

Développement d'une nouvelle solution de maintenance préventive dans l'industrie du ciment

ALHAJJAJI Malek¹, BOUBEKER Brahim¹, IDIRI Mohamed¹, ELJOUMANI Safia¹,
ZAMMA Abdellah¹.

¹ : Laboratoire d'Ingénierie et Matériaux (LIMAT), Faculté des sciences Ben M'Sik, Casablanca, Maroc,
malek.alhajjaji@gmail.com

Résumé- L'optimisation des politiques de maintenance préventive est devenue un sujet d'intérêt qui a fait l'objet de nombreux travaux. Cette contribution propose une nouvelle politique optimisée de la maintenance préventive pour le système axe du galet. Elle est divisée en deux grandes parties. La première propose une nouvelle conception de l'axe où l'effet de la maintenance préventive est intégré, et la deuxième élabore une nouvelle technique de contrôle adapté à la nouvelle conception.

A ce propos, nous nous sommes intéressés aux axes des galets des fours rotatifs de cimenterie. Nous avons noté les contraintes imposées à l'axe «complet» du rouleau. Ces contraintes qui ont provenu de contact entre le bandage et ses rouleaux de soutien. Actuellement, la méthode de contrôle par ultrasons de l'axe plein dans cette situation pose des inconvénients, par exemple, l'obligation de l'arrêt de l'installation ou encore la difficulté de détecter et de dimensionner les défauts (fissures) engendrés par le champ de contraintes.

Nous proposons dans cette étude, une autre approche, nous préconisons d'opter pour un axe creux au lieu d'un cylindre plein, avec un diamètre minimal qui permet au système de contrôle de pénétrer axe creux afin de faire un contrôle par ultrasons. Ceci permettra un contrôle préventif, en fonctionnement par la technique non destructive des ultrasons. L'analyse donne les différents résultats de comparaison entre l'axe de cylindres plein et creux, ayant les mêmes dimensions et le même matériau et finalement le plus intéressant c'est le même fonctionnement.

Mots-clés : FOUR ROTATIF, AXE DU GALET, FATIGUE, MAINTENANCE PREVENTIVE, CONTROLE NON DESTRUCTIF, ELEMENTS FINI.

INTRODUCTION

Le monde de l'industrie et le monde des transports disposent des machines et d'installations de plus en plus performantes et complexes. Les exigences de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité des équipements donnent à la

maintenance préventive des systèmes un rôle prépondérant. Elle doit permettre de n'intervenir qu'en présence d'éléments défectueux, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements [1, 2].

Nous nous intéresserons principalement à l'entretien de four de cimenterie constitue une composante importante dans la maintenance. Ce dernier est utilisé pour l'étape de pré-traitement dans la fabrication de Portland et d'autres types de ciments.

Pour le four rotatif, les axes du galet sont parmi les principales pièces qui composent ce four de cimenterie. Ils sont considérés comme les éléments les plus importants liés à la sécurité, car un axe du galet qui présente une avarie, peut directement entraîner un accident [3].

Afin de minimiser les temps de réparation et de révision, le procédé de maintenance adopté est celui de maintenance préventive avec une nouvelle conception de l'axe du galet en minimisant sa masse pour faciliter sa maintenance préventive. Ensuite, on fait une comparaison entre l'axe actuel et celui développé par notre étude en utilisant la méthode des éléments finis (MEF) pour connaître la différence de fiabilité entre les deux axes.

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

GENERALITES SUR LE DOMAINE

B. Principe de fonctionnement des galets de roulement

A. Four rotatif de cimenterie

Le four est un tube s'appuie sur des stations de roulement (deux, trois, ... huit) ayant une inclinaison de l'ordre de 3,5 % par rapport à l'horizontale et tournant à des vitesses de rotation comprises entre 1,8 et 3,5 tr/min (voir figure 1).

Le four rotatif est isostatique supporté par trois stations de roulement dont la station amont est motrice. La virole du four s'appuie par l'intermédiaire de bandages crantés sur les galets (Figure 2), c'est dernières sont alignant sur les bandages. La mise en rotation du four peut être assurée dans notre cas par la couronne dentée/pignon fixée sur la virole. Le mouvement donne sera guidé les stations de roulement.

Le four à clinker est soumis à des sollicitations ayant pour origine les charges mécaniques mises en œuvre ou appliquées, la charge thermique, des défauts de géométrie. Ainsi ces charges de la virole sont transmises aux fondations par l'intermédiaire des bandages, galets et paliers [3, 4].

Le four est posé sur un ensemble de 3 bondage et 6 galets. Les bondage sont fixés faiblement à la virole du four. La rotation de ces derniers est faite sur 3 paires de galets en acier. Ces galets doivent prendre en charge le four et permettre la rotation qui se fait, aussi que possible, sans frottement.

Galets d'appuis sont en acier forgé, composé à des axes en acier forgé de carbone et ils sont équipés de deux paliers lisses appropriés pour les machines à basse vitesse avec des charges élevées et sont caractérisés par une bonne «élasticité» qui compense les changements statique dans le four aligné [6, 7].

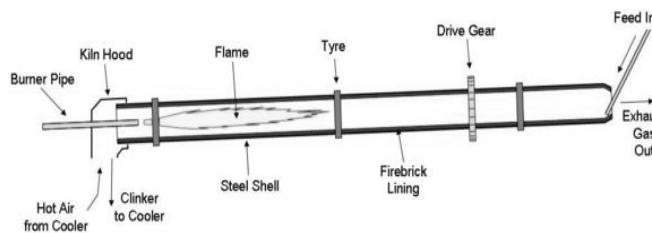


Fig. 6. Four rotatif [5].

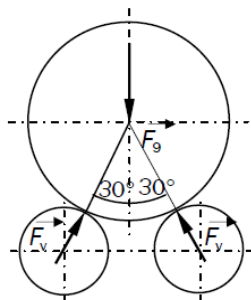


Fig. 7. Situation des galets avec le four [5].

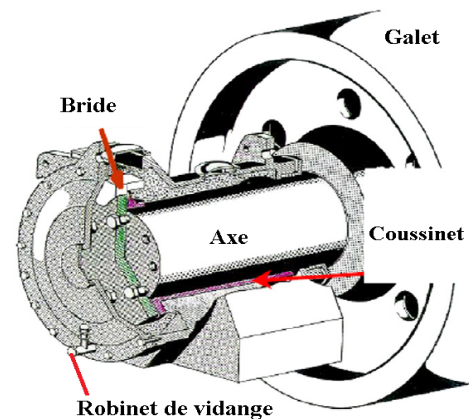


Fig. 8. L'assemblage des galets de roulement du four [6].

DEROULEMENT D'ETUDE

A. Présentation du cas d'étude

L'objectif est d'optimiser le temps d'entretien préventif de l'axe du galet, on réduit le temps, la matière et l'effort fournit pour cette opération.

Problématique : Pendant le fonctionnement du four rotatif, un phénomène de flexion alternée se produit au niveau de l'axe du galet, ce qui donne naissance à des microfissures de fatigue dont la propagation est souvent à l'origine des fractures de celui-ci.

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

La maintenance préventive de l'axe du galet par une technique de contrôle non destructif (CND) est gênée par l'inaccessibilité à ces organes ciblés par l'inspection. L'opération exige un temps important, pour démonter les couvercles, les brides des axes et la vidange d'huile pour les six galets, ainsi que pour leur remontage. De plus, malgré la difficulté rencontrée en démontage, nous n'arrivons pas à un résultat de contrôle fiable et précis à cause de la complexité de l'installation (voir la figure 4).

But de la recherche : Le but de cette recherche est l'analyse du nouveau système développer est de propose une méthode simple de contrôle.

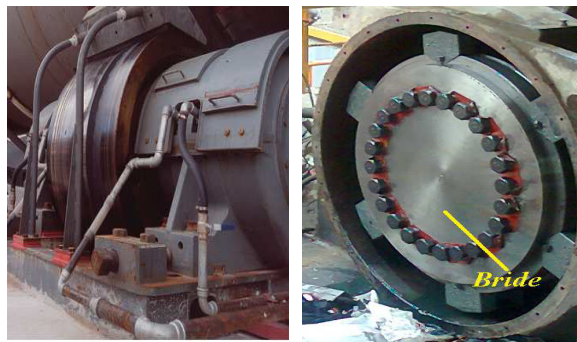


Fig. 9. L'installation de l'axe du galet

B. Analyse statique

• Données et hypothèses

La charge estimée appliquée au niveau des points nodaux de la surface du galet a été établie aux nœuds proches de la zone de contact entre le galet et le bandage. La méthode adoptée pour le calcul de la répartition de la charge sur le produit spécifié est illustrée sur la Figure.5. On utilise l'équation (1) qu'il peut être écrit comme [8] :

$$F = \frac{Q.Gr}{2.\cos 30^\circ} \quad (1)$$

Afin d'analyser la fiabilité du nouveau axe du galet, il est nécessaire de prendre en compte les considérations suivantes : le charges maximum agissant sur les deux galets de support est égale = 6454kN; -Le

poids de bandage est 680Kn [9].La charge appliquée par galet est $F = 3726218.6N$.

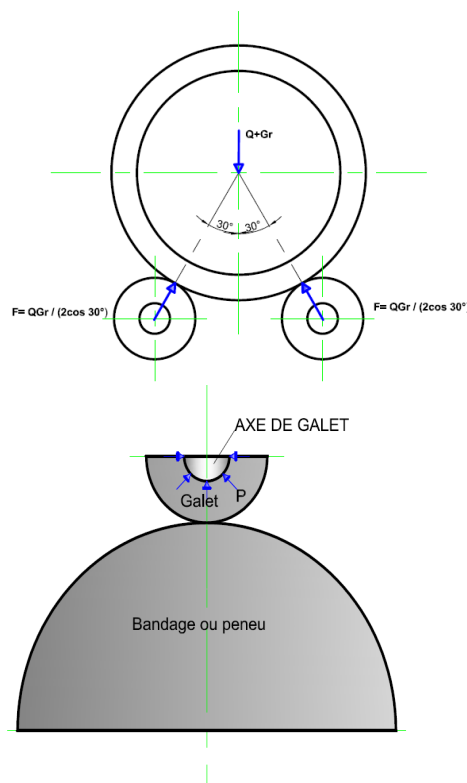


Fig. 10. Contact entre le bandage et le galet- modèle simplifié [5].

Données et hypothèses pour l'analyse : - Dessin de construction de l'axe du galet - voir la figure n° 7 [11]; - EN8 de matériau de l'axe de galet avec la spécification technique (EN8), $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, $E = 2.05E5 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$, $Re = 600 \text{ MPa}$ [10].- Angle entre le bandage et le galet est à 30 degrés. - composante de charge agissant sur le galet unique - Nous avons supposé que le contact entre GALET et BANDAGE est continue sur la largeur totale disponible de l'anneau chemin de roulement, - Nous avons supposé qu'il n'y a pas manivelle cachée de coquille et aucun grand défaut d'alignement de l'axe de système de soutien de four. -Il est difficile de déterminer la pression de chaque galet qui est fonction de la fabrication et d'assemblage qualité.

La complexité de l'ensemble d'un four rotatif et son interaction avec les autres composants nous amènent à adopter

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

certaines hypothèses simplificatrices pour développer notre modèle d'éléments finis (EF).

La coque du four est équipée en paliers et peut être considérée comme poutre simplement appuyée. Dans les conditions normales, l'entrée et la sortie du four ne supportent pas la coquille, par conséquent le four peut être pris comme une poutre en porte à faux.

Pour calculer les réactions d'appui, une procédure simplifiée est utilisée et certaines hypothèses sont prises : le mélange est réparti symétriquement autour de l'axe vertical du four (Figure 6). Cela signifie que des charges du poids du matériau sont également réparties sur chaque galet. La distribution réelle est illustrée à la figure 4 à droite, La figure 6 met en évidence la distribution inégale de charge entre les galets en raison des effets d'inertie [5, 11, 12].

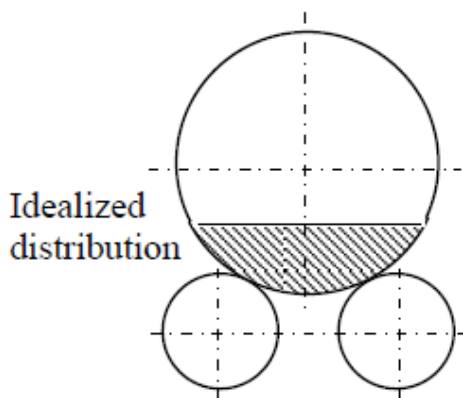


Fig. 11. Répartition symétriquement autour de l'axe vertical du four [5].

C. Modèle d'Éléments Finis

• Conditions aux limites des matériaux

Le galet et ses axes sont assemblés de manière rigide. Nous pouvons considérer, dans le modèle EF, que tous les points de l'axe du galet qui sont en contact avec les longerons, sont présentés par la zone colorée en rouge sur la figure 6, ont deux degrés de liberté [11].

Le poids du four appliqué sur l'axe des efforts notés pour l'attache au siège du galet, figure 6. L'estimation des efforts statiques appliqués à l'axe a été faite en prenant en compte les données précédentes :

Tableau 1: la composition chimique de EN8 Matériel [10].

	Elément chimique et Moyenne de sa concentration en %					
	C	Si	Mn	S	P	Fe
EN8	0.40	0.25	0.80	0.015	0.015	98.52
Material						

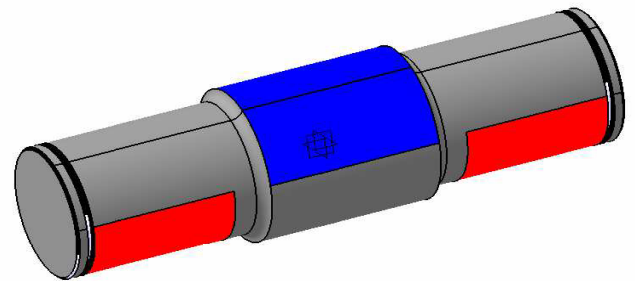


Fig. 12. Géométrie de l'axe du galet

• Modèle mécanique et maillage

Le modèle est développé en utilisant un logiciel des éléments finis. Nous utilisons un modèle élastique en grands déplacements. Nous avons maillé l'axe du galet avec 228880 éléments volumiques. Les éléments utilisés sont issus de la bibliothèque des éléments standards. Ce sont des éléments quadratiques à intégration réduite pour les hexaèdres appelés C3D20R et sans intégration réduite pour les éléments tétraèdres appelés C3D10. Ces éléments ont été choisis principalement pour leur performance en simulation dynamique [11, 12].

D. Résultats des analyses statiques par éléments finis

Le niveau de contrainte de Von Mises dans l'axe du galet creux et du galet plein, donné par le modèle développé dans la partie précédente, est présenté dans les figures 7 et 8.

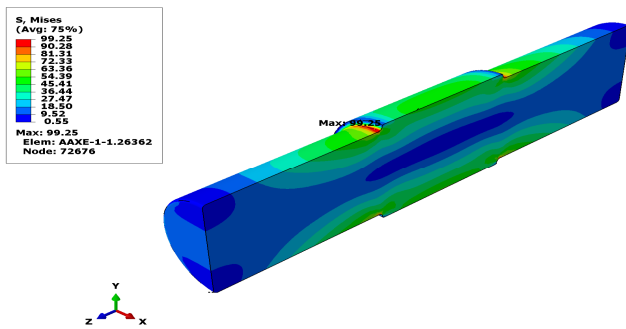


Fig. 8. Distribution des contraintes de Von Mises dans l'axe de galet PLEIN

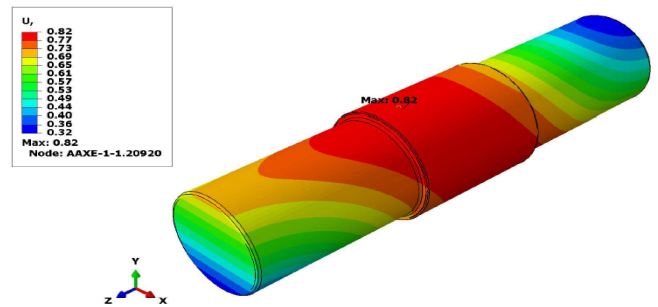


Fig. 10. Déplacement galet PLEIN

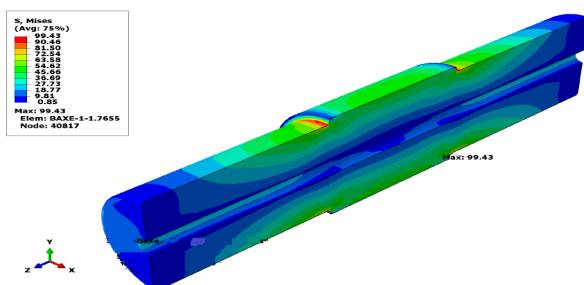


Fig. 9. Distribution des contraintes de Von Mises dans l'axe de galet CREUX

Nous observons que les contraintes équivalentes les plus intenses sont concentrées autour de la zone de changement du diamètre. La valeur maximale des contraintes de l'axe creux augmente, par rapport à l'axe plein, d'une quantité très tolérable. La valeur maximale de la contrainte de Von Mises est de 99.25 MPa pour l'axe plein et de 99.43 MPa pour l'axe creux.

Nous observons également, que le déplacement total de l'axe creux est de 0,63mm, ce qui est inférieur à la valeur maximale du déplacement de l'axe plein, 0,82mm.

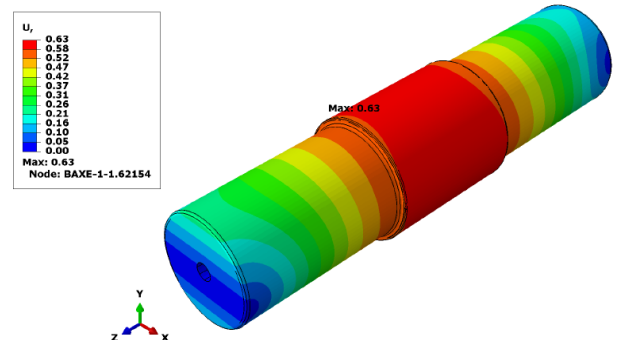


Fig. 11. Déplacement galet CREUX

Tableau 2 : Récapitulatif des résultats

	S.MISES	Déplacement
AXE PLEIN	99.25 Mpa	0.82 mm
AXE CREUX	99.43 Mpa	0.63mm

E. Discussion des résultats

Par les résultats obtenus, il apparaît clairement, que le changement de conception de l'axe du galet donne la même marge des contraintes ce qui confirme la validité de solution sans porter préjudices à sa rigidité. Il est également mis en évidence que la modification de la conception de l'axe proposée, donne une résistance suffisante pour supporter la charge par rapport à la conception initiale de l'axe.

La durée de vie maximale admissible de l'axe du galet peut être atteinte grâce à une conception adoptée pour l'axe creux. Par conséquent, en tenant compte des facteurs externes associés, on a facilité l'accessibilité d'une manière significative à

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

l'axe du galet lors de la maintenance préventive.

MISE AU POINT D'UNE METHODE DE CONTROLE PREVENTIF ULTRASONORE DES AXES DE GALET

A. Principe de la méthode

Afin de pouvoir déterminer s'il y a des défauts dans la pièce (axe de galet), particulièrement dans les zones critiques identifiées ci-dessus, nous avons procédé à étalonner l'appareil de contrôle par ultrasons (UT) et fabriquer un support de palpeur ayant une tige comportant une règle graduée pour déterminer et localiser la position de défaut, et fabriquer des cales pour maintenir la position du palpeur par rapport à la surface du trou de l'axe [13, 14].

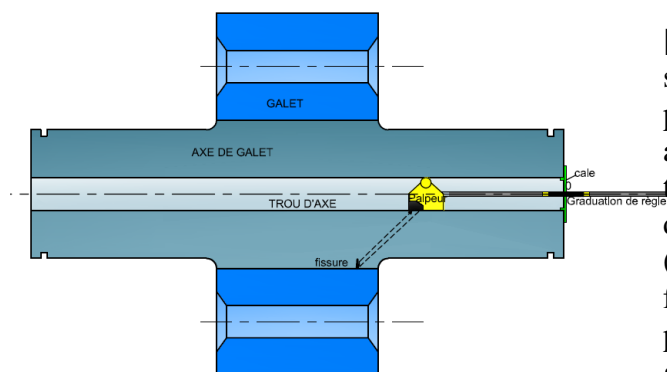


Fig. 12. Contrôle non destructif par ultrason de l'axe du galet

On a fait appel aux ondes transversales (OT) pour contrôler les zones critiques de l'axe pour pouvoir réaliser le contrôle sans démonter la carcasse et les autres éléments.

Les ondes ultrasonores transversales seront générées par un palpeur, avec un angle bien déterminé à partir de la surface du trou d'axe. Comme le montre le schéma de la figure 11. Cette méthode permet au contrôleur de balayer toute la zone critique par ondes transversales.

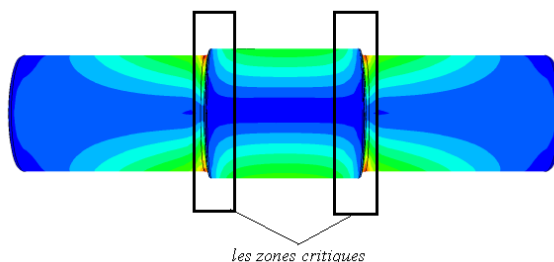


Fig. 13. Les zones critiques de l'axe du galet

La surface de l'axe étant circulaire, il est nécessaire de faire un contrôle en rotation d'un tour (360°) pour s'assurer du balayage de l'ensemble contrôlé. Aussi, nous allons mettre au point un système rotatif pour supporter le palpeur, ce qui permettra un gain, encore, de temps très considérable [14].

B. Procédure d'étalonnage avant contrôle

Le chapitre 7.6 de La norme ISO 9001 [13] exige la Maîtrise des dispositifs de surveillance et de mesure, entre autres on précise l'étalonnage périodique des appareils de contrôle, ce qui n'est pas toujours aisé. En effet, lors de l'étalonnage de l'appareil avec l'étalon normalisé (fig.10), il est important de connaître la fiabilité du matériel : appareils de contrôle, palpeurs (sondes de contrôle) et plus généralement les conditions du contrôle.

Aussi, dans un premier temps nous procédons à un étalonnage suivant les règles de l'art en contrôle non destructif par ultrasons, en utilisant une cale étalon normalisée cale V1, comme la montre la figure 13 ci-après.



Fig. 14. Dispositif d'étalonnage normalisé

Après l'étalonnage initial, nous allons étalonner la sensibilité de l'appareil, sur laquelle on va se baser pour le contrôle de l'axe du galet en service. Elle nous renseigne sur la position des défauts, sur

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

leur importance relative par rapport aux défauts artificiels « connus » et donc une classification permettant de connaître le degré de sévérité de ces défauts [14].

CONCLUSION

Il ya de nombreuses causes externes de défaillance de l'axe qui peuvent être éliminées en changeant toute la conception du four, chose qui n'est pas possible, très coûteuse et fastidieuse. Au lieu de changer la conception de tout l'ensemble ; il serait plus judicieux et plus simple de changer seulement la conception de l'axe du galet comme il est décrit dans notre article, en adoptant un axe creux.

La nouvelle conception facilite le contrôle en permettant l'accessibilité aux zones critiques et la maintenance préventive. De plus, on aboutit à un gain de temps, en réduisant le temps d'arrêt pour maintenance et un gain en masse du matériau constituant l'axe du galet (axe creux).

Par conséquent, l'adoption du changement dans les perspectives matérielles et de conception est un facteur recommandé en tenant compte des conditions et des paramètres pris en compte lors de l'entretien.

En perspective, On se propose l'intégration du système de contrôle aux axes du galet, ce qui permet une surveillance permanente des axes. Les traducteurs peuvent être intégrés au trou de l'axe de galet, ce qui assurera le contrôle les zones critiques que nous avons identifié

précédemment. Une étude approfondie est en cours pour atteindre cet objectif.

REFERENCES

- B. Claire, « elements de maintenance preventive de machines tournantes dans le cas de défauts combines d'engrenages et de roulements », Thesis, INSA de Lyon, 2002.
- FLSmidth Institute, The International Maintenance Seminar, vol. I & II, FLSmidth Institute, Copenhagen, 2005.
- R.P. Chapman, Recommended Procedures for Mechanical Analysis of Rotary Kilns, Fuller Company, Bethlehem, 1985.
- Cement kiln, [http://en.wikipedia.org/wiki/Talk:Cement kiln](http://en.wikipedia.org/wiki/Talk:Cement_kiln); 2010.
- Alma Žiga ,Aleksandar Karač. The contact stresses between cement kiln tyre and supporting rollers , 12th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" August, 2008, pp. 693-696.
- Polysius: Technology Forum, Neu Beckum, 2004.
- E. Rusinski, Z. Stamboliska, et P. Moczko, « Proactive control system of condition of low-speed cement machinery », Autom. Constr., vol. 31, p. 313-324, mai 2013.
- HENG LONG LI, PANOS PAPALAMBROS, A contribution to the optimal design of ride-rings for industrial rotary kilns, Godon and Breach science Publishers ,1985, Vol8 pp. 207-222.
- Vidyadhar Deshpande, Arvind Dhekhane ,Contribution to Kiln Tyre Contact Stress Analysis, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 3, Issue 2, 9500-9504., February 2014
- S. N. Vijayan et M. Makesh Kumar, « Material Specific Product Design Analysis for Conditional Failures—A Case Study », Int. J. Eng. Sci. Technol. IJEST ISSN, p. 0975–5462, 2012.
- SUMESH KRISHNAN, Achieving mechanical stability of rotary kiln by FEM , International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science , Volume No.02, Issue No. 12, p. 568–580, December 2014
- Del Coz Diaz J.J., Rodriguez Mazon F.: Design and finite element analysis of wet cycle cement rotary kiln, Finite Elements in Analysis and Design, 2002.
- Norme française, NF EN ISO 9004 Systèmes de management de la qualité, paris, 2008.
- Norme française, NF EN 12223 Essais non destructifs contrôle par ultrasons spécifications relatives au bloc d'étalonnage, Avril 2000.
- Garayoa R et Al.; Méthodes d'Amélioration Continue, Décembre 2000 .