

# Contribution à l'Etude du Comportement Thermo-Elastique de la virole des Fours Rotatifs des Cimenteries

Khalid I. Janati<sup>1</sup>, Lahbib Bousshine<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Equipe de la Mécanique des structures et des matériaux (EMSM), Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique (ENSEM) – Casablanca, Université Hassan II – Casablanca – Maroc.

**La réalisation de ce travail dans le cadre de durabilité de l'action de coopération entre L'ENSEM et L'STM depuis 2005.**

**Dirigé par le professeur Gery de Saxce**

## Résumé :

*Le système de la maintenance préventive des fours rotatifs des cimenteries est instauré dans l'objectif d'assurer un contrôle permanent de la déformabilité de leurs composants. En particulier, l'ovalisation de la virole, l'excentricité de l'axe du four, l'usure du bandage et le désalignement des galets. Permet la prévention du croulage, l'usure des galets, et les bandages puis la chute des briques réfractaires. Ce type de contrôle doit se réaliser périodiquement afin de garder la structure en bon état. Permet de prendre les décisions de maintenance nécessaires et de planifier les interventions. Par exemple, l'arrêt de production pour remplacer ou rectifier les tronçons endommagés de la virole, des galets ou des bandages. le présent travail consiste à rappeler l'histoire et la technologie des cimenteries, les principales méthodes expérimentales utilisées pour la mesures de l'ovalisation de la virole et du désaxement du four, la modélisation du comportement thermo-élastique au four, la formulation éléments finis et la simulation numérique de la déformabilité du four à froid et à chaud. Une étude comparative des résultats expérimentaux et ceux obtenues par la simulation numérique a été effectuée à l'aide des logiciels de CAO.*

## Les mots clés

Simulation Numérique, Essai Expérimental, Comportement Thermo-élastique, Ovalisation, Excentricité.

## Abstract

*The system for the preventive maintenance of rotary kilns in cement plants is established with the objective of ensuring permanent control of the deformability of their components. In particular, the ovalization of the ferrule, the eccentricity of the axis of the furnace, the wear of the bandage and the misalignment of the rollers. Allows the prevention of the crumbling, the wear of the rollers, and the bandages then the fall of the refractory bricks. This type of inspection must be carried out every five months in order to keep the structure in good condition. The exploitation of the results provided by measurements, provides guidance on the decision to be taken, for example, the production stop to replace or rectify the damaged sections of the shell, rollers or bandage. The present work consists of recalling the history and technology of cement plants, the main experimental methods used for the measurement of the ovalization of the shell and of the furnace offset. The present work consists of recalling the history and technology of cement plants, the main experimental methods used for the measurement of the ovalization of the shell and of the furnace offset, The modeling of the thermo-elastic behavior of the ferrule, the finite element formulation and the numerical simulation of the cold and hot furnace deformability using the finite element method. A comparative study of the experimental results and those obtained by the numerical simulation was carried out using the CAD software, this analysis was applied to the three identical critical zones of the rotary furnace of the cement plants. In general, the results are in very good agreement.*

## 1. Introduction :

L'étude statistique de défaillance de chaque système qui participe à la fabrication des ciments, sont données la virole du four rotatif des cimenteries le système plus critique. Le rôle de ce dernier, la cuisson des matériaux de base pour transformer le calcaire et l'argile en un produit de clinker. Le four est un cylindre qui est formé de deux matériaux différents. La virole et les briques réfractaires, élanés incliné en sont rotation permanente le déplacement du matériau. Un bruleur chauffe le matériau et les gaz chauds circulent dans le sens contraire du déplacement du matériau. La compétitivité dans le domaine de production des ciments impose l'élaboration des solutions préventives et curative de qualité croissante.

Le four est constitué d'une virole métallique de sections variables et d'un revêtement des briques réfractaires. Chaque tronçon a une épaisseur spécifique et les matériaux sont choisis pour résister aux contraintes dues aux charges mécaniques et thermiques appliquées. La température de service à l'intérieur du four dépasse  $1500^{\circ}\text{C}$  et croît au fur à mesure qu'on s'éloigne de l'entrée. Elle est mesurée en permanence à l'extérieur du four au moyennant un appareil de mesure approprié. Grâce au revêtement réfractaire, la température de référence maximale de la virole métallique est de  $350^{\circ}\text{C}$ .

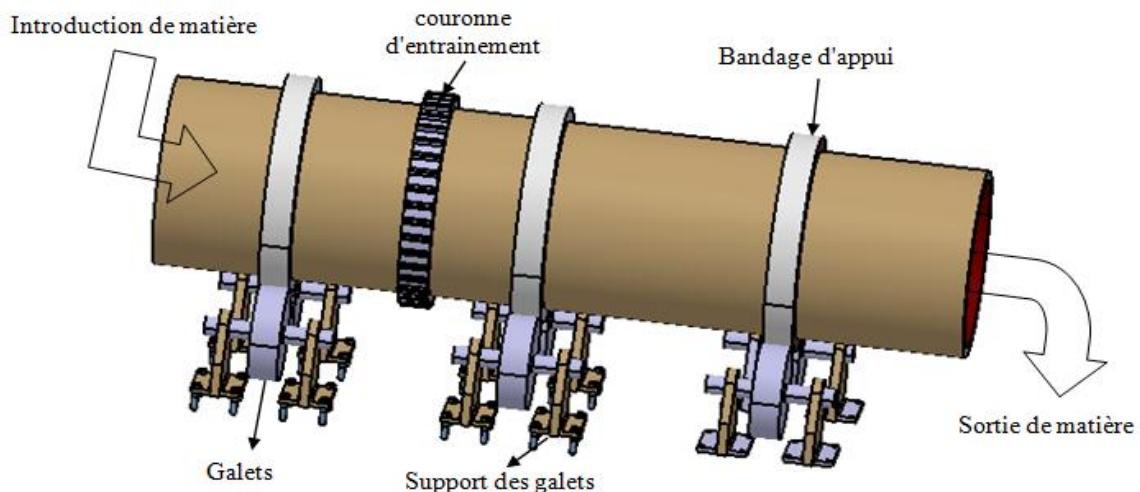


Fig. 1-1 : Le four rotatif des cimenteries



Fig.1- 1 : Tronçon virole

## 1.1 Excentrique ovalisation

Excentrique ovalisation est la combinaison des deux états géométriques ovalisés de la virole. De point de vue expérimental, il est difficile de dissocier ces deux phénomènes sans faire des traitements numériques. De point de vue mécanique. On note que leurs effets mécaniques sont tout à fait différents.

La tombée des briques réfractaire est due principalement aux phénomènes d'ovalisation de la virole et à la création des points chauds comme le montre la figure 1.2.



Fig. 1-3 : (a), Virole ovalisée – (b), Apparition du point chaud

## 1.2 Impact de l'excentrique et l'ovalisation

L'excentricité est due à la flexion causée par les charges mécaniques et la portée du four entre appuis, à l'allongement et au phénomène du cintrage thermique.

Le cintrage thermique peut être défini comme étant la différence d'allongement dans un tronçon de la virole. La cause de ce phénomène est la présence du croûtage (Fig. 1-3) en différentes proportions sur le briquetage.

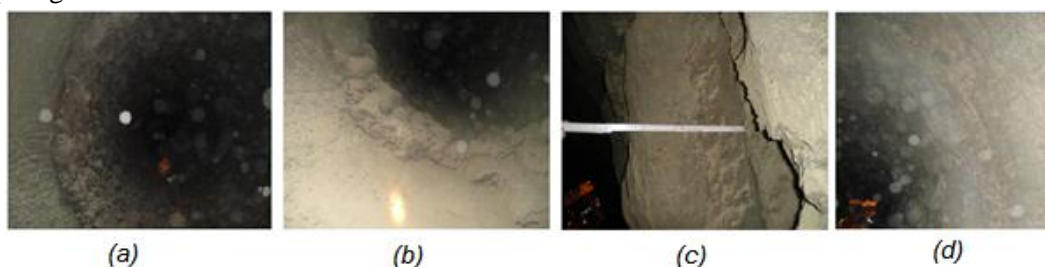


Fig. 1-4 : Impact du croûtage sur la déformation de la virole, (a) Début de croutage, (b) Petit croutage, (c) Epaisseur du croutage, (d) Fin du croutage

## 1.3 Vilebrequin mécanique du four

Ce phénomène est dû principalement à l'excentricité et à l'ovalisation provoquées par la chute des briques réfractaires et du croûtage. Il peut provoquer une surcharge sur les galets.

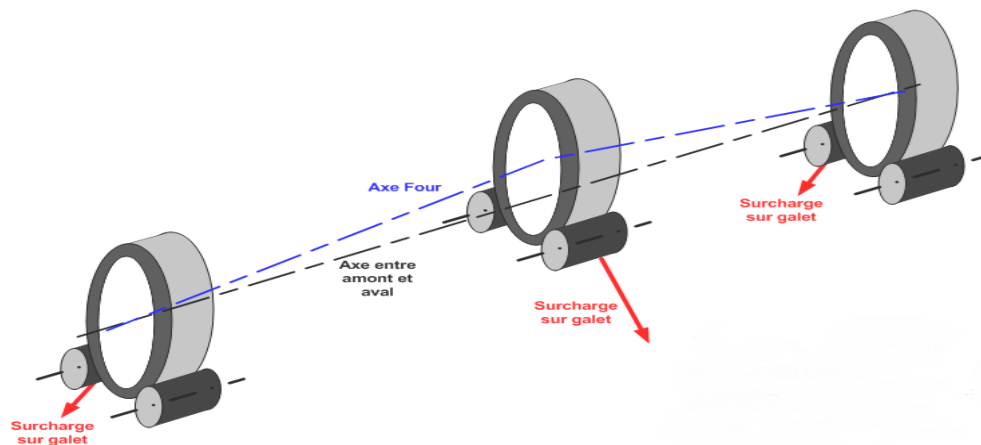


Fig. 1-5 : Variation de l'axe de rotation

## 1.5 Mesure de l'ovalisation

La mesure de la déformation de la virole du four se fait par un appareil spécial comportant un système de mesure pour relever les différents points de la virole, un PC portable pour l'acquisition des données et un trépied qui sert de support (fig.2). Pour prendre les mesures, il est primordial de se situer à tout instant vis-à-vis du four, on doit alors définir un repère global. Le rôle de ce repère est de donner la position de la station de mesure par rapport au centre des noies ring du joint amont, utilisé comme étant le centre de la virole.



Fig.1-6 : Outil de mesure de la déformation de galets, de bondages et de la couronne

- Système de mesure de distance à principe optique basé sur le rayon LASER « dito pro » à connexion RS232 ;
- Pyromètre optique « OS522 » (Oméga), à connexion analogique ;
- Carte d'acquisition « DAQCard-516 » ;
- Synchronisation des acquisitions avec le four ;
- Micro-ordinateur portable ;
- Imprimante (stylus 870) ;
- Logiciel d'acquisition et monitoring temps réel ;
- Logiciel de définition de four (viroles, briques, croutage, ...) ;
- Logiciel de reconnaissance d'excentricités et d'ovalisations plastiques ;
- Logiciel de visualisation 3D four ;

## 1.6 La méthode de mesure de l'excentricité et de l'ovalisation



la virole déformée et la virole parfaite ont été pour déduire l'ovalisation du four. Aussi, le centre réel et le centre théorique de la section ont été repérés. Ces résultats seront exploités par la suite pour déterminer l'axe réel du four [1]:

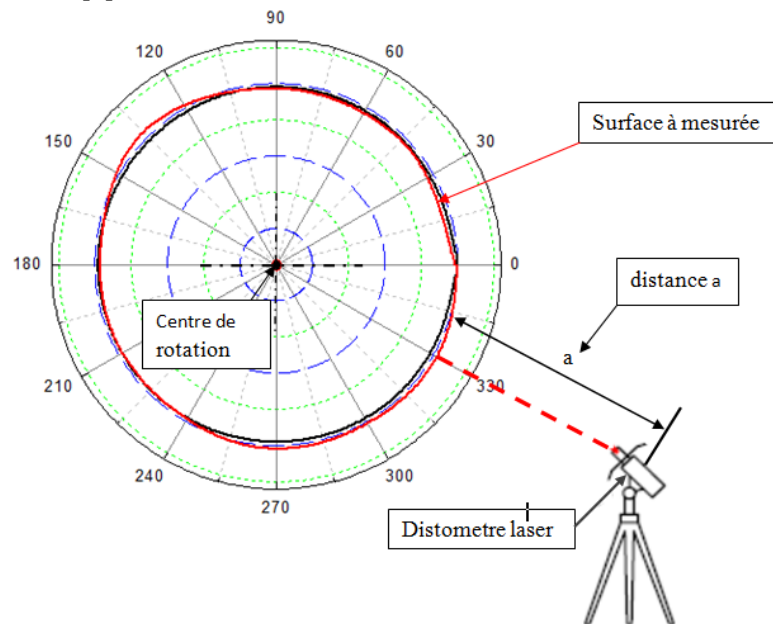
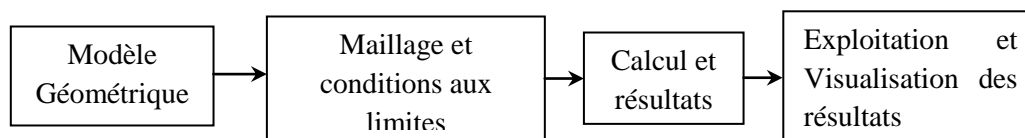


Fig. 1-7 : Station de mesure

## 2. Modélisation numérique par la MEF

L'objectif de cette étude est l'analyse du comportement thermo-élastique de la virole du four en régime quasi-statique [3]. Ce travail a été mis en place dans l'objectif de contribuer à la prise de décision liée à la maintenance du four. Toutes les simulations numériques sont réalisées à l'aide des logiciels de la simulation numérique par éléments finis ; PATRAN/NASTRAN et PATRAN/SAMCEF. Pour modéliser le four rotatif, le processus suivant a été adopté [4]:



## 3. Caractéristiques géométriques et mécaniques

La géométrie du four est représentée par la figure suivante.

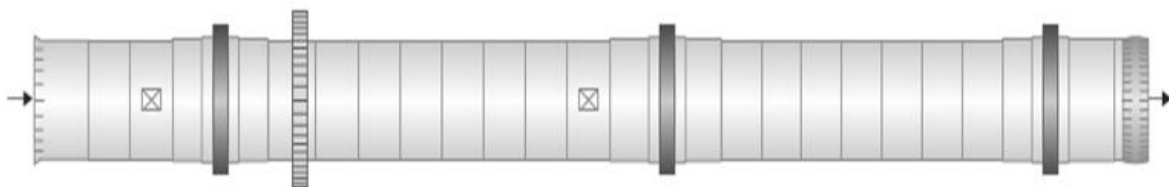


Fig.1.8 : Schéma simplifié du four

### 3.1 Matériaux de la virole

La virole du four constitué d'un métal ordinaire E24 [3], assemblées entre elles par un cordon de soudure formé d'un deuxième matériau métallique. Pour simplifier les calculs on va supposer que le matériau est partout le métal E24 dont les caractéristiques sont données par le tableau suivant :

Tab.1 : Caractéristiques mécanique de l'acier E24

Propriétés du matériau	Module d'Young	Coefficient du Poisson	Limite élastique	Charge de rupture
Valeurs	210000MPa	0.3	235 MPa	400 N/mm <sup>2</sup>

### 3.2 Matériaux des briques réfractaires

Les briques réfractaires [4] du four sont fabriquées par un matériau dont les caractéristiques sont données par le tableau suivant :

**Tab.2 :** Caractéristiques mécanique des briques

Propriétés du matériau	Module d'Young	Coefficient du Poisson	Limite élastique	Charge de rupture
Valeurs	105000MPa	0.35	90MPa	120 N/mm <sup>2</sup>

La figure 1.5 illustre le modèle éléments finis et les conditions aux limites adoptées pour la résolution du problème. Les iso-déplacements sont visualisées dans la figure 1.6.

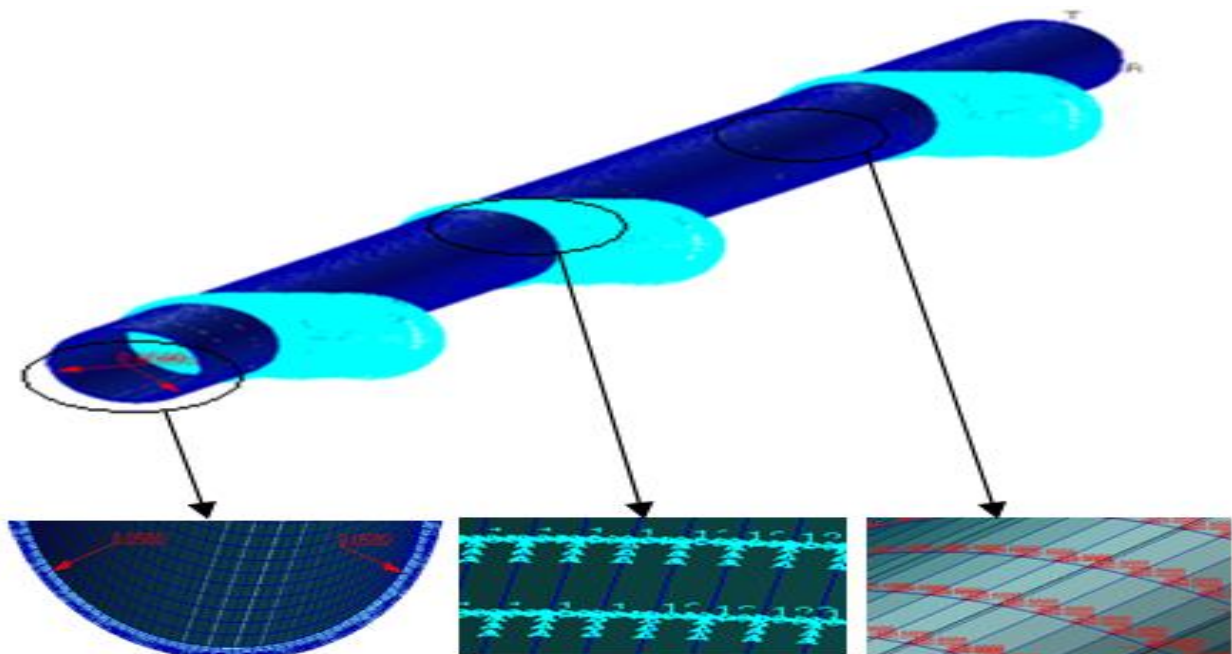


Fig. 1-9 : Le four avec les conditions aux limites, maillage et les charges

### 4. Modélisation des charges dans le four

La masse du four rotatif des cimenteries dépasse les 1000 t, majorée par les matériaux à cuire dont la charge se déplace avec le mouvement de la structure [5]. La nature de ce denier, c'est un matériau granulaire et humide préparé par des cyclons de précalcinateur avant d'entrer le Four rotatif. La position de la charge dans le four dépend de plusieurs paramètres, à savoir :

- La vitesse de rotation du four ;
- L'angle d'inclinaison du four ;
- La température ;
- La viscosité du matériau base de la fabrication de ciment ;
- La taille des grains du matériau base de la fabrication de ciment.

Les charges en mouvement dans le four sont modélisées selon la figure 1.7:

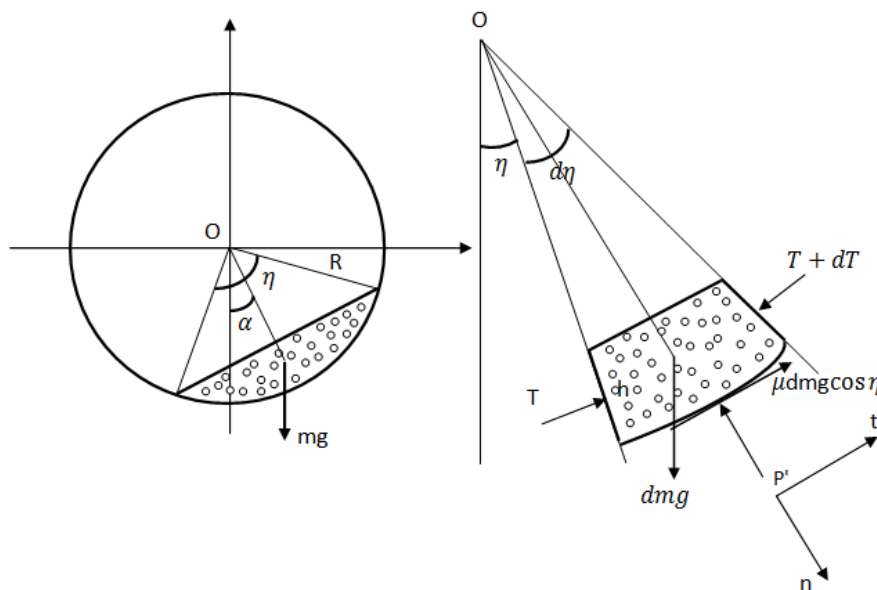


Fig. 1-10 : Modélisation des charges du four

L'équilibre statique du système s'écrit :

$$\sum F_n = 0 \quad T h d\eta - P' r d\eta - dm g \cos \eta = 0 \quad (1.11)$$

$$\sum F_t = 0 \quad T h d\eta - P' r d\eta - dm g \cos \eta = 0 \quad (1.12)$$

$$\sum F_{t=0} T = \rho' r g \left( \mu \sin \eta + \cos \eta - \frac{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\cos a} \right) \quad (1.13)$$

$$dm = \rho' \cdot h \cdot 1 * r d\eta = \rho' h r d\eta \quad (1.14)$$

Avec  $P'$  représente la charge du matériau réfractaire du four rotatif par unité de longueur,  $h$  représente l'épaisseur des briques et  $\eta$  c'est l'angle par rapport à l'axe vertical.

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

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

La charge des briques réfractaires :

$$P = r \rho' g \left( 1 - \frac{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\cos(a - \eta)} \right) \left( \mu \sin \eta - \frac{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\cos(a)} \right) \quad (1.15)$$

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

$$P_{Total} = \begin{cases} \frac{1}{2} \pi t \rho g (\pi - \eta) + \rho' g r (\mu \sin(\eta) \left( 1 - \frac{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\cos(a - \theta)} \right)), & a - \frac{\theta}{2} \leq \eta \leq a + \frac{\theta}{2} \\ \frac{1}{2} \pi t \rho g (\pi - \eta) & \end{cases} \quad (1.16)$$

#### 4.1 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Les sections droites de la virole du four rotatif qui ont subi des mesures expérimentales fournissant une série de valeurs de déplacements [6]. Afin de valider la déformabilité de modèle des éléments finis, ces valeurs vont être comparées aux résultats de déplacements, de la même section droite, issus de la simulation numérique effectuée à l'aide des logiciels PATRAN et NASTRAN.

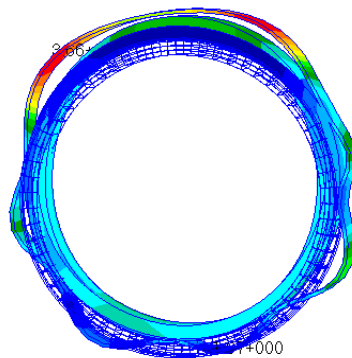


Fig. 1-11 : L'ovalisation en amont

La figure 11 - 4 illustre la forme de la section choisie du four après ovalisation visualisée dans le logiciel PATRAN.

La comparaison des excentricités numérique et expérimentale est présentée dans le tableau 2 qui montre que l'écart relatif est de l'ordre de 8%. On peut dire alors que le résultat numérique coïncide avec celui issu de l'expérience avec une erreur absolue de 0,65 mm.

Tab.3 : Valeurs de l'excentricité

Abscisse 0 (Amont)	Excentricité en [mm]
Numérique	8,65
Expérimental	8

#### 4.2 Simulation numérique et étude expérimentale de la déformabilité de la virole.

Le graphe représenté sur la figure 1-12 montre la différence entre le déplacement maximale en fonction de la longueur du four obtenu par les deux types de maillage adoptés.

Dans cette partie, on compare la variation du déplacement radial maximal issue de la simulation numérique avec celle issue de l'expérience en fonction des angles de section. Les différents résultats obtenus sont présentés dans la figure 1-13. On remarque qu'il y'a une cohérence entre les deux courbes expérimentale et numérique . avec une différence, dans certaines zones, due au phénomène de la fatigue de la virole du four, le croutage, des fissures sur les briques réfractaire ou des points chauds à cause des chutes des briques [7].



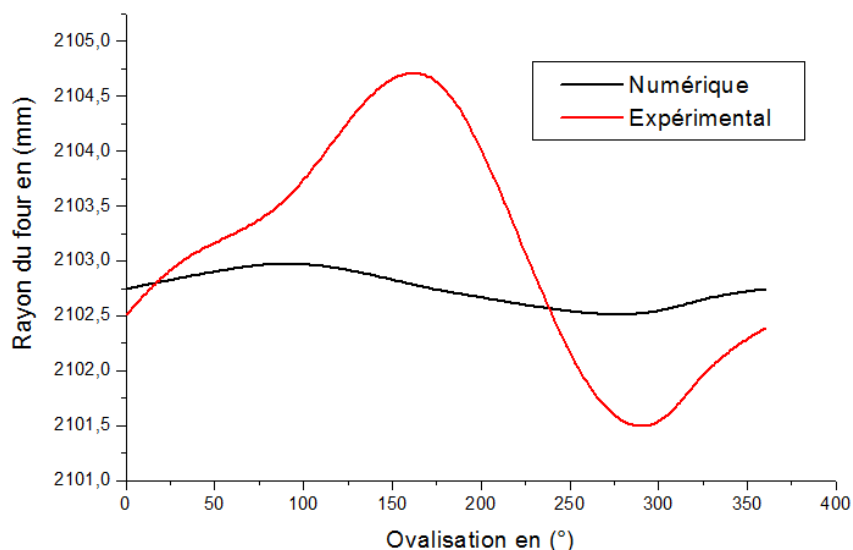


Fig. 1-12 : Déplacement en fonction de tour du four

La variation du déplacement radial maximal donnée par la simulation numérique et celle issue de l'expérience en fonction des angles des sections, sont représentés dans la figure 1.13. On remarque qu'il y'a une cohérence entre les courbes expérimentale et numérique. La relative ponctuelle est due au phénomène de la fatigue de la virole du four [8]

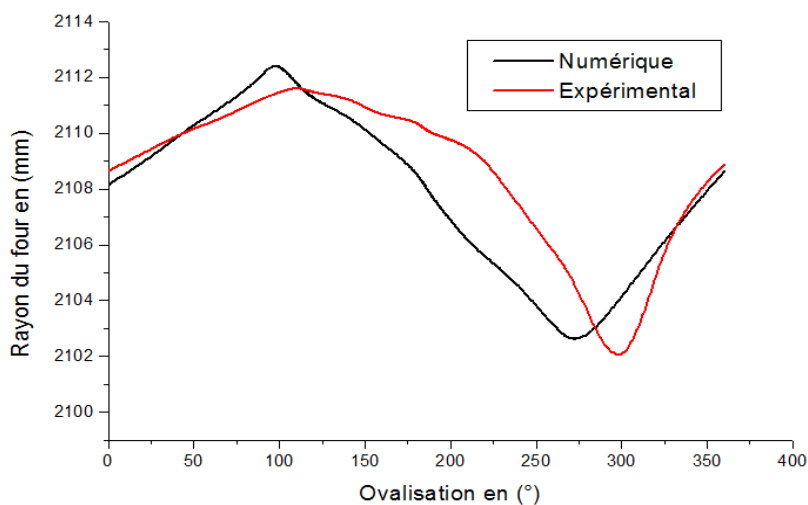


Fig. 1-13 : Déplacement en fonction de tour du four

### 4.3 Déformabilité de la partie amont de la virole.

Les déplacements dans une section à l'entrée du four, pour les deux types de maillage adoptés, sont montrés dans la figure 1-14. On remarque une différence entre les deux courbes à l'angle 90° mesuré par rapport à l'axe horizontal. C'est l'angle de la concentration des charges à transporter.

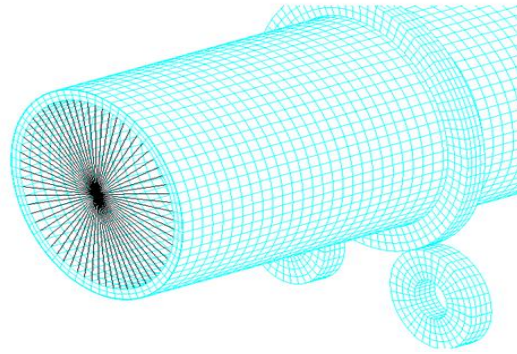


Fig. 1 –14 : Maillage du four n° 2 selon le 1<sup>er</sup> cas

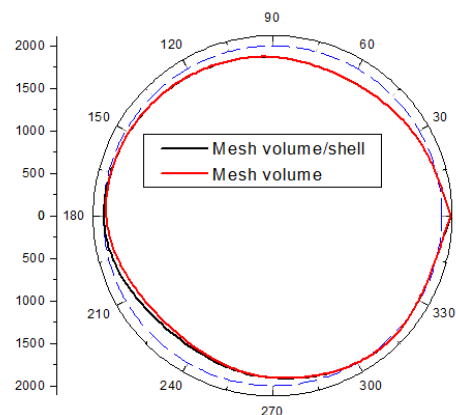


Fig. 1- 15 : Illustration de l'ovalisation de la partie amont du four

#### 4.4 Déformabilité du bandage

Dans l'une des sections droites situées au voisinage du premier bandage au niveau de la sorite du four, on visualise les déplacements radiaux pour qu'il y a un cas. les deux types de maillage, volume-volume et volume-coque voire la Figure 1-16. On remarque désaccord entre les deux réponses en déplacement au niveau de l'angle 90° par rapport à l'axe horizontal. Il peut être expliqué par la coïncidence avec la position angulaire de la concentration des charges appliquées.

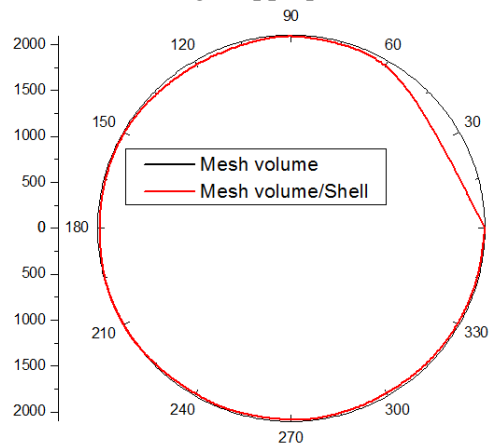


Fig. 1 - 16 : Ovalisation de la partie milieu du four

#### 4.5 Cas de la partie centrale de la virole

La figure 1-17 montre les résultats en termes des déplacements radiaux dans la partie en aval du four. Et ce, pour les deux cas de maillage volume-volume et volume coque.

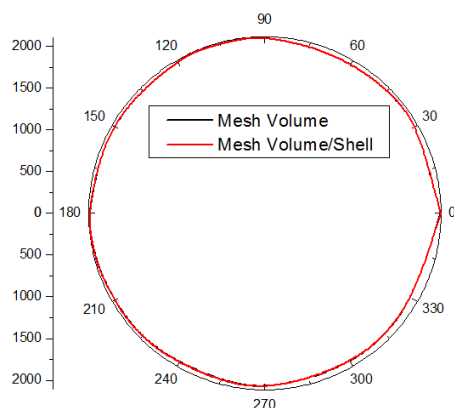


Fig. 1 - 17 : Ovalisation de la partie en aval du four

Le graphe montre dans la figure 1-18 la différence entre le déplacement maximal en fonction de la longueur du four obtenu par les deux types de maillage adoptés.

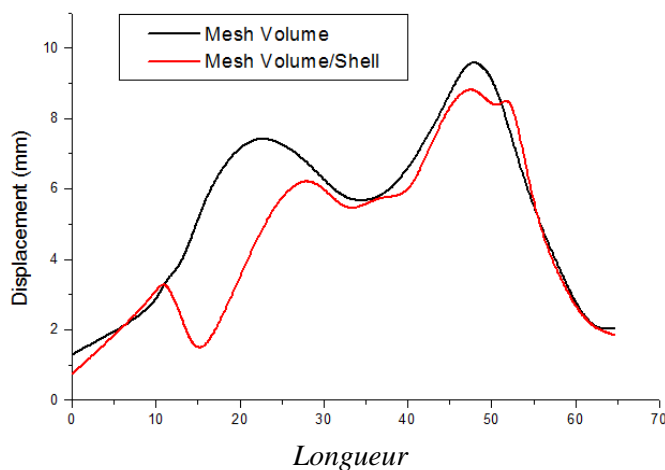


Fig. 1-18 : Déplacement en fonction de tour du four

#### 4.6 Représentation de la déformabilité du four à chaud.

La comparaison a été faite entre deux approches différentes. Pour le premier cas basé sur une campagne des mesures expérimentales pendant que le four est en service. le deuxième cas est basé sur la simulation numérique avec les mêmes conditions aux limites. La figure 1-19 présente l'évolution des déplacements numériques et expérimentaux en fonction de la longueur du four [9].

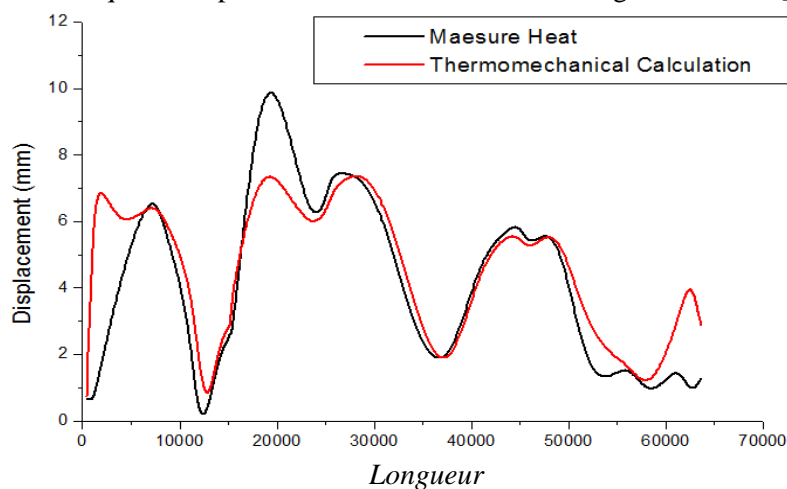


fig.1-19 : Comparaison entre des mesures à chaud et le calcul thermomécanique

## 4.7 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux.

La figure 1-20 montre la variation des déplacements en fonction de la longueur du four. Ils sont obtenus par deux approches numériques et expérimentaux. On constate que les courbes suivant des allures similaires avec des différences minimales.

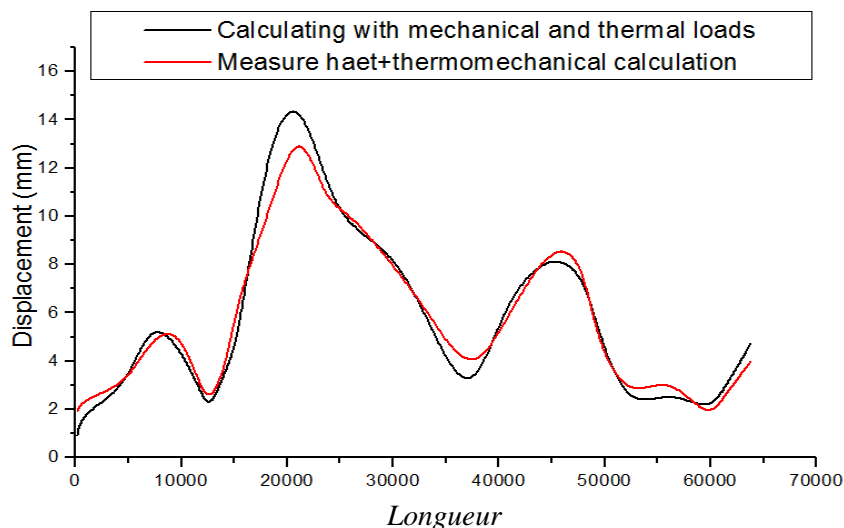


fig. 1-20 : Comparaison entre des mesures à froid plus le calcul thermomécanique et le calcul avec des charges thermique et mécanique

## 4.8 Comparaison des résultats numériques.

La figure 1-21 montre la variation des déplacements en fonction de la longueur du four [10]. Ils sont obtenus par deux approches numériques avec des modèles de calcul différents voir la figure 1-18. pour des approches numériques. L'étude à été faite sur trois modèles de conditions charges mécaniques et thermiques différentes avec des résultats très concordants.

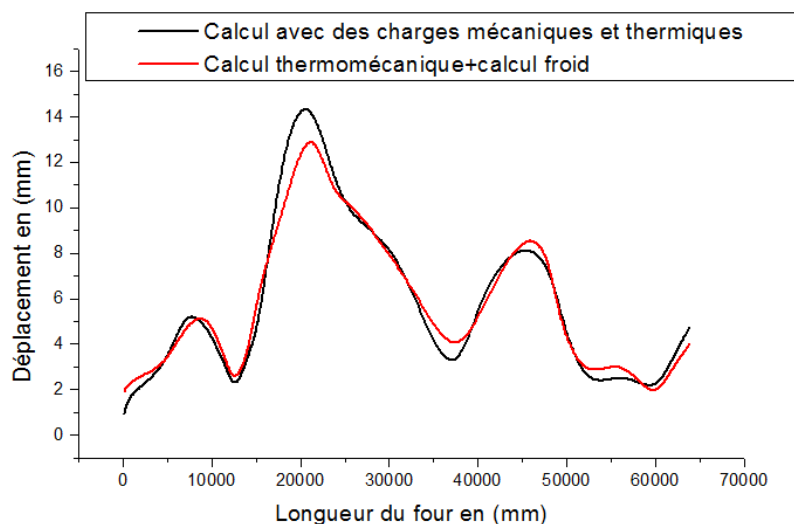


fig. 1-21 : Comparaison entre les calculs à froid et à chaud

## 5. Conclusion

La maintenance préventive des fours rotatifs des cimenteries ne peut se faire sans le contrôle permanent de la déformation de leur structure. En particulier, la mesure de l'ovalisation et l'excentricité de la virole métallique permet la prévention de la chute des briques réfractaires qui constituent le revêtement interne permettant un rendement thermique et une protection contre les températures élevées.

L'étude expérimentale a permis de mesurer l'ovalisation et l'excentricité des FRC. C'est une étude comparative basée sur la modélisation numérique. Cette comparaison a été effectuée suivant plusieurs approches. La première approche basée sur une campagne des mesures expérimentales prélevée pendant le fonctionnement du four, comparée avec une étude d'un modèle numérique sous chargement mécanique et thermique. En conclusion de cette étude, l'utilité de la simulation numérique peut paraître discutable, étant donné qu'elle conduit à des résultats comparables aux l'expérimentaux. Un modèle éléments finis est proposé, les résultats obtenus sont comparés aux mesures expérimentales et montrent la validité du modèle. A travers ces études, on a pu trouver les déplacements résiduels recherchés. Ceci, a beaucoup aidé au choix 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.

## 6. Références:

- [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-Shen Tsien, 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 et simulation numérique, 22ème Congrès Français de Mécanique, 2015 ;
- [4] Janati I. Khalid, Bideq Mustapha, Bousshine Lahbib, Etude Thermoelastique D'un Four Rotatif De Cimenterie : Experimentation Et Modelisation Par Elements Finis, 2016.
- [5] Azad Rahman, M.G. Rasul, M.M.K. Khan and S. Sharma, Cement Kiln Process Modeling to Achieve Energy Efficiency by Utilizing Agricultural Biomass as Alternative Fuels, Thermofluid Modeling for Energy Efficiency Applications, Elsevier, Vol.(9), 2016 .
- [6] K.I.Janati, L.Bousshine, Finite element method: Applied for thin plates and shells as described in PASSFEM program. 2ème Conférence Internationale sur la Mécanique des Matériaux et des Structures MSM2016- Marrakech 2016.
- [7] M. Bideq, K. I. Janati, L. Bousshine, Study of the ovalization of rotary cement kiln by finite elements.
- [8] M. Bideq, K. I. Janati, L. Bousshine, Study of the elastic deformation of rotary cement kiln using finite element analysis. 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING, PP. 91-96, 2016.
- [9] D. Ramanenka, Numerical Evaluation of Brick Lining Status in Rotary Kilns, 2015.
- [10] K. I. Janati, M. Bideq, L. Bousshine, La méthode des paramètres initiaux : appliqué pour les fours rotatifs des cimenteries, 2017.