

# Etude Semi-analytique et Numérique du Comportement Thermoélastique 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.

## Résumé :

*Dans le cadre des travaux de recherche industriels, pour la maintenance préventive des fours rotatifs des cimenteries. En particulier, l'étude de l'ovalisation et de l'excentricité par la méthode semi-analytique. L'étude est fondée sur les tronçons critiques de la virole.*

*Les déplacements verticaux, horizontaux et l'ovalisation obtenus par le modèle semi-analytique. La modélisation du comportement thermo-élastique de la virole, la formulation en éléments finis et la simulation numérique de la déformabilité des tronçons de la virole à froid et à chaud par la méthodes des éléments finis.*

*Une étude comparative des résultats semi-analytiques et ceux obtenus par la modélisation numérique a été effectuée à l'aide des logiciels de CAO, cette analyse a été appliqué sur les tronçons critiques, du four rotatif des cimenteries. En général, les résultats sont compatibles.*

## les mots clés

Four rotatif des cimenteries, Simulation Numérique, méthode Semi-Analytique, Comportement Thermo-élastique, Ovalisation, Excentricité.

## Abstract

*In the context of industrial research, For preventive maintenance of rotary kiln of cement , The study of ovalization and eccentricity by a semi-analytical method. The study is based on critical sections of the ferrule,*

*The vertical, horizontal and ovalization movements obtained by the semi-analytical model. The modeling of the thermo-elastic behavior of the ferrule, the finite element formulation and the numerical simulation of the deformability of the cold and hot sections of the ferrule using the finite element method.*

*A comparative study of the semi-analytical results and those obtained by the numerical simulation was carried out using a CAD software, this analysis was applied on critical sections of the rotary kiln of cement plants. In general, the results are consistent.*

## 1. Introduction :

Les fours rotatifs des cimenteries permettent la cuisson des matériaux de base pour l'obtention de clinker. Le four est un long cylindre incliné en rotation permanente permettant le déplacement du matériau. Un bruleur chauffe le matériau, et les gaz chauds circulent dans le sens contraire 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 [1,2]. 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'extérieure de la virole au moyen d'un appareil de mesure approprié. Grace au revêtement réfractaire, la valeur de référence de la température maximale de la virole métallique est au voisinage de 350 °C.

Le présent travail a pour objectif l'étude de la tenue mécanique et de la déformabilité des tronçon de la virole à chaud et à froid d'un four rotatif de cimenterie. Cette étude entre dans le cadre des travaux de la maintenance préventive de ces fours géants qui constituent l'élément clé dans le procédé de production du ciment.



Fig. 1-1 : Le four rotatif des cimenteries

## 2. Faux rond excentrique ovalisé

Un faux rond excentrique ovalisé est la combinaison des deux phénomènes précédents le faux rond excentrique et celui ovalisé. De point de vue expérimental, il est difficile de dissocier ces deux phénomènes sans passer par un traitement numérique. De point de vue mécanique, on note que leurs conséquences sont tout à fait différentes.

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.

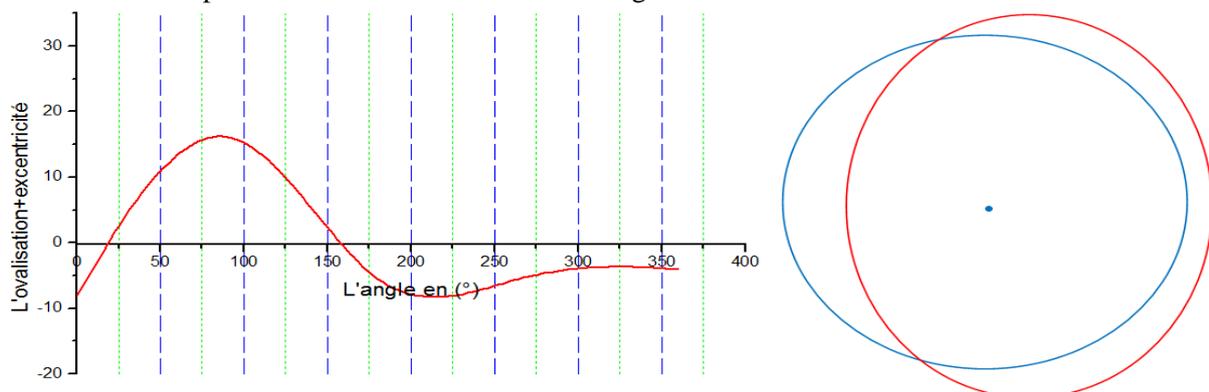


Fig. 1-2 : A gauche, Virole ovalisée – à droite, Apparition du point chaud

## 3. Impact de l'excentrique ovalisé

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

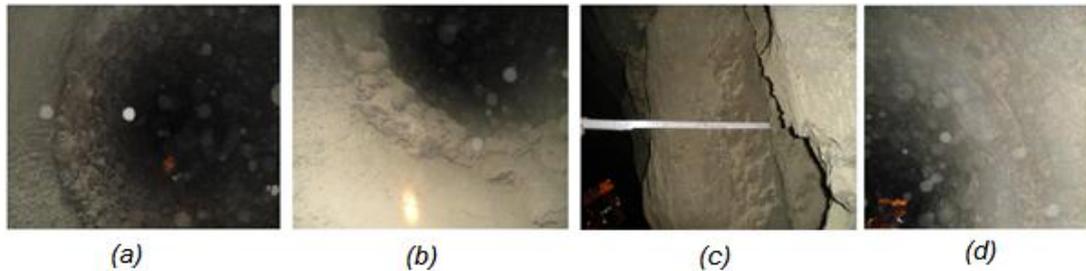


Fig. 1-3 : Impact du croûtage sur la déformation de la virole, (a) Début de croûtage, (b) Petit croûtage, (c) Epaisseur du croûtage, (d) Fin du croûtage

#### 4. 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. Ce phénomène provoque une surcharge sur les galets.

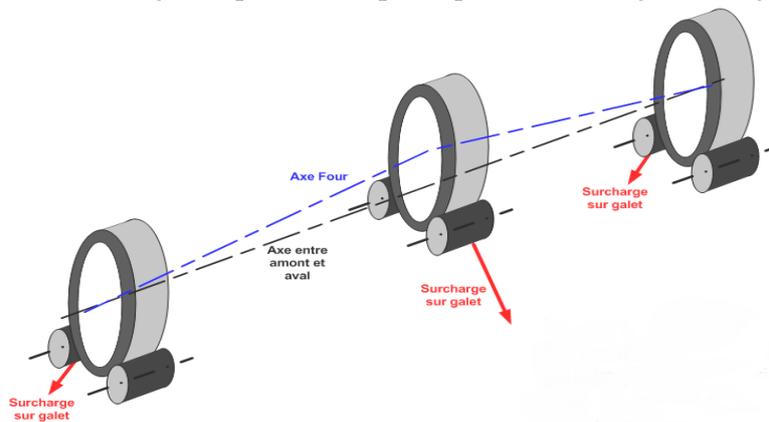


Fig. 1-4 : Variation de l'axe de rotation

#### 5. Etude du four en modélisation simple

##### 5.1 Calcul des contraintes et des déplacements par la méthode Semi-analytique

Les charges mécaniques et celles d'origine thermique développées à l'intérieur du four rotatif, donnent naissance à une contrainte appelée la contrainte critique de compression notée  $\sigma_L$ . Cette dernière dépend des caractéristiques mécaniques du matériau des grandeurs cinématiques (déplacements). Cette valeur empirique [7] est donnée comme suit :

$$\sigma_L = 3 \frac{\delta_v + \delta_h}{D_0^2} E_L t_L \quad (1.1)$$

avec  $E_L$  et  $t_L$  sont respectivement le module d'Young et l'épaisseur du tronçon objet de cette étude.

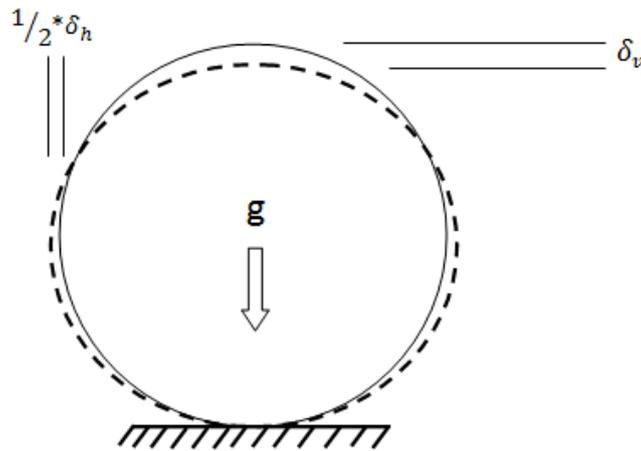


Fig. 1- 6 : Déplacement horizontal et vertical d'une section droite de la virole

$$\delta_h = 0.429 \frac{12. \rho. g. r^4}{Et_C^2} \quad (1.2)$$

$$\delta_v = 0.467 \frac{12. \rho. g. r^4}{Et_C^2} \quad (1.3)$$

$\delta_h$  et  $\delta_v$  sont les déplacements horizontal et vertical exprimés en fonction de la masse volumique  $\rho$ , la pesanteur  $g$ , le rayon nominal  $r$ , le module d'Young  $E_L$  et l'épaisseur  $t_L$ .

## 5.2 Calcul des contraintes et des déplacements par la méthode des éléments finis.

Pour valider les valeurs des contraintes, des déplacements et des ovalisations de quelques zones critiques du four rotatif des cimenteries, on va comparer les valeurs issues des formules analytiques avec ceux issus du modèle numérique effectué à l'aide des logiciels PATRAN et NASTRAN (Fig. 11-18).

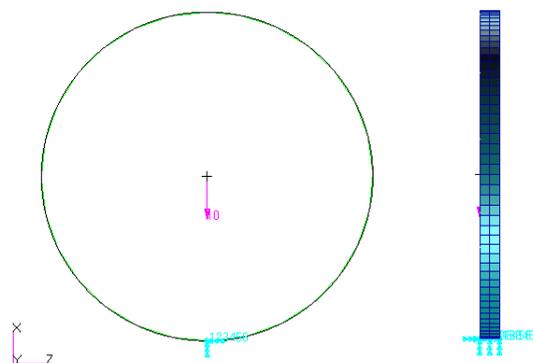


Fig. 1 - 7 : Etude de déformation par du poids de la structure

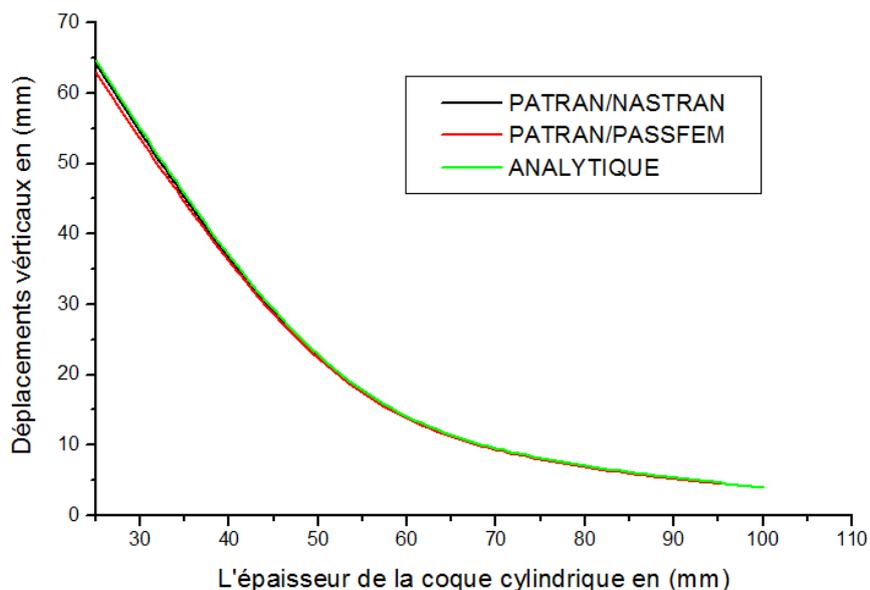


Fig. 1- 8 : Déplacement vertical en fonction de l'épaisseur de la coque

Dans un premier temps, l'effet thermique est négligé seulement la distribution du poids du four qu'est tenu en compte. Les figures 1-9 et 1- 10 montrent la variation des déplacements verticaux et horizontaux dans la structure coque en fonction de l'épaisseur. Les trois courbes présentent les résultats analytiques et ceux obtenus par les logiciels NASTRAN et PASSFEM. Une très bonne concordance entre les résultats analytiques et ceux numériques.

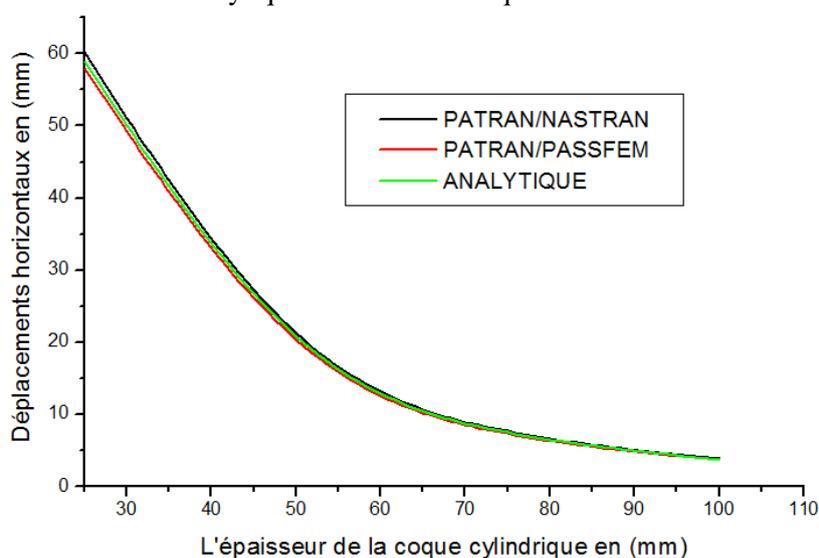


Fig. 1- 9 : Déplacement horizontal en fonction de l'épaisseur de la coque

L'équation 1 - 4 montre que le déplacement horizontal d'origine mécanique est majoré par un déplacement d'origine thermique (principe de superposition) :

$$\delta_h = 0.429 \frac{12 \cdot \rho \cdot g \cdot r^4}{Et_c^2} + \alpha \cdot r \cdot T(r) \quad (1.4)$$

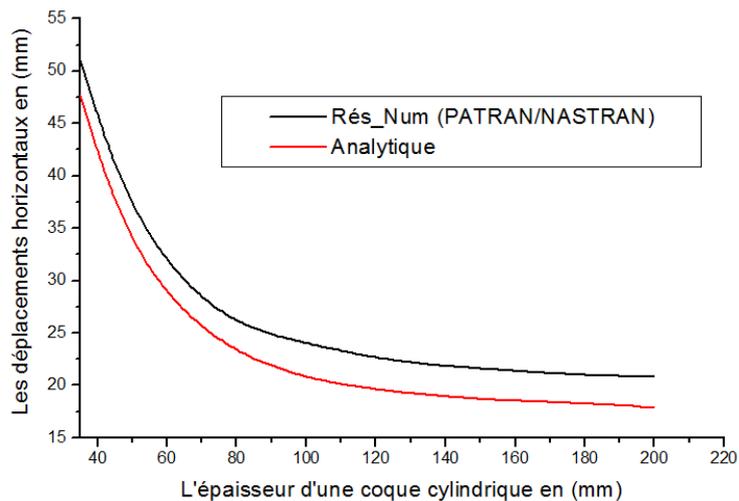


Fig. 1- 10 : Déplacement horizontal en fonction de l'épaisseur de la coque

Le deuxième terme de l'équation 1- 4 est le déplacement causé par l'effet thermique sachant que  $\alpha$  est le coefficient de dilation thermique et  $T(r)$  la température en fonction du rayon nominal.

La figure 1-12 montre la variation du déplacement horizontal en fonction de l'épaisseur de la coque cylindrique du four rotatif. Les deux courbes présentent les résultats obtenus théoriquement et numériquement en négligeant la charge du clinker. On remarque que les résultats analytiques et numériques sont en bonne concordance.

Les deux courbes de la figure 1-13, illustrent les solutions, analytique et numérique, de la variation du déplacement horizontal en fonction de l'épaisseur de la coque cylindrique du tronçon de four rotatif.

$$\delta_h = 0.429 \frac{12. \rho. g. r^4}{Et_c^2} + \alpha. r. T(r) \quad (1.5)$$

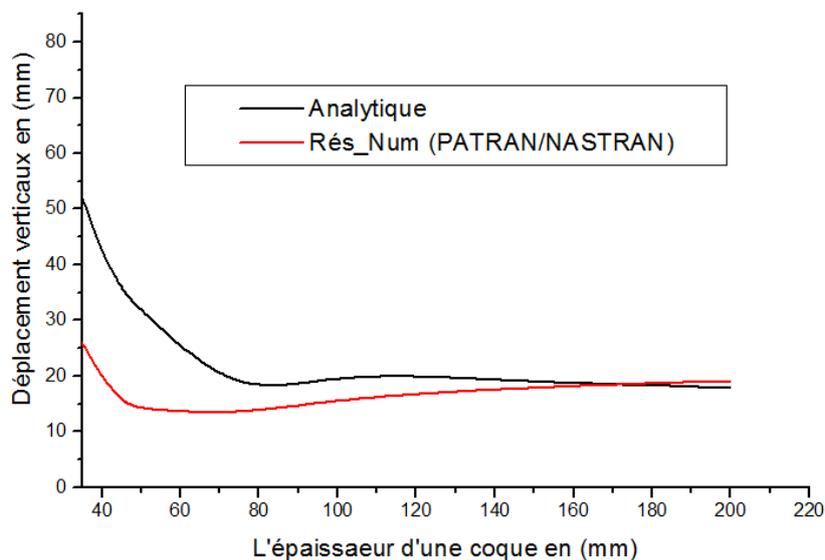


Fig. 1- 11 : Déplacement vertical en fonction de variation de l'épaisseur de la coque cylindrique

### 5.3 Calcul de l'ovalisation relative par la méthode Semi-analytique

Pour calculer l'ovalisation relative du four par la méthode analytique (Eq. 1.6), il faut connaître les grandeurs cinématiques  $\delta_v$  et  $\delta_h$ , en plus du diamètre intérieur du four  $D_0$  [9]. L'expression de l'ovalisation est d'origine empirique, elle a été établie expérimentalement en supposant que sa valeur ne doit pas dépasser 10% du diamètre nominal [5].

$$\omega_r = \frac{\delta_v + \delta_h}{D_0} 100\% \quad (1.6)$$

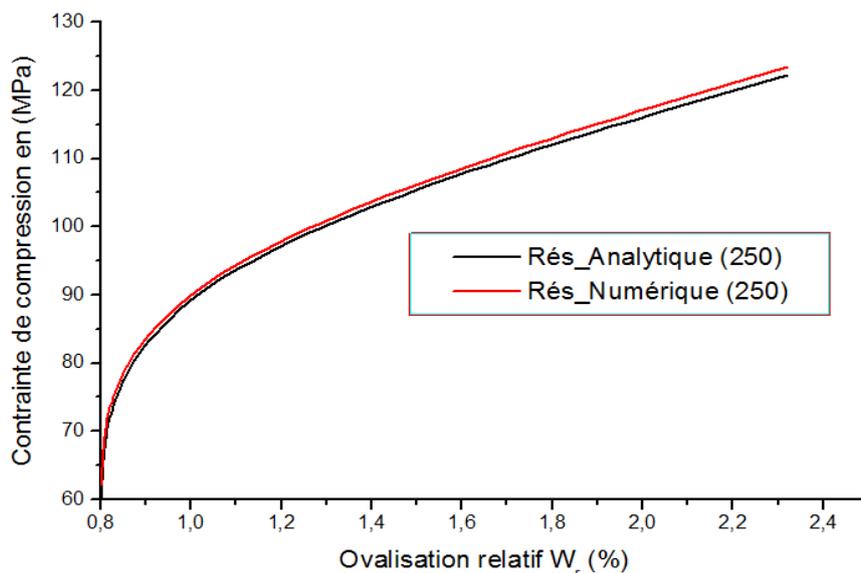


Fig. 1-12 : Contraintes de compression en fonction de l'ovalisation

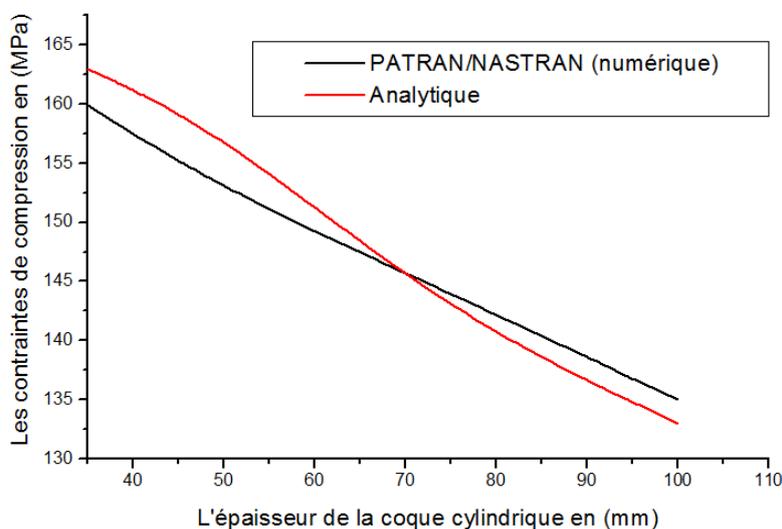


Fig. 1-13 : Contraintes de compression en fonction de l'épaisseur de la coque

## 6. Conclusion

L'ovalité 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'objectif de ce travail de proposer un modèle semi-analytique pour le calcul des déformations, et de l'ovalisations sur les tronçons critiques des FRC. Les formules de ces modèles basés sur les caractéristiques des matériaux, et autre part un modèle éléments finis est

proposé, les résultats obtenus sont comparés aux modèle sem-analytique et montrent la validité de ce modèle.

## 7. Références:

- [1] K.I.Janati, L.Bousshine, Hot deformability of a rotary oven 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.
- [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.
- [9] D. Ramanenka, Numerical Evaluation of Brick Lining Status in Rotary Kilns, 2015.