

SIMULATION NUMERIQUE PAR ELEMENTS FINIS DU PHENOMENE DE CROÛTAGE DANS LE FOUR DE LA CIMENTERIE DE HAMMA-BOUZIANE / CONSTANTINE

Dr BEN MOUSSA Hocine, Mr DEMAGH Yassine
Département de mécanique, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université de Batna.
Tél. :+213 33 81 21 43 Fax. :+231 33 81 24 80, Email : hocine_b@hotmail.com

Résumé

Dans chaque cimenterie, la première prérogative des gestionnaires est le maintien, à un niveau de stabilité acceptable, des paramètres de fonctionnement du four et la connaissance en chaque instant de l'état d'usure du garnissage réfractaire, la constitution du croûtage ainsi que le suivi de la cuisson de la matière à l'intérieur du four. L'étude du transfert de chaleur par conduction à travers les parois du four peut nous aider à comprendre quelques phénomènes qui peuvent avoir lieu à l'intérieur.

La présente étude propose la détermination numérique du champ de températures à travers la paroi solide d'un four de cimenterie, constituée de l'enveloppe métallique, du réfractaire, et du croûtage (crust). Le but principal de ce travail est la prédiction par une simulation numérique des caractéristiques géométriques du croûtage (longueur et épaisseur).

La résolution numérique des équations gouvernant le phénomène des transferts thermiques par conduction a été abordée. L'outil numérique utilisé est la méthode des éléments finis. Un programme a été développé dans ce sens qui permet de résoudre un système d'équations tridimensionnel instationnaire, non-linéaire (rayonnement des parois, et rayonnement des gaz de combustion) dans un milieu hétérogène.

Mots clés : four rotatif / ciment / croûtage / éléments finis.

I- INTRODUCTION

La connaissance des phénomènes à l'intérieur d'un four de cimenterie comme l'état d'usure du garnissage réfractaire, la constitution du croûtage ainsi que le suivi de la cuisson de la matière, conduit à une meilleure tenue du four et une maîtrise des paramètres de conduite à savoir, débit gaz de combustion, débit matière à cuire, taux de tirage de l'air secondaire, vitesse de rotation du four etc... En plus la connaissance de l'état d'usure du garnissage due essentiellement à l'attaque abrasive que subit la brique par le clinker en fusion, peut aider à pronostiquer sur un éventuel arrêt du four programmé, et non pas accidentel, ainsi que le type et la quantité de briques usées à remplacer.

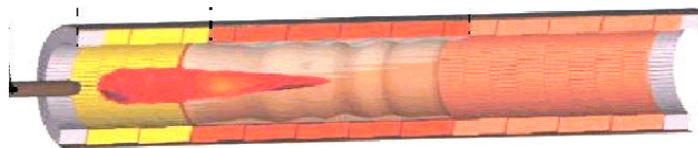


Fig. 1 Four en coupe.

Le four rotatif est le centre du processus de cuisson, il représente l'organe le plus sollicité thermiquement, il inclut des apports d'énergie de grandes capacités et de grandes déperditions thermiques. Le four est un cylindre en acier de chaudière (E26.1), animé d'une vitesse de rotation variable pouvant atteindre les 2 tr/mn. Ce cylindre appelé aussi virole est revêtu de l'intérieur par des briques réfractaires et incliné de 3% dans le sens de l'écoulement de la matière, cette inclinaison combinée avec la rotation fait que la matière puisse progresser par gravité, vers le brûleur. La longueur du four est de 90 m, et de diamètre 5,4 m.

Le brûleur, élément de chauffe, dégage une flamme qui peut atteindre une température de 2000°C (elle est issue de la combustion du gaz naturel). En régime établi, le four est le siège d'un équilibre entre deux flux opposés:

- Un flux calorifique des fumées de combustion d'aval en amont est fourni par la combustion du gaz naturel et le débit d'air secondaire, arrivant du refroidisseur déjà chaud.

- Un flux de matière d'amont en aval forme dans le four un lit appelé talus, arrivant à une température de l'ordre de 800 °C à 900 °C et devrait atteindre la température de clinkerisation (1450 °C) à quelques mètres de la sortie du four.

Une batterie de ventilateurs placée à l'extérieur du four du côté du talus refroidit la virole qui, par conduction thermique, refroidira la matière en contact avec la paroi interne du four et fera que la matière soudainement refroidie puisse coller aux briques réfractaires et les protéger de l'abrasion du clinker en fusion, d'où la formation de croûtage.

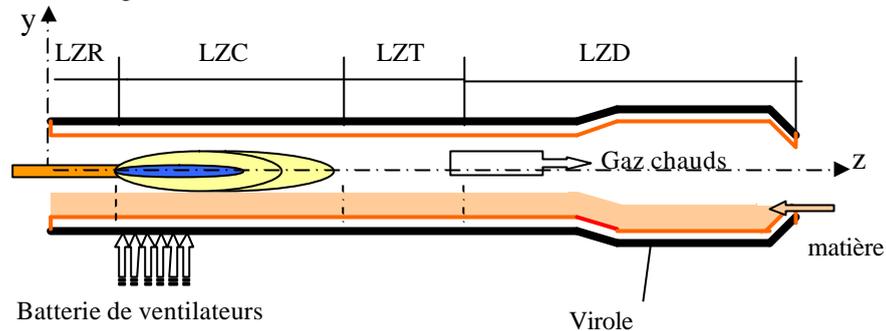


Fig. 2 Processus à l'intérieur du four.

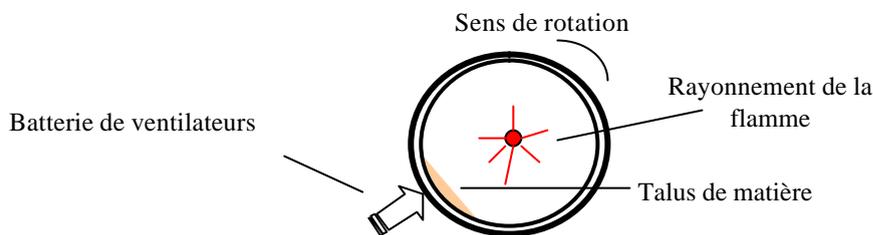


Fig. 3 Coupe transversale du four.

II- DEFINITION DU DOMAINE D'ETUDE

Notre domaine d'étude, Fig. 4 est un milieu hétérogène constitué de :

- a- virole qui prend la forme d'un tube en acier possédant une conductivité thermique égale à 40 W/m.K et une émissivité de $0,8$ [1]. (on admet que la virole a une épaisseur unique de 30 mm).
- b- garnissage constitué de briques réfractaires, admet une conductivité thermique variable, dans le sens de l'axe du four en passant d'une zone à une autre (cf. Fig.4), de $1,1$ à $3,1 \text{ W/m.K}$ à 700 °C [2], et une émissivité de $0,5$.
- c- croûtage qui commence à se former au début de la zone de cuisson et se termine avec cette dernière, son épaisseur varie de 200 mm à 400 mm , avec une conductivité thermique de $1,5 \text{ W/m.K}$ [3], son émissivité est supposée la même que celle du réfractaire.

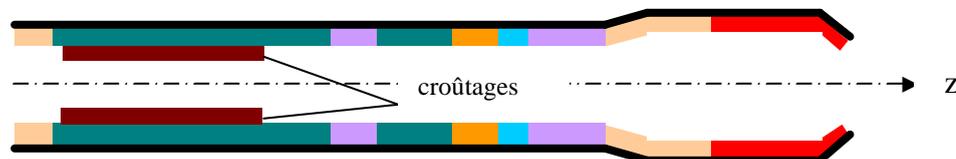


Fig. 4 Four avec croûtage

III- MISE EN EQUATIONS ET DEFINITION DES CONDITIONS AUX LIMITES

On résoud l'équation de la chaleur dans le cas stationnaire, dans un milieu hétérogène et sans source interne, régie par des conditions aux limites présentant des termes non linéaires.

L'équation de la chaleur s'écrit donc :

$$\boxed{\text{Diagramme schématisant un four avec un croûtage}} \quad (1)$$

Conditions aux limites :

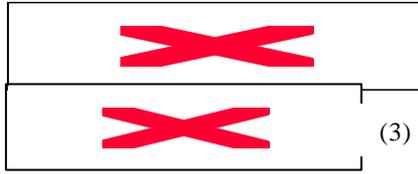
Les différents modes d'échanges de chaleur à l'intérieur du four rotatif de la cimenterie considérés sont :

Convection : fumées - talus de matière, fumées - paroi interne du four,

Radiation : fumées - paroi interne, paroi interne - talus et

Conduction : paroi interne - talus.

a- Entre le talus et la brique (face interne)



(2) sur le domaine : $z \geq LZR+LZC$; $0^\circ \leq \theta \leq 25^\circ$

(3) sur le domaine : $z < LZR+LZC$; $0^\circ \leq \theta \leq 35^\circ$

Arrivée à la zone de cuisson la farine crue se transforme en clinker, ce changement de nature va s'accompagner par celui des caractéristiques physiques à savoir, la conductivité thermique. On suppose que la matière possède un profil de température linéaire $T=f(z)$ reconstitué en fonction des paliers de températures par lesquels la matière transite pour se transformer en clinker :

T_{crue} : température entrée matière (valeur réelle relevée sur site).

$T=1100^\circ\text{C}$ température de fin de décarbonatation.

$T=1250^\circ\text{C}$ température de début de cuisson.

$T=1450^\circ\text{C}$ température de fin de cuisson.

$T=T_{KK}$ température de sortie clinker.

b- Entre les gaz chauds et la brique (face interne)

$$-I_B \frac{\partial T}{\partial n} = \Phi_{convection} + \Phi_{radiant} \quad \text{avec} \quad \Phi_{convection} = h_{G.C.}(T_P - T_{G.C.}), \quad (4)$$

$$\Phi_{radiant} = E_s(A_g q_P^4 - e_g q_{G.C.}^4), \quad E = \frac{e_p}{1 - (1 - e_p)(1 - A_g)} \quad \text{et} \quad q_P = T_P + 273, \quad q_{G.C.} = T_{G.C.} + 273 \quad [5]$$

- Echange convectif dans le domaine : $0^\circ < ? < 330^\circ$, $0 = z = L_{four}$

- Echange radiatif dans le domaine : $0^\circ < ? < 330^\circ$, $LZR = z = L_{four}$

On suppose que les fumées ont un profil de température linéaire $T=f(z)$ reconstitué en fonction des paliers de températures :

T_{AS} température entrée air (air secondaire), valeur réelle relevée sur site.

$T=(T_f + T_{AS})/2$ température maximale.

T_{BF} température de sortie fumées, valeur réelle relevée sur site.

c- Entre les ventilateurs et la virole (face externe)

$$f = -I_V \frac{\partial T}{\partial n} = h_{air\ forcé}(T - T_\infty) + e_v s(q^4 - q_\infty^4), \quad q = T + 273, \quad q_\infty = T_\infty + 273 \quad (6)$$

Sur le domaine : $10^\circ = ? = 20^\circ$, $9,050 \text{ m} = z = 18,950 \text{ m}$

d- Entre le vent et la virole (face externe)

$$f = -I_V \frac{\partial T}{\partial n} = h_{vents}(T - T_\infty) + e_v s(q^4 - q_\infty^4) \quad (7)$$

Sur le domaine : $0^\circ < ? \leq 360^\circ$, $0 = z < 9,050 \text{ m}$ & $18,950 \text{ m} < z = L_{four}$.

$0^\circ < ? < 10^\circ$, $20^\circ < ? \leq 360^\circ$, $9,050 \text{ m} < z < 18,950 \text{ m}$

IV- METHODE NUMERIQUE DE RESOLUTION

La méthode numérique utilisée est la méthode des éléments finis, vu le caractère tridimensionnel de notre problème, nous avons opté pour un élément hexaèdre, iso-paramétrique, à 8 nœuds et dont l'élément de référence, prend la forme:

$$\begin{aligned} -1 \leq \xi \leq 1 \\ -1 \leq \zeta \leq 1 \\ -1 \leq \eta \leq 1 \end{aligned}$$

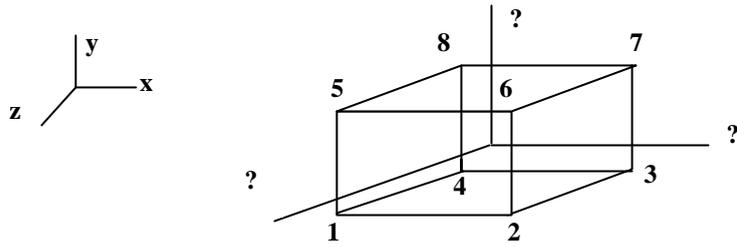


Fig. 5 Elément de référence hexaèdre.

Le maillage de notre domaine était réalisé par le mailleur « lisa ». La méthode de résolution du système est basée sur la méthode de Cholesky alors que celle de Gauss-Seidel est utilisée pour éliminer la non-linéarité par la donnée d'un champ de température initial.

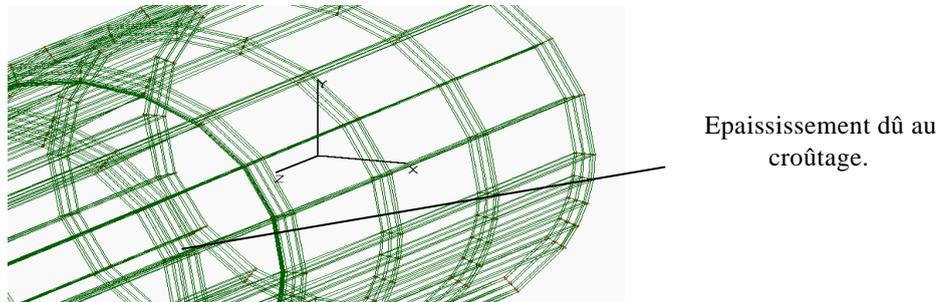


Fig. 6 maillage du four.

V- DETERMINATION DES COEFFICIENTS D'ÉCHANGES ET D'ÉMISSIVITES DES FUMÉES

a- Coefficient d'échange $h_{G.C.}$: fumées - paroi interne

La formule de Kraussold pour un écoulement turbulent donne le Nusselt [1] :

$$N_u = 0,032 \cdot P_r^{0,37} \cdot R_e^{0,8} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{0,054}$$

b- Coefficient d'échange h_{vent} : Vent – paroi externe

On utilise l'approche d'un cylindre horizontal en convection naturelle externe.

La valeur de Rayleigh se trouve dans l'intervalle $10^9 < R_{a,d} < 10^{12}$, ce qui nous conduit à utiliser la corrélation, du nombre de Nusselt, suivante [6] :

$$N_u = 0,13 \cdot R_{a,d}^{1/3} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{0,054}$$

avec
$$R_{a,d} = \frac{g \cdot b \cdot \Delta T \cdot D^3}{a \cdot \mathbf{n}}$$

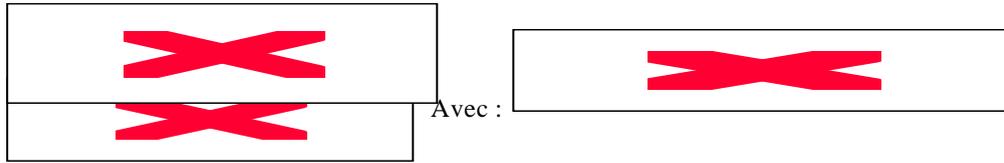
c- Coefficient d'échange $h_{air\ forcé}$: Air ventilateur - paroi externe du four

Le cas considéré pour la détermination du coefficient d'échange est celui d'un cylindre d'axe perpendiculaire à l'écoulement [6].

$$N_{u,D} = \frac{h \cdot D}{I} = 0.0239 \cdot R_{e,D}^{1/3}$$

d- Emissivité des fumées ϵ_g

L'émissivité des fumées à l'intérieur du four est déterminée en fonction de celles des gaz CO_2 et H_2O à la température des fumées. Ces deux émissivités peuvent être obtenues par des expressions analytiques [4], où on a :



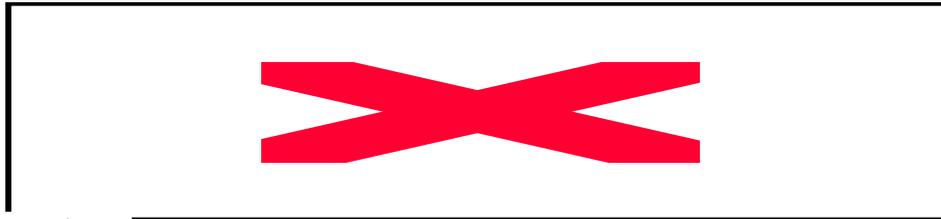
$$\text{et } e_{\text{H}_2\text{O}} = c_0 \cdot \left[1 - \exp \left(-c_1 \cdot \sqrt{X} \right) \right] \quad \text{où } X = P_{\text{H}_2\text{O}} L_e P \left(\frac{300}{T_{G;C} (K)} \right)$$

Tableau : Constantes pour la détermination de ϵ_{CO_2} et $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$

i	$b_{1,i}$	$b_{2,i}$	$b_{3,i}$	$K_i [(\text{atm.m})^{-1}]$	T[K]	c_0	c_1
1	0,1074	-0,10705	0,072727	0,03647	300	0,683	1,17
2	0,027237	0,10127	-0,043773	0,3633	600	0,674	1,32
3	0,058438	-0,001208	0,0006558	3,10	900	0,700	1,27
4	0,019078	0,037609	-0,015424	14,96	1200	0,673	1,21
5	0,056993	-0,025412	0,0026167	103,61	1500	0,624	1,15
6	0,0028014	0,038826	-0,020198	780,7			

e- Pouvoir absorbant des fumées A_g

De la même façon on définit A_g par :



$e_{\text{CO}_2}^+$ et $e_{\text{H}_2\text{O}}^+$: sont déterminées de la même façon que pour les gaz mais à la température de la paroi

T_p et dépendent, non pas de L_e mais de $L = L_e \cdot (T_p + 273) / (T_{G,C} + 273)$

VI- RESULTATS ET INTERPRETATIONS

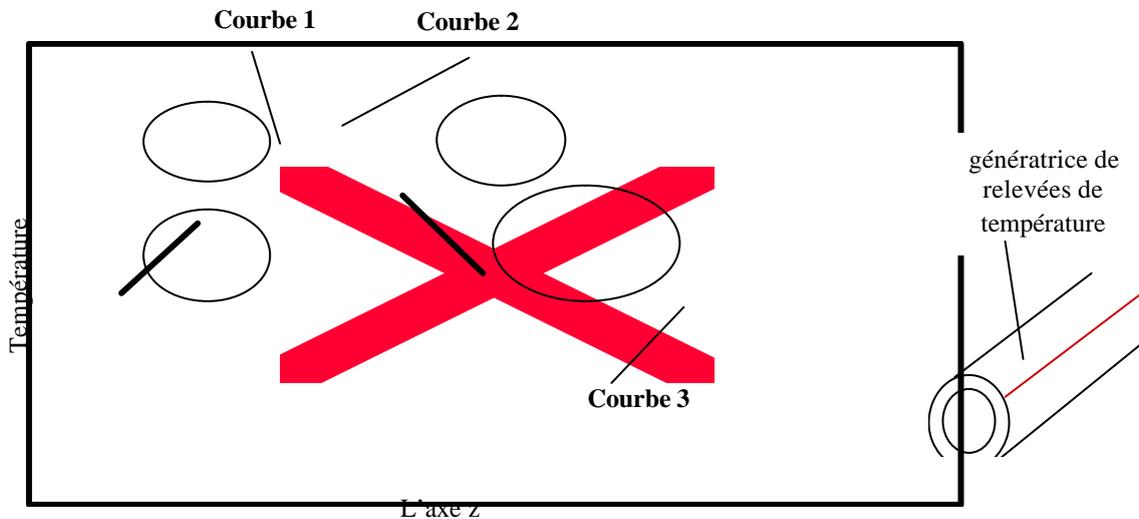


Fig. 7 Comparaison entre le champ de températures calculé et le champ

Cette figure regroupe trois courbes de température.

Les courbes 1 et 2, déterminées numériquement, représentent respectivement la variation de la température sur une génératrice externe du four avec croûtage et sans croûtage .

La courbe 3 représente à son tour les valeurs réelles prises sur site à la cimenterie.

En comparant la courbe 1 et la courbe 3 on constate que :

Les deux courbes présentent la même allure, elles admettent deux zones de perturbations, indiquées par des cercles. La distance séparant les deux zones reste plus importante pour la courbe 3 que pour la courbe 1, on peut facilement remarquer que la première zone se situe exactement aux même point de coordonnée, $z=7,5\text{m}$, pour les deux courbes, alors que la coordonnée z pour la seconde zone est plus importante pour la courbe 3, ce qui nous amène à dire que le croûtage réel, à l'intérieur du four s'étend de 7,5 m, comme supposé auparavant, et se termine à 45 m et non pas à 37,5m. On peut ajouter, que d'après leurs formes et la hauteur du pic notre supposition d'une épaisseur du croûtage de 200mm est acceptable et reste valable pour le début et la fin de croûtage. Les débuts des deux courbes concordent parfaitement alors que les bouts sont très loin l'un de l'autre, cela peut expliquer que T_{AS} est bonne et que T_{BF} , est erronée.

Les deux courbes admettent une grande différence en terme de valeurs numériques qui est due à la valeur du coefficient d'échange thermique, entre les fumées et la paroi interne, calculée en fonction d'une vitesse des fumées égale à 14 m/s, alors que les relevés des températures, sur site, ont été effectués avec four en virage, c'est à dire que le four est en rotation très lente, 0.6 tr/mn, non alimenté en matière à cuire, débit du gaz naturel de combustion très réduit et vitesse des fumées minimale, très inférieure à celle utilisée pour les calculs, si cette vitesse était connue et utilisée pour calculer le coefficient d'échange on aura une valeur du coefficient inférieure à celle utilisée dans le programme numérique, ce qui revient à dire que l'écart entre les valeurs prédites et les valeurs réelles sera moindre.

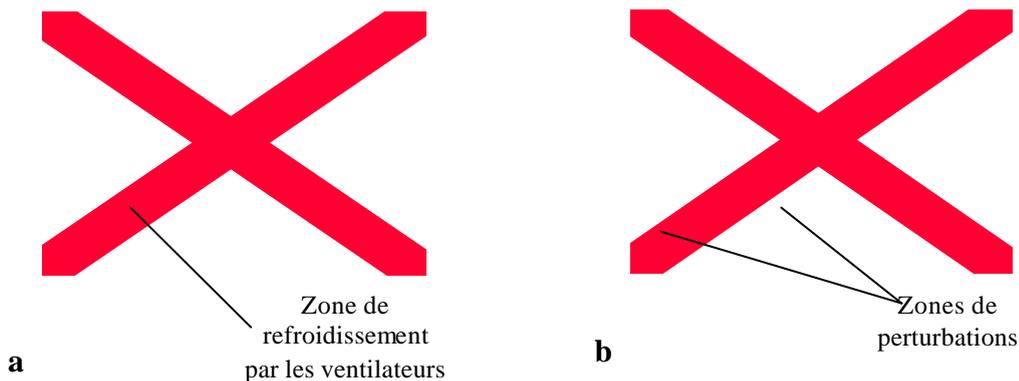


Fig. 8 Champs de température en tridimensionnel.

La figure 8 est une représentation du champ de température en tridimensionnel. Sur la Fig.8a on met en évidence la partie externe de la virole refroidie par la batterie de ventilateurs, sur la Fig. 8b on peut facilement voir les zones de perturbations, couleur rouge vif.

CONCLUSION

Cette étude nous a permis de mieux comprendre le phénomène de croûtage et de pronostiquer sa longueur et son épaisseur, ainsi que de bien cerner les phénomènes physiques qui peuvent avoir lieu, sans que le four soit à l'arrêt. Cette simulation nous a permis encore de mieux interpréter les relevés sur site du dispositif de surveillance permanente par infrarouge (SCANEX).

NOMENCLATURE

a : diffusivité thermique [m^2/s].

A_g : pouvoir absorbant des gaz (calculer à la température de la paroi interne).

C_0, C_1 : constantes (pour le calcul de $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$).

$C_{\text{H}_2\text{O}}, C_{\text{CO}_2}$: coefficients correcteurs de $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}, \epsilon_{\text{CO}_2}$.

d, D : diamètre interne et externe du four [m]

h_{vent} : coefficient d'échange thermique entre vent et paroi externe du four [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$].

$h_{\text{air forcé}}$: coefficient d'échange entre air ventilateurs et paroi externe du four [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$].

h_{GC} : coefficient d'échange thermique entre gaz chauds et paroi interne du four [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$].

k_x, k_y, k_z : Conductivités thermiques dans les directions x, y et z [W/m.K].
 $K, a_i, b_{1,i}, b_{2,i}, b_{3,i}$: constantes pour le calcul de ϵ_{CO_2} .
 L_e : épaisseur de la couche radiante [m].
 L_{four} : longueur du four [m].
 LZR, LZC, LZT, LZD : longueurs des zones de refroidissement, de cuisson, de transition et de décarbonatation [m].
 P_{CO_2}, P_{H_2O} : pressions partielles du CO_2 et de H_2O dans les fumées [atm.].
 P : pression totale des fumées dans le four [atm.].
 T_∞ : température de l'air ambiant [$^\circ C$].
 T_f : température de la flamme [$^\circ C$].
 T_{BF} : température de sortie fumées [$^\circ C$].
 T_{AS} : température d'entrée, dans le four, de l'air [$^\circ C$].
 T_p : température de la paroi interne du four [$^\circ C$].
 T_{GC} : température des gaz chauds (fumées) [$^\circ C$].
 ΔT : différence de température fluide – paroi [$^\circ C$].
 $\beta=1/T$: coefficient de dilatation [K^{-1}].
 λ_v : conductivité thermique de la virole [W/m.K].
 $\lambda_{clinker}$: conductivité thermique du clinker [W/m.K].
 $\lambda_{farine\ crue}$: conductivité thermique de la farine crue [W/m.K].
 λ_B : conductivité thermique de la brique réfractaire [W/m.K].
 ϵ_p : émissivité de la paroi interne du four
 ϵ_g : émissivité des gaz chauds (fumées).
 $\epsilon_{H_2O}, \epsilon_{CO_2}$: émissivités de la vapeur d'eau et du gaz carbonique.
 $\Delta \epsilon$: valeur de correction de ϵ_g .
 θ : référence angulaire [$^\circ$].
 σ : constante de Stefan-Boltzmann .
 ν : viscosité cinématique [m^2/s].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] W. HEILIGENSTAEDT - Thermique Appliquée aux Fours Industriels. Tome 1
DUNOD – PARIS – 1971.
- [2] REFRACTECHNIK Innovation Réfractaire , brochure Technique , 2001
- [3] R. RUDTSCH & H. ROGASS , Laser-Flash Measurements on Moist Porous Materials ,
Paper Presented at the Thirteen Symposium on Thermophysical Properties , June 22-27
1997 , Boulder , colorado , U.S.A.
- [4] R. SIEGEL & JOHN R. HOWELL – Thermal Radiation Heat Transfer , 3^{ème} edition ,
Hemisphere Publishing Corporation 1992.
- [5] A. LEONTIEV – Théorie des Echanges de Chaleur et de Masse, traduit du russe par
V. POLONSKI, édition MIR 1985.
- [6] SOUFIANA A. et TAINÉ J. - Int. J. of Heat and Mass , 30 , 437 (1987)