

La méthode des paramètres initiaux : appliqué pour les fours rotatifs des cimenteries

Khalid I. Janati¹, Mustapha Bideq², Lahbib Bousshine¹

¹Laboratoire des Technologies de Construction et des Systèmes Industriels (LTCSI), ENSEM, Université Hassan II, Maroc.

²Laboratoire des Matériaux, Procédés, Environnement et Qualité (LMPEQ), ENSA de Safi, Université Cadi Ayyad, Maroc.

janati.id02@gmail.com

Résumé

Le présent travail a pour objectif l'étude du désalignement et des caractéristiques du vilebrequin d'un four rotatif pour les cimenteries. Cette étude entre dans le cadre des travaux de la maintenance préventive de ces fours. Il s'agit de valider les modèles par la méthode des paramètres initiaux, programmé par le langage Visual Studio C++, qui simule les surcharges tolérées comme le ratio entre les efforts générés par le désalignement et les efforts statiques au niveau des appuis. Une surcharge due au désalignement égal au maximum à 10.0 % de la charge statique est tolérée. Dans un premier temps, une campagne des mesures expérimentales des charges et déplacements sur les appuis du four a été réalisée à vide, ensuite la modélisation de la virole et le mur réfractaires sous forme d'une poutre avec des appuis simples, Pour une meilleure approche de la réalité de la matrice de rigidité, la surcharge et le désalignement, les résultats obtenus par la méthode des paramètres initiaux sont comparés à ceux obtenues par les essais expérimentaux.

Mots clés: désalignement, vilebrequin, four rotatif, la virole.

1. Introduction

Dans le cadre de la maintenance préventive [1] une étude détaillée du four N°2 (voir fig.1) va être élaborée. Pour ce faire il est nécessaire de déterminer le désalignement, les surcharges du four afin d'anticiper, le croustages, les fissures du mur réfractaires, et la tombé des briques réfractaires et de détecter son axe réel de rotation pour pouvoir contrer le problème de désalignement [1]. 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°2

L'inclinaison et la rotation du four permet le déplacement du calcaire introduit à l'entrée du four à travers la virole vers la sortie de ce dernier sous forme de clinker. comme le montre la figure 3.

2. Principe de la méthode

2.1 Matériel et outillage

Pour faire la pesée du four, il faut utiliser un outillage bien spécifique, la figure ci-dessous montre les différents composants de cet outillage.

- a - vérin hydraulique (1 ou 2 en parallèle), pré-dimensionné, à installer dans l'axe du bandage.
- b - groupe hydraulique - pompe manuelle ou auto, avec indicateur P facile à lire -, clapets anti-retour, accessoires, flexibles... en bon état (vérins, clapets... fuites interdites).
- c - support intermédiaire (tôles, ou berceau au profil du bandage).
- d - fine feuille de protection (type toile aéroglossière ou klingérite), pour ne pas marquer la surface.
- e - châssis super résistant, tôle épaisse pour distribuer de charge et éviter enfoncement vérin.
- f - comparateur « longue » course avec ressort de rappel efficace.
- g - support réglable avec vis de blocage en appui sur assise indéformable.

2.2 Etapes de mesure

Avant d'entamer la pesée, il faudrait tout d'abord : Prévoir les consignes de sécurité adéquates pour l'ensemble des opérations : consignations, absence de balourd dans le four (coins en bois aux autres appuis si nécessaire) ;

Ajuster, puis fixer la position initiale du comparateur, l'aiguille doit être enfoncée au départ de ~ 8-9mm (> hauteur totale de levée) et de préférence, palper sur la virole (ou taquet soudé) plutôt que sur bandage.

- Ramener l'index 0 du cadran face à l'aiguille (facilité lectures ultérieures) et ne plus toucher au comparateur jusqu'à la fin de la pesée [2].

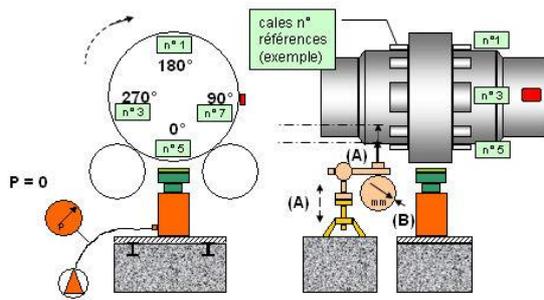


fig.2 : les mesures sur quartes positions

Après réglage du comparateur, les mesures peuvent être démarrées et ceci en procédant comme suit :

Démarrer la pompe et monter lentement le vérin jusqu'à ce qu'il y est contact entre le vérin (berceau) et le bandage,

- Continuer de soulever très lentement de façon à décoller légèrement le bandage des galets sur toute sa largeur (des 2 côtés) puis stopper la pompe. L'opérateur doit regarder simultanément le décollement des galets, et ordonner de stopper la pompe dès que possible, quand il est sûr que le bandage ne repose plus que sur le vérin. La valeur de ce 1er jeu n'est pas une règle: il peut être intéressant de stopper la pompe quand l'aiguille du comparateur est face au 0,

- Incrire les valeurs mesurées P1 bar et H1 mm où H1 mm = enfoncement aiguille initial - enfoncement aiguille 1.

En restant dans la même position, l'opérateur doit effectuer les instructions suivantes :

- Redémarrer la pompe à faible vitesse puis la stopper à 0.5 ou 1mm plus haut et noter de nouveau les valeurs P2 bar et H2 mm.

- Continuer à lever comme ci-dessus et noter (P3, H3), (P4, H4) ..., en théorie, 2 points sont suffisants (relation linéaire $F = f [h]$, pente = rigidité à l'appui) mais en pratique, il faut relever entre 3 et 5 points depuis la perte de contact bandage/galets (pas @ 1mm).

- Relâcher ensuite la pression, et laisser le four descendre lentement, puis confirmer avec une 2^{ème} série de mesure, dans la même position 0°.

- Tourner le four pour faire les mesures de la même façon 90°, 180°, 270°, il faut vérifier qu'il n'y a pas de risque d'interférences (aider le vérin à descendre, effacer le comparateur, penser aux calages sur autres appuis le cas échéant, consignations...).

3. Etude de cas

Le dessin ci-dessous représente les défauts de lignage verticaux du supportage du four, c'est à dire les déports d'axe du tube dus à des positions incorrectes des galets dans l'espace (défauts de position latérale, de nivellement, de braquage ou différence de diamètre de galet). Le calcul est effectué pour un four chaud [3] avec les diamètres et les nivellements des galets. De plus, les mouvements relatifs à chaud des bandages lisses ont été

pris en compte. La précision de ces indications est de ± 0.5 mm.

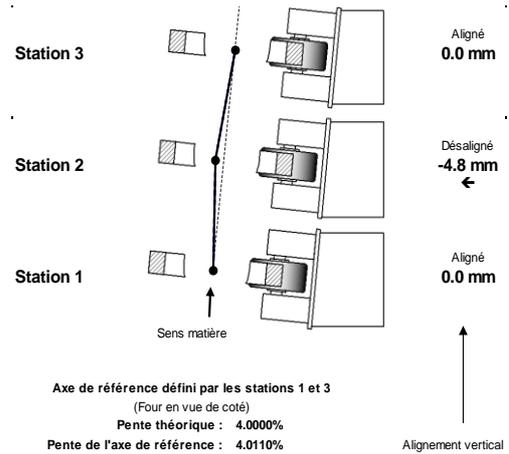


fig.3 : désalignement vertical du four

En prenant la même référence, nous notons un désalignement de l'axe vertical de 4.8 mm vers le haut au niveau de la station 2.

La pente du four mesurée entre les stations 1 et 3 est quasiment égale à la pente théorique du four (4.011 % pour 4.0 %).

Pour information, cela représente un défaut d'altitude de 5.0 mm à la station 3 (trop basse).

4. Modèle mécanique du four

Dans ce qui suit, nous allons considérer l'extrémité amont du four comme origine du repère (Oxyz), avec x l'axe de rotation du four, y l'axe vertical et z l'axe horizontal. Les coordonnées des appuis selon x sont notées x_{Ri} .

La virole peut être modélisée comme une poutre continue appuyée sur un nombre fini d'appuis simples[4].

On décompose la poutre (virole) en s segments ayant la même rigidité (même épaisseur), les coordonnées des extrémités du k^{ème} segment sont respectivement x_{k-1} et x_k , sa rigidité en flexion est EI_k , avec I_k le moment quadratique qui a comme expression dans ce cas :

$$I_k = \frac{\pi(D_k^4 - d_k^4)}{64} \quad (1)$$

Avec : D_k et d_k sont respectivement les diamètres extérieur et intérieur du segment k. Le i^{ème} appui contenu dans le segment k (i) a comme coordonnées x_{Ri} . Le four est soumis à des couples concentrés, des forces concentrées et d'autres uniformément réparties.

Dans la suite, On suppose ce qui suit :

t_{km} couples concentrés notés m_{ki} , localisés en x_{kmi} avec $i = 1, 2, \dots, t_{km}$;

t_{kp} forces concentrées notées p_{ki} , localisées en x_{kpi} avec $i = 1, 2, \dots, t_{kp}$;

t_{kq} forces uniformément réparties notées q_{ki} situées entre x_{kqi+} et $x_{kqi+} + l_{kqi}$, avec $i = 1, 2, \dots, t_{kq}$;

- $n + 1$ appuis numérotés de 0 à n de l'amont vers l'aval ;
- n forces réactives notées R_i et n déplacements notés y_i avec $i = 1, \dots, n$ au niveau de chaque appui ;

θ_0 et θ_n sont les angles de rotation des deux supports d'extrémités et M_0 et M_n sont leurs moments réactifs.

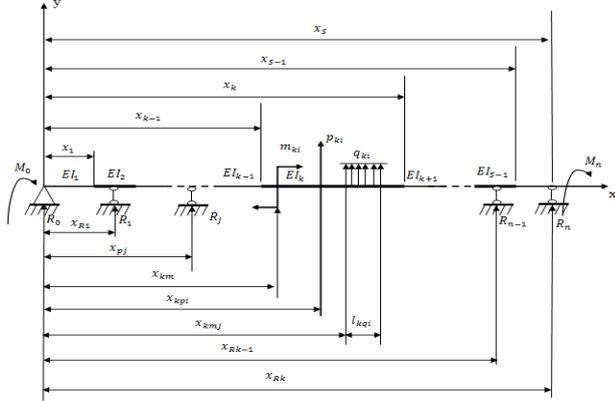


Fig.4: Modélisation du four par une poutre composée d'éléments de différentes épaisseurs

$$\theta_k(x) = \theta_0 + \frac{f_1^k(x)}{EI_k} + \sum_{i=1}^{k-1} \frac{f_1^i(x_i)}{EI_i} \quad (2)$$

$$y_k(x) = \theta_0 x + \frac{f_2^k(x)}{EI_k} + \sum_{i=1}^{k-1} \frac{f_2^i(x_i) + (x - x_i) f_1^i(x_i)}{EI_i} \quad (3)$$

La variable j_i est telle que :

$$\frac{1}{EJ_i} = \frac{1}{EI_i} - \frac{1}{EI_{i+1}} \quad (4)$$

Et les deux fonctions f_1^K et f_2^K sont comme suit :

$$\begin{aligned} f_1^K &= M_0 x + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n R_i (x - x_{Ri})^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i_{ij}} m_{ij} (x - x_{ijj})^1 \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i_{ij}} p_{ij} (x - x_{ijj})^2 + \frac{1}{6} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i_{ij}} q_{ij} [(x - x_{ijj})^3 - (x - x_{ijj} - l_{ijj})^3] \\ f_2^K &= \frac{1}{2} M_0 x^2 + \frac{1}{6} \sum_{i=0}^n R_i (x - x_{Ri})^3 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i_{ij}} m_{ij} (x - x_{ijj})^2 \\ &+ \frac{1}{6} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i_{ij}} p_{ij} (x - x_{ijj})^3 + \frac{1}{24} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i_{ij}} q_{ij} [(x - x_{ijj})^4 - (x - x_{ijj} - l_{ijj})^4] \end{aligned}$$

Les formules (4.10) à (4.20) peuvent être assemblées sous forme d'une équation matricielle :

$$A.X = B$$

L'expression suivante donne le vecteur inconnu :

$$X = [y_0 \ \theta_0 \ M_0 \ R_0 \ R_1 \ R_2 \ \dots \ R_{n-1} \ R_n \ M_n \ \theta_n \ y_n]^T$$

Application au four 1 :

à travers équations ainsi obtenues permettent de déterminer la matrice de rigidité théorique suivante :

$$k = \begin{bmatrix} 0.9024 & -2.0933 & 1.1908 \\ -2.0933 & 4.8553 & -2.7621 \\ 1.1908 & -2.7621 & 1.5713 \end{bmatrix}$$

Les éléments de la matrice sont donnés en (Tonnes/mm) :

Un désalignement du four est à l'origine d'une surcharge au niveau des galets. Il est nécessaire de quantifier les désalignements tolérés de manière à savoir si un ajustement est à prescrire [5]. Les valeurs ci-après sont obtenues par les mesures sur site.

La charge statique appliquée sur les appuis :

- Appui 1 : 340 T
- Appui 2 : 530 T
- Appui 3 : 290 T

Le calcul nous donne une matrice dont les éléments sont donnés en (Tonnes/mm) :

$$k_{Experimental} = \begin{bmatrix} 0.9 & -2.1 & 1.2 \\ -2.1 & 4.9 & -2.8 \\ 1.2 & -2.8 & 1.2 \end{bmatrix}$$

Application au four 2:

Les équations ainsi obtenues permettent de déterminer la matrice de rigidité théorique suivante du Four 2: Les éléments de la matrice sont donnés en :

$$k_E = \begin{bmatrix} 1.85 & -4.37 & 2.51 \\ -4.37 & 10.28 & -5.9 \\ 2.5 & -5.9 & 3.39 \end{bmatrix}$$

La matrice fournie expérimentalement est comme suit :

$$k_{Experimental} = \begin{bmatrix} 1.8 & -4.2 & 2.4 \\ -4.2 & 9.8 & -5.6 \\ 2.4 & -5.6 & 3.2 \end{bmatrix}$$

5. conclusion

Les résultats théorique de la méthode des paramètres initiaux sont approximativement identiques avec ceux de les essais expérimentaux.

Références

- [1] K.I.Janati, S.Jalal, A.Mjidila, L.Bousshine, Limit Analysis of a S235- steel Bottle for Calor gas for domestic usage, International Organization of Scientific Research Journals, 2015.
- [2] K. I. JANATI, L. BOUSSHINE, Modélisation Et Simulation Numérique Des Fours Rotatifs Des Cimenteries Application : PASSFEM/NASTRAN,
- [3] K. I. JANATI¹, M. A. DIRHAR¹, Z. EL MASKAOUI¹, S. E. JALAL¹, L. BOUSSHINE¹ Déformabilité à chaud d'un four rotatif pour cimenteries Expérimentation et simulation numérique, CFM, lyon, france, 2015.
- [4] K. I. JANATI, L. BOUSSHINE, Study of the temperature gradient influence on the rotary kiln deformability, Editeur, International Organization of Scientific Research Journals, 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, 2016