

Etude de Mode de Conductivité Thermique Dans les Fours Rotatifs

K. I JANATI^a, A. El khalfi^a, L. Bousshine^b

^aEquipe des Méthodes numériques et leurs applications en mécanique, Faculté des sciences et techniques, université sidi mohamed ben abdellah, fès – Maroc

^bEcole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique (ENSEM) – Casablanca, Université Hassan II – Casablanca – Maroc.
Janati.id02@gmail.com

Résumé

Le présent travail a pour objectif de l'étude de la conductivité thermique dans les fours rotatifs. Cette étude dans le cadre des travaux de la maintenance préventive de ces fours. Il s'agit de valider les modèles éléments finis qui simule le comportement du four en service. Dans un premier temps, une campagne de mesures expérimentales des gradients a été réalisée pendant le fonctionnement du four, ensuite la validation du programme de l'étude a été réalisée par le langage de programmation fortran. Et une autre part l'étude de la tenue mécanique des déformabilités et de l'excentricité du four a été réalisée à chaud, ensuite la validation de simulation numérique réalisée par PASSFEM de la virole par la méthode des éléments finis a été élaborée en utilisant le logiciel PATRAN/NASTRAN. Pour une meilleure approche de la réalité du comportement du four, les résultats obtenus par la MEF sont comparés à ceux obtenues par les essais expérimentaux.

Abstract

The present work aims to study the thermal conductivity in rotary kilns. This study as part of the work of the preventive maintenance of these kilns. This is to validate the finite elements models that simulate the behavior of the furnace in service. Initially, a campaign of experimental measurements of gradients and heat flows was carried out during the operation of the furnace, and then the validation of the program of the study was carried out by the FORTRAN programming language. And on the other hand, the study of the mechanical strength of the deformability and eccentricity of the furnace was carried out, then the numerical simulation validation of the ferrule and the refractory wall by the finite element method was developed using the software PATRAN/NASTRAN. For a better approach to the reality of the kiln behavior, the results obtained by the MEF are compared with those obtained by the experimental tests.

Mots-Clés: Virole, four rotatif, maintenance préventive, excentricité, gradient thermique, PASSFEM, PATRAN/NASTRAN.

1. Introduction

Les fours rotatifs sont les cœurs des cimenteries, ils permettent la cuisson des matériaux de base pour l'obtention du clinker. Le four est un long cylindre incliné en rotation permanente permettant le déplacement du matériau (figure 1). Un bruleur chauffe le matériau à une température de 1600°C, et les gaz chauds circulent dans le sens inverse du déplacement du matériau.

La virole du four rotatif se compose de plusieurs tronçons de tailles différentes assemblés par soudage et revêtus de briques réfractaires. Chaque tronçon du four a une épaisseur spécifique et les matériaux sont choisis pour résister aux contraintes dues aux charges mécaniques et thermiques appliquées [1].

La température de service à l'intérieur du four dépasse les 1500 °C et croît au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'entrée, elle est contrôlée en permanence à l'extérieur de la virole au moyen d'un appareil de mesure approprié. Grâce au revêtement réfractaire, la valeur de référence de la température maximale de la virole métallique est de 400 °C.

Dans le cadre de la maintenance préventive [2] une étude détaillée du four N°1 (voir fig.1) va être élaborée. Pour ce faire il est nécessaire de déterminer le désalignement, les surcharges du four afin d'anticiper, le croutage, les fissures du mur réfracteurs, et la tombé des briques réfractaires et de détecter son axe réel de rotation pour pouvoir contrer le problème de désalignement [3]. Ces causes influencent aussi sur les autres composants du four, par exemple les galets de guidage en rotation qui sont de l'ordre de trois comme on le voit sur la figure 1.



Fig.1 : Four rotatif N°1

2. Type des défaillances

Dans le cas de défaillance des briques réfractaires du four par le croutages, l'usure ou la tombé des briques la température dépasse 650°C à l'extérieur du four. Ce qui influence sur le comportement du matériau de la virole. La limite élastique est donc franchie, ce qui génère des déformations plastiques permanentes et importantes comme le montre la figure 2.

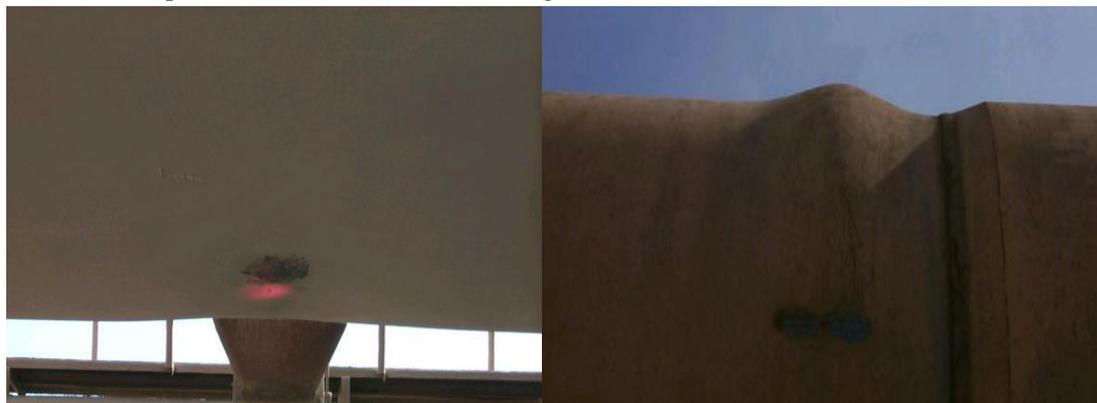


Fig.2 : Tache thermique et déformation sur la virole

Les centres réels de rotation (fig.3) des tronçons de la virole sont établis par une série de mesures à partir de l'extérieur de la virole. Habituellement, les diamètres des tronçons et l'espacement entre les galets et les bandages sont des données importantes pour représenter l'alignement externe du four

rotatif. Certaines difficultés surgissent pour la réalisation de ces mesures. Parmi elles, par exemple, il est difficile de mesurer l'espacement entre les galets et le bandage à cause de non disponibilité d'une surface de référence et de plus, sur certains fours où les bandages sont très usés, les mesures de diamètre peuvent être aléatoires. La précision de l'alignement final du four est liée étroitement aux conditions de mesuré. Il y a longtemps, il est difficile d'obtenir des résultats fiables basés, uniquement, sur des mesures géométriques externes. Autrement, grâce à l'utilisation d'un ordinateur portable et des théodolites à principe optique, ces mesures peuvent être effectuées sur des fours en service. Ces avancées technologiques permettent d'obtenir des mesures précises et fondamentales pour l'amélioration de l'alignement externe [4].

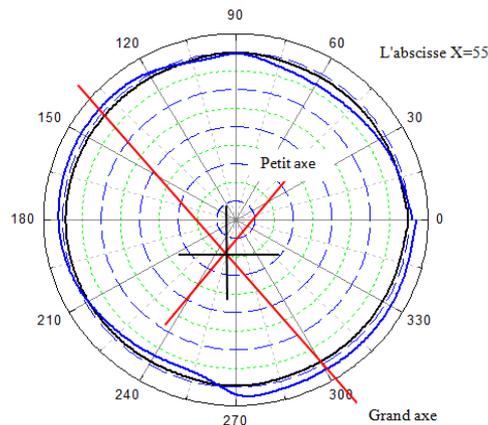


Fig.3 : Déformation et centre réel d'une section droite de la virole

3. Formulation éléments finis de la conduction de la chaleur

Formulation éléments finis de la conduction de la chaleur deux possibilités pour résoudre les problèmes du transfert de chaleur par conduction dans un solide, peuvent être utilisées. La première est basée sur la formulation variationnelle et la deuxième utilise le principe des résidus pondérés. Toutes les deux mènent au système d'équation algébrique suivante :

$$[K][T] = \{f\}$$

3.1 Méthode de Galerkin

Pour les équations quasi-harmoniques [5]. L'équation de la conduction thermique est donné par :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + G = 0$$

$$T = T_B \text{ Sur } S_1$$

$$k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) l + k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) m + k_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) n + q + h(T - T_\infty) = 0$$

Sur S_2 où q est spécifié et sur S_3 on h et T_∞ sont spécifiés.

$$T \approx \bar{T} = \sum_{i=1}^r N_i T_i = [N]\{T\} \quad (3)$$

En appliquant la méthode de Galekin on obtient :

$$\int_V N_i \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) + G \right] dx dy dz = 0$$

En introduisant les conditions aux limites on obtient :

$$\int_V GN_i dx dy dz - \int_S q N_i dS + \int_S h T_\infty N_i dS - \int_S h [N] N_i \{T\} ds - \int_V \left[k_x \frac{\partial [N]}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + k_y \frac{\partial [N]}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + k_z \frac{\partial [N]}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] \{T\} dx dy dz = 0$$

Qui aussi peut s'écrire

$$[k]\{T\} = \{f\}$$

Où

$$k_{ij} = \int_V \left(k_x \frac{\partial [N]}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + k_y \frac{\partial [N]}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + k_z \frac{\partial [N]}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right) dx dy dz + \int_S h N_i N_j ds \quad i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,n$$

$$f_i = \int_V GN_i dV - \int_S q N_i dS + \int_S h T_\infty N_i dS \quad (4)$$

$$\{T\}^T = [T_1 \quad T_2 \quad \dots \quad T_n] \quad (5)$$

Sous forme matricielle

$$[k] = \int_V [B]^T [D][B] dV + \int_S h [N]^T [N] dS \quad (6)$$

$$\{f\} = \int_V G [N]^T dV - \int_S q [N]^T dS + \int_S h T_\infty [N]^T dS \quad (7)$$

Où B est la matrice gradient

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & K & \frac{\partial N_n}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & K & \frac{\partial N_n}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_j}{\partial z} & K & \frac{\partial N_n}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [D] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

4. Etude du four en modélisation simple

L'étude des flux et des gradients thermiques par la méthode des éléments finis. L'étude est fondée sur les tronçons critiques de la virole, dans la zone au milieu du four [7].

L'objectif de cette étude est l'analyse des flux et des gradients thermique mécanique de la virole du four dans le cas de fonctionnement à vide. Ce travail a été effectué pour l'aide à la décision relative la maintenance du four. Tous les calculs [8] sont réalisés par les logiciels de simulation numérique par la méthode des éléments finis Patran/Nastran et Patran/PASSFEM. La modélisation du four se fait en définissant :

Matériau	Conductivité thermique (w/m.k)	Chaleur spécifique (J/kg.k)	Densité (kg/m ³)
Acier E24	50.099998	510	7800

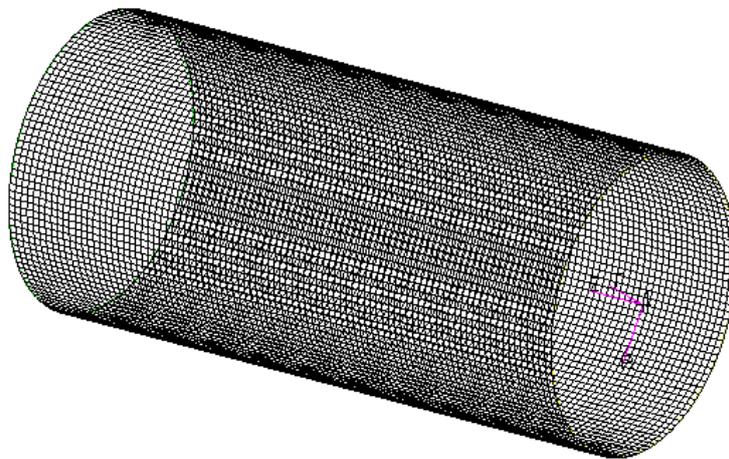


Fig.5 : Modèle éléments finis adopté pour la résolution du problème

5. Etude comparative des résultats numériques

Les courbes des flux thermiques, en fonction de la position de chaque point de la génératrice de la virole au milieu du four, sont représentées dans la figure 6.

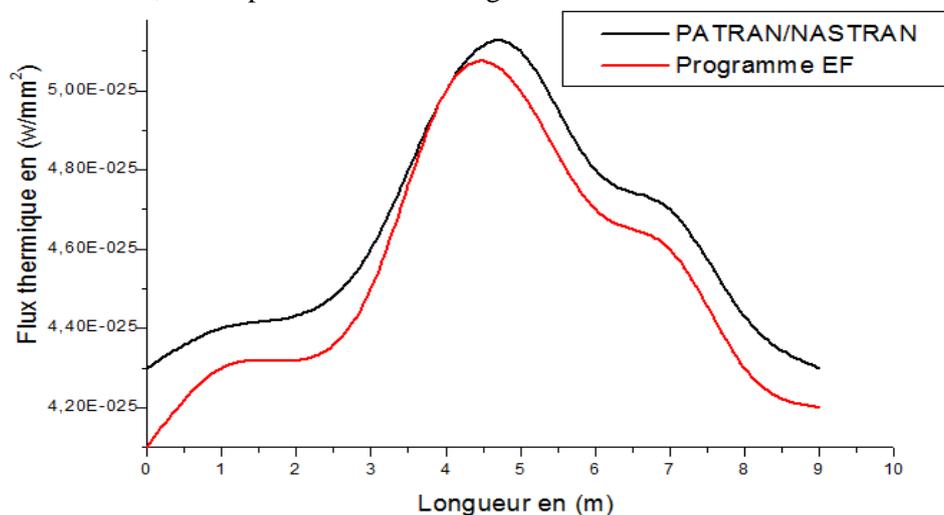


Fig.6 : Comparaison des résultats du flux thermique

Les gradients thermiques entre le point d'abscisse 20m et le point d'abscisse 36m, par les logiciels NASTRAN et PASSFEM sont représentées dans la figure 7. Les valeurs des gradients thermiques calculées au même point par les deux logiciels sont relativement très proches.

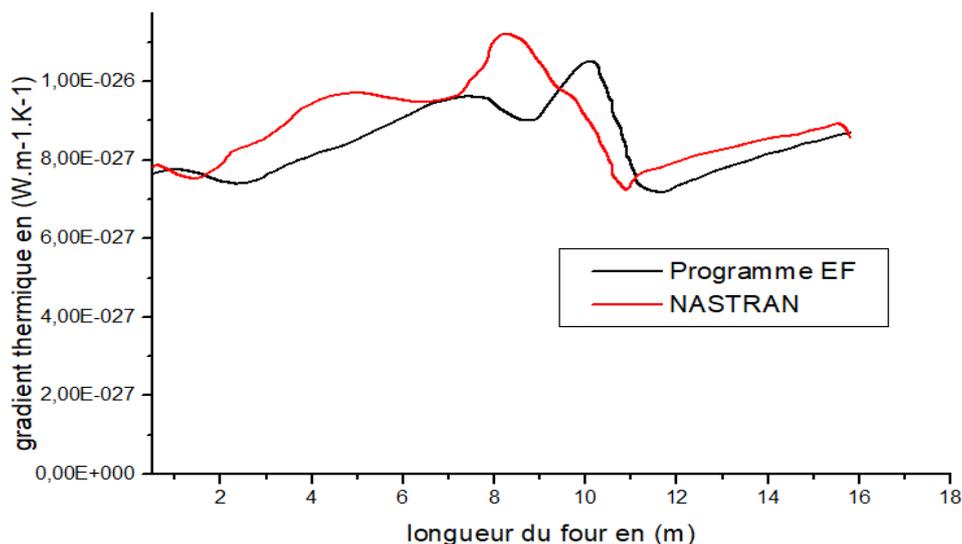


Fig.7 : Comparaison des résultats du gradient thermique

Les courbes des déplacements, en fonction de la position entre 26 et 34 de chaque point de la génératrice la virole, sont représentées dans la figure 8.

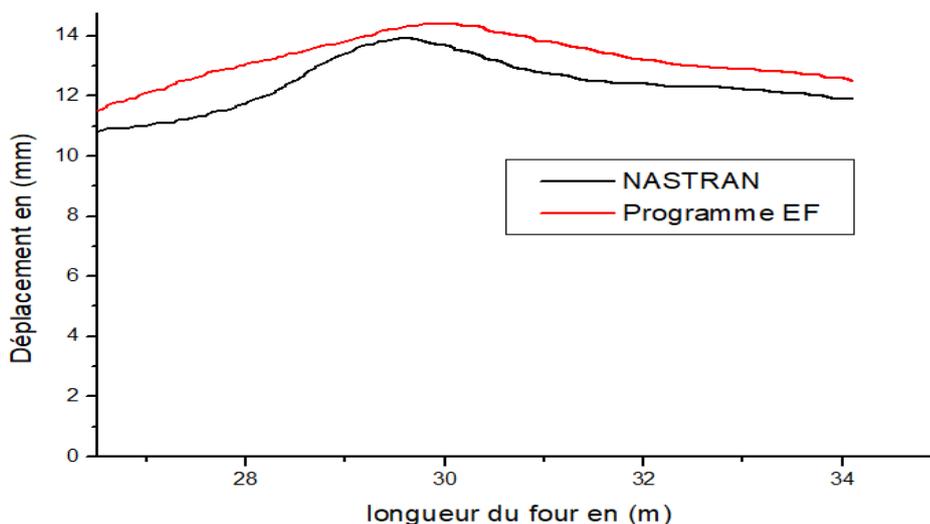


Fig.8 : Comparaison entre les mesures et le calcul thermomécanique

6. Modélisation de la géométrie du four rotatif et des charges appliquées.

Quand le four est en service, la charge d'exploitation dépend de la vitesse de rotation estimée à quatre tours par minute, l'angle d'inclinaison, le gradient de la température, la taille des grains de la matière, la viscosité et l'écoulement des grains de la matière de base pour la fabrication du clinker [9].

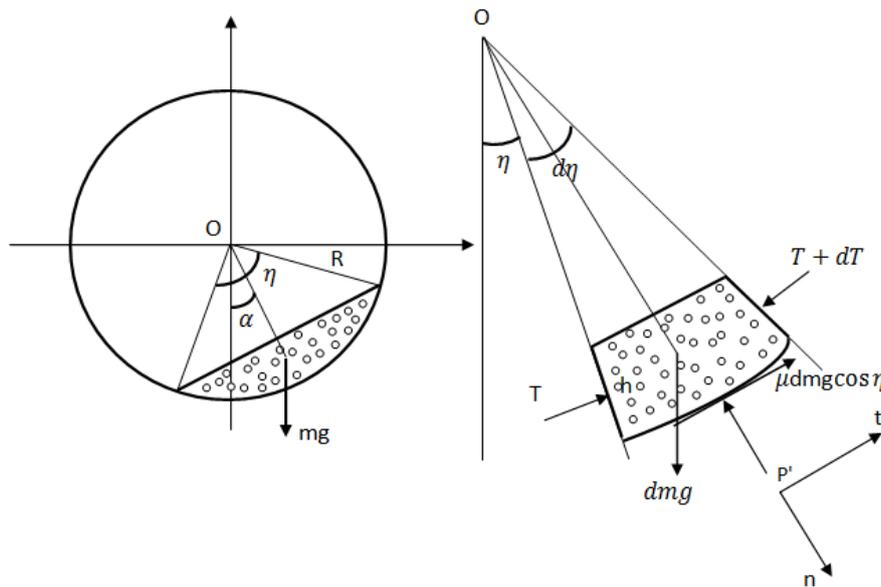


Fig.9 : Modélisation des charges dans le four

Les équations d'équilibre s'écrivent comme suit :

$$\sum F_n = 0 \quad T h d\eta - P' r d\eta - dm g \cos \eta = 0 \quad (9)$$

$$\sum F_t = 0 \quad T = \rho' r g \left(\mu \sin \eta + \cos \eta - \frac{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\cos a} \right) \quad (10)$$

$$dm = \rho' . h . \times r d\eta = \rho' h r d\eta \quad (11)$$

avec P' est la force de volume du matériau réfractaire du four par unité de longueur, h représente l'épaisseur des briques η l'angle par rapport à l'axe vertical, μ le coefficient de frottement, g la gravitation universelle et T la force latérale [10].

$$p' = h \rho' g \cos \eta \quad a - \frac{\theta}{2} \leq \eta \leq a + \frac{\theta}{2}$$

$$h = \left(1 - \frac{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\cos(a - \theta)} \right) r$$

La force des briques réfractaires :

$$p = r \rho' g \left(1 - \frac{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\cos(a - \eta)} \right) \left(\mu \sin \eta - \frac{\cos\frac{\theta}{2}}{\cos(a)} \right) \quad (12)$$

Lorsque l'on rajoute la masse des briques réfractaires, le poids total devient :

$$P_{total} = \left\{ \frac{1}{2} \pi \rho g (\pi - \eta) + \rho' g r \mu \sin(\eta) \left(1 - \frac{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\cos(a - \eta)} \right), a - \frac{\theta}{2} \leq \eta \leq a + \frac{\theta}{2} \right\} \quad (13)$$

$$+ \frac{1}{2} \pi \rho g (\pi - \eta)$$

• Conditions aux limites

Certaines hypothèses permettent de simplifier la modélisation du problème sans remettre en cause la fiabilité du modèle, à savoir :

- L'effet de la rotation du four est négligé car la vitesse de rotation est très petite;
 - La température varie le long du four mais, elle reste constante dans une section droite ;
 - La masse volumique du revêtement (briques et mortier) est considérée constante ;
 - Les briques réfractaires ont les mêmes dimensions ;
 - La déformation totale est la somme de la déformation due aux contraintes mécaniques et celle d'origine thermique ;
 - Le coefficient de dilatation thermique est constant:

• Matériau

Caractéristiques mécanique des briques

Module d'Young	Coefficient du Poisson	Limite élastique	Charge de rupture
105000MPa	0.35	90MPa	120N/mm ²

Caractéristiques thermiques des briques

Propriété thermique du matériau	Intérieur	extérieur	Unité
Coefficient de transfert thermique	120	90	W/m ² K

7. Modélisation de la géométrie du four et des charges appliquées

Soit la virole du four avec le diamètre moyen de 4200mm, la longueur de 64000mm et d'épaisseurs variables entre 35mm et 65mm. Le modèle géométrique est fixé par ses extrémités. Il est soumis à son poids propre, le poids du mur réfractaire et une charge d'exploitation inclinée figure 10.

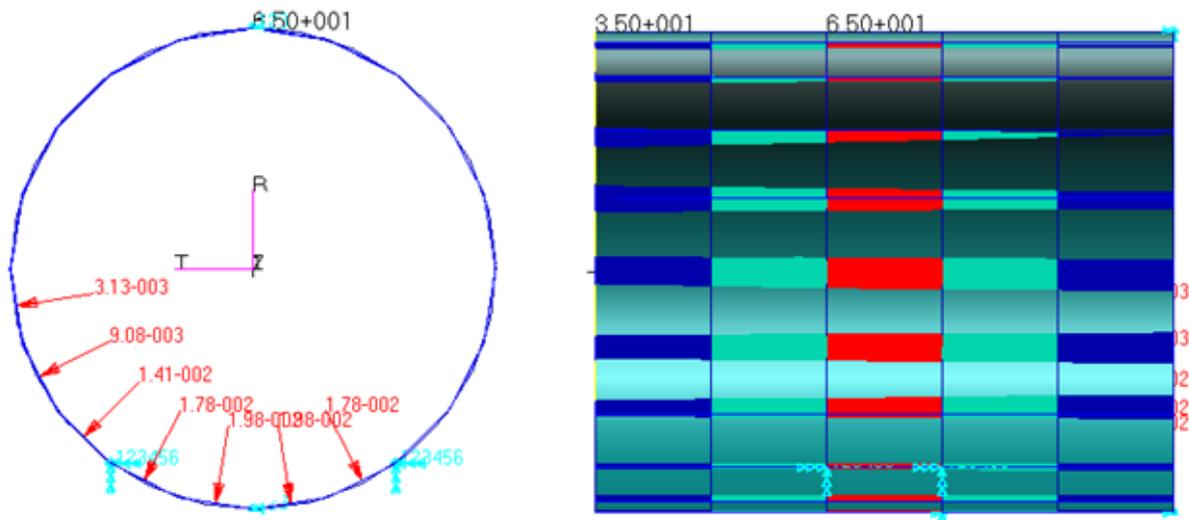


Fig.10 : Modèle géométrique du tronçon de la virole

7.1 Analyse des déplacements par les logiciels NASTRAN et PASSFEM

Les courbes des déplacements, en fonction de la position de chaque point de la génératrice du tronçon de la virole, sont représentées dans la figure 11.

L'erreur relative maximale de 5% et l'erreur relative minimale de 1.5% sont relativement réduites. Dans ce cas, le logiciel PASSFEM permet de donner des valeurs qui s'approchent de celles fournis par NSTRAN.

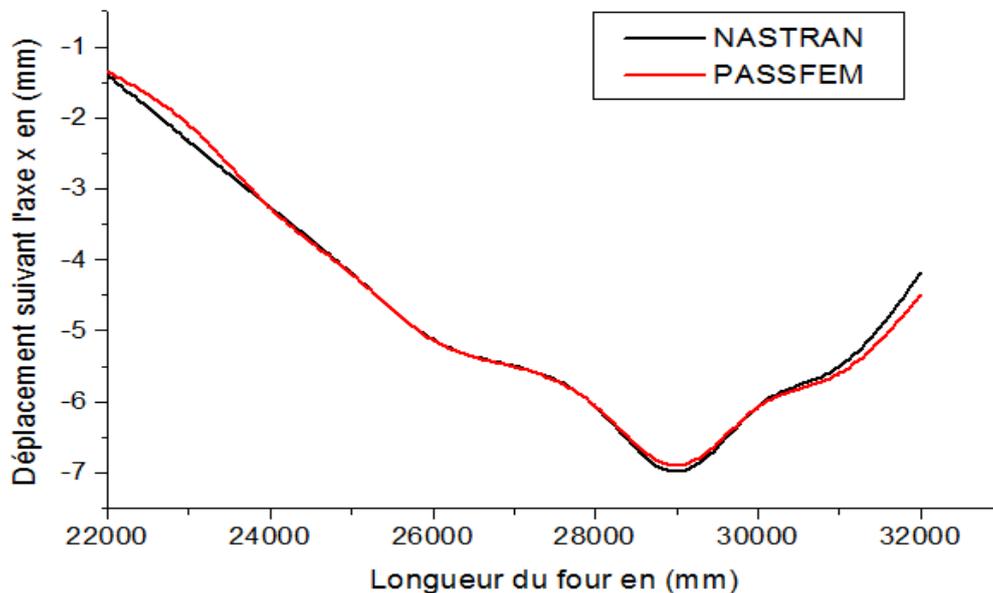


Fig.11 : Distribution des déplacements le long de la partie milieu du four rotatif

7.2 Analyse des contraintes à l'aide des logiciels NASTRAN et PASSFEM

Les contraintes principales maximales et minimales calculées respectivement, entre le point d'abscisse 22m et le point d'abscisse 36m, par les logiciels NASTRAN et PASSFEM sont représentées dans la figure 14 et 15. Les valeurs des contraintes calculées au même point par les deux logiciels sont relativement très proches [11].

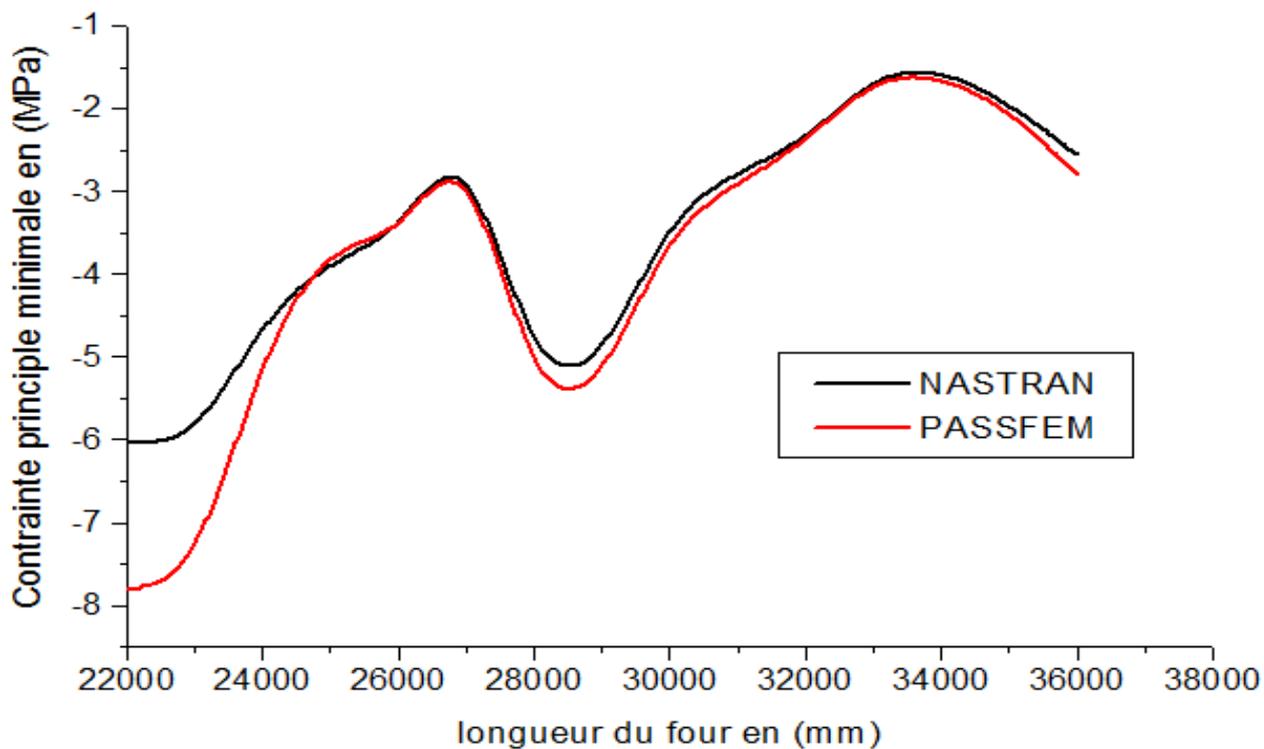


Fig.14 : Contraintes principales minimale

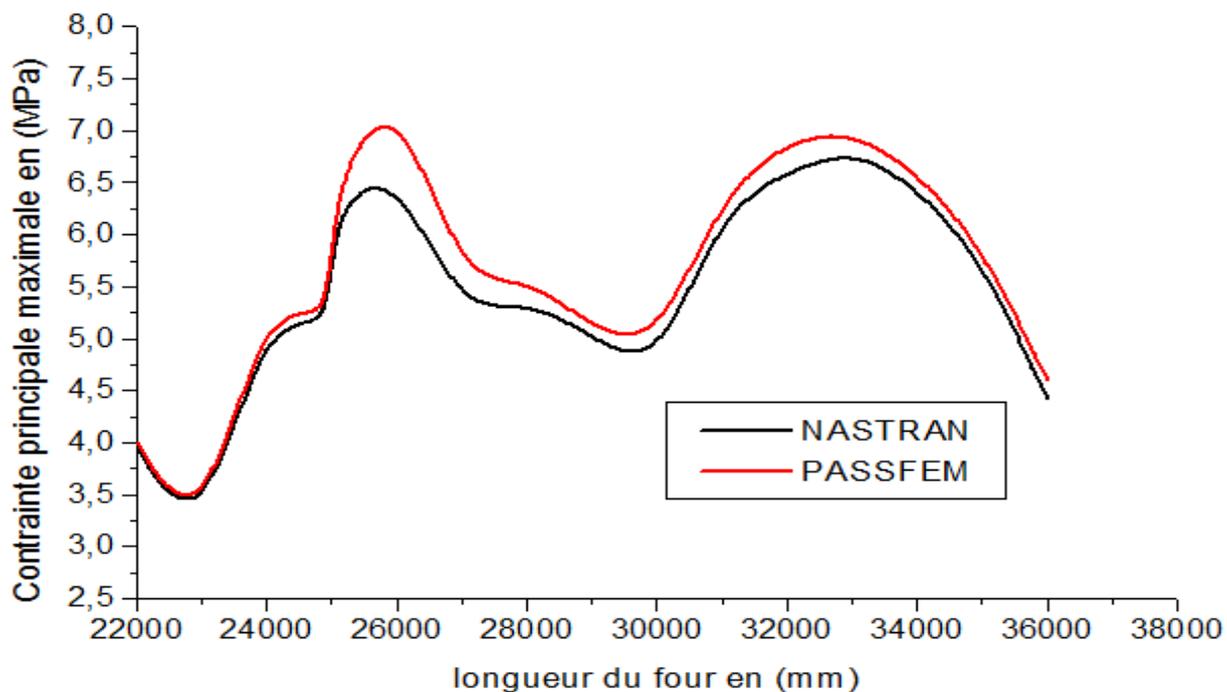


Fig.15 : Contraintes principales maximale

Partie milieu : C'est le tronçon qui se trouve entre 26 et 31 mètres mesurés à partir du joint en amont du four.

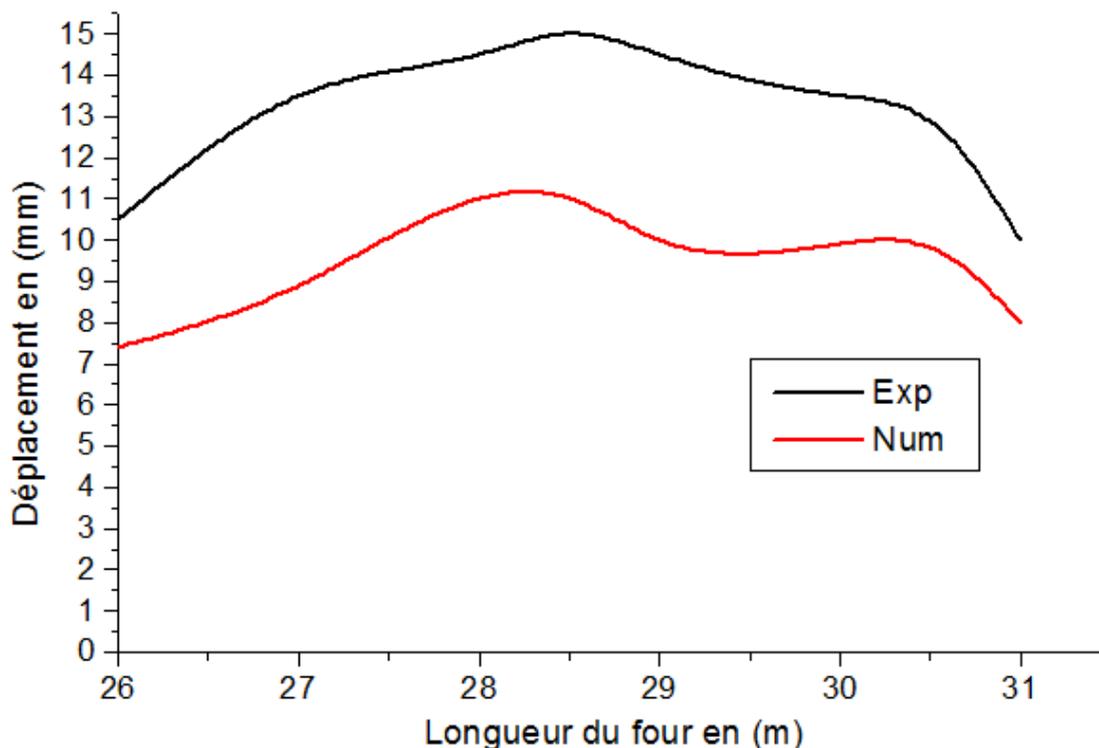


Fig.16: Variation longitudinale du déplacement maximal de la partie avale du four

8. Conclusion

C'est une étude comparative basée sur la modélisation numérique. Cette comparaison a été effectuée suivant plusieurs approches. La première approche basée sur la réalisation d'un programme de calcul des gradients et des flux thermiques dans la virole des fours rotatifs, comparée avec une étude d'un modèle numérique sous chargement thermique réalisé par les logiciels PATRAN/NASTRAN. En conclusion de cette étude, l'utilité de la simulation numérique peut paraître discutable, étant donné qu'elle conduit à des résultats comparables. Les résultats obtenus par ce programme sont comparés avec les résultats obtenus par le logiciel NASTRAN et montrent la validité du modèle. A travers ces études, on a pu trouver les gradients thermiques. Ceci, a beaucoup aidé au choix des briques réfractaires, des cales de réglage du jeu entre les bandages et les tronçons de la virole porteuse, et on localise les zones critiques de la virole. En perspective, les résultats obtenus permettront d'étudier en détail le mécanisme de chute des briques réfractaires, pour l'amélioration durée de vie de la virole du four.

9. References

- [1] K.I.Janati, L.Bousshine, Hot deformability of a rotary kiln for cements experimentation and numerical simulation, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2016.
- [2] Theodore Von Karman, And Hsue-ShenTsien, The Buckling of Thin Cylindrical Shells under Axial Compression, Journal Of The Aeronautical Sciences , Vol.(40), PP. 303-312, 2003.
- [3] K. I. JANATI, A. DIRHAR, S. RAKIZ, L. BOUSSHINE, Déformabilité à chaud d'un four rotatif pour cimenteries Expérimentation.
- [4] [1] D. N. Huntzinger and T. D. Eatmon, "A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies," J. Clean. Prod., vol. 17, no. 7, pp. 668–675, 2009.
- [5] [2] R. Jin, J. Zhan, G. Liu, Y. Zhao, and M. Zheng, "Chemosphere Profiles of polychlorinated biphenyls (PCBs) in cement kilns co-processing solid waste," Chemosphere, vol. 174, pp. 165–172, 2017.

-
- [6] [3] Ö. Genç and A. H. Benzer, “Horizontal roller mill application versus hybrid HPGR/ball milling in finish grinding of cement,” *Miner. Eng.*, vol. 22, no. 15, pp. 1344–1349, 2009.
- [7] [4] X. Liu, X. Xu, W. Wu, F. Herz, and E. Specht, “A simplified model to calculate the power draw for material movement in industrial rotary kilns,” *Powder Technol.*, vol. 301, pp. 1294–1298, 2016.
- [8] A. Boateng, *Rotary Kilns Transport Phenomena and Transport Processes*, Springer, vol. 53, no. 9. 2013.
- [9] A. Zeitschrift, P. Link, E. Dienst, and E. Eth, “La cuisson du ciment portland,” 2016.
- [10] D. Ramanenka, J. Stjernberg, and P. Jonsén, “FEM investigation of global mechanisms affecting brick lining stability in a rotary kiln in cold state,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 59, pp. 554–569, 2016.
- [11] P. S. Ghoshdastidar, G. Bhargava, and R. P. Chhabra, “Computer Simulation of Heat Transfer During Drying and Preheating of Wet Iron Ore in a Rotary Kiln,” *Dry. Technol.*, vol. 20, no. 1, p. 19, 2002.