



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 احمد بن احمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الامن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département De Maintenance En Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : *Génie Mécanique*

Spécialité : *Maintenance en électromécanique.*

Thème

**Comportement Mécanique D'une Virole d'un Four Rotatif
de Cimenterie.**

Présenté et soutenu publiquement par :

CHORFI ADEL & BOUDJAMA HICHEM

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
ADJLOUA Abdel aziz	MAA	IMSI	Président
BOUHAFS Mohammed	MCB	IMSI	Encadreur
MEGHDIR Abed	MCB	IMSI	Examineur

Septembre 2021

INTRODUCTION :

Un four est un outil de production destiné à élaborer ou transformer des matériaux grâce aux transferts thermiques entre une source de chaleur et la matière à traiter.

Le four rotatif est un procédé couramment utilisé dans le domaine de l'industrie pour réaliser une opération unitaire ou une combinaison de plusieurs, tels que le chauffage, le séchage, le mélange, l'enrobage de matériaux solides. Ce procédé est largement utilisé dans l'industrie dans divers domaines d'activités, matériaux de construction, industrie chimique, métallurgie ou agroalimentaire.

Depuis quelques années, les fours rotatifs sont utilisés dans le retraitement de déchets dangereux. En effet, ils permettent par exemple d'immobiliser les métaux lourds contenus dans les déchets verts. Dans la conception des fours, il y a quatre aspects importants à considérer d'un point de vue de technologie de processus, à savoir le transfert thermique, l'écoulement des matériaux solides granulaires à travers le four, le transfert de masse gaz-solide et les réactions chimiques.

Les charges mécaniques et thermique sont les plus importants parmi ces aspects, parce que dans beaucoup de cas, c'est le transfert thermique et les forces mécaniques qui limite la performance du four rotatif

Les contraintes dans un four rotatif sont complexes Le four rotatif présente une grande importance dans le domaine de la production de ciment. Il est considéré comme le cœur de chaque cimenterie, il représente l'organe le plus sollicité thermiquement, il inclut la totalité des réactions, il inclut encore des échanges thermiques énormes, des apports d'énergie de grandes capacités et de grandes déperditions ; la compréhension de tous ces phénomènes conduit à une meilleure conduite du four. Or, les défaillances freinent sa marche normale et entraîne des pertes de profit pour la société. Pour remédier à ces problèmes, nous avons entamé ce mémoire qui étudie le comportement mécanique et de la déformabilité des viroles d'un four rotatif pour améliorer la détectabilité des pannes critiques, tout en agissant sur la conception de plusieurs éléments critiques.

L'objectif principal du présent mémoire est la simulation numérique par la méthode des éléments finis d'un four rotatif, le modèle de four de cimenterie étudié est celui implanté à LafargeHolcim d'Oggaz (Mascara). L'utilisation des capacités de simulation qu'offre le logiciel solidworks représente une partie non négligeable du présent travail .

L'étude envisagée dans le présent mémoire est structurée en quatre chapitres :

- ❖ Le premier chapitre ou nous avons décrit les étapes de la fabrication du ciment puis on a présenté le four rotatif de cimenterie avec l'ensemble des organes qui le constituent ainsi que, leurs rôles et leurs spécificités.

- ❖ Le deuxième chapitre concerne les différents calculs des éléments essentiels du four allant du calcul de la charge totale appliquée que peuvent supporter par les galets, à l'ovalité du bandage et de la virole.
- ❖ Le troisième chapitre englobe les méthodes numériques, présentation du logiciel SOLIDWORKS et la réalisation de modèle
- ❖ Enfin dans le dernier chapitre sont présentés les résultats des différentes simulations réalisé sur notre four pour différents charges applique, l'étude d'évolution des contraintes et des deformations,

Une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus, est dressée en fin du mémoire. Quelques recommandations et perspectives pour des études futures sont également présentées.

Chapitre I:

Généralité sur les four rotatif de cimentrie

Introduction :

Les fours tournants (rotatif) sont très utilisés dans l'industrie. Ils sont utilisés dans la production du clinker pour l'industrie du ciment, la fabrication de la chaux, la fabrication des charbons. . . Ils possèdent plusieurs avantages sur d'autres types des fours comme les lits fixes notamment le fait d'être des fours continus (permettant donc une production continue) et le fait que les débits de production peuvent être élevés. L'industrie de ciment utilise seulement les fours tournants.

Le principal constituant du ciment est le clinker. Ce dernier est fabriqué suivant une série de procédés par lesquels la matière première, principalement du calcaire, de la silice, du fer (oxyde de fer) et de l'alumine, est chauffée à 1450°C jusqu'à une fusion partielle. Ce procédé de fabrication est essentiel pour la qualité du ciment et implique un contrôle très précis de l'alimentation énergétique. Un procédé de combustion est nécessaire pour transformer le combustible chimique en chaleur capable de cuire le clinker. Une chaleur insuffisante peut laisser des particules de calcaire dans le clinker. A l'inverse, un excès de chaleur risque de diminuer la solidité des briques réfractaires du four, ce qui peut détériorer la coque (virole) de ce dernier.

I.1 Définition sur le ciment :

Ciment c'est un matériau se présentant sous forme de poudre très fine, qui durcit au contact de l'eau et est ainsi utilisé comme liant. Le ciment est également appelé liant hydraulique. Cette capacité de prise est recherchée en construction, par exemple pour préparer les bétons.

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement au cours du temps, même à l'abri de l'air, et notamment sous l'eau.

Aujourd'hui, environ 98 % du ciment produit dans le monde est du Ciment Portland, c-à-dire du ciment contenant principalement des silicates de calcium.

Parmi les 2% restants, citons par ordre d'importance décroissante les ciments alumineux (aluminates de calcium exclusivement), les ciments magnésiens.

.Actuellement, la production annuelle de béton dans le monde atteint 5 milliards de m³ correspondant à la production annuelle de 1,5 milliards de tonnes de ciment Portland. La production européenne était en 1975 de 172 Mt (437 fours), soit environ 12% de la production mondiale.

D'après la norme "AFNOR", le ciment est défini comme étant une matière finement broyée composée d'un pourcentage de clinker portland et d'ajouts (gypse, pouzzolane,...). Le clinker est le produit de cuisson, à une température de 1450 à 1500°C, d'un mélange de calcaire ($\approx 75\%$ de la masse) et d'argile ($\approx 25\%$ de la masse) et parfois d'autres additifs en très faibles pourcentages pour ajuster la composition chimique de départ.

Le ciment, ainsi défini, forme en présence d'eau une pâte liante plus au moins fluide susceptible de faire prise et de durcir tant dans l'eau qu'à l'air en formant des composés stables et agglomérant des substances adéquates.

I.2 La fabrication du ciment :

Le ciment est fabriqué en montant en température jusqu'à 1450 °C, un mélange défini et finement broyé de calcaire, d'argile et de sable dans un four rotatif. Sous l'effet de la chaleur, la farine issue de ce mélange se transforme en clinker. Le clinker sortant du four est refroidi, puis finement broyé pour produire la poudre que nous appelons ciment. Les différents types de ciment sont ensuite obtenus par ajout de composants minéraux supplémentaires comme des cendres de centrales thermiques, du laitier de haut fourneau, des fillers calcaires ou encore de pouzzolanes naturelles ou artificielles.

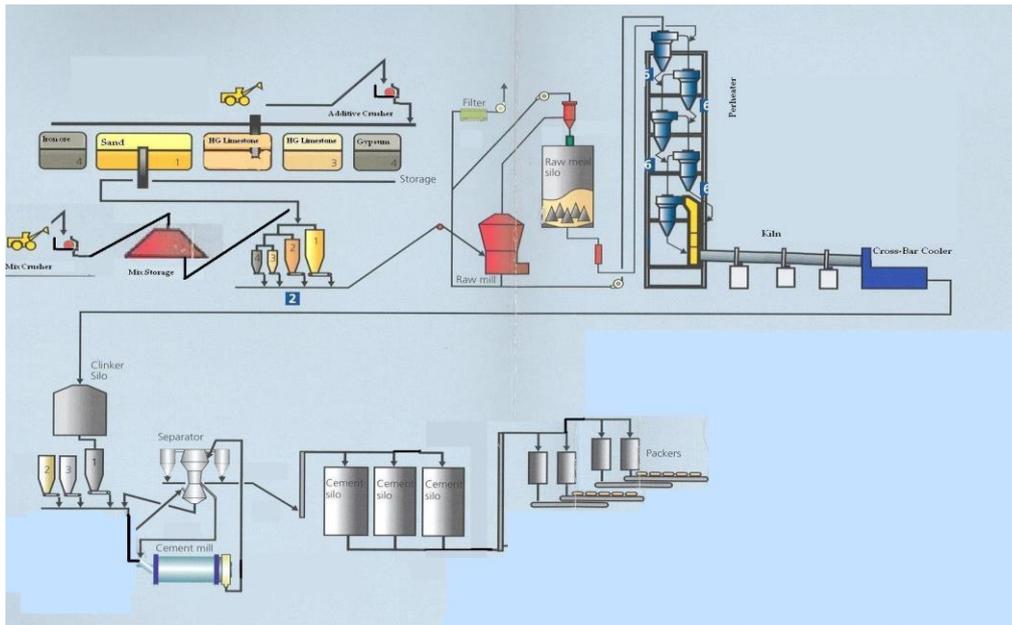


Figure I.1 : chaîne de fabrication de ciment

I.3 Généralités sur les fours tournants :

Ce qui fait des fours tournants des équipements de choix dans autant de procédés c'est entre autre le fait d'être des réacteurs de conception simple. En effet d'un point de vue conception, un four tournant est un cylindre allongé, incliné légèrement par rapport au plan horizontal et tournant autour de son axe. L'inclinaison des fours tournants est en général comprise entre 1° et 4°. Un four tournant peut tout à fait fonctionner avec une inclinaison nulle également. Les vitesses de rotation habituellement rencontrées sont comprises entre 0.5 tr/mn et 30 tr/mn . L'alimentation en charge solide peut se faire par différents types de systèmes comme des couloirs vibrants, des vis sans fin. L'écoulement de la charge dans un four tournant est assuré par la double action de l'inclinaison du four et de la vitesse de rotation.

I.4 Historique des fours rotatif de cimenterie :

Les premiers fours rotatifs réussis ont été développés en Pennsylvanie en 1890, et ont été d'environ 1,5 x 15 m. Un tel four fait environ 20 tonnes de clinker par jour. En 1905, les plus grands fours étaient de 2,7x60m en taille, et font 190 tonnes par jour. Les grands fours à voie humide (exemple : capacité 3000 t/j et ont été d'environ 6,3 x 227 m, reposant sur huit appuis) ont fait place dans les années 1980, aux fours à voie sèche reposant sur trois appuis et les plus

grands fours aujourd'hui produire environ 10000 tonnes par jour. Les fours rotatifs fonctionnent 24 heures par jour, et sont généralement arrêtés seulement pour quelques jours une ou deux fois par an pour l'entretien essentiel .

I.5 Les différents types de tube rotatif :

La géométrie du four tournant (diamètre et longueur) est particulièrement importante sur le plan des débits de solide que peut charrier le four et sur le plan de temps de séjour.

La gamme des diamètres des fours tournants est comprise entre une dizaine de centimètres jusqu'à 7 mètres. Quant à la longueur, il existe des fours mesurant 1m qui sont plutôt des fours tournants de laboratoires et de vitesse de rotation jusqu'à 30 tr/min, mais aussi des fours mesurant jusqu'à 100 mètres. Des fours tournants de grande longueur et de grands diamètres seront privilégiés pour des applications nécessitant de longs temps de séjour et des débits massiques importants. C'est le cas par exemple des fours tournants de cimenterie ou de métallurgie.

I.6 Processus dans les fours de cimenteries :

Le four de cimenterie est un tube en appui sur des stations de roulement (deux jusqu'à 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. Les fours rotatifs se retrouvent dans beaucoup de processus qui comportent le traitement de solides. Les fours rotatifs sont populaires en raison de leur flexibilité. Ils peuvent traiter divers aliments avec des valeurs calorifiques différentes, et il n'y a aucun problème à déplacer les déchets solides vers la sortie. Généralement, les déchets dangereux travaillent dans un lit relativement profond et une chambre de combustion secondaire est prévue derrière le four rotatif pour améliorer la combustion hétérogène des déchets.

Les fours rotatifs peuvent être utilisés à 03 fins différentes: chauffage, divertissement et séchage de matériaux solides, et dans de nombreux cas, ils sont utilisés pour réaliser une combinaison de ces objectifs. Dans la conception du four, du point de vue de la technologie des procédés, il y a 04 aspects importants à prendre en compte, à savoir le transfert de chaleur, le flux de matériaux solides granulaires à travers le four, les solides de transfert de masse de gaz et la réaction.

.

I.6.1 Four rotatif de cuisson :

Le four rotatif est le centre de processus de cuisson, il représente l'organe le plus sollicité thermiquement, il inclut la totalité des récréations qu'elles soient endothermiques ou exothermiques, il inclut encore des échanges thermiques énorme, des apports d'énergie de grande capacité et de grandes déperditions, la compréhension de tous ces phénomènes conduit à une meilleure conduite du four .

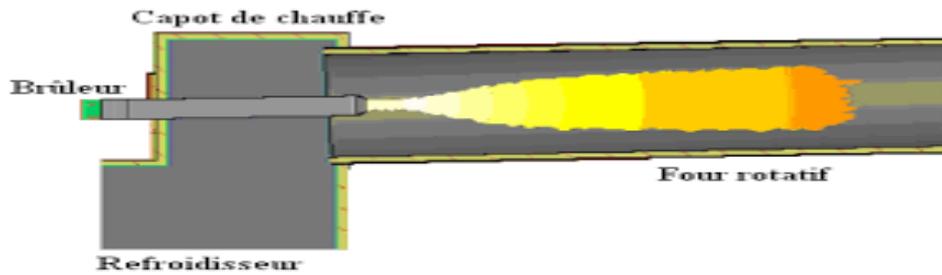


Figure I.2 : La combustion dans un Four rotatif

I.7 Les éléments principaux dans les Fours Rotatifs :

Le four est la pièce maîtresse de la cimenterie, Il a pour rôle de transformer la matière préparée en clinker en la portant à une température allant de 1200 à 1500°C .



Figure I.3 : Four rotatif de voie sèche.

I.7.1 La virole :

C'est un tube constitué d'un assemblage d'éléments soudés. Elles sont fabriquées à partir de tôles en acier de qualité E 24.2 ou A42 CP. Les tôles d'une largeur environ de 2200 mm sont arrondies au diamètre intérieur du four ; les demi-viroles ainsi obtenues sont ensuite soudées suivant leurs deux génératrices.

L'assemblage des viroles bout à bout s'effectue en quinconce de manière à ne pas avoir un alignement des soudures longitudinales.



Figure I.4 : montage d'une virole

On distingue trois catégories de viroles en fonction de leur position sur l'axe du four :

- Les viroles courantes dont l'épaisseur varie de 22 à 36 mm.
- Les viroles intermédiaires de 40 à 60 mm .
- Les viroles porteuses ou sous bandage de 70 à 110 mm.

La déformation de la virole due à l'ovalisation est perceptible jusqu'à une distance de $1.5 D_s$ de part et d'autre du bandage. Or, la jonction entre virole courante et viroles intermédiaires se situe à moins de $1.5 D_s$ du bandage où se combinent contraintes axiales et contraintes tangentielles, donc on porte un soin particulier aux contrôles des soudures dans cette zone.

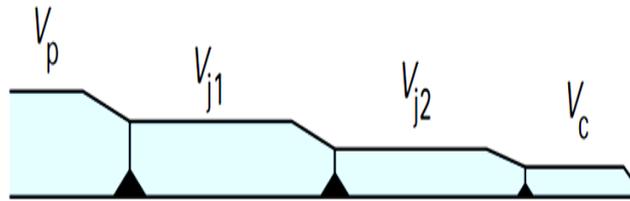


Figure I.5 : Épaisseurs de viroles

Les valeurs limites admissibles communément admises sur les viroles sont :

- Contrainte pour une virole courante : ≤ 2 da N/mm².
- Contrainte pour une virole intermédiaire ou porteuse : ≤ 1.5 da N/mm².
- Variation de contrainte au changement d'épaisseur des viroles : ≤ 0.8 da N/mm².
- Flèche : 10^{-4} de la portée.

Le choix des différentes épaisseurs de viroles (forcément discontinues) doit être tel qu'il permette une variation des contraintes avec un minimum de discontinuité .

I.7.2 Station des galets :

Le couple à transmettre nécessite un contact parfait entre le rouleau et le pneumatique. Tout impact dû à la déformation thermique de l'enveloppe du four ou au tassement de la base doit être compensé par les rouleaux sans diminuer la stabilité du four. Afin de concilier ces exigences opposées (contact optimal entre le rouleau et la surface de roulement du pneumatique et maintien isostatique fiable de la bague). Ces rotules résistent à la pression du four et peuvent suivre n'importe quel voile dans le pneu. Le système peut garantir que le générateur peut être atteint normalement dans toutes les conditions de charge. Pour éviter l'abrasion de la surface de roulement, les axes de rotation du rouleau et du pneu sont toujours parallèles lorsque le four fonctionne.

Ce mécanisme sert également au guidage longitudinal des galets avec le même effet qu'une butée hydraulique conventionnelle. Le four est maintenu en position par un simple galet de butée fixe.



Figure I.6 : Station des galets.

I.7.2.1 Catégories de stations des galets :

Il existe quatre types de rouleaux: rigides, rotules rigides, auto-alignantes et auto-alignantes rotule. Pour les fours avec deux supports, il est recommandé d'utiliser une station de roulement à billes et douilles à alignement automatique (Figure I.7d). En cas de déformation accidentelle du four (vilebrequin), la surface de contact entre le pneumatique et le rouleau ne sera pas perdue, évitant ainsi des contraintes excessives, qui peuvent provoquer des fissures et la formation de petites cavités (piqûres). Les pressions Hertz calculées à ces stations sont 25% plus élevées que celles considérées dans les stations de laminage traditionnelles.

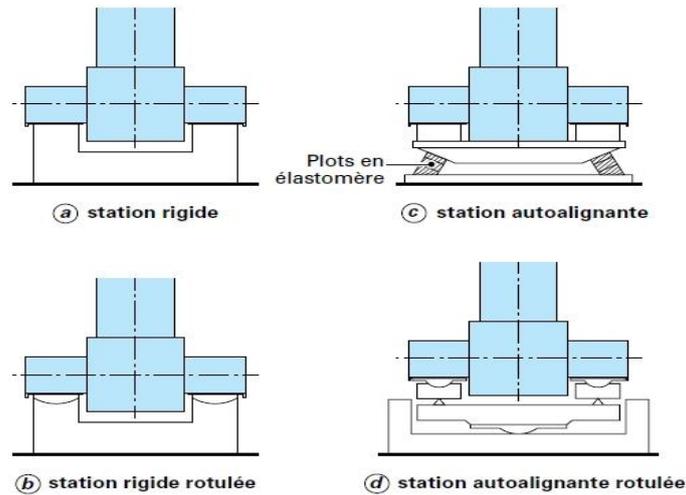


Figure I.7: Différentes catégories des galets.

Le matériau utilisé pour fabriquer les galets est de l'acier moulé, qui a subi un traitement thermique normalisé puis revenu.

En raison de la dilatation du four, il est nécessaire de prévoir une largeur de galet de 40 à 80 mm plus large que le bandage.

I.7.2 Station de bandage :

Les bandages, comme les galets sont actuellement de section rectangulaire pleine, les bandages creux en oméga disparaissant progressivement. La qualité du matériau employé est généralement identique à celle des galets.

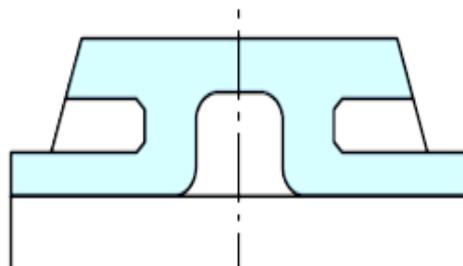


Figure I.8 : bandage creux oméga

Le diamètre intérieur des bandages est légèrement supérieur au diamètre extérieur de la virole avec ses platines pour permettre une dilatation différente, car la température de la virole est toujours plus élevée que celle du bandage.

On utilise deux techniques différentes pour le positionnement radial du bandage, selon qu'il est du type flottant ou cranté.

I.7.2.1 Bandage flottant :

La virole du four repose sur le diamètre intérieur du bandage par l'intermédiaire de platines de calage. Ainsi, les forces d'appui lui sont appliquées dans une direction radiale par l'intermédiaire des platines de calage.

Les bandages flottants doivent être suffisamment rigides et avoir un mouvement relatif très faible pour que l'ovalisation de la virole soit maintenue à des valeurs acceptables .

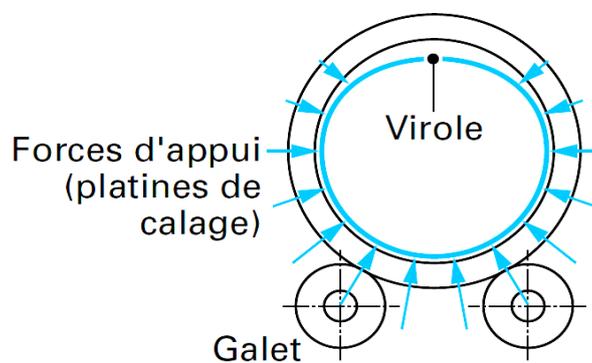


Figure I.19 : bandage flottants.

I.7.2.2 Bandage cranté :

La virole du four est positionnée de manière quasi concentrique par rapport au diamètre intérieur du bandage. Les forces d'appui sont appliquées tangentiellement par l'intermédiaire des crans ou dents réparties sur le diamètre intérieur du bandage.

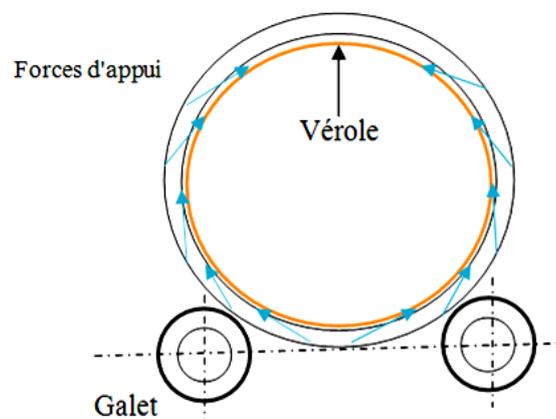


Figure I.10 : bandage cranté

Les dents peuvent faire partie du corps du bandage à l'intérieur de celui-ci ou bien être rapportées et fixées latéralement au bandage par boulons.

Le choix entre bandage flottant et bandage cranté résulte d'un compromis entre :

- Le risque de frettage (étranglement);
- La réduction de l'ovalisation.

Le positionnement axial du bandage est assuré soit par deux cerces continues de part et d'autre du bandage s'appuyant sur des taquets d'arrêt soudés sur la virole, soit par des blocs guides latéraux positionnés alternativement de part et d'autre du bandage et soudés sur la virole.

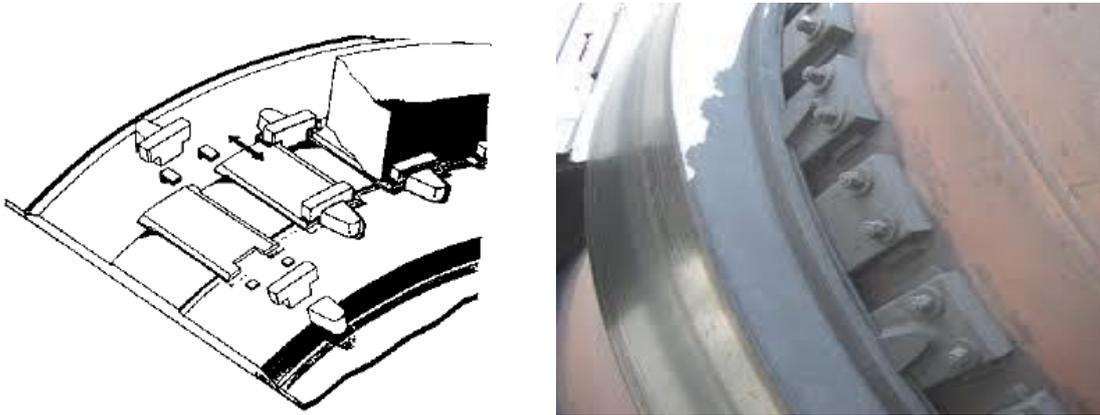


Figure I.11 : Le positionnement du bandage

I.7.3 Le brûleur :

L'énergie représente 30 à 40% du revient du ciment. Un système qui permet une utilisation efficace de plusieurs type de combustible donne un résultat encourageant [37]. Une utilisation efficace (maîtrise) des brûleurs demande que le combustible ne précarise pas la qualité du clinker, non polluant et ne crée pas des problèmes de fonctionnement dans le four, mise à part le type de combustible utilisé. Il existe plusieurs types de brûleur, selon que la combustible est de type prémélangée ou non prémélangée.



Fig. I.12 Un brûleur à Gaz naturel.

La conception d'un brûleur de four est fonction :

- Du combustible et de la façon dont se fait le mélange combustible-comburant .
- De l'espace disponible dans l'enceinte où se déroule la combustion .
- De la forme que l'on souhaite donner à la flamme .

On distingue deux types de brûleur pour un mélange combustible-comburant :

Les brûleurs à pré-mélange : dans ce type de brûleur le mélange entre le combustible et le comburant se fait préalablement à son introduction dans le four. Ces brûleurs sont uniquement des brûleurs à combustible gazeux. Ils produisent des flammes courtes et permettent d'obtenir

localement des températures très élevées. Des précautions particulières doivent être prises pour éviter la propagation de la combustion, vers l'amont, jusqu'au dispositif de mélange.

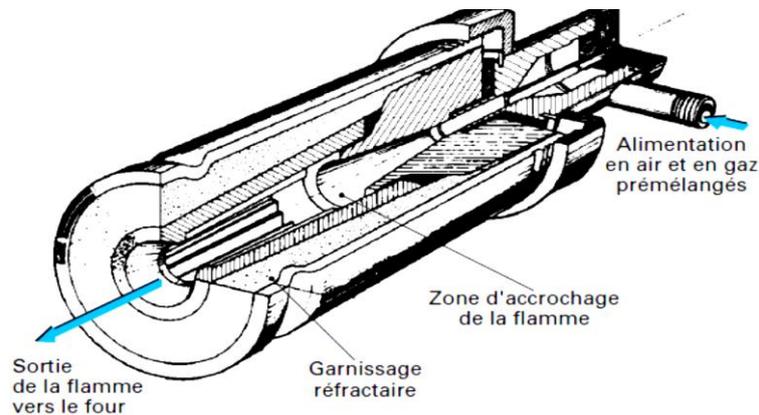


Figure I.13: Brûleur à pré-mélange

Les brûleurs à flamme de diffusion : a se procédé le mélange entre le combustible et le comburant se fait à la sortie du brûleur ou au nez du brûleur. Ces brûleurs concernent les combustibles gazeux, liquides et solides sous forme pulvérisée. Ils permettent, en agissant sur les vitesses et les écoulements, d'obtenir des formes de flamme très variées.

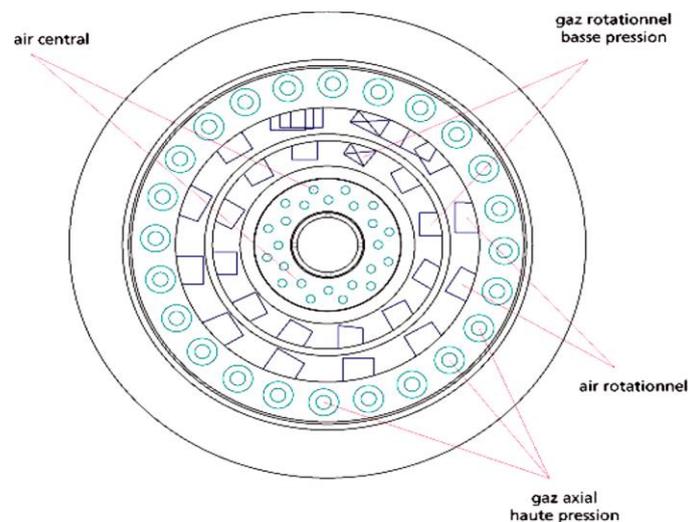


Figure I.14 : vue de face bruleur

Le brûleur dans le four rotatif fonctionne comme un injecteur, l'air secondaire est aspiré du refroidisseur dans le four de telle façon que la flamme dégagée se concentre autour de la ligne centrale du four.

I.8 Les systèmes de récupération de chaleur :

Le préchauffage de l'air est indispensable afin d'augmenter la température de combustion et générer ainsi un transfert de chaleur suffisant vers la charge. Pour préchauffer l'air, l'énergie des fumées sortant du four est récupérée.

I.8.1 Mécanismes de transferts de chaleur

Les transferts de chaleur dans les fours rotatifs impliquent principalement des transferts convectifs et radiatifs entre les matériaux, les gaz, et la paroi. Ainsi, le calcul des échanges de chaleur implique une connaissance des surfaces de transfert, des propriétés convectives et radiatives, et plus particulièrement des coefficients de transfert et de l'émissivité des matériaux solides, de la paroi et des gaz.

I.9 Les briques dans le four rotatif de ciment :

Les briques dans four rotatif du ciment, ils ya trois déférents modelés de briques dans les zones de four (zone de calcination et zone de cuisson) par ce que à l'intérieur du four à clinker, les grandes températures dans les deux zone (calcination et cuisson) environ (2000-2350 °C) flamme. À (1050 °C), tandis que la matière passe un revêtement réfractaire, principalement du type briquetage, de (850-900°C, à 1420-1450 °C) protège la virole de four rotatif, réduit les pertes de chaleur de l'acier, éviter les problèmes des arrêts dans four et augmenté la production du clinker.

I.10Entraînement :

L'entraînement des fours s'effectue le plus souvent par l'intermédiaire d'un couple pignon-couronne dentée. La couronne dentée est réalisée en deux pièces ou plus reliées à la virole soit par des bretelles tangentielles, soit par des lames flexibles fixées sur des sabots. La commande du four est disposée dans la partie supérieure de manière à la protéger le plus possible de la chaleur ambiante. Pour réduire les risques de déformation qui ne manqueraient pas de se produire, sur arrêt brutal par manque de courant, on prévoit, en général, un groupe de virage de secours (pour mise en rotation à vitesse très réduite par un entraînement auxiliaire) alimenté par une source d'énergie électrique indépendante (groupe électrogène diesel). Le dispositif de virage est également utile lors des opérations de maintenance

Le moteur d'entraînement est, dans la plupart des cas, un moteur électrique à vitesse variable. Il est possible d'installer une commande hydraulique, mais les expériences sont encore relativement peu nombreuses et récentes ; elles ne permettent pas d'affirmer que les deux inconvénients présentés par ce type de commande ont été supprimés, à savoir :

- un rendement global de 75 %-80 % au lieu de 85 %-90 % ;
- une durée de vie plus faible pour les moteurs hydrauliques.

La nouvelle technologie du four à deux appuis autorise l'utilisation de l'entraînement direct par un ou deux galets commandés électro-hydrauliquement ou électro-mécaniquement en alternative à l'entraînement par pignon et couronne. Cette technique fait l'objet d'applications industrielles depuis 1995.

La commande directe par les galets impose l'utilisation de bandage cranté

Chapitre II :

Calcul du four rotatif du cimentrie

Introduction

Le four rotatif est soumis à des sollicitations ayant pour origine les charges mécaniques mises en œuvre ou appliquées, la charge thermique et des défauts de géométrie.

Les charges mécaniques, mises en œuvre ou appliquées, peuvent être, uniformément réparties (poids propre de la virole, poids du réfractaire, poids de la matière.), Concentrées (poids de la couronne, poids sur les extrémités du four (joints, satellites), force et couple d'entraînement.) Évolutives (croûtage, anneaux.)

Les charges thermiques sont :La variation de température sur la longueur du four et une distribution de température non homogène dans une section transversale.

Ces sollicitations engendrent des contraintes et des déformations qui sont évaluées par le calcul lors de la conception, de manière à rester dans des limites acceptables.

-On peut citer comme défauts de géométrie.

- ✓ Les alignements imparfaits des supports (horizontal et vertical).
- ✓ La construction défectueuse au montage (axe de virole non rectiligne).
- ✓ Les déformations permanentes créées par des surchauffes.

II.1 Technologie de four rotatif de ciment:

La charge radiale de la virole est transmise à la fondation à travers des bandages, des galets et des paliers. la station de roulement supporte le poids du four, chaque station a trois éléments principaux, deux galet chaque galet fixe par deux palies et bandage.

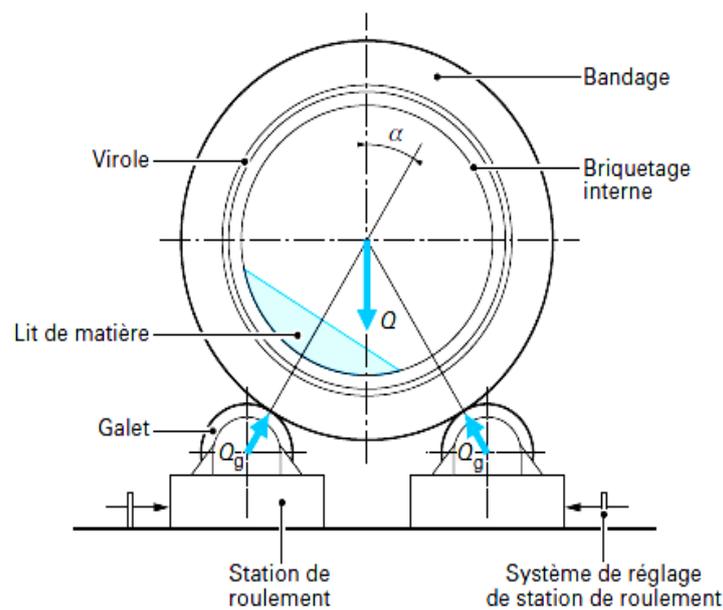


Figure II.1 : Station de roulement (bandage, galets).

II.2 Station des galets :

Les galets de four sont exécutés en deux pièces, un cylindre plein dans lequel est emmanché un axe (fusée de galet). Cet emmanchement est réalisé avec serrage, ou l'ajustage doit être compris entre 0,07 % et 0,1 %. Des valeurs plus élevées impliquent le risque de déplacement relatif de l'arbre par rapport au galet dont la conséquence inévitable est la cassure de l'arbre. La charge

radiale du four Q se répartit par hypothèse uniformément sur les deux galets, soit une charge par galet de :

$$Q_g = \frac{Q}{2\cos\alpha} \quad (\text{II-1})$$

Généralement, on prend l'angle « α » qui vaut 30° pour l'alignement de four leur fonctionnement. La valeur de 30° est communément admise comme le compromis entre une charge acceptable sur les galets et la stabilité du four sur ses appuis.

II.2.1 Calcul le diamètre de l'axe du galet :

Le diamètre de l'axe du galet est exprimé par la formule suivante:

$$d_g = \sqrt[3]{\frac{P_1 * 0.577 * 1' * 1.4 * 1.7}{12 * 10^{-1} * \sigma_{f_{\max}}}} = \sqrt[3]{\frac{1.14 * P_1 * 1'}{\sigma_{f_{\max}}}} \quad (\text{II-2})$$

Une fois le diamètre trouvé, il y a lieu de vérifier la contrainte (pression de Hertz) qui se reparti sur les deux coussinets :

$$\sigma_{Hc} = \frac{P_1 * 0.577 * 0.5}{d_g * 1'} \quad (\text{II-3})$$

II.2.2 Détermination du diamètre du galet :

Le dimensionnement adéquat du système "bandage-galet", c'est-à-dire le diamètre du galet permet d'éviter les déformations dont l'origine est une trop forte pression d'Hertz. Cette pression d'Hertz qui ne doit pas dépasser 42 dan/mm^2 , s'exprime comme suit :

$$\sigma_G = 0.449 * \sqrt{\frac{QE \left(\frac{D_{bi} + 2h + D_g}{(D_{bi} + 2h).D_g} \right)}{b}} \quad (\text{II-4})$$

Après transformation, le diamètre du galet se calcule alors par la formule suivante :

$$D_g = 2.4 * \frac{Q' . (D_{bi} + 2h)}{b . (D_{bi} + 2h) - 2.4 * Q'} \quad (\text{II-5})$$

II.2.3 Palier de galet :

Les galets de four sont fixés par des paliers lisses ou paliers à coussinet en alliages de bronze ou de métal blanc (antifriction). La bonne tenue du palier lisse, est conditionnée par une lubrification adéquate, assurant la présence d'un film d'huile, dont la viscosité permet son adhésion, contre les surfaces en mouvement. L'axe du galet étant soumis à un effort de flexion, la contrainte en flexion se déduit de :

$$\sigma_{f_{\max}} = \frac{M_{f_{\max}} . \alpha_f . \beta_f}{10^{-1} d_g^{-3}} \quad \text{Et} \quad M_{f_{\max}} = \frac{P_1 * 0.577 * L_f}{12} \quad (\text{II-6) et (II-7)}$$

II.2.4 Butée hydraulique de retenue du four :

Du fait de l'inclinaison et sous effet de son poids, le four aura tendance à glisser vers le bas. Là où les butées de retenue, qui par l'intermédiaire de leur galet, s'appuient sur le bandage pour, contenir la poussée dont la force est évaluée à :

$$P_s = i \cdot Q_f / 100$$

(II-9)

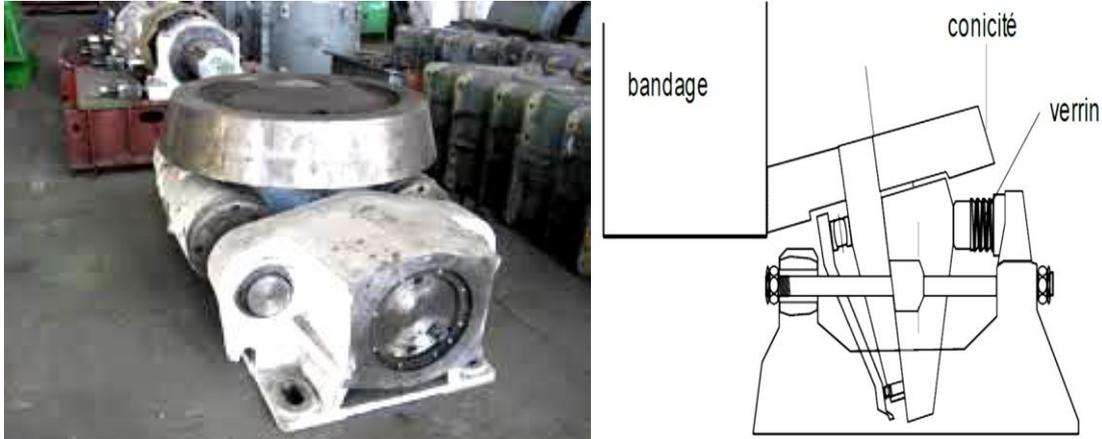


Figure II.2: Butée hydraulique de retenue du four.

Cependant la butée ne contient pas toute la poussée du four puisque la force de frottement entre bandages et galets la limite. La force de frottement entre bandages et galets est très importante. Elle se calcule par la formule :

$$F_f = Q_f (\sin \alpha_1 + \mu \cos \alpha_1)$$

(II-10)

La force de frottement est maximale lors du préchauffage ou du refroidissement, c'est-à-dire lorsque le four se dilate ou se contracte. La rotation du four minimise quelque peu ces effets. Lors du préchauffage, le four devra donc être mis en rotation discontinue dès que la température de la virole de la zone de cuisson, aura atteint environ 25°C au-dessus de la température ambiante.

Le galet de retenue doit être dimensionné de sorte que la pression d'Hertz reste dans les limites acceptables. En outre il doit pouvoir contenir à lui seul, toute la poussée du four, quand deux butées sont nécessaires.

Conicité du galet : suite à la transmission perpendiculaire du mouvement de rotation entre bandage et galet, les deux faces du galet de retenue tournent à une même vitesse de rotation (tr/mn), mais à des vitesses linéaires (m/s) différentes.

II.3 Les viroles :

Le calcul des structures par la méthode des éléments finis est couramment employé dans l'élaboration du projet de construction d'un four rotatif.

Néanmoins, une méthode approchée de calcul permet à l'exploitant de contrôler les contraintes et les flèches dans la virole. Elle consiste à évaluer les contraintes et déformations subies par le four sous l'action de sollicitations qui sont de trois types : uniformément réparties, concentrées, évolutives.

II.3.1 calcul des viroles :

La virole du four est dimensionnée mécaniquement pour faire face aux contraintes de flexions radiales, maximales au niveau des bandages et des flexions axiales maximales entre bandages. Les données de départ pour le dimensionnement d'un four sont le diamètre, la longueur et le débit de matière. Ces données sont déduites à partir des connaissances du processus, dans notre cas la fabrication du clinker à ciment. Le dimensionnement implique le calcul des épaisseurs de différents tronçons de virole :

- Entre appuis de sorte que la rigidité du four ne soit ni trop faible pour assurer un fonctionnement sans risque de rupture, ni trop forte pour minimiser les surcharges sur certains appuis quand l'un d'entre eux subit un tassement ou une usure se traduisant par un désaxage du four.
- Sur appuis de sorte que la virole supporte l'effort tranchant. Le calcul des épaisseurs de la virole se déduit des méthodes de calcul basées sur la résistance des matériaux. Le module d'élasticité longitudinal ou module de Young "E" dont la valeur à la température ambiante est de 21000daN/mm² chute avec la température, du fait que l'acier devient en quelque sorte plus plastique donc moins résistant à l'allongement.

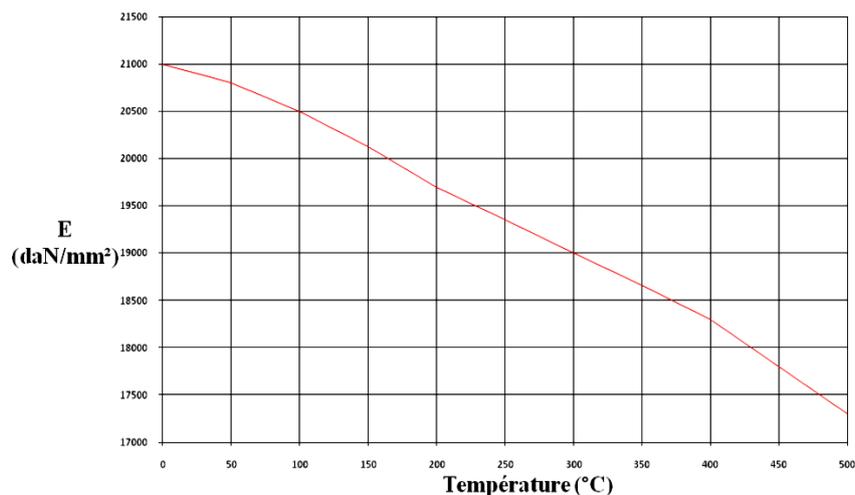


Figure II. 3: Evolution du module de Young avec la température.

L'inertie axiale "I" pour un tube dont l'épaisseur est très faible devant le diamètre se déduit de la relation :

$$I = \frac{d^3 * \pi * e}{8} = 0.39d^3 * e \quad (\text{II-11})$$

Le diamètre moyen (d+e) du tube ou du four dans notre cas et "e" l'épaisseur de la virole. Nous constatons que le module d'inertie est proportionnel à l'épaisseur de la virole et au cube du diamètre, autrement dit, une augmentation du diamètre de 10 % pour une épaisseur constante provoque une augmentation de la rigidité du four de 33 % alors que pour un diamètre constant, il faut une augmentation de l'épaisseur de la virole de 33% pour donner la même rigidité. Ceci explique pour quoi l'augmentation du diamètre des fours n'entraîne pas d'autant l'augmentation

de l'épaisseur de la virole. La rigidité d'un four et avant tout une affaire de diamètre. Cependant, l'augmentation du diamètre n'entraîne pas que des avantages, puis que la déformation radiale lui est proportionnelle

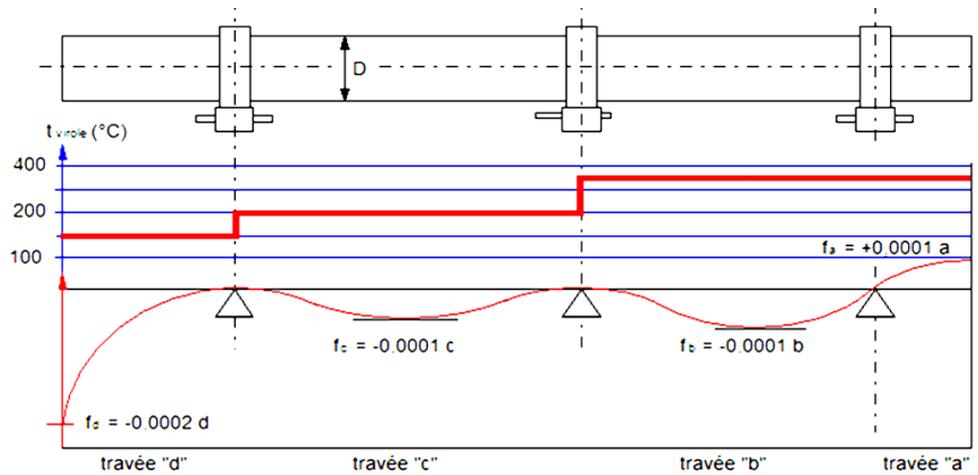


Figure II.4: Déflection des différentes travées du four.

Dans la Figure II.4 sont représentées les valeurs des déflexions pouvant être utilisées pour les différentes travées du four ainsi que les températures moyennes maximales supposées dans ces mêmes travées.

Sur la base des valeurs des déflexions ou flèches, et connaissant le diamètre du four et la charge supposée uniformément répartie sans prise en compte dans une première approche du poids linéaire de la virole du four puisque les épaisseurs sont inconnues, il est possible de déduire les épaisseurs des différents tronçons de la virole en se fixant au préalable les longueurs des travées. La détermination des épaisseurs se déduit à partir des principes de calcul de la résistance des matériaux en assimilant le four à une poutre reposant sur trois appuis la flèche de la travée "a" se déduit de la formule:

$$f_a = \frac{P_a * a * (a+b)}{24 * E * 0.39 * D_N^3 * e_a} * (3a^2 + a * b - b^2) \quad (\text{II-12})$$

Dans cette travée "a" et suivant la figure II.8, la température est de 350°C et la Figure II.7 donne (18300daN/mm²). Dans cette même travée, la charge linéaire P_a en tonne par mètre linéaire qui comprend la charge du maçonnerie réfractaire, le croûtage et la charge de la matière ainsi que le poids linéaire du four, s'évalue par les formules suivantes :

La flèche de la travée "b" se déduit de la formule :

$$f_b = \frac{P_d * a * (a+b)}{384 * E * 0.39 * D_N^3 * e_b} * (5b^2 - 12a^2) \quad (\text{II-13})$$

De même, les différentes charges se calculent d'une façon similaire, à l'exception d'un paramètre qui change à savoir la hauteur du croûtage h'. La flèche de la travée "c" se déduit de la formule :

$$f_c = \frac{P_c * c^2}{384 * E * 0.39 * D_N^3 * e_c} * (5c^2 - 12b^2) \quad (\text{II-14})$$

La charge linéaire P_c se déduit en considérant les paramètres changeant suivants :

Le briquetage étant en alumine à 75-80 % sur $\approx 25\%$ de la travée avec $2,6 \text{ t/m}^3$ et 40-42% sur $\approx 75\%$ avec $\rho = 2,3 \text{ t/m}^3$ ce qui donne une densité moyenne de $\rho = 2,6.0,25 + 2.3.0,75 = 2,4 \text{ t/m}^3$ croûtage faible existant uniquement sur 20 % de la travée dont la hauteur $h' = 100 \text{ mm}$:

La flèche de la travée "d" se déduit de la formule :

$$f_d = \frac{P_d * d * (c+d)}{24 * E * 0.93 * D_N^3 * e_d} * (3d^2 + c * d - c^2) \quad (\text{II-15})$$

La charge linéaire P_d se déduit en considérant les paramètres changeant suivants :

Le briquetage étant en alumine à 42 % dans la travée avec ($2,3 \text{ t/m}^3$) ce qui donne une densité moyenne de croûtage inexistant. La charge de la matière se déduit sur la base d'un taux de remplissage de $\approx 24 \%$ et $\rho'' = 0,9 \text{ t/m}^3$.

II.3.2 . Dimensionnement des épaisseurs des viroles :

En général la virole de la zone de cuisson du four, est exécutée en acier A42CP ou E26-3 (acier pour chaudière) dont la composition chimique est : C=0,30%, Si=0.15%, P=0.04%, Mo=0.15%, Mn=0.50 %, Cr=0,90%, dont les résistances mécaniques sont :

- Résistance à la traction = 35-45 kg/mm²,
- Limite de déformation permanente = 20 kg/mm².
- Allongement = 25 %.
- Le reste de la virole est exécuté en acier E-23 (A-36)

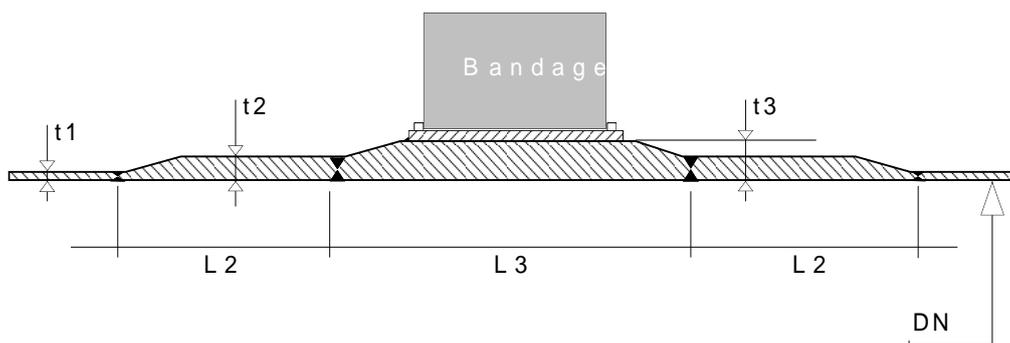


Figure II.5 : Les différentes épaisseurs des viroles du four.

II.3. 3:Charges linéaires du maçonnerage réfractaire :

Matière réfractaire ou le brique réfractaire est constitué de matières et produits non métalliques qui résiste la température jusqu'à 1500°C au minimum. La charge de matière réfractaire lie au volume de brique et son dimension. Dans l'industrie cimentière, l'usure de la réfractaire céramique concerne surtout le garnissage du four. La durée de vie étant beaucoup plus faible que dans l'échangeur de chaleur et dans le refroidisseur dont l'usure n'est appréciable que dans le

puits de chute de clinker.

$$Cr(a) = h_{brique} * 10^{-3} * \phi_N * \pi * \rho \quad (II-16)$$

II.3.3.1 : Charge linéaire du croûtage :

Le croûtage adhère le mieux à la dolomie et un peu moins à la magnésie-chrome à liaison silicatée et beaucoup moins aux briques de magnésie-chrome à liaison directe et le spinelle. Ceci s'explique par le fait que la dolomie contient de la chaux et des impuretés (silice, alumine et fer) qui interagissent avec les composés du clinker avec établissement, de ponts de liaison ; la charge de croûtage est donné par

$$Cc(a) = h_{croustage} * 10^{-3} * (\phi_N - 2h_{brique}) * \pi * \rho' \quad (II-17)$$

II.3.3.2 Charge linéaire de matière :

Le degré de remplissage d'un four est le rapport entre la section occupée par la matière et la section du four. Les valeurs généralement admises oscillent entre 5 et 17% indépendamment du diamètre du four. Il est évident qu'un four est d'autant plus rentable que son degré de charge soit proche de 17 % ; le taux de remplissage du four est exprimé par la valeur 0,14.

$$Cm(a) = 0.14 * [\phi_N - 2 * (h_{brique} + h_{croustage})]^2 * \rho'' \quad (II-18)$$

II.3.3.3 Charge linéaire de la virole:

L'épaisseur de la virole étant une inconnue, la charge linéaire de vérole peut être estimée pour les besoins du calcul à :

$$Cv(a) = \phi_N^2 * 6.5 * 10^{-3} * \pi * \rho''' \quad (II.19).$$

II.3.3.4 La charge linéaire totale :

La charge linéaire totale du four est la somme des charges:

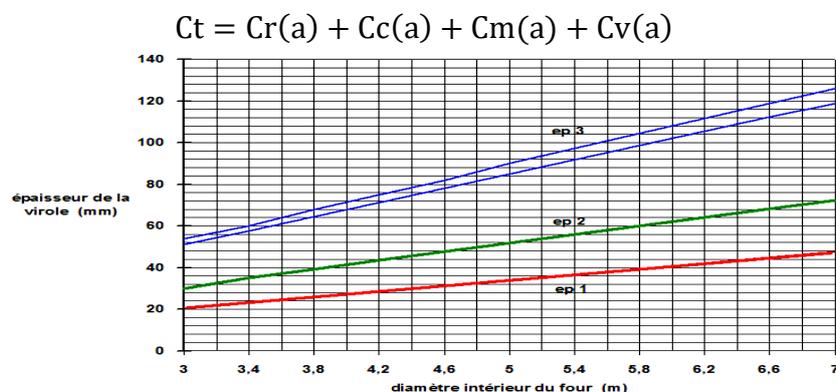
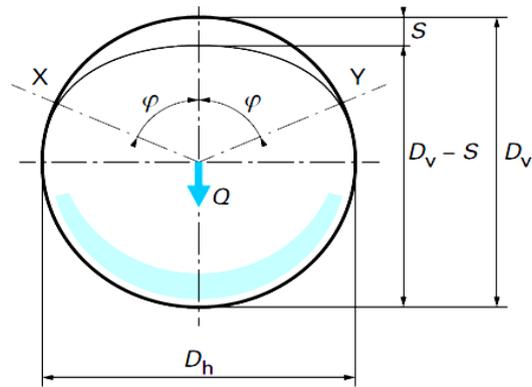


Figure II.6 : Relation entre l'épaisseur et le diamètre de la virole.

II.3.4 :Ovalisation des viroles :

La l'ovalisation de la virole c'est la déformation du cylindre ,elle est exprimée par la relation suivante :



(b) cylindres déformés

Figure II.7 : Ovalisation de la virole.

$$\omega_v = \frac{D_h - (D_v - S)}{D_s} 100 \quad (\text{II-20})$$

La méthode de SHELLTEST permet une évaluation de l'ovalisation de la virole par la mesure continue des rayons de courbure de la virole.

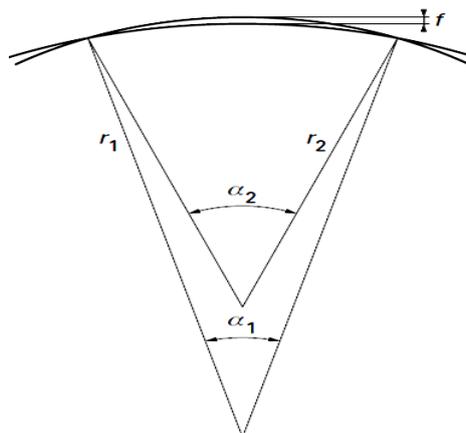


Figure II.8 : Principe de méthode de SHELLTEST.

L'appareil SHELLTEST consiste en une poutre métallique rigide de 1m de longueur, fixée sur la virole dans le sens radial par des aimants. Au centre de cette poutre, une jauge est appliquée de façon continue sur la virole. Au cours de la rotation de la virole, un index associé à la jauge trace sur un disque, toujours maintenu en position verticale, une courbe amplifiée 10 ou 15 fois, qui est l'image de la déformation de la virole.

Sur cette courbe, on détermine la valeur « f » de l'amplitude maximale du tracé de la déformation ; « f » est pris en compte par la formule de ROSENBLAD pour déterminer l'ovalisation de la virole : [13]

$$\omega_v = \frac{4 D_s}{3 L^2} * f * 100 \quad (\text{II.21}).$$

Les diagrammes tracés à l'aide de l'appareil SHELLTEST correspondant à des fours équipés de bandages faibles et de bandages forts sont représentés figure II.12, pour illustrer.

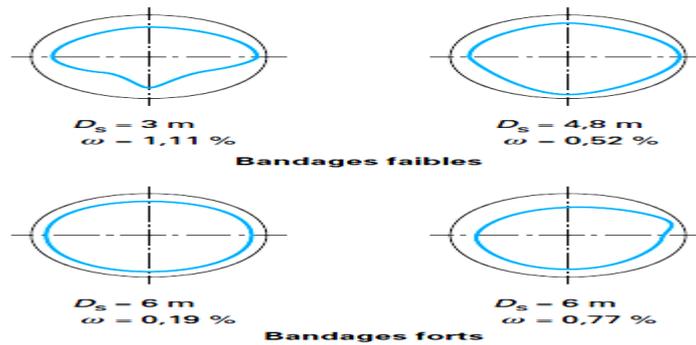


Figure II.9 : Diagrammes méthode de SHELLTEST.

II.3.4.1 Maîtrise de l'ovalisation de la virole :

La durée de vie des réfractaires sera améliorée si l'on réduit l'ovalisation de la virole soit en choisissant les bandages du type cranté qui permettent d'obtenir une ovalisation de virole minimale, soit en ajustant au mieux le jeu entre virole et bandage dans le cas des bandages flottants.

En fonction du diamètre du four, les valeurs admises pour l'ovalisation de virole, à chaud, évaluée d'après SHELLTEST sont les suivantes, données par le tableau II.2 :

Diamètre de four (m)	3	4	5	6
Bandage cranté ω (%)	0.2	0.25	0.3	0.4
Bandage flottant ω (%)	0.3 à 0.4	0.4 à 0.5	0.5 à 0.6	0.6 à 0.7

Tableau II.1 : Valeurs admises pour l'ovalisation de la virole.

Pour corriger un jeu excessif entre virole et bandage flottant, on met en place des cales ou de nouvelles plaques supports. La détermination de l'épaisseur de ces plaques se fait après observations répétées du déplacement relatif (U) entre bandage et virole.

II.3.4.2 : La déformation du bandage

La déformation du bandage peut s'exprimer par la formule :

$$\delta = 0.0208 \cdot \frac{Q \left[\frac{1}{2} (D_{bi} + h) \right]^3}{E \frac{1}{12} b \cdot (h)^3} \quad (\text{II-22})$$

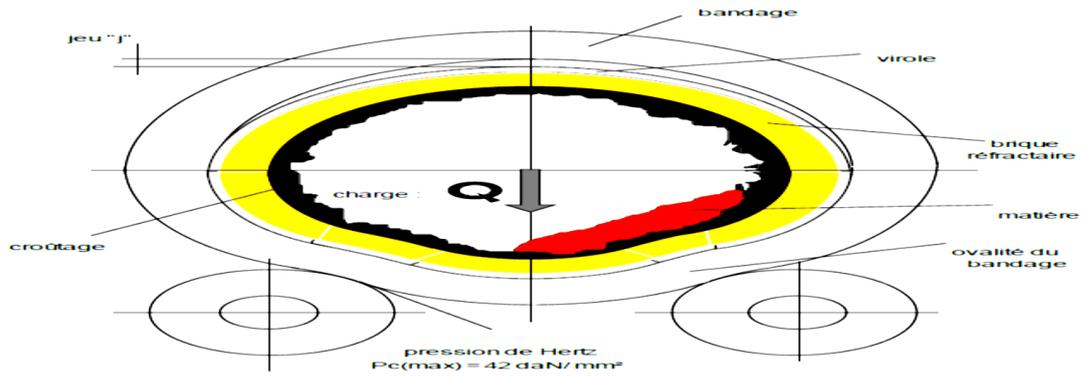


Figure III.10: Déformation du bandage

II.3.5: Contraintes thermiques dans la virole et son bandage :

Le graphe (Figure II.12) fait ressortir l'importance de l'opération de montée en température (préchauffage), puisqu'on y distingue clairement la différence croissante de température entre la virole et le bandage, ou pour certaines valeurs, apparaît un réel danger d'étranglement de la virole par le bandage, occasionnant une déformation permanente, augmentant par la même la valeur de l'ovalité.

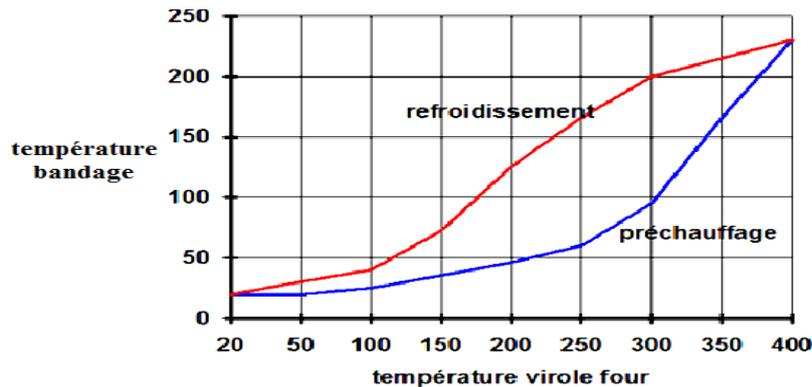


Figure II.11 : La différence croissante de température entre la virole et le bandage.

Il est possible d'apprécier la différence de température permise entre le bandage et la virole, pour une différence diamétrale de 10

Pour mieux cerner l'importance du risque d'étranglement de la virole par le bandage, reportons nous au phénomène de la dilatation thermique :

$$\Delta L = \lambda \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (\text{II-23})$$

$$\Delta D = \lambda \cdot D_0 \cdot \Delta T \quad (\text{II-24})$$

Cette augmentation des dimensions, qui, s'elle est bloquée, engendre une contrainte mécanique, qui peut dépasser la limite élastique du métal et provoque une déformation permanente, en effet, en conformité avec la loi de Hook, la contrainte mécanique en N/mm² s'exprime comme suit :

$$\sigma = T.E.\Delta.\lambda \quad (\text{II-25})$$

(E étant le module d'élasticité de Young qui pour l'acier vaut 210000 N/mm²)

Pour une augmentation de la température de 1 °C :

$$\sigma = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 2110^4 \cdot \Delta T = 2,52 \cdot \Delta T \quad (\text{II-26})$$

Si l'acier de construction a une limite de déformation permanente de l'ordre de 200 N/mm², nous concevons que l'augmentation de la température ne doit pas excéder 80 °C .

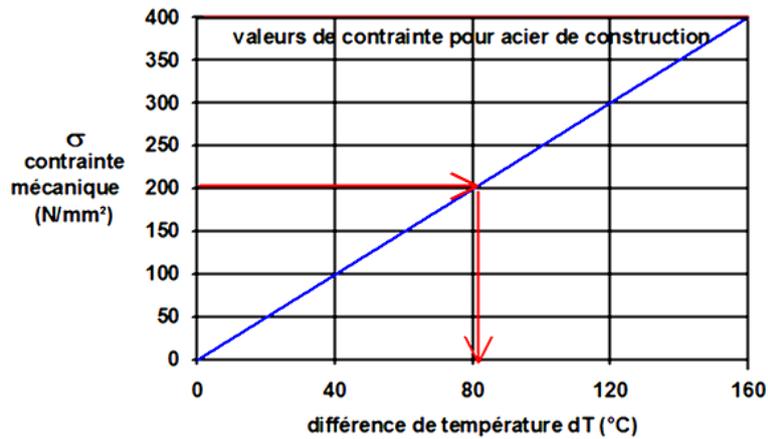


Figure II.12 : Valeur de contrainte pour acier de construction.

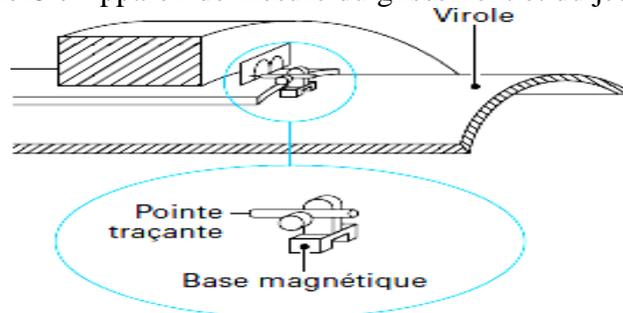
II.3.6 : Déplacement relatif virole-bandage :

Le déplacement (ou glissement) U entre virole et bandage est défini par:

$$U = \pi DL - \pi DS = \pi C \quad (\text{II-27})$$

La mesure simultanée de déplacement U et du jeu S supérieur du bandage se réalise simplement par un dispositif comprenant un crayon fixé par aimant sur la virole du four, il trace une courbe caractéristique sur un papier solidaire d'un des champs du bandage .

Figure II.13 : Appareil de mesure du glissement et du jeu.



II.3.7 : Surveillance du jeu pendant l'allumage :

Lors de l'allumage du four, la température de la virole augmente plus rapidement que celle du bandage de sorte que le jeu entre virole et bandage diminue progressivement, de la valeur de jeu « à froid » à la valeur « fonctionnement normal ». Il est important de contrôler cette évolution de manière à éviter tout frottement de la virole, à l'intérieur du bandage, qui serait à l'origine de déformations permanentes.

Il y a en effet un compromis difficile à trouver entre, d'une part, le jeu optimal «à froid» qui permet d'obtenir une ovalisation du four faible et, d'autre part, le jeu « de sécurité » qui permet d'éviter le frottement en toutes circonstances.

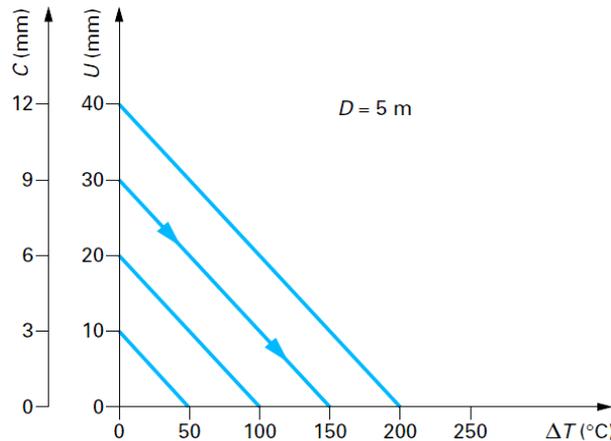


Figure II.14 : Écart de température maximal admissible en fonction du jeu à froid.

Conclusion

Pour maintenir une position finale optimale de four, et l'économie à long terme des usines de ciment, la surveillance de l'assemblage, l'alignement et l'ordre raisonnable des réglages s'avèrent une tâche laborieuse. La mesure et le positionnement du four rotatif est une activité qui s'oriente surtout vers la recherche d'une position optimale de toutes les pièces en rotation et fixes du four.

Chapitre III :

Modélisation et simulation numérique par solidworks

Introduction :

Pour mener à bien un projet technique, l'ingénieur doit concevoir puis dimensionner l'ouvrage de manière à fournir les plans nécessaires à sa réalisation. Très souvent, celui-ci utilisera un outil de calcul basé sur la méthode dite des éléments finis (FEM) dont l'utilisation s'est généralisée dans l'industrie depuis une vingtaine d'années.

Cette méthode, qui n'est pas uniquement dédiée aux problèmes de structures lui permettra de résoudre un éventail très large de problèmes structurels, thermiques, électromagnétiques, fluidiques, avec des aspects linéaires ou non linéaires, stationnaires ou transitoires.

La structure de ces codes comporte habituellement un préprocesseur, un ou plusieurs solveurs, un ou plusieurs post-processeurs. Le préprocesseur est une interface graphique permettant à l'utilisateur de décrire la géométrie et le type de problème à résoudre. Le ou les solveurs intègrent les bases des méthodes de résolution (linéaire ou non linéaire, stationnaire ou transitoire, etc.) spécifiques au cas étudié. Le ou les post-processeurs permettent de visualiser les résultats sous forme de courbes (évolution en fonction du temps, des charges, des déplacements, etc.) ou d'iso valeurs matérialisant le comportement de la structure par une échelle de couleurs variant du bleu au rouge généralement [23].

1 Les résolutions numériques :

La plupart des phénomènes physiques sont gouvernés par des équations différentielles partielles. Les méthodes numériques sont très utiles dans les résolutions des équations aux dérivées partielles, car la non linéarité de ces équations et la complexité de phénomènes rend leur résolution difficile par les méthodes analytiques. Les trois grandes méthodes numériques utilisées dans les codes tridimensionnels sont les méthodes suivantes :

1.1 La méthode des différences finies :

Consiste à discrétiser les équations continues aux nœuds d'un maillage prédéfini en calculant chaque dérivée partielle à l'aide de séries de Taylor tronquées pour obtenir des équations linéaires reliant la valeur des inconnues en un nœud aux valeurs de cas mêmes inconnues aux nœuds voisins.

1.2 Méthodes des volumes finis :

Développée à l'origine par « Patankar et Spandling », cette méthode des volumes finis, appliquée à la résolution des équations de Navier Stokes, a connu un essor important au cours des années 80, sa facilité de mise en œuvre, sa robustesse numérique et surtout par son rapprochement de la réalité physique. Pour toutes ces raisons, cette méthode est très utilisée dans les calculs numériques. C'est une méthode basée sur la formulation des équations de comportement sur chacune des faces des volumes jointifs, appelés volumes finis, le principe de la méthode consiste :

- A discrétiser le domaine physique en un ensemble de volumes de contrôle.
- A effectuer des bilans de masse et de quantité de mouvements sur ces volumes.

La méthode des volumes finis est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans tous les volumes finis ainsi dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation telle que le terme source. La méthode consiste à partager le domaine de calcul en

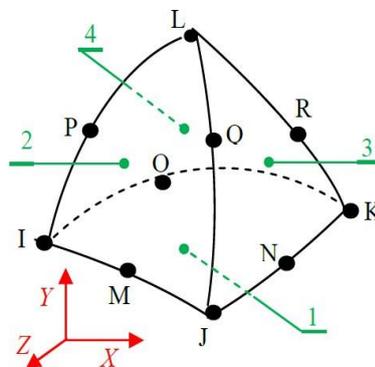
plusieurs volumes, où chaque volume entoure un nœud. En utilisant différents schémas d'approximations on peut intégrer les termes des équations différentielles sur chaque volume de contrôle, où les valeurs et les quantités sont stockées aux nœuds du volume de contrôle. Ces équations algébriques produites expriment la conservation des quantités pour le volume de contrôle et pour tout le domaine de calcul.

III.1.3 La méthodes des éléments finis :

La méthode des éléments finis est un outil de calcul numérique permet la résolution de certains problèmes physiques. Elle permet de déterminer la solution approchée dans le domaine spatial, cette solution peut être calculée en fonction de certaines équations et certaines conditions imposées. La méthode comprend la division du domaine spatial en petits éléments, également appelés grilles, et la recherche d'une formule simplifiée du problème sur chaque élément, c'est-à-dire la conversion de tout système d'équation linéaire. Chaque système d'équation linéaire peut être représenté par une matrice. Ensuite, rassemblez tous les éléments du système d'équation pour former une grande matrice. La résolution de ce système global donne une solution approximative au problème.

III.1.4 Préparation du maillage:

Le maillage n'influence pas uniquement sur la précision de solution, mais aussi au temps nécessaire à la convergence, donc temps de simulation. Le choix de type de maillage se fait en fonction de la géométrie et du problème physique à résoudre. Pour le four rotatif on choisit les éléments tétraédriques à 10 nœuds voir la figure



Les nœuds: I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R
 Les faces: 1(J-I-K), 2(I-J-L), 3(J-K-L), 4(K-I-L)

Figure III.1 : Élément tétraèdre quadratique iso-paramétrique à 10 nœuds.

III.2 description du problème

Durant le temps de fonctionnement normal, le four subit des déformations souvent situées dans les zones près des appuis de support. La virole dégage de la chaleur par convection à l'air entourant le four, par conduction aux autres pièces en contact (le bandage) et par rayonnement. Dans ce travail on étudie le comportement mécanique d'un four rotatif d'une cimenterie LafargeHolcim, on prend le cas où le four horizontal est en rotation, en négligeant l'inclinaison d'alignement et des différents régimes d'écoulement de matière à cuire. Le four ayant un poids de 700 tonnes animé par une vitesse de rotation depuis 0 tr/min jusqu'à 4 tr/min.

On procède à une simulation numérique dans le logiciel solidworks pour déterminé la répartition des contraintes, déformations mécaniques et la fléché de flexion pour notre four (brique réfractaire, ensemble des véroles) ainsi, on cherche à étudier l'efficacité de positionnement des appuis qui supporté le four. Les dimensions du domaine étudié et les caractéristiques des matériaux sont représentés au tableau III.1.

Caractéristique	Valeur	Unité
Longueur	80	Mètre
Diamètre de four	5	Mètre
Nombre d'appui	3	/
Inclinaison	4	Dgrée
Angle d'alignement des galets	30	Degrée

Tableau III.1 : caractéristique du four rotatif.

Les différentes caractéristiques physiques, et mécaniques de l'acier de la virole E24.2 et le brique réfractaire du four étudié sont résumées dans les tableaux III.2 et III.3

Propriété d'acier E24.2	Valeur	Unité
Module d'élasticité	2.100000031 e+011	N/m ²
Module de cisaillement	7.9e+010	N/m ²
Coefficient de Poisson	0.28	/
Masse volumique	7800	kg/m ³
Limite de traction	420000000	N/m ²
Limite d'élasticité	275000000	N/m ²

Tableau III.2 : Les caractéristiques de virole.

Propriété de brique réfractaire	Valeur	Unité
Conductivité thermique	1.629	W/ (m·°C)
Masse volumique	3000	kg/ m ³
Module de Young	8	GPa
Epaisseur	200	mm

Tableau III.3 : Les caractéristiques de brique réfractaire.

La figure III.2 montre que le four étudié comporte un ensemble des viroles soudées l'une avec l'autre et la brique réfractaire placée à l'intérieur du four comme un revêtement de protection (modélisation avec solidworks) .

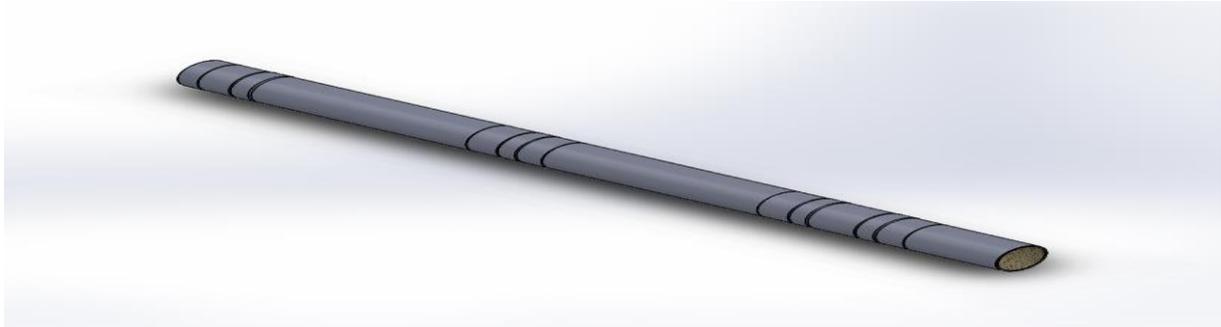


Figure III.2: four rotatif de cimenterie.

L'étude est basée sur une analyse des contraintes et déformation à partir de l'application des différentes forces sur le four, on prendre les charge selon la variation de débit et le croûtage, faisant ainsi, on se permet de faire une comparaison entre les essais en se basant sur les résultats obtenus.

III.3 Formulation de l'équation de la charge du four :

Nous nous proposons de déterminer des différentes charges dans le four ainsi que la production d'un four à ciment de 7000 t/j dont le diamètre nominal 5m et la longueur de 80m, déduits des considérations du processus sont :

- Charge linéaire du maçonnerage réfractaire par l'équation (II.1) avec :
 h: hauteur de la brique en mm (dépend du diamètre du four)
 ρ : Masse volumique de la brique réfractaire ($\rho = 3 \text{ t/m}^3$)

- Charge linéaire du croûtage par l'équation (II.15) avec :
 h': hauteur du croûtage en mm ($h' \sim 80 \text{ mm}$)
 ρ : Masse volumique du croûtage ($\rho' \sim 3000 \text{ kg/m}^3 = 3 \text{ t/m}^3$)

- Charge linéaire de matière par l'équation (II.16) avec :
 Taux de remplissage du four est égal 0.14
 ρ'' : Masse volumique du clinker ($\rho'' \sim 1700 \text{ kg/m}^3 = 1.7 \text{ t/m}^3$)

- Charge linéaire de la virole du four par l'équation (II.17) avec :
 ρ : Masse volumique de l'acier en t/m^3 ($\rho''' = 7,85 \text{ t/m}^3$)

- La charge linéaire totale est donc la somme des charges par l'équation (II.18).

Charge linéaire tonnes /mètre N

du maçonnerage réfractaire	9.42	$7.4 \cdot 10^6$
du croûtage	3.46	$2.7 \cdot 10^6$
de matière	4.69	$3.7 \cdot 10^6$
de la virole	4.00	$3.2 \cdot 10^6$
Totale	21.57	$17 \cdot 10^6$

Tableau III.4 : les charges applique sur le four.

III.4 Mise en œuvre de la simulation dans solidworks :

III.4.1 Présentations du logiciel solidworks :

Le logiciel SOLIDWORKS est un modeleur volumique permettant de créer des pièces complexes en 3 dimensions. Ces pièces peuvent être ensuite utilisées pour créer des mises en plan en 2D et des assemblages de plusieurs pièces entre elles. SOLIDWORKS est un système à cotation piloté. On peut spécifier des cotes et rapports géométriques entre les éléments. Un changement de cote entraîne un changement de taille de la pièce, tout en préservant l'intention de conception.

III.4.2 Les avantages de la simulation numérique :

- La simulation numérique permet la réduction du temps de la conception (design) et du développement d'un projet donné.
- On peut aussi tester un large éventail de conditions très difficiles.
- L'avancement spectaculaire de l'informatique a fait que les calculateurs deviennent de plus en plus performants en vitesse de calcul et capacité de stockage des données.
- Des simulations plus précises et complètes pour atteindre les objectifs de qualité produit.
- En simulation numérique l'obtention de toutes les variables dans la totalité du domaine de calcul est réalisée avec un minimum d'efforts.

III.4.3 Modélisation dans solidworks :

Pour analyser le problème du comportement mécanique d'un four rotatif de cimenterie, il faut tout d'abord calculer les différentes charges en état de fonctionnement normal.

Dans la première étape, il faut choisir un modèle simple. Le module de calcul de la mécanique dans solidworks est le structure statique. Ce programme à rendement élevé et d'usage universel de mécanique de structure qui a été appliqué pour résoudre des problèmes mécanique. MÉCHANICAL et sa technologie avancée permettent de réaliser des solutions fiables et précises.

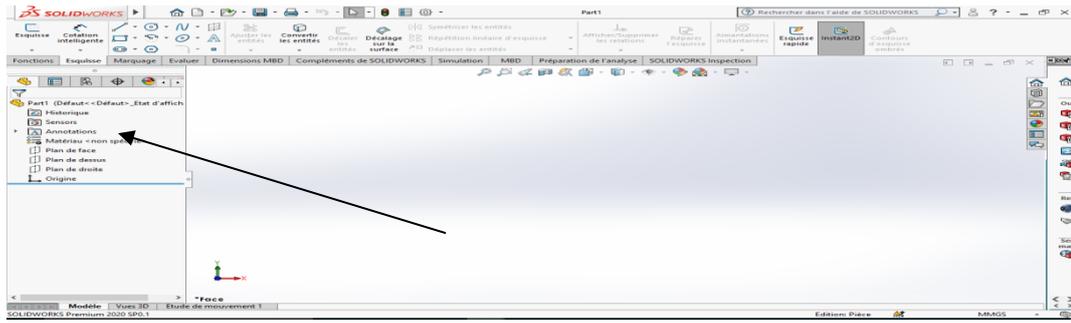


Figure III.3 : présentation d'espace géométrique du solidworks

On pouvait s'y attendre, il a été conclu qu'un maillage trop fin serait augmenter de façon exponentielle le temps de calcul de l'analyse et un maillage trop grossiers serait sacrifier l'exactitude des résultats. Et il y a toujours un intervalle où la précision de la solution est acceptée, donc le raffinement du maillage qui donnera toujours une précision à l'intérieur de l'intervalle serait une perte du temps.

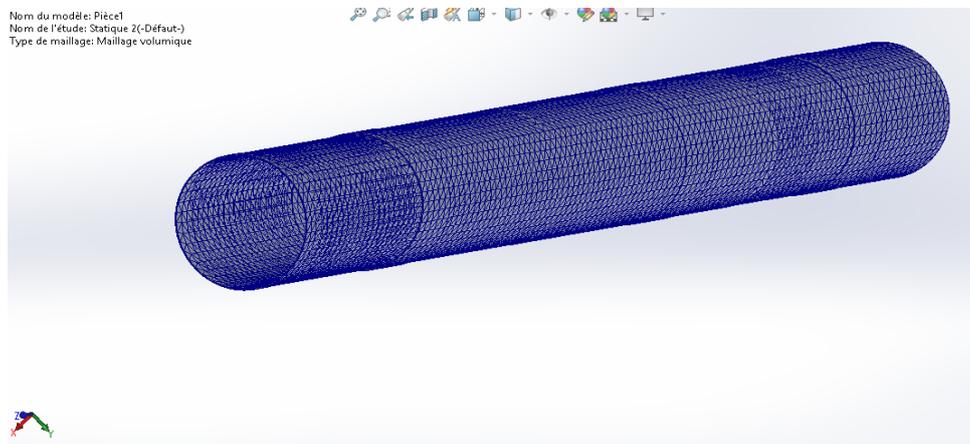


Figure III.4: Maillage tétraédrique du four.

	Élément	Nœud
Four (ensemble)	52769	181023

Tableau III.5 : Paramètres de maillage.

III.4.4 Condition aux limites dans SOLIDWORKS :

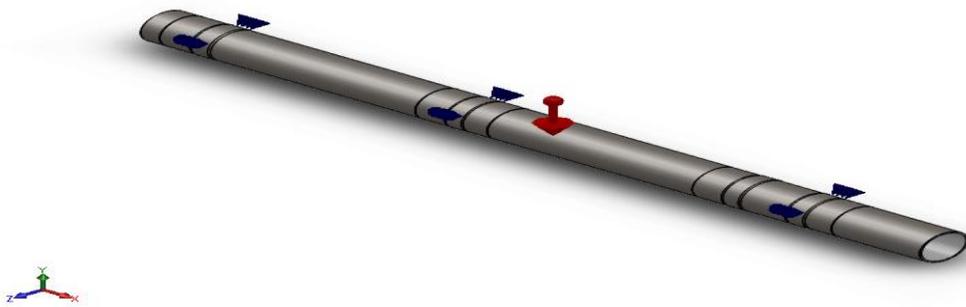


Figure III.5 : Représentation des force appliquées sur la virole a vide

III.4.4.1 Premier cas :

La figure (III.6) présente le modèle géométrique avec les conditions aux limites pour faire une étude globale sur le comportement mécanique du four. Une fois déclarée la gravité terrestre, la charge de l'ensemble des viroles et le brique réfractaire est calcul automatiquement par logiciel. Dans le cadre de cette simulation, la virole et le brique sont considérée comme étant isotrope, linéaire élastique. Les conditions aux limites sont :

- La vitesse de rotation du four de 4 tr/m ;
- La gravité terrestre de 9.81 m/s^2 ;
- La charge de la couronne d'entraînement de 20000N ;

Les trois appuis considérés comme des supports cylindriques

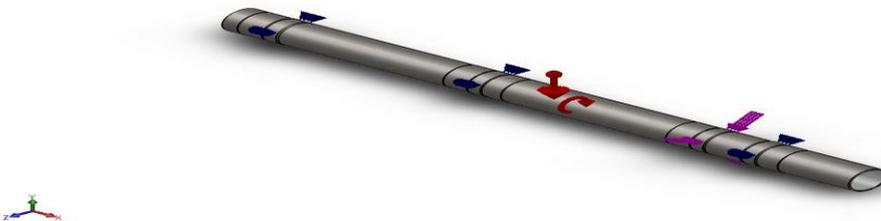


Figure III.6: Représentation de chargement sur le four de 1^{er} cas.

III.4.4.2 deuxième cas :

La figure (III.7) présente le modèle géométrique et le chargement mécanique appliqué sur le four. Les conditions aux limites sont :

- La vitesse de rotation du four de 4 tr/m ;
- La gravité terrestre de 9.81 m/s^2 ;
- La charge de la couronne d'entraînement de 20000N ;
- Les trois appuis considérés comme des supports cylindriques ;
- La charge de croutage de valeur de 2.7 MN ;

La charge de la matière introduite dans le four est égale 3.7 MN

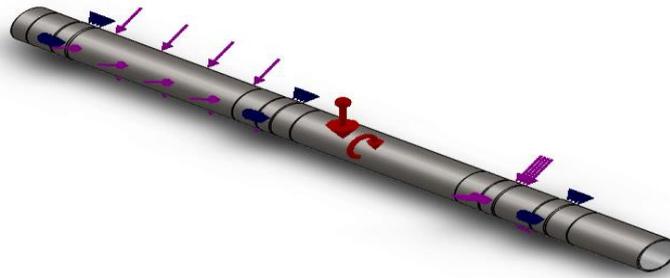


Figure III.7 : présentation des conditions aux limites de 2^{ème} cas.

III.4.4.3 Troisième cas :

Par la présente analyse, on va tenter de voir l'effet de la température sur l'évolution de l'équipement ainsi que la vitesse de rotation et les charge appliqué sur la virole de notre four sont les mêmes charges de deuxième cas, ce qui complique de plus en plus cette étude :

- La vitesse de rotation du four de 4 tr/m ;
- La gravité terrestre de 9.81 m/s² ;
- La charge de la couronne d'entraînement de 20000N ;
- Les trois appuis considérés comme des supports cylindriques ;
- La charge de croutage de valeur de 2.7 MN ;
- La charge de la matière introduite dans le four est égale 3.7 MN ;
- Une variation d'épaisseur du croutage (50,100, 200, 300 mm).

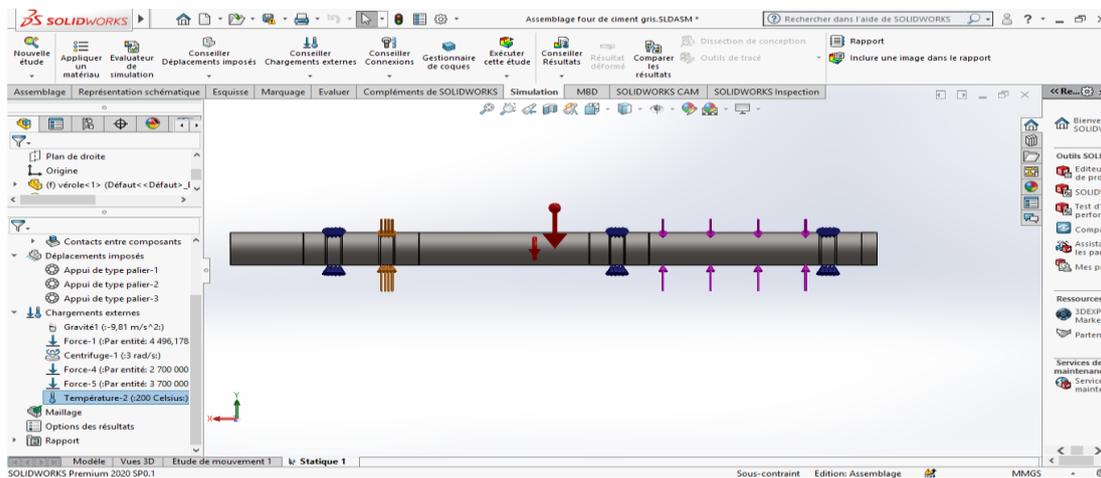


Figure III.8 : présentation des conditions aux limites de 3^{ème} cas

III.4.4.4 Quatrième cas :

La figure (III.9) présente les conditions aux limites thermiques..Dans le cadre de cette simulation, les viroles, le croutage et les briques réfractaires sont considérés comme étant isotrope. Les conditions aux limites sont :

- La vitesse de rotation du four de 4 tr/m ;
- La gravité terrestre de 9.81 m/s^2 ;
- La charge de la couronne d'entraînement de 20000N ;
- Les trois appuis considérés comme des supports cylindriques ;
- La charge de croutage de valeur de 2.7 MN ;
- La charge de la matière introduite dans le four est égale 3.7 MN

- Le champ de température dans chaque zone :
 - ✓ [800°C-1100°C] : zone de calcination .
 - ✓ [800°C-1250°C] : zone de transition.
 - ✓ [1250°C-1450°C] : zone de clinkérisation.
 - ✓ [1450°C-1250°C] : zone de refroidissement .

Conclusion :

La définition du model est l'étape la plus importante pour résoudre un problème d'ingénierie, en effet il faut bien le simplifier autant que possible afin qu'on soit capable de le résoudre avec les outils dont on dispose. On cherche un modèle le plus simple possible et qui simule au mieux le cas réel.

Chapitre IV :

Résultats et discussion

Introduction :

L'étape la plus importante de cette étude est l'interprétation des résultats. Comme première phase de notre travail, il est impératif de passer par une validation. Ensuite en va aller vers l'étude d'autres cas ou en a remarqué l'influence des différents paramètres de notre système à savoir l'effet de changement de chargement et la température.

Cette distinction permet d'examiner les résultats en vue d'application pratique.

Les conclusions qui en découlent peuvent ensuite être transposées à l'échelle de la structure pour répondre à la problématique industrielle posée.

Les cas cités aux préalables vont être étudiés et interprétés par la mise en évidence par la distribution des contraintes pour les quatre cas définis dans le chapitre III.

- 1^{er} cas : On simule le four sous son propre poids animé par une vitesse de rotation de 4 tr/min.
- 2^{ème} cas : On ajoute les différentes charges (croustage) avec une vitesse de rotation constante (4tr/min).
- 3^{ème} cas : On applique les différentes charges (croustage et matière) avec une vitesse de rotation constante avec une variation d'épaisseur du croustage .
- 4^{ème} cas : On applique les différentes charges du 3^{ème} cas et on ajoute des charges thermique interne sur la virole du four .

IV.1 Discussions des résultats :

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus par la simulation numérique réalisée sous Solidworks, avec la représentation de la répartition des contraintes équivalentes, les déplacements totaux, la déformation élastique le long du four.

IV.2 Premier cas :

On sait que dans n'importe quel four rotatif, il y a deux zones critiques, qui sont représentées sur la figure IV.1, la première zone c'est celle qui est située au niveau des appuis (bandage) tandis que la deuxième zone est celle existant entre l'appui 1 et l'appui 2 à cause de la distance qui dépasse 40,8 % entre eux, équivalente de 32.64 m.

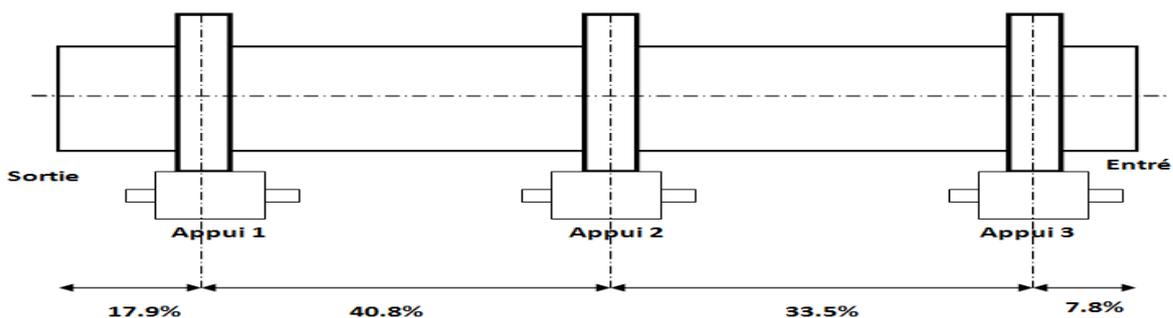


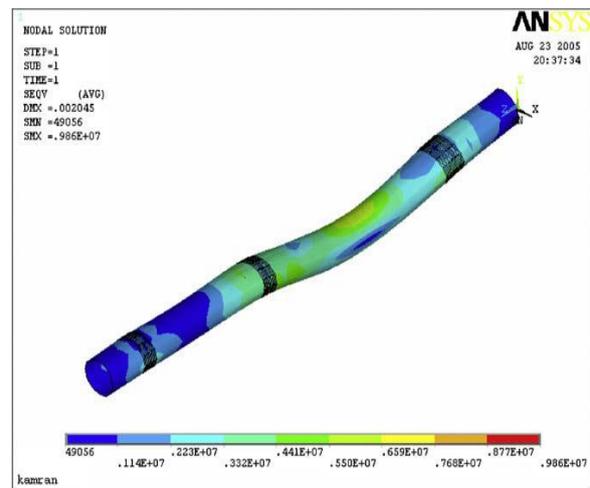
Figure IV.1 : Représentation des zones critiques dans un four rotatif.

IV.2.1 La validation :

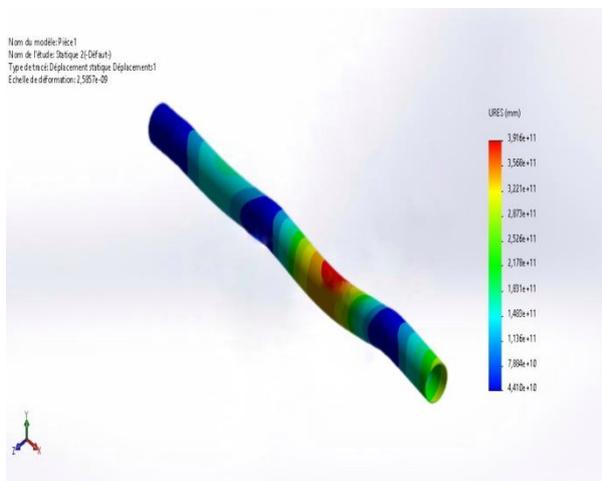
Pour assurer la validité du modèle numérique on utilise la méthode des éléments finis, nos résultats montrés ci-dessous ont été comparés avec ceux de K.PAZAND [20] qui sont présentés

sur la figure IV.2.A on constate que Les résultats de notre simulation sont proche a celle de PAZAND.

L'autre figure (A) (notre cas d'étude) montre la distribution de contrainte équivalente de Von-Mises sur la surface externe de la virole du four. On distingue que la contrainte equivalente varie de 4.410 MPa jusqu'à 13.41 MPa, la valeur maximale est positionnées au niveau de l'appui 1. On remarque que la distribution des contraintes sont plus importantes dans la premier zones déjà cité à savoir le tronçon situé entre l'appui 1 et l'appui 2 tandis que le tronçon qui se trouve entre l'appui 2 et l'appui 3 et relativement moins sollicité. Par contre au niveau des zones en amont et en aval la contrainte prend la valeur minimale.



A



B

Figure IV.2 : présentation des contraintes équivalentes (Von Mises) A étude PAZAND, B notre cas.

Pour les mêmes conditions de chargement avec ceux de PAZAND, on a déduit la distribution des contraintes suivant le critère de Von Mises. La figure IV.2, montre qu'une concordance dans la répartition des contraintes sur le système étudié à savoir le four rotatif. La différence réside au niveau de la contrainte maximal qui est de 13.33 MPa pour notre cas d'étude tandis

que celle de PAZAND est de 9.86 MPa. Le comportement des deux fours sont compatible sauf quelle que différence liée à :

- La géométrie du four : dans notre cas la longueur du four est de 80 m et diamètre intérieur de 5 m, par contre le four dans le cas de Mr Pazand de longueur de 71.5 m et diamètre de 4.8 m ;
- Caractéristiques physique de brique réfractaire ;
- Certaines conditions aux limites.

IV.2.2: l'évolution de la contrainte mécanique du four :

l'évolution de la contrainte mécanique le long du four est sollicitée au niveau des appuis travaille en compression et en traction, près des zones d'appui il y'a concentration de contraintes.

Après une distance de 5m les contraintes augmentes de forme de pic dans les trois modes des contraintes (contrainte maximal de 0.8MPa, contrainte minimal de 0.5MPa et contrainte de Von Mises valeur de 1.5MPa).

Au niveau de la couronne la contrainte équivalente prend la valeur maximale de 2MPa, qui est dû au poids de la couronne. Les contraintes maximale et minimal atteignent le maximum de 1.3 MPa dans le tronçon situé entre 40 m et 60 m, à cause de l'épaisseur de 30 mm utilise dans cette zone de la virole.

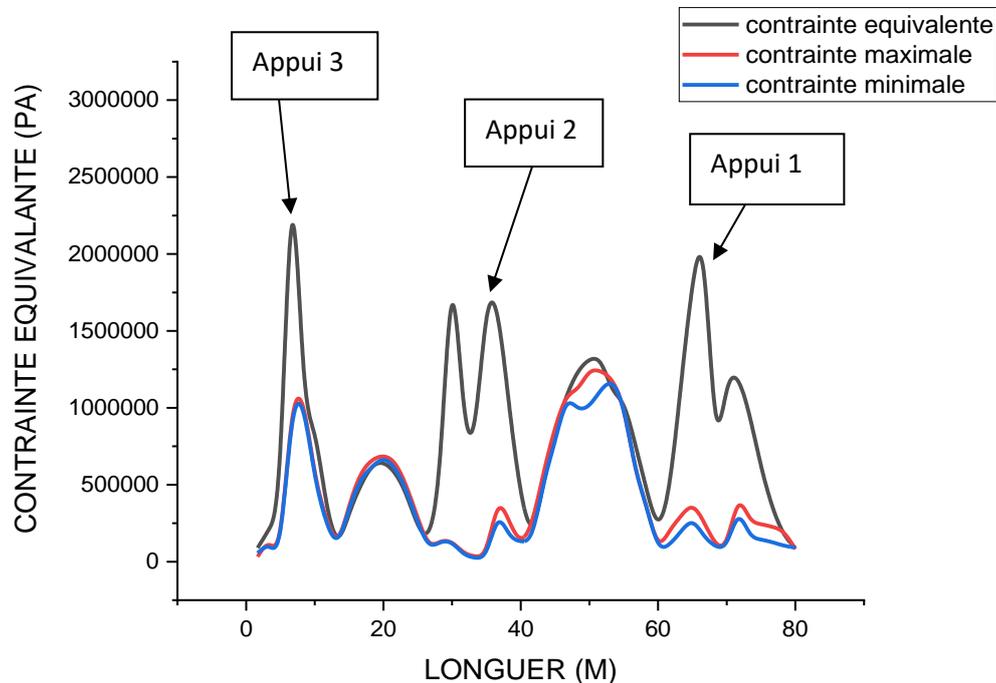


Figure IV.3 : La variation du champ de la contrainte mécanique

La figure IV.4 montre la distribution de contrainte équivalente (Von-Mises) sur la surface

externe de la virole du four jusqu'à 14 MPa, la valeur maximale des contraintes de Von Mises est positionnées au niveau de l'appui 2. On remarque que les contraintes sont plus élevées dans le tronçon qui se trouve entre l'appui 1 et l'appui 2. Par contre au niveau des zones en amont et en aval la contrainte prend la valeur minimale 4127 Pa.

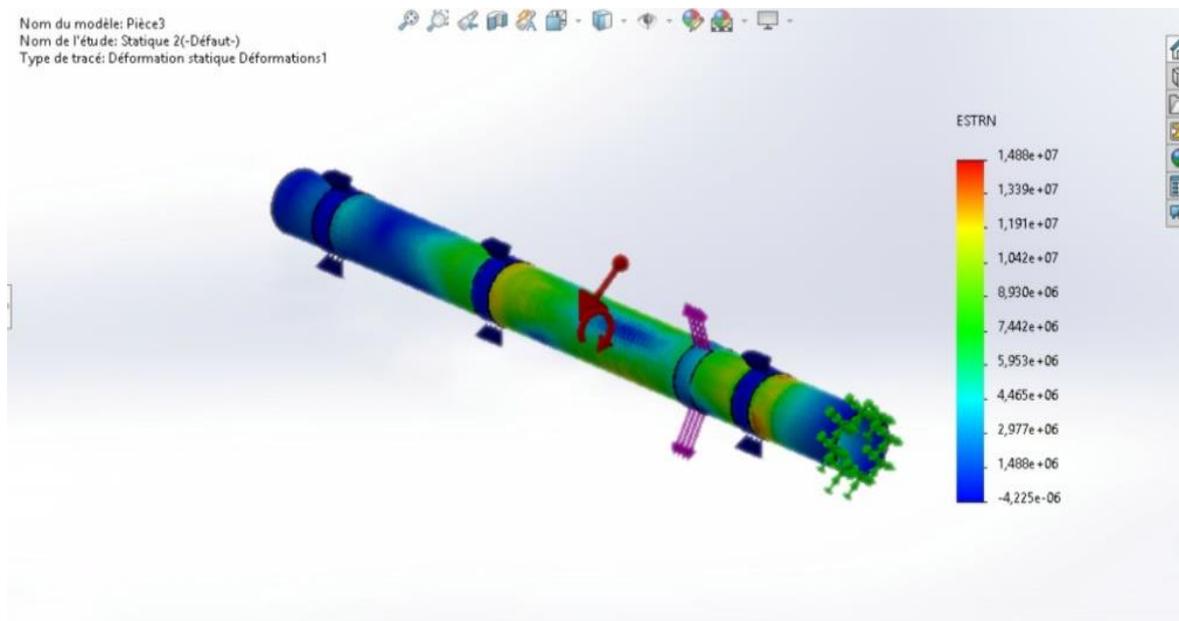


Figure IV.4 : présentation des contraintes maximales.

IV.2. 3 La déformation élastique :

La figure IV.5 et IV.6 montrent que la déformation élastique le long du four est très importante près des appuis au niveau des stations des roulements d'une valeur de 0.004886m que dans les autres zones, parce que la concentration des contraintes est très élevée à cause la pression et l'effet de rotation.

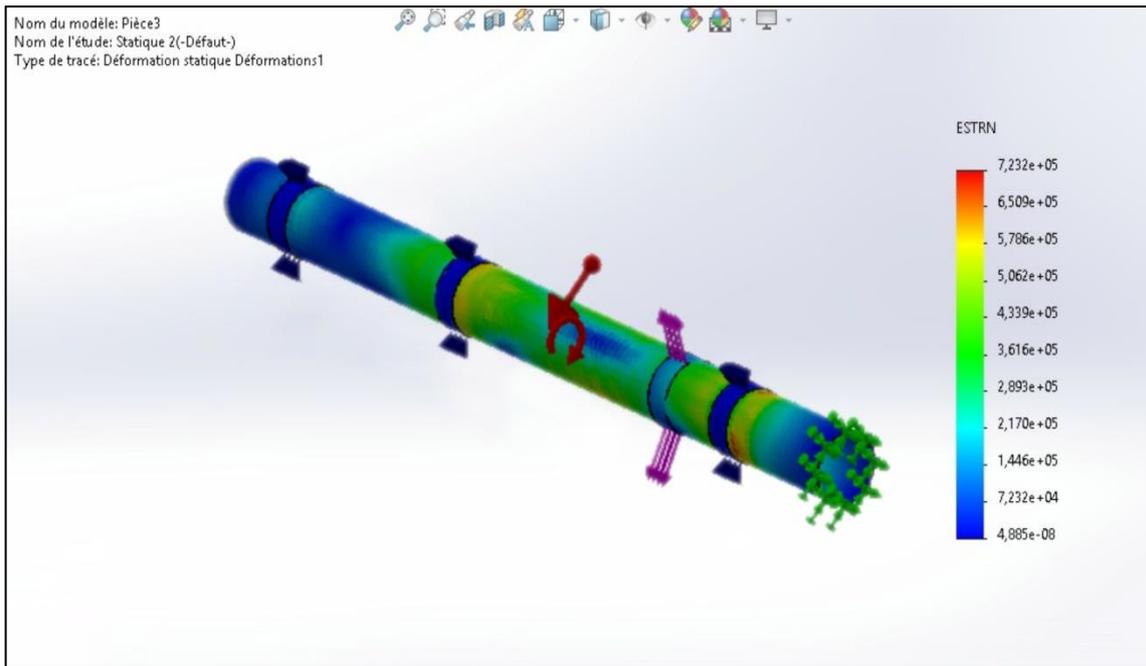


Figure IV.5 : représentation de la déformation élastique équivalente.

Les figures IV.6 montrent que la déformation évaluée au niveau des trois stations des roulements et la couronne d'entraînement causée par la force de compression appliquée par le poids du four. La plus grande déformation est enregistrée suivant la direction de chargement en compression et flexion c'est-à-dire suivant Y (5×10^{-5} la valeur max) au niveau des stations de roulement. On remarque que les zones plus déformées sont les zone de faible épaisseur (depuis 40 m jusqu'à 60 m) et au niveau des supports (7 m appui 1, 32.5 m appui 2, 69 m appui 3) et la couronne d'entraînement (65 m).

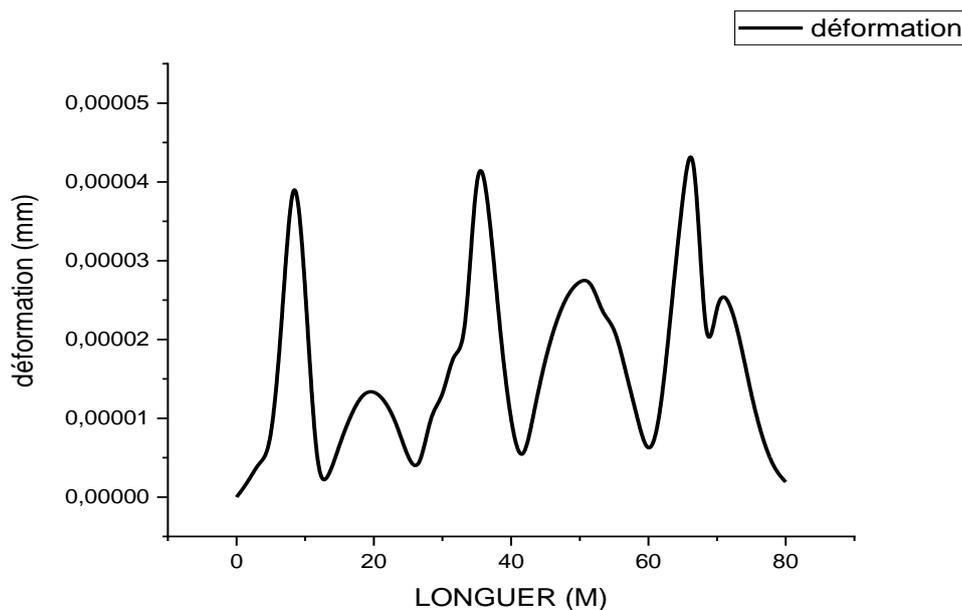


Figure IV.6 : Variation de la déformation élastique équivalente.

IV.2.4 Le déplacement :

Dans les figures IV.7, IV.8 présentent respectivement les déplacements enregistrés suivant le cas de chargement.

La figure IV.7 montre que le champ de déplacement augmente entre l'appui 1 et l'appui 2 dans le cas où la virole dans un état de flexion, d'une valeur maximale de 1.31 mm. Par contre dans les autres zones, le déplacement diminue jusqu'à d'une valeur de 0.006578 mm. Ce qui est logique par rapport aux conditions de fonctionnement du four de ciment.

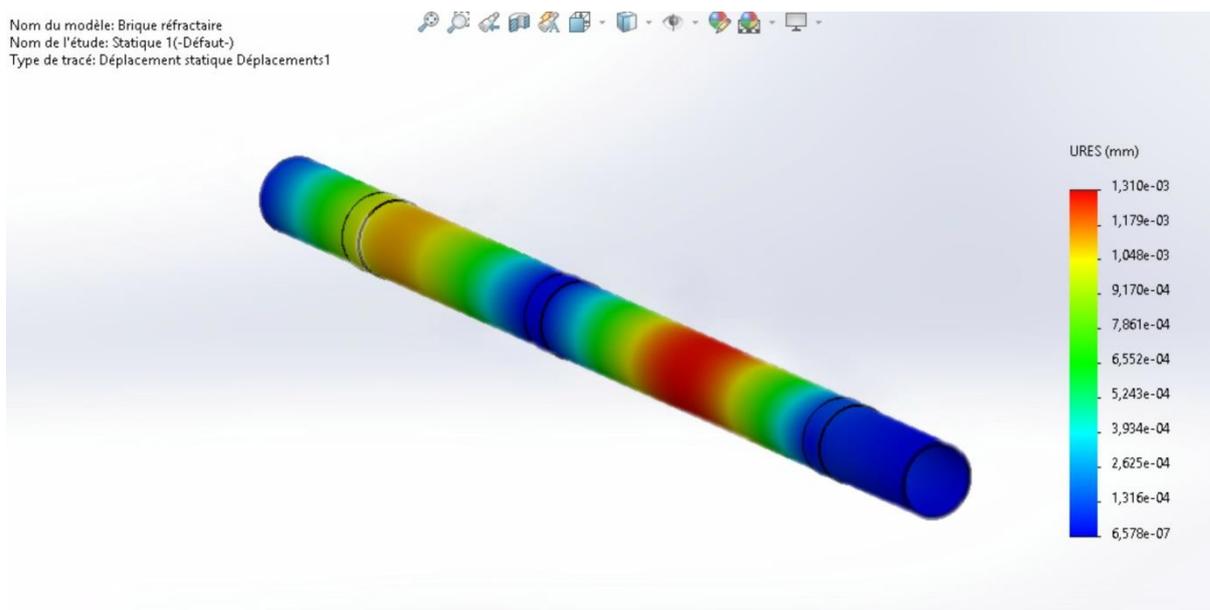


Figure IV.7 : représentation du déplacement total du four.

La courbe de la figure IV.8 représentative du déplacement total le long de four, elle peut être en trois zones :

- 1^{er} zone : en aval du fou déplacement total est très faible valeur de 0.12 mm, a cause de la longueur (7 m) et l'épaisseur de la virole de 38 jusqu'à 50 mm utilisé dans se tronçon, par contre en amont du four le déplacement devient important 0.8 mm.
- 2^{ème} zone : au niveau des appuis le déplacement est presque nul de valeur de 0.06 mm, les appuis sont de zones qui supporte le poids du four.
- 3^{ème} zone : entre les appuis, on remarque que la flèche dépend a la distance entre les appuis. Concernant la distance entre les appuis 3 et 2, la longueur entre les deux 26.8 m et le déplacement total 1.5 mm, et entre les appuis 2 et 3 la distance est égale 33.5 m et le déplacement égale a 1.3 mm.

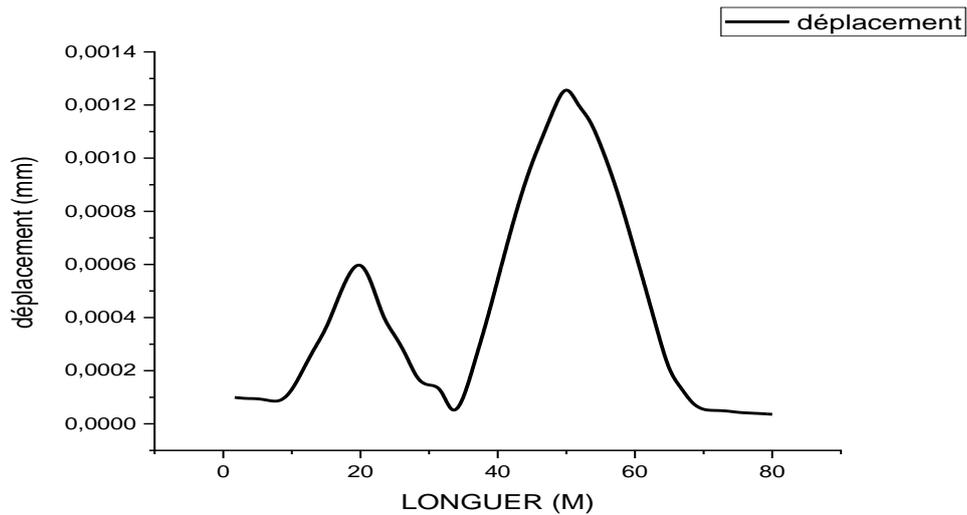


Figure IV.8 : La variation de déplacement total au long de four.

IV.3 Deuxième cas :

Compte tenu des résultats de comparaison précédente, nous avons voulu voir l'effet d'un autre paramètre, qui est la température. elle joue un rôle très important dans le comportement mécanique du virole.

IV.3.1 Les contraintes mécaniques :

La figure IV.9 montre la distribution de contrainte équivalente de Von-Mises sur la surface externe de la virole du four,

La contrainte équivalente varie de 3200Pa jusqu'à 15MPa, la valeur maximale des contraintes équivalentes positionnées au niveau des appuis. On remarque que les valeurs des contraintes sont plus élevées dans l'appui 1 et l'appui 2 valeur de 7.6MPa . Par contre au niveau des zones en amont et en aval la contrainte prend la valeur minimale.

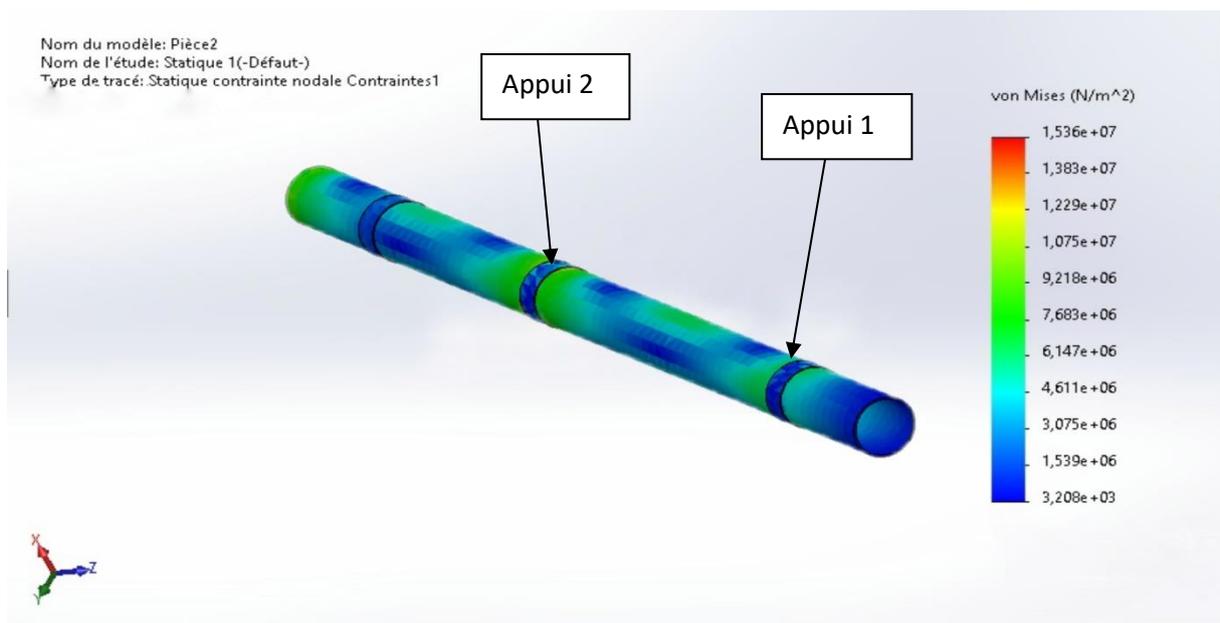


Figure IV.9 : présentation des contraintes équivalentes.

La figure IV.10 montre l'évolution des contraintes en fonction de la longueur du four et avec les conditions aux limites de deuxième cas, c'est-à-dire le four en plein charge. Exactement comme dans le cas précédent courbe de la figure IV. 3 on remarque qu'à la distance $L=7\text{m}$, la contrainte équivalente atteint son maximum de 3MPa . La contrainte maximale est de 1.1MPa , cette valeur liée a la nouvelle charge de croutage .

Au niveau de l'appui 2 (35m) la concentration des contraintes devient moins importante que les autres appuis et la couronne.

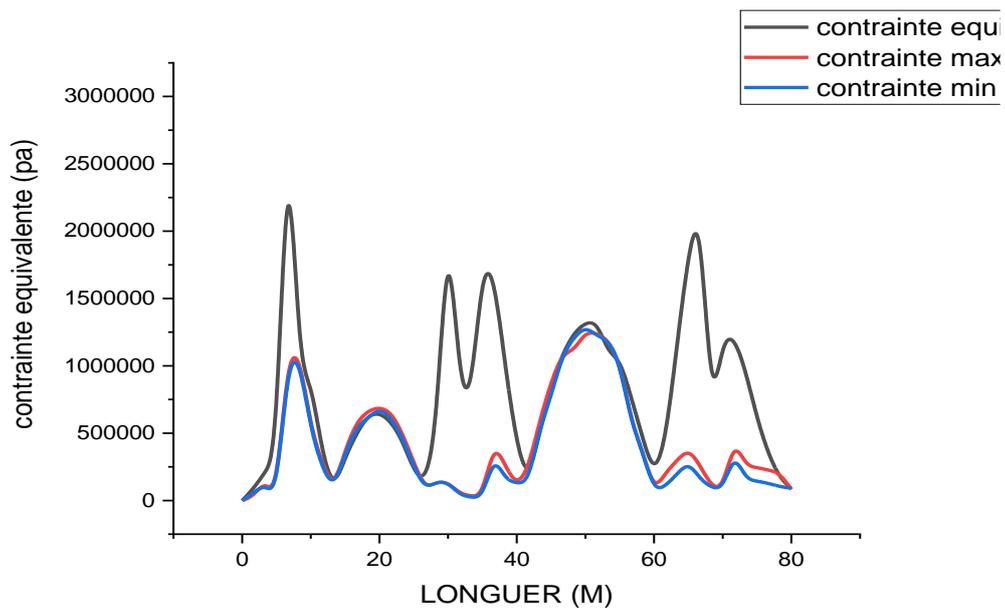


Figure IV.10 : l'évolution des contraintes mécanique applique sur la virole.

IV.3.2 La déformation élastique :

La déformation élastique de la virole présentée au figure IV.11 concerne uniquement les déformations produites par un chargement mécanique.

Les déformations partagées de façon logique et acceptable, elles atteignent la valeur maximale $8.5 \text{ E-}5\text{mm}$ au niveau des appuis sous l'effet de pression, et la valeur minimale en amont et en aval du four.

Déformation maximale

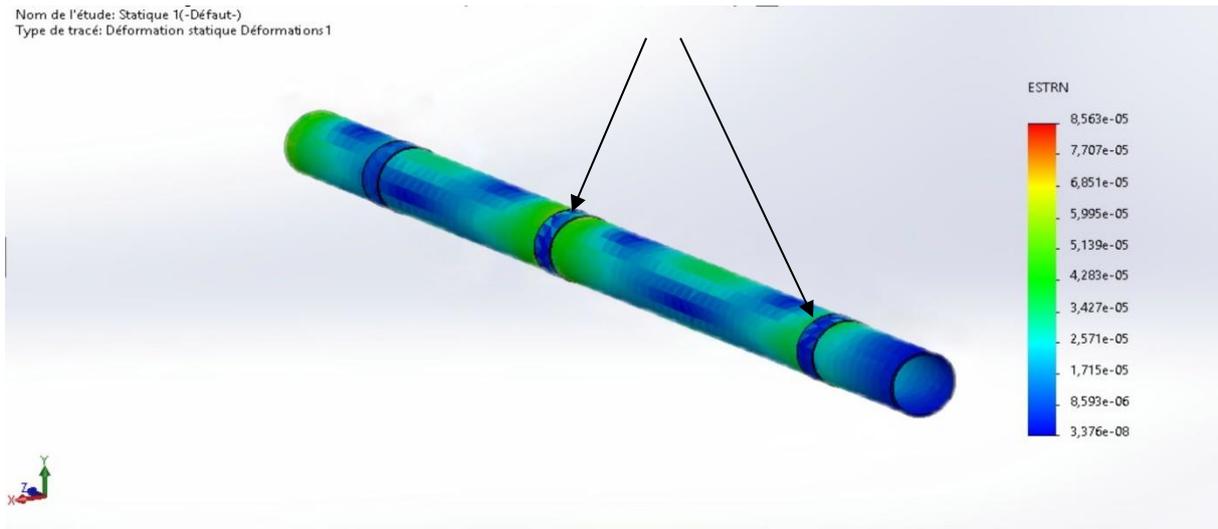


Figure IV.11 : présentation des déformations élastique équivalentes.

La figure IV.12 présente les déformations élastique total dans le cas de chargement normal de four. La figure montre que les déformations sont très importantes par rapport a le premier cas sur les appuis sous forme de déformation en compression d'une valeur de 0.000067mm et entre les appuis sont déformée en flexion d'une valeur de 0.0000337mm. Cette augmentation lie par les chargements additifs de croutage et matière (cru), la déformation élastique dans notre cas est une ovalisation de virole au niveau des stations de roulement.

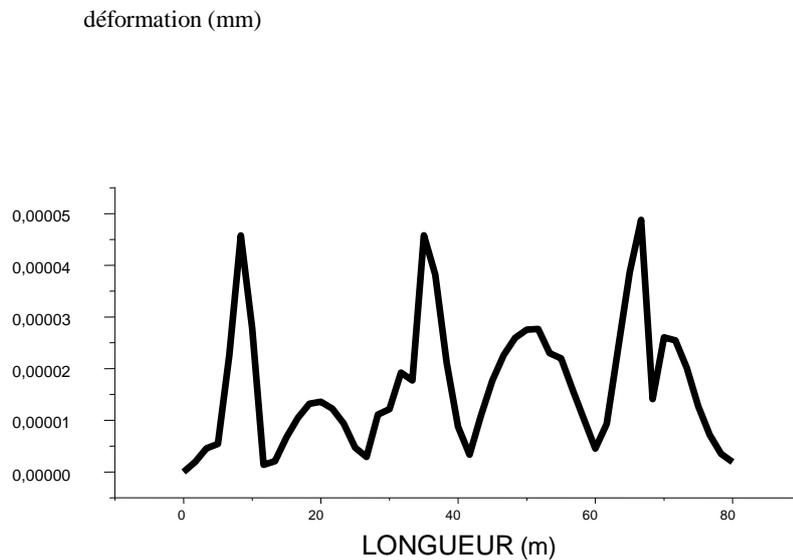


Figure IV.12 : l'évolution de la déformation élastique équivalente.

IV.3.3 Le déplacement :

La figure IV.13, présente les déplacements enregistrés suivant le cas de chargement. le champ de déplacement augmente à entre l'appui 1 et l'appui 2 dans le cas où la virole est dans un état de flexion, d'une valeur maximale de 1.5 mm. Par contre dans les autres zones, le déplacement

diminue jusqu'à d'une valeur de à 0.004404mm. Ce qui est logique par rapport a l'échelle industrielle.

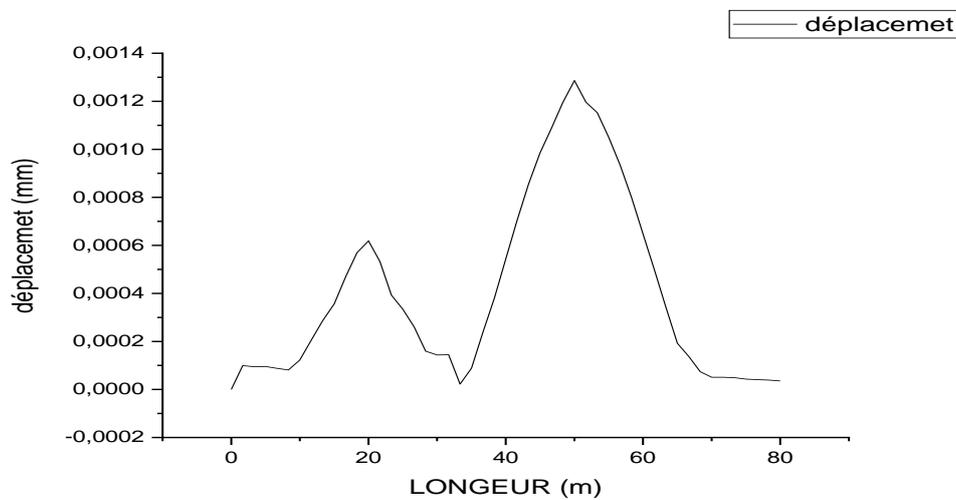


Figure IV.13 : La variation de déplacement total.

les mouvements horizontaux sont forcément nuls en raison de l'absence de charge dans cette direction. Le système à résoudre se réduit donc au terme de flexion .

IV.4 Troisième cas :

Compte tenu des deux cas de simulation précédente, nous avons tenu à en réaliser une troisième avec une condition thermique permettant d'obtenir les déformations et les déplacements (flexion) de virole.

IV.4.1 La déformation élastique :

une variation d'épaisseur du croutage été proposées (50, 100, 200, 300 mm). La déformation (déformation élastique équivalente) a été variable le long de four. La figure IV.14 exprime l'évolution de la déformation à différentes épaisseurs, avec des chargements bien définies.

En remarque que la déformation est très importante, au niveau de l'appui 3 avec une valeur de 0.0025mm. Donc, on constate simplement un effet très net du variation d'épaisseur du croutage sur la virole.

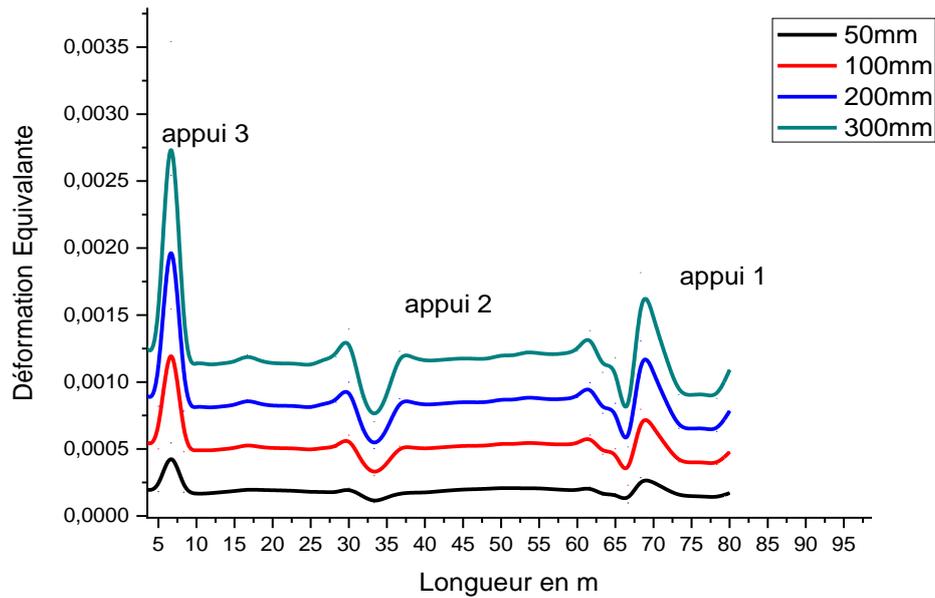


Figure IV.14 : l'évolution de la déformation équivalente.

Les déformations élastiques sont également produites par des changements de température, la vitesse de rotation, la charge de matière et le croutage introduit dans le four. Une variation d'épaisseur dans un matériau produit des contraintes mécaniques et changement des caractéristiques de module d'élasticité. Les paramètres physiques appropriés pour quantifier ces phénomènes, sont les coefficients de dilatation thermique et le module de Yong.

IV.4.2 Le déplacement :

La figure IV.15 représente le déplacement total pour un four. On observe que le déplacement dépend de l'épaisseur du croutage , dans chaque cas en varie l'épaisseur du croutage, le déplacement total en amont et entre les appuis augmente, on conclut que la variation d'épaisseur du croutage influe sur le comportement de la virole.

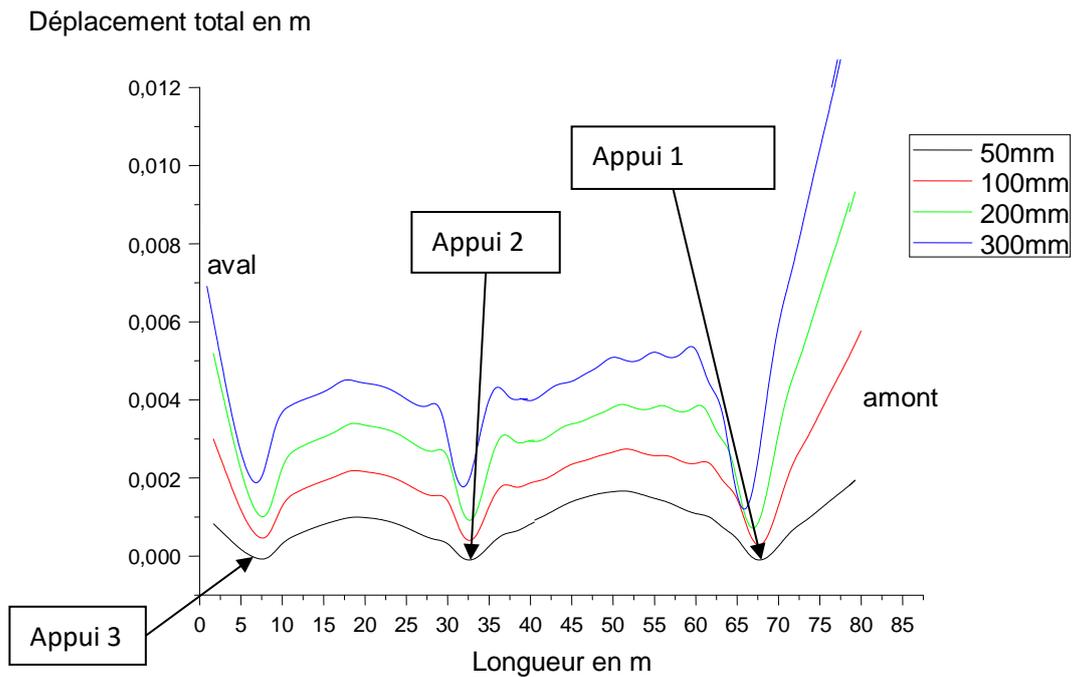


Figure IV.15 : présentation de déplacement en fonction de température.

Concernant le déplacement directionnel (figure IV.15), nous avons représenté l'évolution de la flèche en amont, entre les supports (appui 1 et 2, appui 2 et 3) et en aval dans une direction horizontale et perpendiculaire à l'axe de rotation dans la même direction des forces appliquées (O, Y). Il s'avère que les déplacements sont plus importants :

- On remarque que le déplacement entre l'appui trois et deux est moins important que les autres zone, a cause des caractéristiques géométriques (distance de 28.5 m et épaisseur de la virole est égale a 30 mm) a chaque fois qu'on augmente l'épaisseur du croutage précédente le déplacement va augmenter.
- La figure IV.15 montre que le champ de déplacement augmente en amont du four à partir de 70 m de la longueur du four où la virole est dans un état de flexion, d'une valeur maximale correspond à l'épaisseur de 300 mm est de 12 mm dans l'amont du four.

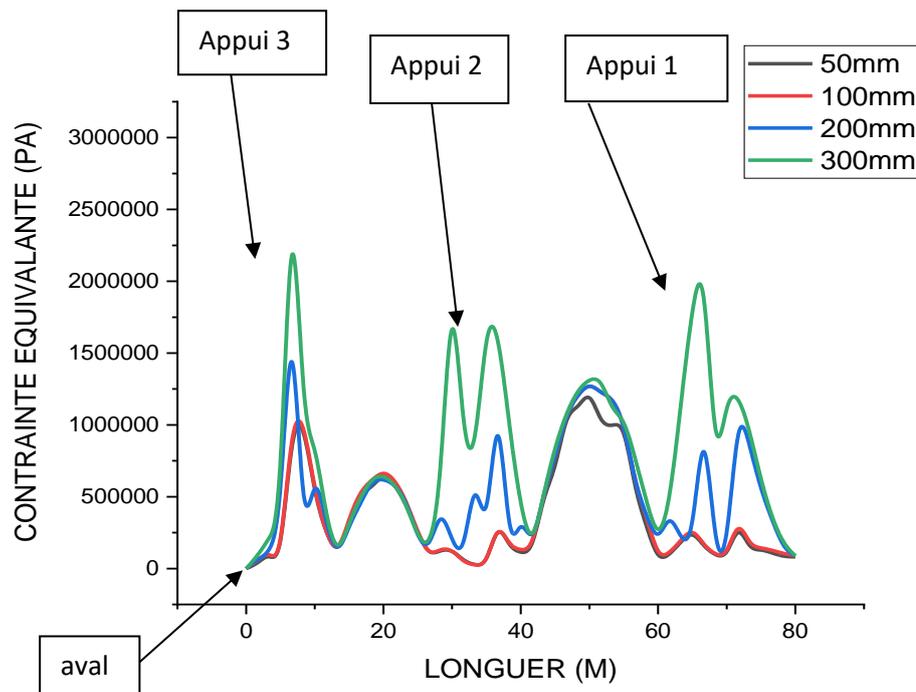


Figure IV.16 : présentation des contraintes équivalentes en fonction d'épaisseur du croutage.

Nous avons remarqué le changement d'épaisseur du croutage influe sur le comportement du four et l'évolution de la contrainte équivalente suivante (O, Y).

En premier lieu, différentes épaisseurs du croutage ont été proposées (50 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm). La contrainte mécanique équivalente (Von-Mises) qui varie le long de four. La figure IV.16 exprime l'évolution de la contrainte pour différentes épaisseur du croutage , avec des conditions bien définies.

En remarque que la contrainte augmente au niveau des zones de faible épaisseur et en aval de four. Donc, on constate simplement un effet très net de l'épaisseur de croutage sur le comportement élastique de l'ensemble des viroles. Aussi, on peut dire que la contrainte suit la même variation pour les quatre épaisseurs. La contrainte est maximale au niveau des trois appuis.

IV.5 Quatrième cas :

Cette simulation est basée en principe sur un couplage thermomécanique en commençant à l'entrée par les conditions d'origine thermique, puis nous insérons les conditions mécanique précédente.

La figure IV.17 montre la variation de la température en fonction de la longueur du four.

La figure IV.18 montre la variation de la déformation et le déplacement en fonction de la longueur du four.

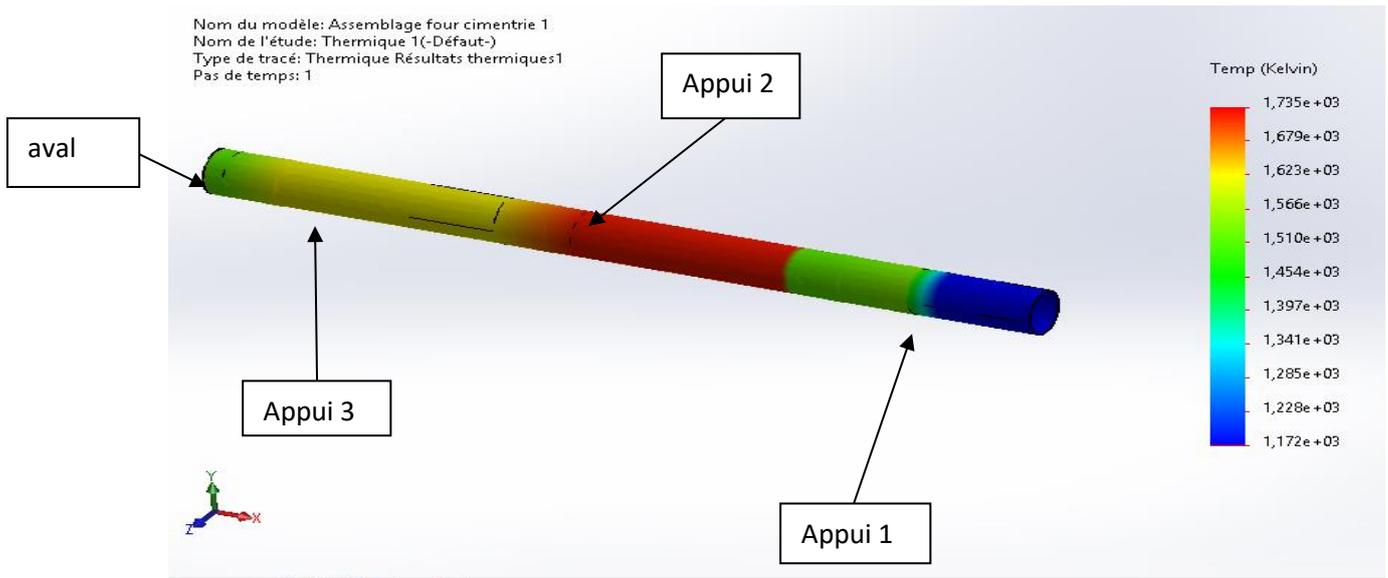


Figure IV.17: Courbe de la variation de la température en fonction de la longueur du four.

la température à l'entrée est minimale avec une valeur de 800°C , juste après, la température commence à augmenter sur toute la longueur jusqu'à qu'elle atteigne une valeur maximale de 1450° , ou la phase de cuisson se déroule, pendant laquelle des réactions physiques et chimiques sont effectuées à fin de produire le clinker, ce qui nécessite une haute température, puis on observe une chute de cette température jusqu'à 1200°C

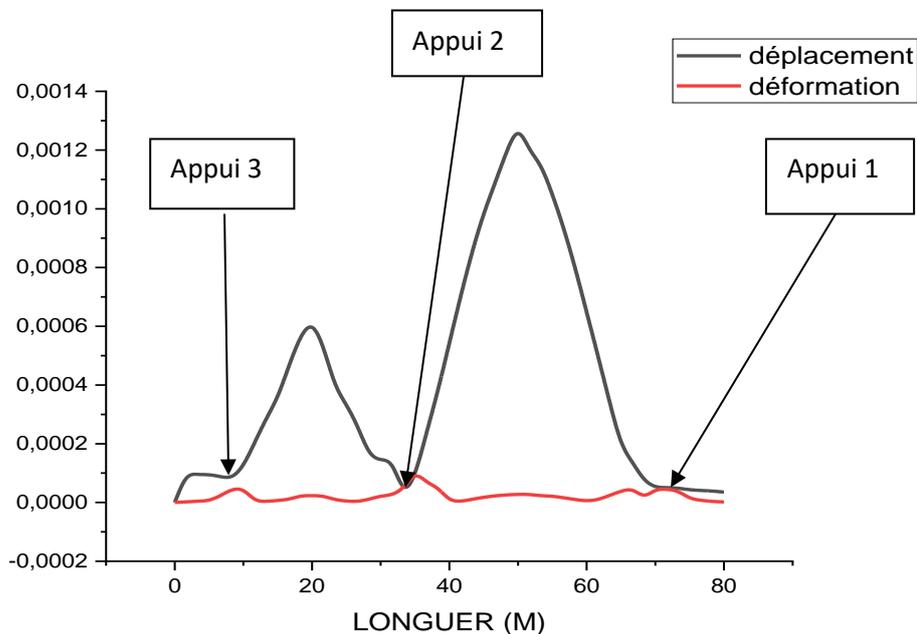


Figure IV.18: présentation des déformations et les déplacements en fonction de la longueur du four.

On remarque que le déplacement entre les appuis est important par rapport à la zone, à cause des caractéristiques géométriques du four et du fait de l'importance des conditions thermiques qui ont une incidence directe sur la virole car on parle d'une température de 1450°C qui règne à l'intérieur, par contre la déformation est importante au niveau des trois appuis.

Conclusion

La répartition des contraintes dans la virole présente une valeur importante au niveau des appuis. La contrainte maximale de traction reste très inférieure à la limite élastique. Concernant la déformation équivalente du four, on constate que la valeur maximale est localisée dans la zone des appuis qui travaille en compression, cette valeur demeure toutefois dans le domaine élastique.

Selon la validation, les résultats obtenus sont en bonne concordance. La charge mécanique est la plus dominante dans le premier et le deuxième cas, tandis que pour le troisième cas c'est l'effet thermique qui est dominant.

La simulation thermomécanique nous aide à savoir la distribution des déformations et les déplacements sur la longueur de la virole.

Conclusion générale

Les effets de la charge mécanique, thermique et de la vitesse de rotation dans le four rotatif de cimenterie sont très importants à cause de son influence sur l'ensemble des viroles de ce dernier, d'où la nécessité d'un programme de maintenance selon les priorités, afin de réduire les différentes contraintes au niveau du four.

Cette intégrité des structures est devenue aujourd'hui une préoccupation majeure des compagnies qui exploitent l'industrie de cimenterie afin d'assurer l'accroissement de productivité, la longévité des ouvrages, la sécurité des hommes, et la sauvegarde de l'environnement.

Dans ce projet de fin d'études, nous avons établi une modélisation numérique par logiciel SolidWorks du problème d'interaction structure. Le présent travail, a pour objet d'étude du comportement mécanique d'une virole d'un four rotatif de la cimenterie LafargeHolcim OGGAZ.

Notre simulation est basée sur quatre cas différents, le premier cas on simule le four sous son propre poids animé par une vitesse de rotation de 4 tr/min. Le deuxième on ajoute sur les conditions du premier cas, les différentes charges (croulage et matière), le troisième cas on ajoute sur le deuxième cas l'effet thermique, tandis que, le quatrième cas on a appliqué des différentes charges thermiques sur la virole du four.

Afin d'éviter les contraintes et la déformation élastique, une grande attention doit être prise pendant l'exploitation pour ne pas dépasser les épaisseurs minimales admissibles responsables d'une déformation plastique de notre virole ou un dégât. Pendant le fonctionnement d'un four les normes doivent être respectées pour avoir un fonctionnement correct. À partir des résultats obtenus, nous avons constaté que la variation des paramètres géométriques de la brique influence sur la variation des contraintes et des déformations élastiques.

De cette étude, il est évident que les paramètres géométriques, mécaniques et thermiques peuvent provoquer l'endommagement de la structure.

Finalement, on peut dire que cette étude a été très fructueuse, parce qu'elle nous a permis d'accomplir une simulation numérique qui pourra nous servir dans le dimensionnement et l'optimisation des éléments structuraux et par la suite éviter l'endommagement permanent de la structure sous les charges mécaniques et thermiques.

Étant donné la faible quantité des travaux publiés, il est difficile de dire avec précision de quel ordre est l'erreur réelle. Il serait intéressant dans un projet futur, de pouvoir faire d'autres tentatives numériques pour déterminer cette erreur avec plus de précision.

Pour de futures recommandations nous envisageons d'effectuer une analyse non linéaire toujours pour suivre l'évolution des contraintes et des déformations au niveau de l'ensemble des viroles sous l'effet de la variation de vitesse de rotation. En plus, on propose de réaliser une simulation plus réaliste du croulage, ainsi que la considération de la convection interne et externe dans le cas du champ thermique.

