gaz restent limités et compte tenu du coût élevé des fours à gaz qui existent sur le marché, il était nécessaire de faire un effort de production locale de four à coût réduit et de faire aussi un travail d'argumentation incitative pour convaincre les artisans de s'équiper en four à gaz [2].

Les matières premières argileuses sont mises en forme (pressage, coulage etc...), séchées et traitées thermiquement afin de les consolider. L'étape de cuisson des produits céramiques est primordiale pour les industriels.

La cuisson a pour conséquence une modification importante de la microstructure. En cru, il s'agit d'un matériau cristallisé avec une structure en feuillet. Lorsqu'elle est traitée thermiquement, l'argile se transforme, et, après refroidissement, elle est alors constituée uniquement d'une phase amorphe ou d'un mélange d'une phase amorphe et de phases cristallisées. Le choix, souvent empirique, des matières premières et du cycle de cuisson dépend des propriétés d'usage recherchées pour les produits finaux: par exemple, une faible conductivité thermique, une forte résistance mécanique ou même certains aspects esthétiques (couleur) [3].

Pour des températures atteignant 900°C, les produits de cuisson offrent des valeurs élevées de porosité apparente, ce qui se traduit par des céramiques peu denses avec de faibles résistances mécaniques.

Au-dessus de 900°C jusqu'à 1200°C les produits obtenus font apparaître la mullite et la cristobalite et les céramiques sont denses avec des résistances mécaniques assez élevées, sans déformation ou défauts. Ces matériaux argileux peuvent être utilisés pour la production des produits de terre cuite et aussi pour la formulation des céramiques à tesson peu poreux [4].

En plus des transformations permanentes présentées par les produits au cours de la cuisson. Nous avons aussi des transformations transitoires comme par exemple l'augmentation de volume que présente tout corps pendant son chauffage si la conduite de cuisson n'est pas adaptée (irrégularité, ou insuffisance de cuisson). Ces modifications temporaires risquent de provoquer des dégâts permanents [5].

Pour pouvoir donc cuire les produits céramiques convenablement nous devons résoudre deux problèmes:

Le premier consiste à déterminer la courbe de cuisson optimale, il faudra connaître notamment la vitesse de montée en température, la température maximale de cuisson et la durée de maintien de celle-ci.

Le deuxième problème consiste à faire cuire les produits suivant cette courbe de cuisson. Il faudra essayer évidemment de minimiser au même temps la consommation d'énergie pour que le produit soit rentable.

2- PROCÉDES ET TECHNIQUES APPLIQUES

La fabrication des céramiques fait appel à différents types de fours et à toute une gamme de matières premières pour donner des produits pouvant revêtir diverses formes, tailles et couleurs.

Le procédé général de fabrication des céramiques, quant à lui, est plutôt uniforme, en dehors du fait qu'une cuisson en plusieurs étapes est souvent requise pour la fabrication d'articles céramiques.

En général, les matières premières sont mélangées puis mises en forme par coulage, pressage ou extrusion. Un apport régulier d'eau facilite le mélange et la mise en forme. Cette eau s'évapore dans les séchoirs et les produits sont ensuite enfournés manuellement ou placés dans des chariots [6].

3- TRAITEMENT THERMIQUE DE LA MATIERE

Le traitement de la matière est la tâche qui requiert, pour l'ensemble des potiers – céramistes, le plus de temps soit environ 50%. Plusieurs entrevoient que des changements dans l'accomplissement de cette tâche sont à envisager dans l'évolution du métier. Cette tâche, jugée cruciale, pourrait, selon certains, être réduite par l'acquisition d'appareils mécaniques facilitant la tâche ou éliminée par l'installation d'une unité de production où seraient traitées les terres pour plusieurs ateliers [7].

Durant la cuisson, un gradient de température très précis est nécessaire pour que les produits fassent l'objet du traitement adéquat. Il faut ensuite un refroidissement contrôlé pour que les produits libèrent leur chaleur progressivement en préservant leur structure céramique.

4- DESCRIPTION DU PROCESSUS

4.1- Présentation du four

Le dispositif expérimental faisant l'objet de cette étude est un four de cuisson utilisant comme source d'énergie le gaz butane, constitué d'une enceinte parallélépipédique de capacité 4.6 m³ (fig.1) est bâti en maçonnerie avec des matériaux locaux (briques, plaques, chamotte, laine de verre etc...).

La construction a été réalisée par des plaques réfractaires et recouvert par des briques. L'isolation du four a été assurée par de la fibre céramique et la laine de verre au niveau du four et au niveau de la porte.

L'alimentation en gaz est garantie par les bouteilles de butane placées à l'extérieur de la chambre (condition de sécurité).

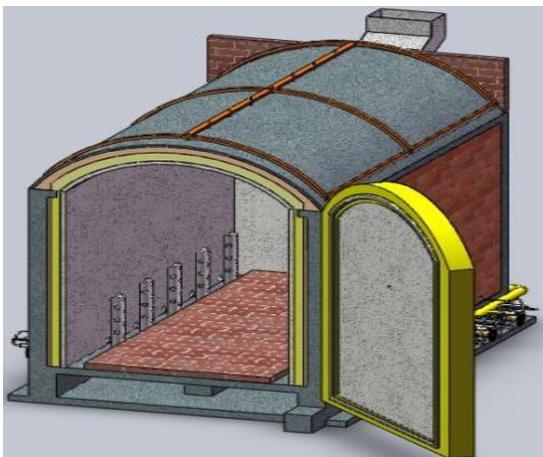


Fig.1: Four prototype à gaz

4.2- La charge

La charge est constituée des produits à cuire. Cette charge est relativement hétérogène car elle dépend du nombre et de la forme des produits à cuire.

La cuisson est assurée par 10 brûleurs atmosphériques placés sur deux côtés opposés. Chaque brûleur comporte sa propre vanne de sécurité qui ferme le gaz dans le cas d'une extinction de la flamme. La pression du gaz pendant l'expérimentation est mesurée par un manomètre fixé à la sortie.

Une connaissance approfondi du fonctionnement thermique des fours de cuisson permet une meilleure maîtrise du comportement thermique; ce qui amène à des améliorations dans deux directions [8] :

- la diminution du taux de produits à détériorés
- la diminution de la consommation spécifique de l'énergie

4.3- Le fonctionnement du four

Le four est assimilable à un échangeur de chaleur entre solide (charge) qui occupe presque tout l'espace à l'intérieur du four et le gaz. Les produits à cuire sont placés avec espacement entre eux de manière à favoriser la meilleure circulation et transmission de la chaleur [9].

La cuisson de la charge se fait en trois phases :

- La première, nommée phase de préchauffage où en chauffe le produit pour passer de la température ambiante à une température élevée de l'ordre de 450°C.
- La deuxième, c'est la phase de cuisson où la température varie entre 900°C et 1200°C.
- Finalement la phase de refroidissement où la température de la charge diminue progressivement.

En effet la chaleur fournie à la charge provient seulement de la chaleur fournie par des brûleurs sous forme de flammes.

5- MODELISATION MATHEMATIQUE ET SIMULATION NUMERIQUE

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 $T_p(z,t)$ [5]:

$T_s(z,t)$: 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.

5.1- Hypothèses simplificatrices

Afin d'obtenir un système d'équations relativement simples et facilement exploitables sans trop de difficulté sur le plan numérique, mais suffisamment précis pour qu'il puisse fournir une représentation assez fidèle du fonctionnement du four. Par conséquent, il est indispensable de faire quelques hypothèses simplificatrices qui ont été justifiées en prenant comme références des travaux antérieurs relatifs aux processus semblables [8]-[9]-[10].

- ✓ 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 et négligeable.

La prise en compte de ces hypothèses et en considérant le bilan sur un volume différentiel $dv = S_h \cdot dz$ et dans un intervalle du temps dt nous a conduit à un modèle mathématique sous la forme d'un système d'équations aux dérivées partielles, non linéaire et couplées suivant [11]:

Bilan thermique au niveau de la charge de température $T_s(z,t)$

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

Bilan thermique au niveau du gaz de température $T_g(z,t)$

$$S_h \varepsilon \frac{\partial (\rho_g C_{pg} T_g)}{\partial t} + D_{mg} \frac{\partial (C_{pg} T_g)}{\partial z} = A_{GS} (T_s - T_g) + A_{GTa} (T_a - T_g) \quad (2)$$

Avec :

- ε Le taux de vide dans le four (%)
- S_h La section horizontale du four (m^2)

ρ_s La densité volumique de la charge (Kg/m^3)

ρ_g La masse volumique du gaz (Kg/m^3)

C_{ps} La capacité calorifique à pression constante de la charge ($J/Kg \cdot ^\circ K$)

C_{pg} La capacité calorifique à pression constante du gaz ($J/Kg \cdot ^\circ K$)

D_{mg} Débit massique du gaz (Kg/s)

A_{GS} Coefficient associé au transfert de chaleur par convection entre la charge et le gaz ($J/s \cdot m \cdot ^\circ K$)

B_{ps} Coefficient associé au transfert de chaleur par rayonnement entre la charge et paroi ($J/s \cdot m \cdot ^\circ K^4$)

A_{GTa} Coefficient associé au transfert de chaleur par convection entre le gaz et le milieu extérieur ($J/s \cdot m \cdot ^\circ K$)

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- RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats numériques de la variation des températures moyennes du gaz et du solide (produit) en fonction du temps dans le four prototype pendant son fonctionnement chargé sont donnés par La figure 2.

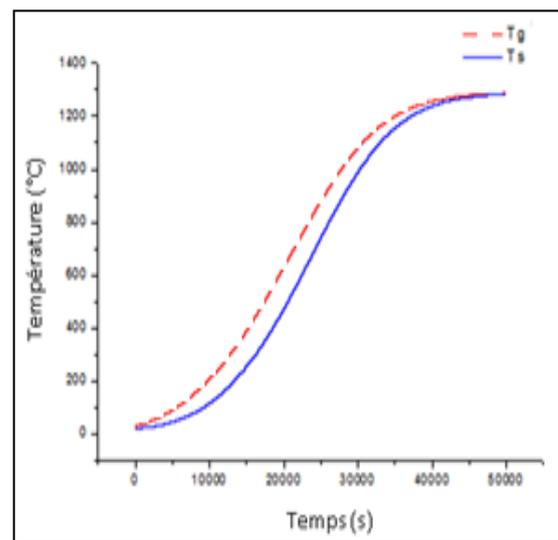


Fig.2. Profil de température moyenne du gaz et du solide en fonction du temps

La figure 2 montre que Les températures moyennes du gaz et du solide 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 [5], [9]. L'écart entre la progression de la montée en température du gaz et du solide au moment du fonctionnement du four chargé est dû à l'influence de la résistance thermique du produit.

Les résultats numériques obtenus en régime transitoire de la distribution des températures moyennes du gaz dans le four céramique considéré au cours de son fonctionnement chargé au centre du four, sont donnés par la figure.3 pour les différents débits: ($D_{mg} = 0.04 \text{ Kg/s}$, $D_{mg} = 0.05 \text{ Kg/s}$, $D_{mg} = 0.06 \text{ Kg/s}$) et par la figure 4 pour les différents taux de vide dans le four: ($Taux=12\%$, $Taux=15\%$, $Taux=20\%$, $Taux=24\%$).

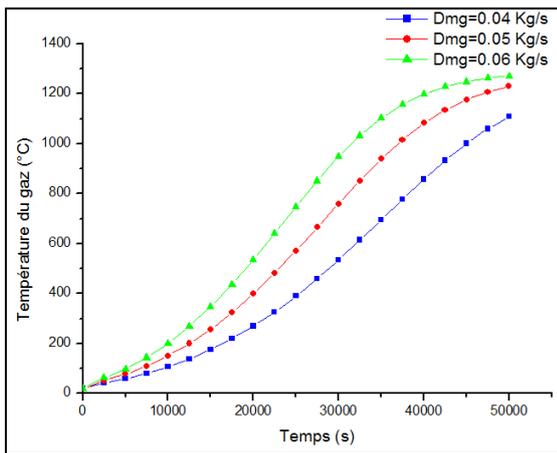


Fig.3. Températures du gaz en fonction du temps pour différents débits

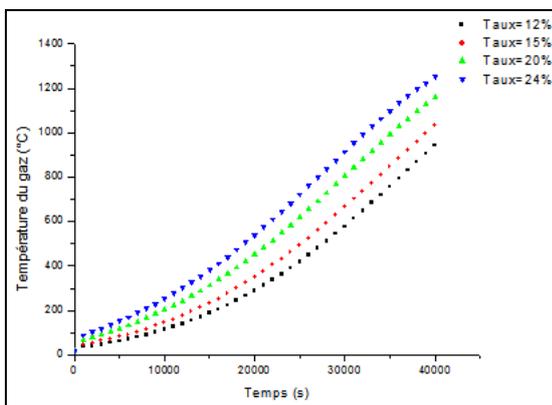


Fig.4. Températures du gaz en fonction du temps pour différents taux de vide

D'après les figures 3 et 4, 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) et du taux de vide.

Nous avons procédé à des essais de cuisson de produit émaillé et non émaillé avec un enfournement en vrac (manière habituelle des potiers) et en utilisant des supports, les résultats de la cuisson sont illustrés respectivement sur les figures 5, 6 ci-après.

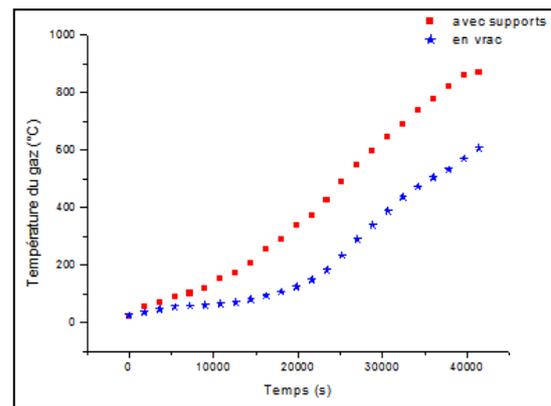


Fig. 5 : Variation transitoire des températures du gaz (en vrac)

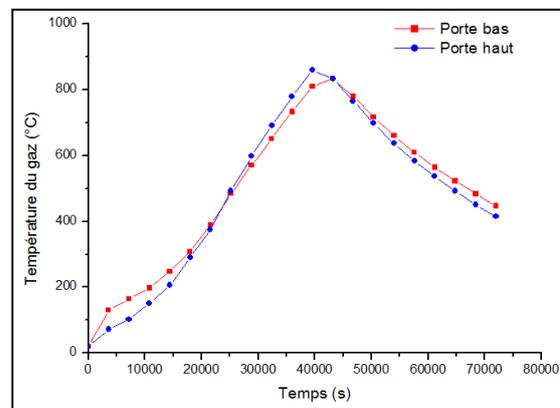


Fig. 6 : Variation transitoire des températures du gaz (avec support)

On peut constater que pour un enfournement en vrac (fig. 5) le four était trop chargé et étouffé, la chaleur n'arrivait pas à accéder à la moitié supérieure du four, mais pour un enfournement en utilisant des supports en céramique (fig. 6) les résultats de cuisson étaient jugés très satisfaisants par les potiers-céramistes.

7- CONCLUSION

Le modèle proposé nous a permis de caractériser la montée en température, cela va contribuer à une meilleure programmation de cuisson de divers produits selon une courbe optimale déterminée expérimentalement.

La vitesse de montée en température, la température maximale de cuisson et la durée de maintien de celle-ci dépendent essentiellement de la puissance thermique et du taux de vide dans le four.

La manière d'enfourner est très préjudiciable à la qualité de cuisson : L'enfournement doit être homogène afin de ne pas créer des chemins préférentiels. En effet, dans un four atmosphérique, le tirage est naturel et un enfournement hétérogène provoque des chemins préférentiels (les gaz chauds prennent le chemin où la perte de charge est faible).

On peut conclure que suite aux essais réalisés sur le nouveau prototype, que la cuisson du produit a été satisfaisante et que le four présente une bonne homogénéité de la température si on respecte un enfournement homogène en utilisant les supports.

REFERENCES

[1] N. EL Yakoubi, Potentialités d'utilisation des argiles marocaines dans l'industrie céramique : cas des gisements de Jbel Kharrou et de Benhmed, thèse doctorat, université Mohammed V-Agdal, Faculté des sciences Rabat, Maroc, 2006, p. 9.

[2] A. Chehbouni, Lutte contre la pollution et amélioration de la qualité des produits dans le village des potiers de Marrakech, Centre de Développement de la Région du Tensift (CDRT), Février 2009.

[3] A. MICHOT, Caractéristiques thermo-physiques de matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C. Thèse doctorat, Université de Limoges Faculté des Sciences, décembre 2008, p. 5.

[4] H. Baccour Zghal et al. Caractérisation physicochimique et Mécanique de matériaux Céramiques obtenus à partir des argiles tunisiennes. Verres, Céramiques & Composites. Vol.1, N°2, (2011), p. 25-33

[5] 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, p. 4.

[6] Projet, Commission européenne Fabrication des céramiques, Août 2007

[7] Rapport, Centre de Qualification Professionnelle des Arts Traditionnels de Rabat-Takadoum APC en Artisanat, Poterie / Céramique, décembre 2006.

[8] 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, p.10.

[9] 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. p 11 - 17, 2006.

[10] A. E. Larrazabal Identification et optimisation d'un four tunnel d'industrie céramique. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de sciences, Toulouse, France, Décembre 1985, p. 10.

[11] L.Balli, A.Touzani, Modélisation et Simulation Numérique des Transferts Thermiques dans un Four à Poterie, International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET), June-September 2014, Volume 2, ISSN: 2356-5608. Link:<http://ipco-co.com/current%20issue2.html>