



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 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن 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 :

DJELLID IKRAM & BENHAMMADI ZINEB

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
MEGHDIR Abed	MAA	IMSI	Président
BOUHAFS Mohammed	MCB	IMSI	Encadreur
ABDI Ghezail	MCB	IMSI	Examineur

Juin 2018

Dédicace

À mes parents,

À mon pays,

À ma sœur bien aimée,

À mes frères,

À mon fiancé,

À ma famille,

À tous ceux qui sont intéressés par ce sujet.

BENHAMMADI ZINEB

Dédicace

Avant tout, je tiens à remercier le bon dieu, et l'unique qui m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les difficultés de la vie et qui nous a éclairé les chemins du savoir et de la sagesse.

Je dédie ce travail à l'âme des êtres, les plus chers au monde, à ceux qui m'ont guidé et mis sur les rails dès mes premiers pas dans la vie et qui m'ont porté leur amour, leur soutien moral et avec lesquelles je partage cette joie et cet aboutissement, à mon cher père et à ma très chère mère

A mes chères sœurs

A mon cher frère

Aux Familles cherdoudi et lakehal

Et à mes chers amis

Merci pour chaque personne qui m'a aidé d'une façon ou d'une autre

DJELLID IKRAM

Remerciements

Tout d'abord nous remercions nos bon Dieu qui nous 'a donné le courage et la patience à fin de réaliser ce modeste travail

Nous exprimons toute notre gratitude à Monsieur le Professeur BOUHAFS Mohamed, pour l'effort fourni, les conseils prodigués, sa patience et sa persévérance dans le suivi.

Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants, qui nous 'ont donné les bases de la science,

Nous remercions très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examineur,

A toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail.

Merci



TABLE DES MATIERES

DÉDICACE	II
REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES FIGURES	IX
NOMENCLATURE	XII
REFERENCE BIBLIOGRAPHIE	XIV
INTRODUCTION GENERAL	01

CHAPITRE I

« Généralité sur les fours rotatif de cimenterie »

Introduction	03
I.1 Ciment	03
I.2 La fabrication du ciment	03
I.3 Les fours rotatifs	04
I.4 Le four rotatif de cimenterie	05
I.5 Développement des fours rotatif	06
I.6 Le fonctionnement des fours rotatifs	06
I.7 Les éléments principaux dans les Fours Rotatifs	07
I.7.1 La virole	07
I.7.2 Station des galets	08
I.7.2.1 Catégories de stations des galets	08
I.7.2.2 Différents types de galet	09
I.7.2.3 Réglage des axes des galets par rapport à celui du bandage	10
I.7.3 Le bandage	11
I.7.3.1 Rôle du bandage	11
I.7.3.2 Conception des bandages	11
I.7.4 Les briques dans le four rotatif de ciment	13
I.7.5 Le bruleur	13
I.8 Position du four	15

CHAPITRE II

« Recherche bibliographie et calcul du four rotatif de la cimenterie »

Recherches bibliographie	16
Calcul du four rotatif de la cimenterie	17
II.1. La virole	18
II.1.1 calcul des viroles	18
II.1.1.1 Charges linéaires du maçonnerage réfractaire	20
II.1.1.2 Charge linéaire du croûtage	21

TABLE DES MATIERES

II.1.1.3 Charge linéaire de matière	21
II.1.1.4 Charge linéaire de la virole du four	21
II.1.1.5 La charge linéaire totale	21
II.1.2 Dimensionnement des épaisseurs des viroles	21
II.1.3 Ovalisation des viroles	22
II.1.3.1 Valeurs d'ovalité admissible en fonction du diamètre du four	24
II.1.3.2 Correction de l'ovalité du four	25
II.1.3.3 Contraintes mécaniques dues à l'ovalité	25
II.1.3.4 Contraintes thermiques dans la virole et son bandage	26
II.1.4 Déplacement relatif virole-bandage	28
II.1.5 Maîtrise de l'ovalisation de la virole	29
II.1.6 Surveillance du jeu pendant l'allumage	29
II.1.7.La méthode de mesure de déformation de la virole	30
II.1.8.La méthode géométrique	32
Conclusion :	

CHAPITRE III

« Modélisation et simulation numérique dans ANSYS »

Introduction :	35
III.1 Principales méthodes de discrétisation	35
III.1.1. Méthode des Différences Finis (MDF)	35
III.1.2. Méthode des Eléments Finis (MEF)	35
III.1.3. Méthode des Volumes Finis (MVF)	36
III.2 description du problème	36
III.3 Formulation de l'équation de la charge du four	38
III.4 Outil de simulation SOLIDWORKS et WORKBENCH	38
III.4.1 Outil SOLIDWORKS	38
III.4.2 Présentations du logiciel ANSYS et WORKBENCH	38
III.4.3 Modélisation dans ANSYS	39
III.4.5 Préparation du maillage	40
III.4.6 Condition aux limites dans ANSYS Workbench	41
III.4.6.1 Premier cas	41
III.4.6.2 deuxième cas	42
III.4.6.3 Troisième cas	42
Conclusion	43

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE IV « Résultat et Discussion »

Introduction :	44
IV.1 Discussions des résultats	44
IV.2. La contrainte mécanique	44
IV.2.1 La validation	44
IV.3. La déformation élastique et le déplacement total	47
IV.4.Effet de la variation de l'épaisseur de brique réfractaire	49
IV.4.1.La contrainte mécanique	49
IV.4.2.Le déplacement	50
IV.4.3 La déformation élastique	51
IV.5. L'ovalisation	52
Conclusion	55
CONCLUSION GENERAL	56

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Relation entre la virole et le bandage.	22
Tableau II.2 : Valeurs admises pour l'ovalisation de la virole.	29
Tableau III.1 : Caractéristique du four de cimenterie LAFARGE.	36
Tableau III.2 : Les caractéristiques de vérole.	37
Tableau III.3 : Les caractéristiques de brique réfractaire.	37
Tableau III.4 : Les charges applique sur le four.	38
Tableau III.5 : Paramètres de maillage.	41

Liste des figures

Figure I.1 : Four rotatif à incinération	04
Figure I.2 : Four rotatif de cimenterie	05
Figure I.3 : Four à 3 appuis.	06
Figure I.4 : Épaisseurs de viroles.	07
Figure I.5 : Station des galets.	08
Figure I.6 : Différentes catégories des galets.	09
Figure I.7 : Différents types des galets.	09
Figure I.8 : Galet pousseur (la buté).	10
Figure I.9 : braquage de galet.	10
Figure I.10 : Le bandage.	11
Figure I.11 : bandage flottants.	12
Figure I.12 : bandage cranté.	12
Figure I.13 : fixation latérale.	13
Figure I.14 : Briquetage dans un four rotatif de cimenterie.	13
Figure I.15 : Brûleur à prémélange.	14
Figure I.16 : Bruleur du four rotatif de ciment LAFARGE.	15
Figure II.1 : Evaluation du module de Young avec la température.	18
Figure II.2 : Déflexion des différentes travées du four.	19
Figure II.3 : Les différentes épaisseurs des viroles du four.	22
Figure II.4 : Relation entre l'épaisseur et le diamètre de la virole.	22
Figure II.5 : Ovalisation de la virole.	23
Figure II.6 : Principe de méthode de SHELLTEST.	23
Figure II.7 : Diagrammes méthode de SHELLTEST.	24
Figure II.8 : L'ovalité de la virole du four en fonction de son diamètre intérieur.	24
Figure II.9 : La relation entre l'ovalité relative et le diamètre de la virole.	25
Figure II.10 : Relation entre l'épaisseur et le diamètre de la virole.	26
Figure II.11 : La différence croissante de température entre la virole et le bandage.	27
Figure II.12 : Valeur de contrainte pour acier de construction.	28
Figure II.13 : Appareil de mesure du glissement et du jeu.	28
Figure II.14 : Traces du jeu (S) et du glissement (U).	28
Figure II.15 : Écart de température maximal admissible en fonction du jeu à froid.	30
Figure II.16 : le diagramme de la mesure principale.	31
Figure II.17 : schéma de la méthode de mesure	32
Figure II.18 : le modèle géométrique de la méthode de calcul.	33
Figure III.1 : Géométrie du four rotatif de cimenterie.	37
Figure III.2 : Modèle complet dans SOLIDWORKS (vue de face).	39
Figure III.3 : Définition du domaine étudié dans Workbench.	39
Figure III.4 : Élément tétraèdre quadratique iso-paramétrique à 10 nœuds.	40
Figure III.5 : Maillage tétraédrique du four.	40
Figure III.6 : Représentation de chargement sur le four de 1 ^{er} cas.	41
Figure III.7 : présentation des conditions aux limites de 2 ^{ème} cas.	42
Figure III.8 : présentation des conditions aux limites de 3 ^{ème} cas.	43

Liste des figures

Figure IV.1 : présentation des contraintes équivalentes (Von Mises)	45
Figure IV.2 : Représentation de la trajectoire utilisée sur la longueur du four.	45
Figure IV.3 : La variation du champ de la contrainte mécanique 1 ^{er} cas.	46
Figure IV.4 : présentation des contraintes équivalentes	47
Figure IV.5 : La variation du champ de la contrainte mécanique 2 ^{ème} cas	47
Figure IV.6 : Variation de la déformation élastique équivalente.	48
Figure IV.7 : Variation du déplacement total.	49
Figure IV.8 : présentation de contrainte en fonction d'épaisseur de brique.	50
Figure IV.9 : présentation de déplacement en fonction d'épaisseur de brique.	50
Figure IV.10 : l'évolution de la déformation équivalente	51
Figure IV.11 : Ovalisation de la partie milieu du four	52
Figure IV.12 : l'évolution de déplacement au tour de four à 15m	53
Figure IV.13 : l'évolution de déplacement au tour de four à 35m.	53
Figure IV.14 : l'évolution de déplacement au tour de four de 150mm	54
Figure IV.15 : l'évolution de déplacement au tour de four de 50mm.	54

NOMENCLATURE

- E : module d'élasticité en N/mm^2 .
 I : Le moment d'inertie mm^3 .
 φ : angle entre la verticale et les points de contact X et Y
 e : épaisseur de la vérole.
 a : Travée entre l'amont et l'appui 1 du four en m.
 b : Travée entre l'appui 1 et l'appui 2 du four en m.
 c : Travée entre l'appui 2 et l'appui 3 du four en m.
 d : Travée entre l'appui 3 et l'aval du four en m.
 f_a : la flèche de la travée « a » en m.
 f_b : la flèche de la travée « b » en m.
 f_c : la flèche de la travée « c » en m.
 f_d : la flèche de la travée « d » en m.
 P_a : la charge linéaire de travée « a » en N.
 P_b : la charge linéaire de travée « b » en N.
 P_c : la charge linéaire de travée « c » en N.
 P_d : la charge linéaire de travée « d » en N.
 e_a : épaisseur du vérole de la travée « a » en mm.
 e_b : épaisseur du vérole de la travée « b » en mm.
 e_c : épaisseur du vérole de la travée « c » en mm.
 e_d : épaisseur du vérole de la travée « d » en mm.
 C_v : la charge linéaire de vérole en tonnes/m.
 C_c : la charge linéaire du croûtage en tonnes/m.
 C_m : la charge linéaire de matière en tonnes/m.
 C_r : la charge linéaire de maçonnerie réfractaire en tonnes/m.
 C_t : la charge linéaire de total du four en tonnes/m.
 ω_v : l'ovalisation de la virole.
 D_S : diamètre de virole non déformée en m.
 D_L : diamètre interne du bandage non déformé en m.
 D_V : diamètre vertical interne du bandage déformé en m.
 D_h : diamètre horizontal interne du bandage déformé en m.
 S : jeu réel en mm.
 C : Jeu à froid « initial » en mm.
 f : Amplitude de tracé du SHELLTEST en mm.
 L : Longueur de l'appareil SHELLTEST en mm.
 t_c : épaisseur de la tôle de correction en mm.
 t_{cb} : épaisseur de la tôle de fourrure existante en mm.
 ΔD : différence entre le diamètre intérieur du bandage et le diamètre extérieur de la virole en mm.
 σ : La contrainte mécanique sur la tôle de la virole en MPa.
 D_N : diamètre nominal intérieur du four en m.
 Φ_N : diamètre nominale de four en m.
 h_{brique} : hauteur de brique en mm.
 ρ : Masse volumique de brique Réfractaire basique, $\rho \approx 3000 \text{ kg/m}^3 = 3 \text{ t/m}^3$.

NOMENCLATURE

h' : Hauteur du croûtage en mm ;

ρ' : Masse volumique du croûtage en kg/m^3 ($\rho' \approx 3000 \text{ kg/m}^3 = 3 \text{ t/m}^3$).

ρ'' : Masse volumique du clinker en kg/m^3 ($\rho'' \approx 1700 \text{ kg/m}^3 = 1.7 \text{ t/m}^3$).

ρ''' : Masse volumique de l'acier en t/m^3 ($\rho''' \approx 7.85 \text{ t/m}^3$).

r_1, r_2 : rayons courbure de la virole.

α_1, α_2 : angles au centre correspondants.

λ : Coefficient de dilatation thermique ($\lambda = 0,000012 \text{ mm par } 1^\circ\text{C et par mm}$).

$\Delta L, \Delta D$: augmentation de la longueur et du diamètre du four en mm.

L_0, D_0 : longueur et diamètre primitifs du four en mm.

ΔT : différence entre la température de la vérole et le bandage en $^\circ\text{C}$.

p : Epaisseur des plaques en mm.

U_{\min} : Déplacement relatif minimal.

j_c : Jeu effectif résiduel à chaud en mm.

U : Déplacement ou le glissement en mm.

ζ : La valeur de la différence entre les contours et le cercle de base.

O : Le centre de rotation de la section.

O' : Le centre géométrique de la section.

(a, b) : Les coordonnées de centre géométrique de la section.

(x_i, y_i) : La coordonnée du point mesuré.

L_i : Point mesuré ($i=1.2.\dots.n$)

n : Le nombre des points mesuré.

R : Le rayon de cercle de base.

r_i : Le rayon du point « L_i » au centre de rotation de la section.

e : L'excentricité.

Δr_i : La valeur de la différence de rayon de chaque section.

R_c : Le rayon moyen de chaque section transversale.

θ_i : L'angle compris entre l'axe des « x » et le rayon « r_i ».

φ : L'angle compris entre l'axe des « x » et l'excentricité « e ».

INTRODUCTION GÉNÉRALE



1. INTRODUCTION

Le ciment dont le besoin national et international augmente sans cesse, ce qui fait de sa fabrication une industrie qui occupe une place prépondérante dans les économies de toutes les nations. Sa production est un indicateur économique lié d'une part au nombre d'habitants, mais également au potentiel de croissance de chaque pays sur une période donnée. L'évolution de sa production dans le monde progresse chaque année. L'industrie du ciment, en Algérie, a connu, ces dernières années, une amélioration progressive vue le nombre de linges de production de ciment qui a augmenté.

Les fours rotatifs sont employés couramment dans des industries chimiques, l'industrie du ciment, l'industrie métallurgique, procédé de séchage, le traitement des déchets et le processus incinération etc. Le four rotatif est un équipement principal dans une industrie cimentière employée pour la cuisson des matériaux de base pour l'obtention de clinker.

Il se compose d'un tube effectué à partir de la plaque en acier, souvent de 3 à 7 mètres de diamètre et plus de 100 mètres de longueur, garnie de la brique réfractaire. Le tube est légèrement incliné (de 1 à 4 °) et tourne lentement sur son axe à entre 30 et 250 révolutions par heure.

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 WORKBENCH (ANSYS) représente une partie non négligeable du présent travail. La construction du modèle géométrique est générée avec le logiciel "Solidworks".

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

- Dans le premier chapitre, 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 ANSYS et la réalisation de modèle numérique par Workbench ANSYS.

- 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 déformations, en plus de l'étude d'ovalité des viroles les plus sollicité thermiquement pour éventuellement réduire ces contraintes.

Enfinement, pour achever ce mémoire, nous avons présenté en conclusion générale les principaux résultats obtenus qui résumant l'essentiel de notre travail, ainsi que les futures recommandations ou perspectives.

Chapitre I



Généralité sur le four rotatif de cimenterie

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, il peut être soit :

- un équipement destiné uniquement au chauffage (exemple : réchauffage de l'acier avant déformation plastique, réchauffage de pétrole brut avant distillation) ;
- un véritable réacteur dans lequel on élabore les produits (exemple : four de fusion de verre, four de vapocraquage de la pétrochimie).

Il s'intègre généralement dans une ligne de production complexe dont il est un des éléments. On trouve des fours dans un très grand nombre d'activités industrielles, ce qui rend une approche globale assez délicate [1].

Dans le présent chapitre, nous allons citer la procédure de fabrication du ciment commençons par le concasseur jusqu'à l'expédition. Ensuite, nous allons présenter le four rotatif de cimenterie sujet de notre étude suivi par une description technique du four de cuisson et leurs composants.

I.1. Ciment :

Le ciment est une poudre minérale fine, principal composant du béton, auquel il confère un certain nombre de propriétés, et notamment sa résistance. Il s'agit d'un matériau de construction de haute qualité, économique, utilisé dans les projets de construction du monde entier.

I.2. La fabrication du ciment :

Étape 1 : Extraction et broyage des matières premières Les matières premières qui entrent dans la fabrication du ciment (carbonate de calcium, silice, alumine et minerai de fer) sont généralement extraites de roche calcaire, de craie, de schiste ou d'argile. Ces matières premières sont prélevées des carrières par extraction ou dynamitage. Ces minéraux naturels sont ensuite broyés mécaniquement. À ce stade, d'autres minéraux sont ajoutés pour corriger la composition chimique du ciment. Ces minéraux sont des déchets ou des sous-produits d'autres industries, comme des cendres de papier. Le broyage permet de produire une fine poudre, appelée « cru de ciment », qui est ensuite préchauffée, puis placée dans un four où elle est soumise à d'autres procédés.

Étape 2 : Chauffage et broyage du cru de ciment : Le four est au cœur du procédé de fabrication du ciment. Une fois dans le four, le cru de ciment est chauffé à environ 1450 degrés Celsius (°C) - ce qui correspond à peu près à la température de la lave en fusion. À cette température, des réactions chimiques se produisent et entraînent la formation du clinker, substance qui contient des silicates de calcium hydrauliques. Pour chauffer des matières à une température aussi élevée, il faut produire une flamme de 2000 °C à l'aide de carburants fossiles et de déchets. Le four est incliné de trois degrés par rapport à l'horizontale, ce qui permet à la matière de le traverser en 20 à 30 minutes. À sa sortie du four, le clinker est refroidi, puis entreposé, avant d'être broyé afin de produire le ciment.

Étape 3 : Broyage et expédition du ciment : Une petite quantité de plâtre (de trois à cinq pour cent) est ajoutée au clinker pour réguler le durcissement du ciment. Ce

mélange est ensuite moulu très finement pour obtenir du « ciment pur ». Pendant cette phase, d'autres minéraux, appelés « adjuvants », pourraient être ajoutés en plus du plâtre. Ces adjuvants d'origine naturelle ou industrielle sont dosés pour conférer au ciment des propriétés précises : perméabilité réduite, résistance accrue aux sulfates et aux environnements agressifs, maniabilité améliorée, meilleure qualité des finis, etc. Enfin, le ciment est entreposé dans des silos avant d'être expédié en vrac ou en sacs aux chantiers où il sera utilisé.

I.3. Les fours rotatifs :

Les fours rotatifs sont, dans l'industrie de processus, parmi les unités dont le fonctionnement est bien établi mais qui reste pourtant parmi les moins compris ; ils peuvent être employés pour 3 raisons distinctes : chauffage, réaction et séchage de matériaux solides, et dans beaucoup de cas, ils sont employés pour réaliser une combinaison de ces objectifs.

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.

Le transfert thermique est le plus important parmi ces aspects, parce que dans beaucoup de cas, c'est le transfert thermique qui limite la performance du four rotatif et ceci est reflété par le nombre de papiers publiés sur les modèles de transfert thermique dans des fours [2].



Figure I.1 : Four rotatif à incinération

Les fours rotatifs se retrouvent dans beaucoup de processus qui comportent le traitement de solides. Ceux-ci incluent le séchage, l'incinération, le mélange, le chauffage, le refroidissement, l'humidification, la calcination, la réduction, l'agglomération et la réaction gaz-solide. Une des plus importantes utilisations industrielles est la production du ciment. Une autre application importante des fours rotatifs est l'incinération des déchets. Les fours rotatifs sont populaires pour ce rôle en raison de leur flexibilité. Ils peuvent manipuler une grande variété de matériaux d'alimentation, avec des valeurs

calorifiques variables, le déplacement des solides de rebus jusqu'à la sortie ne présente aucun problème. Typiquement, les incinérateurs de déchets dangereux fonctionnent avec des lits relativement profonds et ont une chambre de combustion secondaire après le four rotatif pour améliorer la combustion hétérogène des déchets. Un exemple d'un incinérateur de déchets dangereux est montré dans la figure I.1 [2].

I.4. Le four rotatif de cimenterie :

Le four rotatif est le centre du processus de cuisson, il représente l'organe le plus sollicité thermiquement, il inclut la totalité des réactions, qu'elles soient endothermiques ou exothermiques, il inclut encore des échanges thermiques énormes, des apports d'énergie de grandes capacités et de grandes déperditions.



Figure I.2 : Four rotatif de cimenterie

Le four est un cylindre en acier supporté par des stations de roulement dont la station amont est motrice, animé d'une vitesse de rotation variable pouvant comprises entre 1,8 et 3,5 tr/min. Ce cylindre appelé aussi virole est revêtu de l'intérieur de briques réfractaires. Il présente une inclinaison de 3.5 % dans le sens de l'écoulement de la matière qui combinée avec la rotation fait que la matière puisse progresser par la gravité, vers le brûleur.

Les dimensions du four, diamètre et longueur, sont déterminées par le constructeur en fonction de la capacité de production de clinker et du débit des gaz de combustion (air secondaire).

En régime établi, le four est le siège d'un équilibre entre deux flux. Un flux calorifique des fumées de combustion d'aval en amont fourni par la combustion des gaz et le débit d'air secondaire, arrivant du refroidisseur déjà chaud. Un flux de matière granulaire, d'amont en aval qui forme dans le four un lit de matière appelé talus, arrivant du préchauffeur partiellement décarbonatée, avec une température de l'ordre de 800 °C à 900

°C et devant atteindre la température de clinkérisation à quelques mètres de la sortie du four [2].

Le temps de séjour de la matière dans le four est estimé, pour une température d'entrée de matière de 810 °C, un taux de décarbonatation de 35 % et une vitesse de rotation du four de 1,9 tr/mn, à environ 52 minutes [2].

I.5. Développement des fours rotatif :

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 2,7 x 60 m en taille, et produit 190 tonnes par jour.

Au fil des années, les progrès réalisés dans le domaine des procédés ont conduit à une diminution progressive des dimensions des fours alors que les capacités de production étaient en augmentation. Aujourd'hui, des capacités de production entre 5000 à 10000 tonnes par jour ne sont pas rares.

Grâce à l'optimisation globale de l'installation de cuisson, les fours rotatifs sont aujourd'hui, malgré leurs débits souvent importants beaucoup plus compacts, ce qui diminue l'investissement.

I.6. Le fonctionnement des fours rotatifs :

Les fours rotatifs des cimenteries permettent la cuisson des matériaux de base pour l'obtention de clinker. Le four est un long cylindre incliné en rotation permanente permettant le déplacement du matériau.

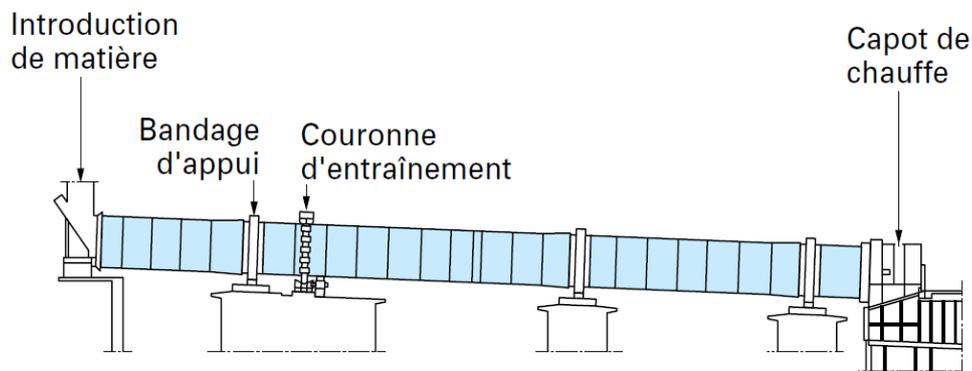


Figure I.3 : Four à 3 appuis

La matière est introduite par l'amont du four, après être chauffée à 900°C par les gaz chauds du four, la rotation du four et sa pente (3,5 %) permet à la matière de se mouvoir vers la sortie du four, à travers laquelle une flamme assure le chauffage du four et la cuisson du clinker.

Le four possède trois stations, sur lesquels il s'appuie par le billet du bandage. Chaque station est constitué de deux galets cylindriques, et chaque galet est supporté par deux paliers contenant chacun un coussinet.

I.7. Les éléments principaux dans les fours rotatifs :

Le four est la partie la plus importante dans le procédé de production du ciment. Il se compose de plusieurs éléments qui sont ci-dessus détaillés :

I.7.1. La virole :

La virole est un ensemble de tôles dont le rayon de courbure coïncide avec le rayon du four, les tôles sont soudées deux à deux tout en évitant une continuité de soudure dans la direction axiale. Elles sont fabriquées à partir de tôles en acier de qualité E 24.2 ou A42 CP. Les tôles d'une largeur de 2200 mm environ sont enroulées 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. 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.

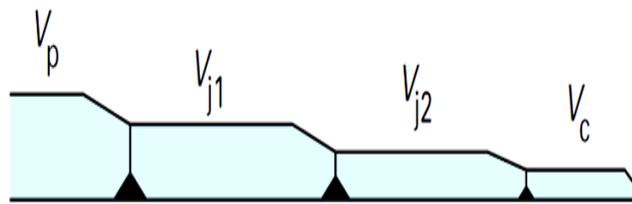


Figure I.4 : Épaisseurs de viroles.

Les valeurs limites admissibles communément admises sur les viroles sont :

- Contrainte pour une virole courante : $\leq 2 \text{ daN/mm}^2$;
- Contrainte pour une virole intermédiaire ou porteuse : $\leq 1.5 \text{ daN/mm}^2$;
- Variation de contrainte au changement d'épaisseur des viroles : $\leq 0.8 \text{ daN/mm}^2$;
- 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 [5].

La virole du four doit travailler dans une zone de température modérée inférieure à 450 °C, car au-delà de cette température les propriétés mécaniques sont dégradées et présentent le risque de déformation permanente.

La durée de vie de la virole est généralement estimée entre 20 ans à 30 ans, mais la mauvaise tenue en corrosion peut entraîner des changements de viroles en quelques

années. La virole de sortie du four est la plus sollicitée thermiquement et peut conduire à des changements tous les 5 ans.

I.7.2. Station des galets :

Les galets sont des formes cylindriques d'acier pleines, jouant le rôle de support du four. Ils permettent de minimiser le frottement par un faible coefficient de frottement de surface, ils sont de même nature que les bandages avec lesquels ils sont en contact, ce qui permet d'avoir une usure uniforme. Le galet est composé d'un arbre et d'un corps, qui est assemblés avec un ajustement serré, l'assemblage se fait par frettage. Le galet est soutenu par deux palier, sur lequel est interposé un coussinet ou bague de frottement, le contact est constamment lubrifié par bain d'huile, qui est refroidie par un système de refroidissement à eau.

Le couple à transmettre demande un contact parfait entre les galets et le bandage. Toute incidence résultant d'une déformation thermique de la virole ou d'un tassement des fondations, doit être compensée par les galets, sans que la stabilité du four en soit diminuée pour autant. Pour concilier ces exigences contraires Ces rotules reprennent les forces d'appui du four et peuvent suivre n'importe quel voile du bandage. Ce système garantit dans tous les cas de charge une portée régulière sur la génératrice. Pour éviter une usure des surfaces de roulement, les axes de rotation du galet et du bandage sont toujours parallèles pendant la marche du four.

Ceci est obtenu par un mécanisme qui contrôle et ajuste en permanence la position relative des galets et du bandage. 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 [3].



Figure I.5 : Station des galets.

I.7.2.1. Catégories de stations des galets :

On distingue quatre catégories de stations des galets : rigide, rigide rotule, autoalignante, autoalignante rotule. Les stations des galets autoalignante rotules sont recommandées pour les fours à deux appuis. En cas de déformation accidentelle du four (mise en vilebrequin), il n'y aura pas de perte de surface de contact entre bandage et

galets évitant ainsi les contraintes excessives qui auraient causé des fissures et la formation de petites cavités (pitting). Ces stations sont calculées pour une pression d’Hertz supérieure de 25 % à celle qui est prise en compte pour les stations de roulement traditionnelles [3].

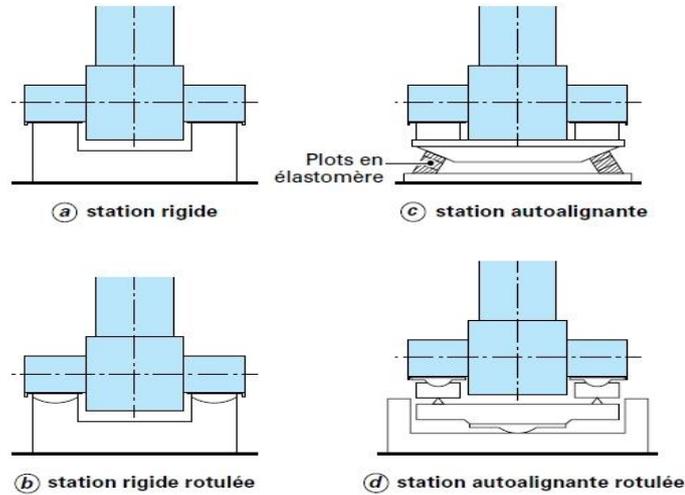


Figure I.6 : Différentes catégories des galets.

I.7.2.2. Différents types de galet :

Les galets sont du type plein, la tendance étant d’abandonner les galets type creux pour des raisons de fragilité. Ils ont, en général un diamètre extérieur compris entre 1 et 2 m.

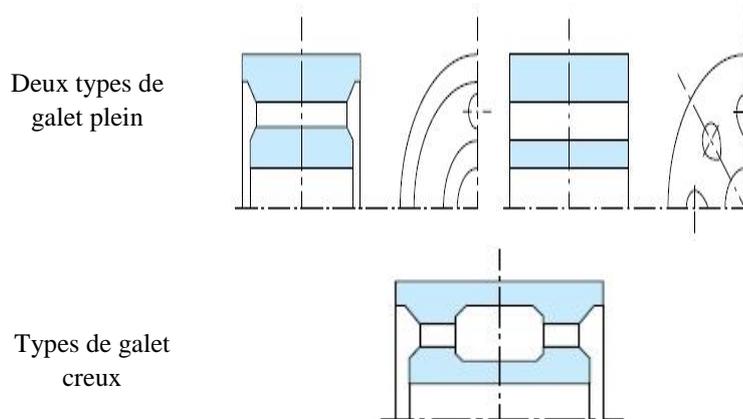


Figure I.7 : Différents types des galets.

Le matériau employé pour la réalisation des galets est un acier moulé ayant subi un traitement thermique de normalisation, puis un revenu. Les caractéristiques mécaniques ainsi obtenues sont :

- résistance maximale à la rupture : $R_r \geq 650 \text{ MPa}$
- résistance élastique : $R_e \geq 380 \text{ MPa}$
- allongement : $A \geq 14 \%$
- résilience : $KCU \geq 3.5 \text{ daJ/cm}^2$

Du fait de la dilatation du four, il est nécessaire de prévoir une largeur des galets supérieure à celle des bandages de 40 à 80 mm [3].

I.7.2.3. Réglage des axes des galets par rapport à celui du bandage :

Si le four était en position rigoureusement horizontale, les axes des galets, du bandage et du four pourraient être parallèles ; le four resterait en position. Pour que la matière à cuire avance dans le four, une inclinaison de quelques degrés a été donnée au four, de sorte qu'il est nécessaire de compenser la composante qui a tendance à faire descendre le four par un effort de sens opposé apporté sur les bandages. Cet effort est fourni :

- Soit par le braquage des galets ;
- Soit par un galet pousseur.

Le réglage entre bandage et galets doit permettre le déplacement du four de 40 à 60 mm dans les deux sens ; la durée de montée du four sera de l'ordre de 8 à 24 h et la durée de la descente sera de 4 à 8 h. Ainsi l'usure sera uniformément répartie sur toute la surface des galets d'appui. Selon que le four est équipé ou non de galets pousseurs, le principe du réglage sera différent. Sans galets pousseurs, les axes des galets sont orientés braqués par rapport à l'axe du four de manière à faire monter le four ; arrivé en position haute, le déclenchement d'un graisseur suffit à faire descendre le four. La figure I.9 schématise, pour un four tournant à droite, la direction du braquage des galets permettant la montée du four [4].

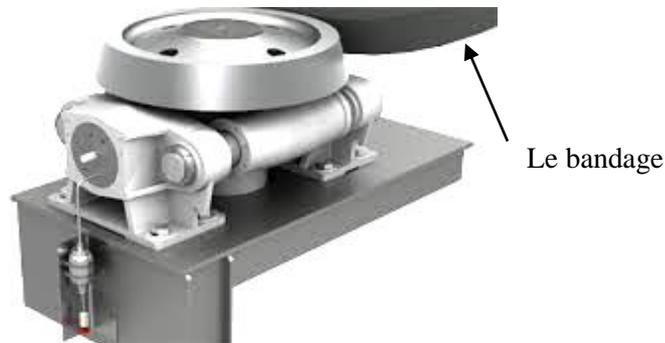


Figure I.8 : Galet pousseur (la buté).

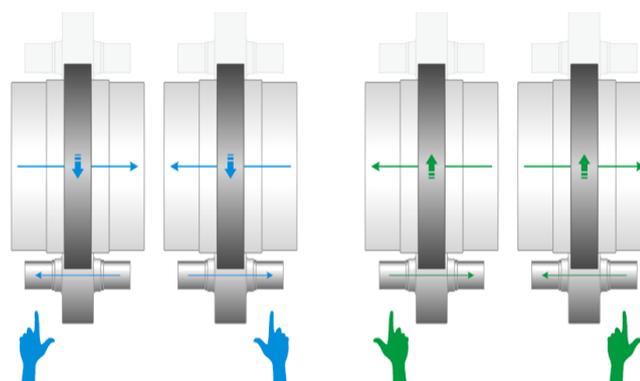


Figure I.9 : braquage de galet.

Dans ce cas, les axes des galets d'appui sont réglés parallèlement à l'axe du four, la descente du four est provoquée par son inclinaison sur l'horizontale. La montée du four

est provoquée par les galets pousseurs actionnés par vérins hydrauliques selon un programme bien défini et maîtrisé ; la descente sera contrôlée par la décharge programmée du système hydraulique.

I.7.3. Le bandage :

Le bandage est un anneau métallique à section rectangulaire, installé sur la virole du four dans les zones des paliers, leurs nombres diffèrent d'un four à un autre selon sa conception.



Figure I.10 : Le bandage

I.7.3.1. Rôle du bandage :

Le rôle principal du bandage est de protéger la virole du four de l'usure, de minimiser le frottement entre le four et ses paliers tout en conservant la forme cylindrique de la virole pour éviter les fissurations et la détérioration des briques réfractaires. Le bandage permet aussi de diminuer le flux de chaleur transmis de la virole aux galets supports.

I.7.3.2. Conception des bandages :

Le diamètre intérieur du bandage est légèrement supérieur au diamètre extérieur de la virole du four, ceci permet un jeu fonctionnel. En effet, la dilatation thermique du four est supérieure à celle du bandage du fait de la différence de température et la nature du matériau, elle se répercute sur l'évolution du jeu entre virole et bandage, ainsi, un jeu faible présente un risque potentiel de déformation à chaud, de même, un jeu très important permet à la virole de se déformer et perdre de sa qualité et celle des briques internes. Il existe deux types de bandage [3] : le bandage flottant et le bandage cranté.

-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.

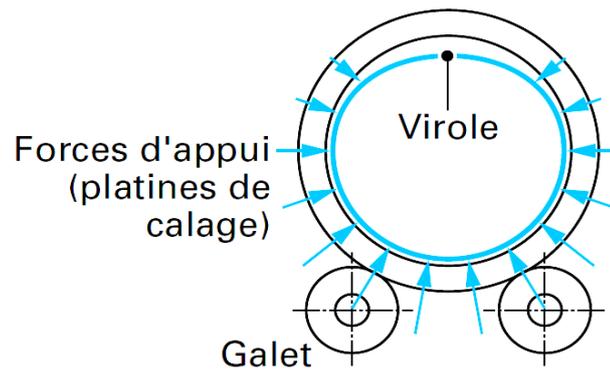


Figure I.11 : bandage flottants.

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 [3].

-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. 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.

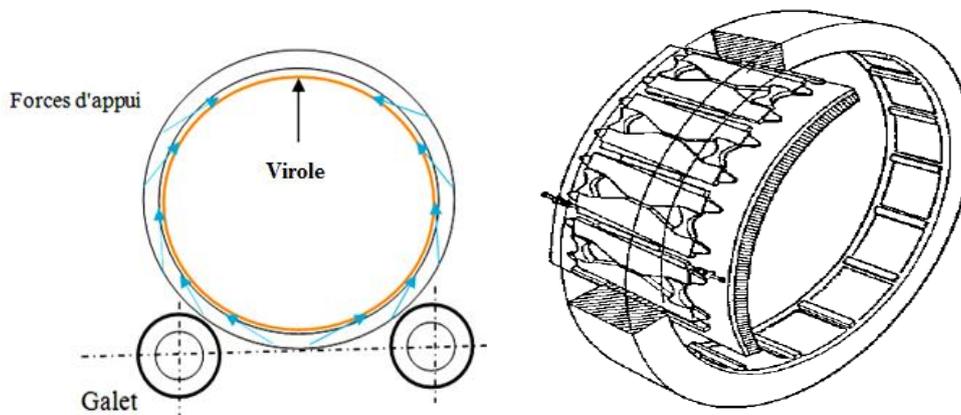


Figure I.12 : bandage cranté.

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 [3].

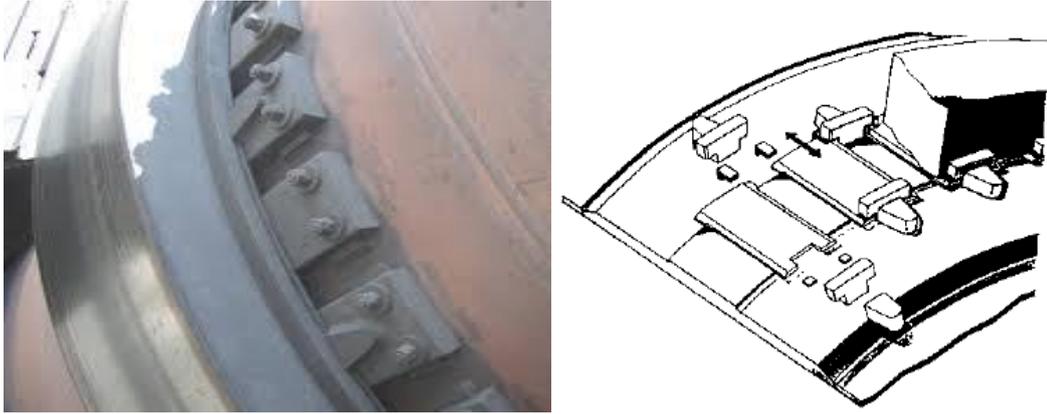


Figure I.13 : fixation latérale.

I.7.4. Les briques dans le four rotatif de ciment :

Les briques sont en matériau céramique réfractaires, pouvant résister à une température de 900°C à l'entrée du four, jusqu'à une température au voisinage de la flamme de 1450°C à la sortie du four.

La nature du matériau des briques change selon leur position axiale dans le four.

Elles permettent de protéger la virole en limitant le transfert de chaleur, préserver l'efficacité énergétique en diminuant les pertes de chaleur [5].



Figure I.14 : Briquetage dans un four rotatif de cimenterie.

I.7.5. Le brûleur :

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 [1].

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 [1].

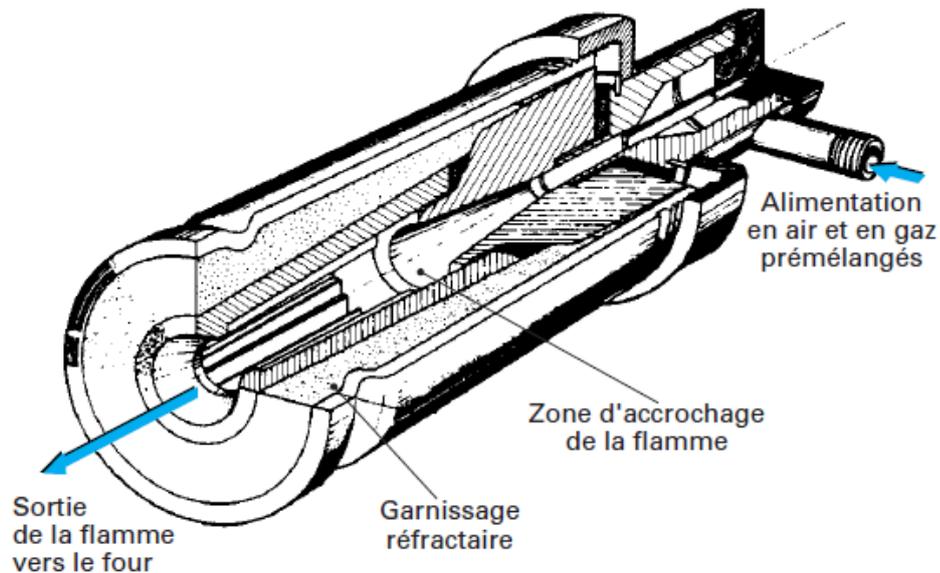


Figure I.15 : Brûleur à prémélange.

➤ 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 [1].

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 [6]. D'un point de vue procès le brûleur qui est utilisé pour le chauffage la zone de cuisson d'un four rotatif doit remplir les conditions suivantes :

- Le brûleur doit être capable de réaliser la combustion de gaz naturel, de charbon, de gasoil ou n'importe quel mélange de ce dernier, il doit assurer encore une combustion complète, à excès d'air bas et à formation minimum d'oxyde de carbone (CO) et d'oxyde de nitrogène (NO_x). Il doit produire une flamme courte, étroite et fortement radiante, ces critères représentent les conditions adéquates pour un bon transfert thermique de la flamme aux matériaux en écoulement de la zone de cuisson (clinkérisation) du four [7-8].

- Il doit engendrer une flamme qui doit favoriser la formation, dans la zone de cuisson du four, d'une couche dense et stable sur le réfractaire (phénomène de croûtage).

- Il doit utiliser un peu d'air primaire sans pour autant compromettre la stabilité de fonctionnement normal ou surcharge du four. L'air primaire est habituellement exprimé en pourcentage d'air de combustion stœchiométrique requis pour brûler la quantité du combustible mise en feu par le brûleur.



Figure I.16 : Brûleur du four rotatif de ciment LAFARGE.

I.8. Position du four :

La position axiale du four sur les galets de support est contrôlée par un dispositif de poussée. Le constructeur définit dans le manuel d'instruction du dispositif de poussée les limites d'alarme pour les réglages axiaux de four.

- L'alarme maximale I est un signal instruisant l'opérateur à effectuer une inspection du dispositif de poussée et/ou de la position des galets de support.
- L'alarme maximale II arrête automatiquement la commande de four pour empêcher un endommagement de la garniture de la chambre à fumée, la garniture de la hotte et le galet de poussée.

Il peut être nécessaire de vérifier la direction de poussée des galets de support. Dans une situation critique, il peut être nécessaire d'appliquer de l'huile directement sur les galets de support, s'ils ont tendance à pousser le four vers le haut, mais il est très important d'assurer que l'huile est enlevée dès que possible après le réaligement des galets de support. La lubrification entre les galets de support et le bandage doit être une lubrification par graphite sec [9].

Chapitre II



Calcul du four rotatif de la cimenterie

Recherches bibliographie :

Les sollicitations thermomécaniques subit par un four rotatif sont diverses et très variable à fin d'optimiser l'utilisation de cette équipement qui est essentielle pour toute cimenterie dans le monde. Afin de nous permettre d'établir notre travail, il est nécessaire de passer par l'étape de la recherche bibliographique. Dans ce contexte plusieurs travaux de recherche ont été faits, que nous avons pu les résumer comme suit :

K. Janati et L. Bousshine (2017) ont rappelé l'histoire et la technologie des cimenteries, les principales méthodes expérimentales utilisées pour la mesures de l'ovalisation de la virole et du désaxement du four, la modélisation du comportement thermo-élastique au four, la formulation éléments finis et la simulation numérique de la déformabilité du four à froid et à chaud. Une étude comparative des résultats expérimentaux et ceux obtenues par la simulation numérique a été effectuée à l'aide des logiciels de CAO [10].

S. El fakkoussi et al (2017) ont fait une étude de la tenue mécanique du système de calage du bondage four rotatif pour la cimenterie en utilisant à la fois la théorie de la mécanique et la simulation par éléments fins en utilisant le logiciel ANSYS. Les résultats obtenus par la MEF sont comparés à ceux obtenus par les calculs théoriques [11].

M. Bideq et K. Janati et L. Bousshine (2017) ont calculé l'ovalité par éléments fini en utilisant le logiciel Patran/Nastran et comparée aux mesures effectuées directement sur le four de la cimenterie de la région de Settat (maroc) par un dispositif approprié. [12]

J. Ravindran et S. Krishnan (2016) : ont étudié le transfert thermiques à travers la virole d'un four rotatif en supposant 3 cas différent qui sont l'absence du croutage, avec croutage en considérant une conductivité thermique de $0,74 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ et la variation de la température du lit de matière [13].

K. Zheng, Y. Zhang et al (2015) : ont étudié l'excentricité du four rotatif en utilisant deux méthodes de calcul, la première est la méthode EMD (décomposition en mode empirique) et la deuxième est une méthode géométrique. L'excentricité calculée par les deux méthodes était la même [14].

Janati, et al, (2015) : ont étudié la tenue mécanique et de la déformabilité des viroles à chaude d'un four rotatif des cimenteries. Une étude comparative été faite entre les résultats expérimentaux et ceux donnés par les simulations numériques d'analyse par la méthode des éléments finis a été élaborée utilisant le logiciel PATRAN/NASTRAN. L'étude faite sur trois zones délicates du four rotatif, ainsi une correspondance a été trouvée à partir de cette analyse [15].

Pazand et al (2009): ont présenté une approche de la détermination rapide de la déformation structurelle et des contraintes au niveau de la virole du four rotatif de ciment en considérant son réfractaire. Pour démontrer l'applicabilité de l'approche proposée, une analyse d'un four rotatif typique utilisant la méthode des éléments fini et comparant les résultats avec ceux obtenus par la méthode expérimentale [16].

D. Kfidaros et al (2006), le but de cette étude est de contrôler le procédé de calcination en fours à ciment industriels. Par conséquent, la compréhension des mécanismes des phénomènes d'écoulement et de transport dans le calcinateur est importante [17].

V. Ranade et al (2006) : Les prévisions modélisées ont été vérifiées en les comparant aux données expérimentales publiées. Le modèle a été employé pour mener une étude numérique et voir les performances des trois fours rotatifs industriels. Des simulations numériques ont été effectuées pour étudier l'influence de l'opération principale et les paramètres de conception sur la consommation d'énergie de four. Le modèle a été également employé pour explorer la possibilité de réduire la consommation d'énergie de four rotatif. Le modèle et les résultats constitueront une base utile pour le développement complet de modèle tridimensionnel des fours à ciment [18].

G. Nieto et al (2002) : ont effectué la méthode des éléments finis (MEF) pour déterminer une analyse non linéaire d'un four rotatif à ciment de l'usine Rais HAMIDOU (Algérie). Ensuite, une analyse MEF globale est effectuée pour les différents régimes de fonctionnement et des charges réelles à des positions différentes du four rotatif. Les contraintes et le déplacement des composants du four sont validés par des résultats expérimentaux [19].

Mastrorakos et al (1999) ont réalisé une étude du comportement thermique d'un four rotatif avec la considération de la couche de croutage [20].

Tscheng et Watkinson (1979) ont déduit des coefficients du transfert thermique pour le calcul de la quantité de chaleur du gaz transmis par la convection des parois. Ces coefficients ont été déterminés pour un four rotatif d'une longueur de 2.5 m et un diamètre de 0.19 m [21].

Brimacombe et Watkinson (1978) ont réalisé plusieurs expériences sur le four rotatif, les études ont été menées pour un four de diamètre de 5.5 m. Les résultats obtenus par ce travail définissent le comportement thermique et le transfert de chaleur sur la paroi du four [22].

Calcul du four rotatif de la cimenterie :

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 [3].

- 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 ;
 - ✓ 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. La virole :

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.1.1. 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 21000 daN/mm^2 chute avec la température, du fait que l'acier devient en quelque sorte plus plastique donc moins résistant à l'allongement. [23]

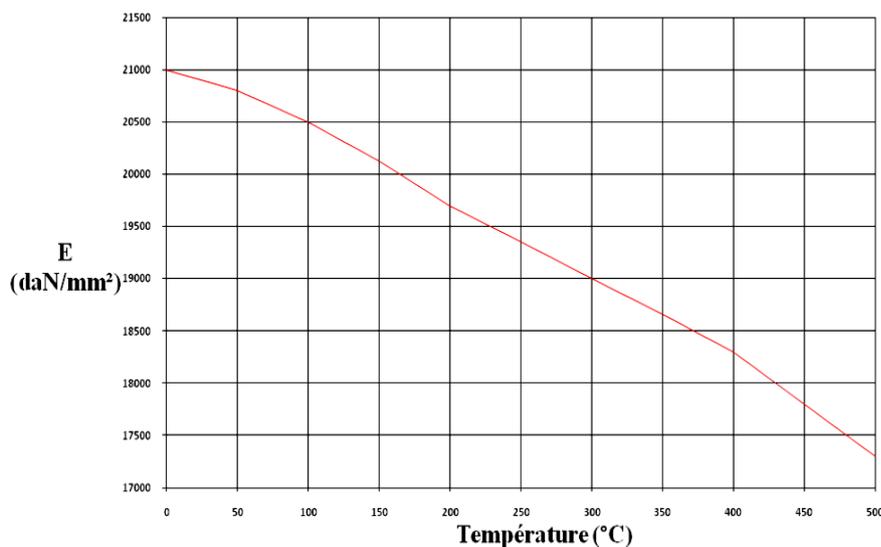


Figure II.01 : Evaluation du module de Young avec la température.

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

$$I = \frac{d^3 * \pi * e}{8} = 0.39 d^3 * e \tag{II.01}$$

d étant le diamètre moyen (d+e) du tube ou du four dans notre cas dont « 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 pourquoi l'augmentation du diamètre des fours n'entraîne pas d'autant l'augmentation de l'épaisseur de la virole. La rigidité d'un four est 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.

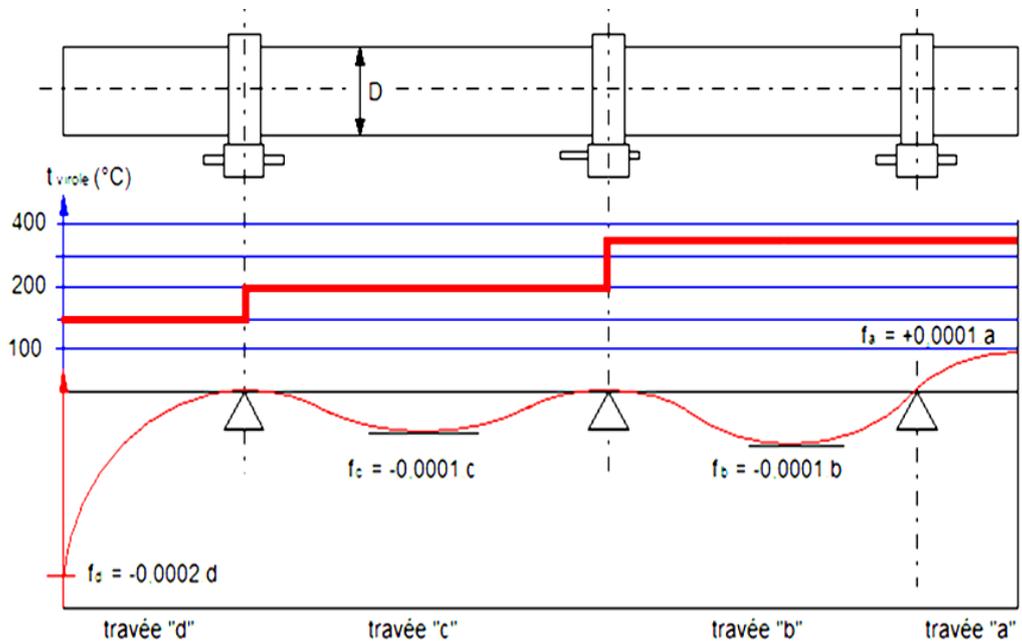


Figure II.02 : Déflexion des différentes travées du four.

Dans la figure II.02 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 travées « a » se déduit de la formule :

$$f_a = \frac{p_a * a * (a+b)}{24 * E * 0.39 * D_N^3 * e_a} * (3a^2 + a * b - b^2) \quad (\text{II.02}).$$

Dans cette travée « a » et suivant la figure II.02, la température est de 350°C et la figure II.01 donne (18700daN/mm²). Dans cette même travée, la charge linéaire P_a en tonne par mètre linéaire qui comprend la charge du maçonnerage réfractaire, le croutage et la charge de la matière ainsi que le poids linéaire du four, s'évalue par les formules (II.06), (II.07), (II.08), (II.09), (II.10).

La flèche de la travée « b » se déduit de la formule :

$$f_b = \frac{P_a * a * (a+b)}{384 * E * 0.39 * D_N^3 * e_b} * (5b^2 - 12a^2) \quad (\text{II.03}).$$

De même, les différentes charges se calculent d'une façon similaire, à l'exception d'un paramètre qui change à savoir la hauteur du croutage h'.

La flèche de la travée « c » se déduit de la formule :

$$f_c = \frac{P_c * c^2}{384 * E * 0.39 * D_N^3 * e_c} * (5c^2 - 12b^2) \quad (\text{II.04}).$$

La charge linéaire P_c se déduit en considérant les paramètres changeant suivants : Le briquetage étant en alumine à 75-80 % sur ≈ 25% de la travée avec 2,6 t/m³ et 40-42 % sur ≈ 75% avec ρ = 2,3 t/m³ ce qui donne une densité moyenne de ρ = 2,6 × 0,25 + 2,3 × 0,75 = 2,4 t/m³ croutage faible existant uniquement sur 20 % de la travée dont la hauteur h' = 100 mm :

La flèche de la travée « d » se déduit de la formule :

$$f_d = \frac{P_d * d * (c+d)}{24 * E * 0.39 * D_N^3 * e_d} * (3d^2 + c * d - c^2) \quad (\text{II.05}).$$

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 t/m³) ce qui donne une densité moyenne de croutage inexistant. La charge de la matière se déduit sur la base d'un taux de remplissage de ≈ 24 % et ρ" = 0.9 t/m³.

II.1.1.1. 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.

$$Cr(a) = h_{brique} * 10^{-3} * \phi_N * \pi * \rho \quad (\text{II.6}).$$

II.1.1.2. 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. Ces ponts de liaison sont beaucoup plus rares dans le cas des magnésies-chromes à liaison directe et encore moins dans les spinelles en raison de la grande pureté des composants de la brique ; la charge de croûtage est donné par

$$Cc(a) = h' * 10^{-3} * (\phi_N - 2h_{brique}) * \pi * \rho' \quad (II.7).$$

II.1.1.3. 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.

$$Cc(a) = 0.14 * [\phi_N - 2 * (h_{brique} + h')]^2 * \rho'' \quad (II.8).$$

II.1.1.4. Charge linéaire de la virole du four :

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

$$Cv(a) = \phi_N^2 * 6.5 * 10^{-3} * \pi * \rho''' \quad (II.9).$$

II.1.1.5. La charge linéaire totale :

La charge linéaire totale est la somme des charges énumérées ci-dessus :

$$Ct = Cr(a) + Cc(a) + Cm(a) + Cv(a) \quad (II.10).$$

II.1.2. 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)

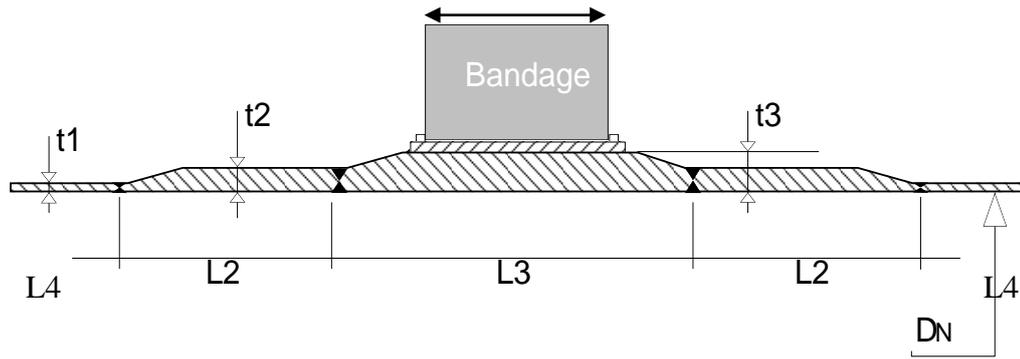


Figure II.3 : Les différentes épaisseurs des viroles du four.

bandage	L2	L3	L4
bandage 1 (entré matière)	5 à 7 x Largeur du Bandage	2,5 à 3 x Largeur du Bandage	
bandage 2	2 x Largeur du Bandage	2,2 à 2,5 x Largeur du Bandage	3 à 4 x Largeur du Bandage
bandage 3	2 x Largeur du Bandage	2,5 x Largeur du Bandage	2 x Largeur du Bandage

Tableau II.1 : Relation entre la vérole et le bandage.

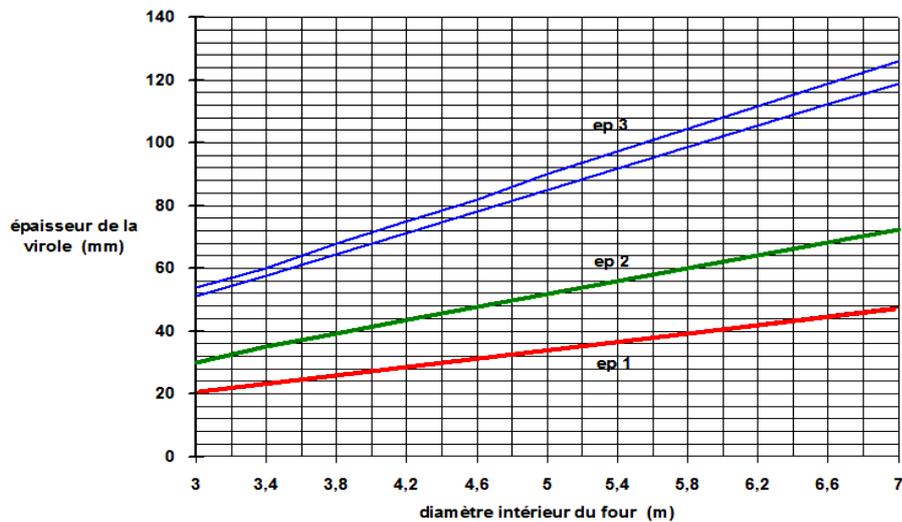


Figure II.4 : Relation entre l'épaisseur et le diamètre de la virole.

II.1.3. Ovalisation des viroles :

Le suivi et le contrôle de l'ovalisation des viroles sont très importants pour l'ingénieur d'exploitation du fait de la très forte corrélation entre consommation de réfractaire et ovalisation de la virole au droit des bandages.

La définition de l'ovalisation de la virole (%) est la suivante (figures II.5a et II.5b) :

$$\omega_v = \frac{D_h - (D_v - S)}{D_s} 100 \quad (\text{II.11}).$$

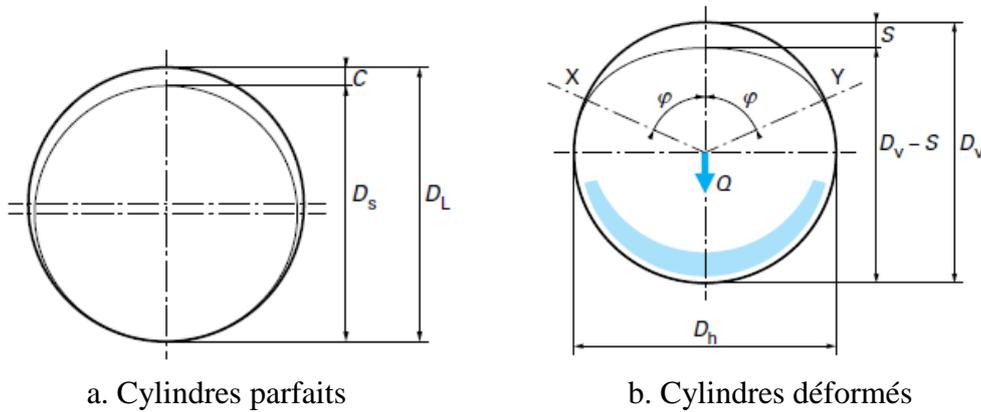


Figure II.5 : Ovalisation de la virole.

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

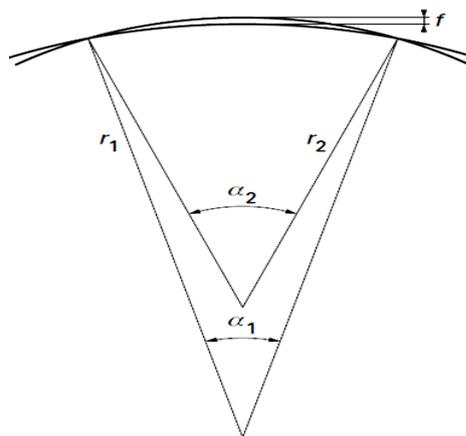


Figure II.6 : Principe de méthode de SHELLTEST.

L’appareil SHELLTEST consiste en une poutre métallique rigide de 1 m 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 : [24]

$$\omega_v = \frac{4 D_s}{3 L^2} f 100 \quad (\text{II.12}).$$

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 6.

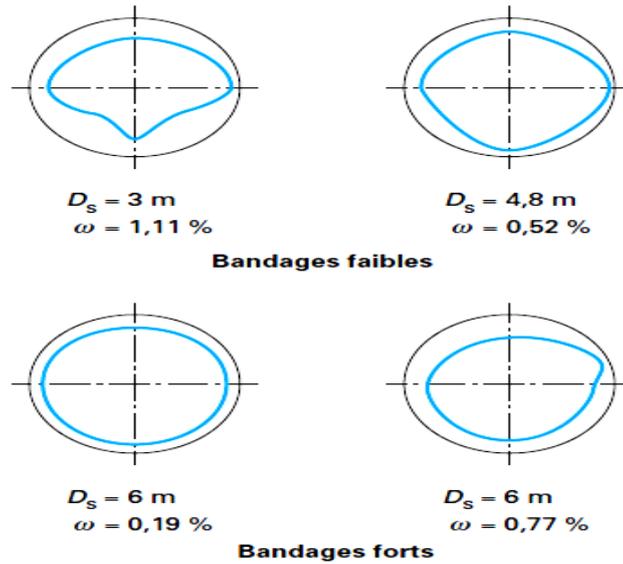


Figure II.7 : Diagrammes méthode de SHELLTEST.

II.1.3.1. Valeurs d'ovalité admissibles en fonction du diamètre du four :

Afin de garantir des valeurs de contraintes mécaniques tout à fait acceptables, il y a lieu de se référer aux données du graphique, où sont représentées les valeurs d'ovalité en fonction du diamètre du four. Le graphique (Figure II.8) représente la dépendance de l'ovalité de la virole du four en fonction de son diamètre intérieur pour [23]:

- Courbe 1 : des bandages flottants après exploitation prolongée,
- Courbe 3 : des bandages crantés (valeurs optimales),
- Aire 2 : délimitée par la courbe aux valeurs maximales tolérées et courbe aux valeurs minimales souhaitées.

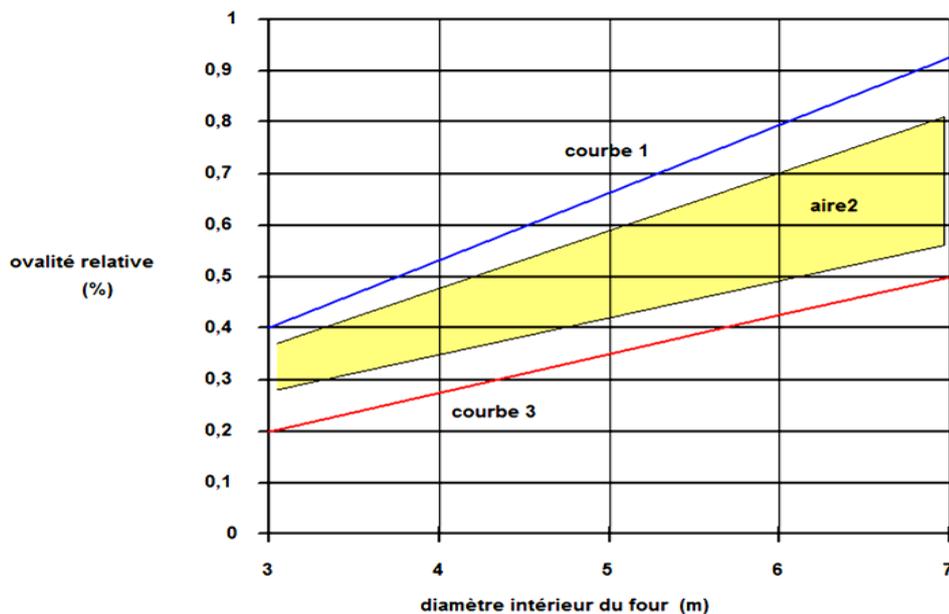


Figure II.8 : L'ovalité de la virole du four en fonction de son diamètre intérieur.

II.1.3.2. Correction de l'ovalité du four :

Lorsque l'ovalité du four devient importante, suite à un long service, et pour des raisons évidentes de longévité du garnissage réfractaire, il devient impératif de procéder à une correction des épaisseurs de fourrure, par adjonction d'une tôle sous la fourrure déjà existante [2]. Pour le faire, la formule suivante est utilisée :

$$t_c = t_{cb} + \Delta D - \frac{c}{2} \tag{II.13.}$$

II.1.3.3. Contraintes mécaniques dues à l'ovalité :

La contrainte mécanique sur la tôle de la virole s'exprime par la relation suivante :

$$\sigma = 3 \frac{\omega.a.E.e}{D_N^2} \tag{II.14.}$$

Les représentations graphiques (Figure II. 9 - Figure II. 10) illustrent la relation entre l'ovalité relative et l'épaisseur de la virole en fonction de la déflexion déduite du SHELLTEST et contrainte mécanique [2].

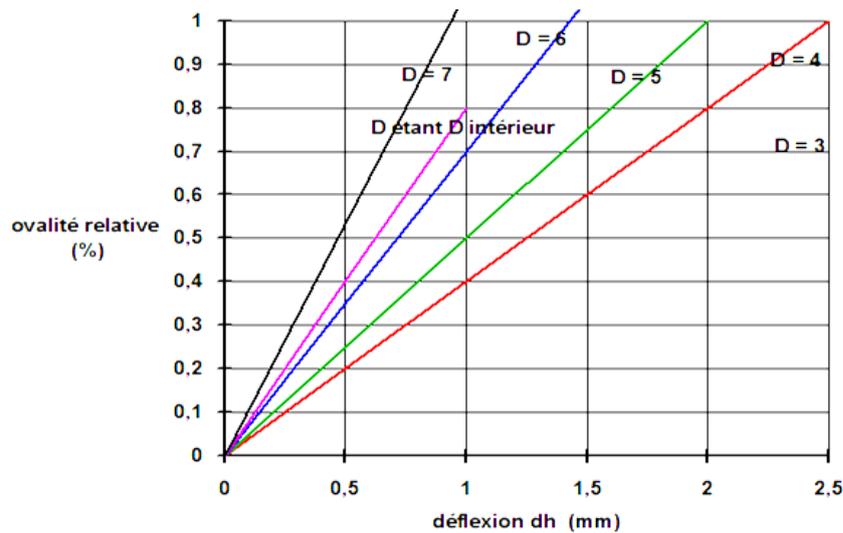


Figure II. 9 : La relation entre l'ovalité relative et le diamètre de la virole.

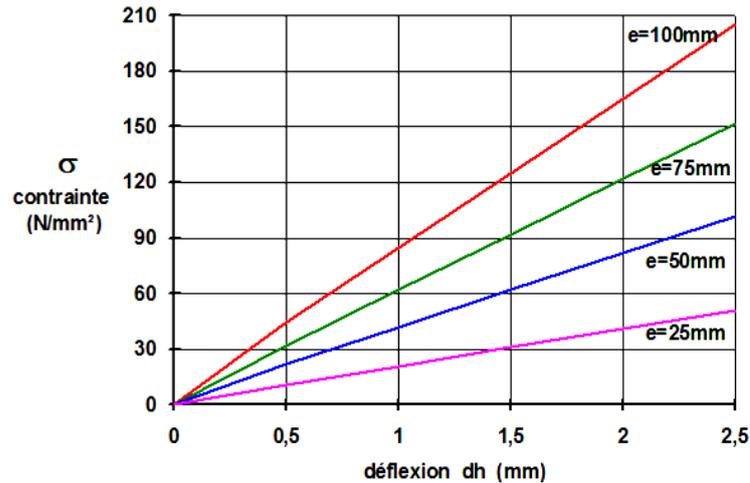


Figure II. 10 : La relation entre les contraintes relative et l'épaisseur de la virole.

Si nous admettons que l'ovalité relative admissible (en %) est de l'ordre de $D_N/10$, alors pour un four de diamètre nominal $D_N = 5$ m, la déflexion d'après le graphe II.9 est de l'ordre de (1 mm) permet la déduction de l'épaisseur de la virole en fonction de la valeur de la contrainte.

D'autre part, des contraintes mécaniques (martelage de la virole) agissent sur l'anneau de briques réfractaires à l'intérieur du four, qui peuvent être évités en respectant un jeu admis entre la virole et le bandage, dont la valeur est-elle même conditionnée par la différence de température qui y règne entre elles, surtout lors du préchauffage, qui induit une plus grande dilatation de la tôle du four avec le risque pour un jeu incorrecte de provoquer son étranglement par le bandage trop massif, avec pour conséquence une augmentation du jeu lors de l'équilibre des températures [23].

Lors du dimensionnement le jeu à froid « S_f » qui reste fonction du diamètre pour :

- Bandages des zones chaudes : $S_f = 0,002 \cdot D_{int}$,
- Bandages des zones froides : $S_f = 0,0008 \cdot D_{int}$.

II.1.3.4. Contraintes thermiques dans la virole et son bandage :

Le graphe (Figure II.11) 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.

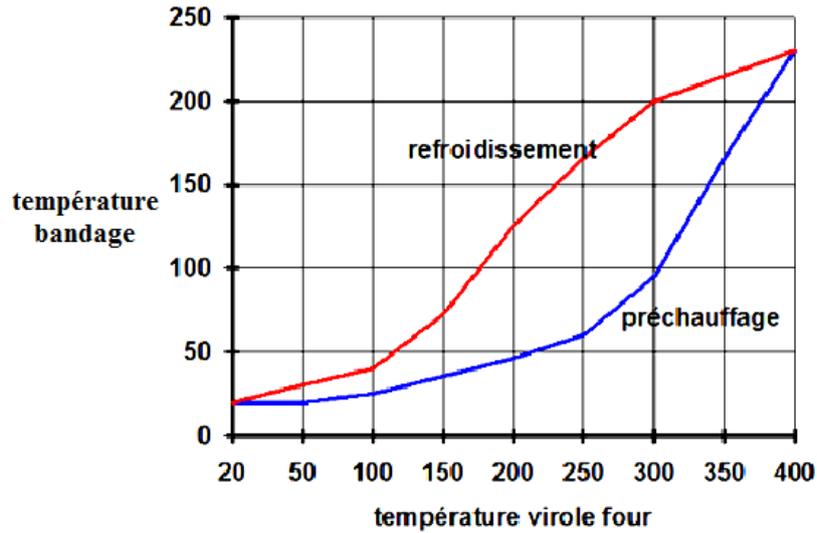


Figure II.11 : La différence croissante de température entre la virole et le bandage.

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

$$\Delta T = 10/D\lambda \tag{II.15}.$$

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

$$\Delta L = \lambda \cdot L_o \cdot \Delta T \tag{II.16}.$$

$$\Delta D = \lambda \cdot D_o \cdot \Delta T \tag{II.17}.$$

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 :

$$\sigma = \lambda \cdot \Delta T \cdot E \text{ (E étant le module d'élasticité de Young qui pour l'acier vaut 210000 N/mm}^2\text{)}$$

Pour une augmentation de la température de 1 °C :

$$\sigma = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot \Delta T = 2,52 \cdot \Delta T \text{ donc } \sigma = 2,52 \text{ N/mm}^2$$

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 (200/2,52) [23].

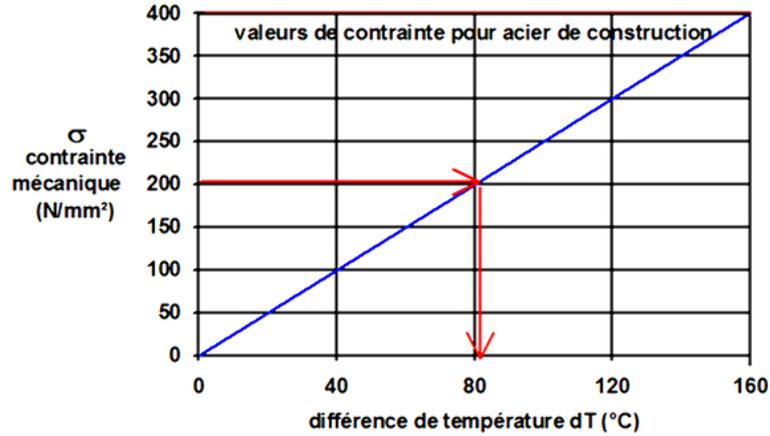


Figure II.12 : Valeur de contrainte pour acier de construction.

II.1.4. Déplacement relatif virole-bandage :

Le déplacement (ou glissement) U entre virole et bandage (figure II.5a) est défini par :

$$U = \pi D_L - \pi D_S = \pi C \tag{II.18}$$

La mesure simultanée du glissement 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). La figure II.14 représente quelques courbes obtenues avec cet outil de contrôle [3].

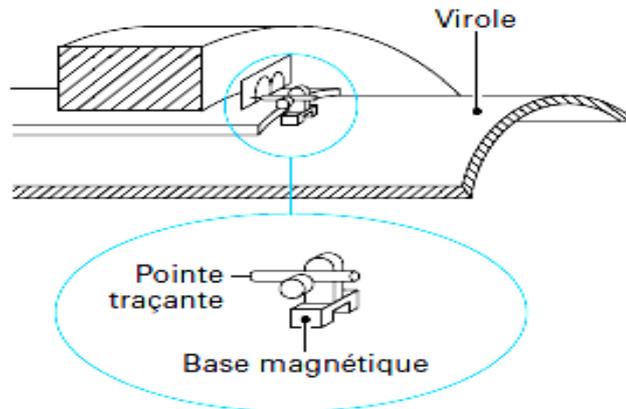


Figure II.13 : Appareil de mesure du glissement et du jeu.

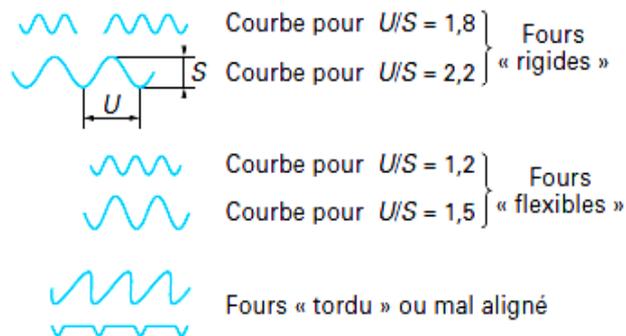


Figure II.14 : Traces du jeu (S) et du glissement (U).

II.1.5. 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 [3].

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.2 : 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 :

$$p = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{\min}}{\pi} - j_c \right) \quad (\text{II.19}).$$

On prend en général : $j = 3$ mm pour $D = 4$ m ; $j = 5$ mm Pour $D = 6$ m.

Pour un four de diamètre (5m), on estime que le déplacement relatif doit être limité à (15 mm) par tour. [3]

II.1.6. 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. [3]

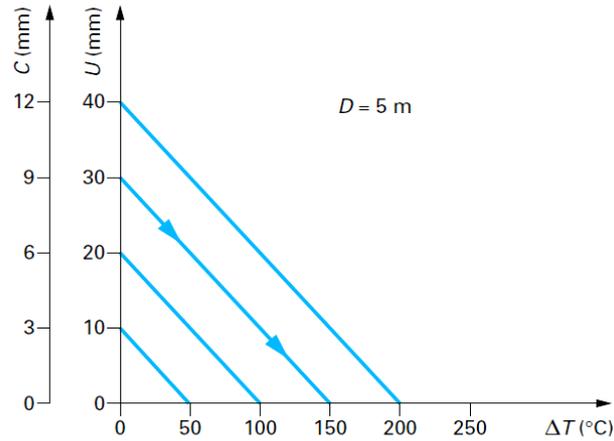


Figure II.15 : Écart de température maximal admissible en fonction du jeu à froid.

Des systèmes de contrôle en continu « embarqués » (tournant avec le four) ont été développés pour permettre la surveillance du jeu, plus particulièrement dans les phases d'allumage.

II.1.7. La méthode de mesure de déformation de la virole :

Le cylindre du four rotatif se compose de plusieurs sections transversales liées. En pratique, ils mesurent le profil de chaque section. Sur la base des résultats de mesure concernant toute la section l'écart de stabilité du cylindre du four rotatif et la déformation de la surface ont pu être calculés. Le diagramme principal de mesure est montré dans Figure II.16. [14]

La méthode de mesure est montrée en Figure II.17.

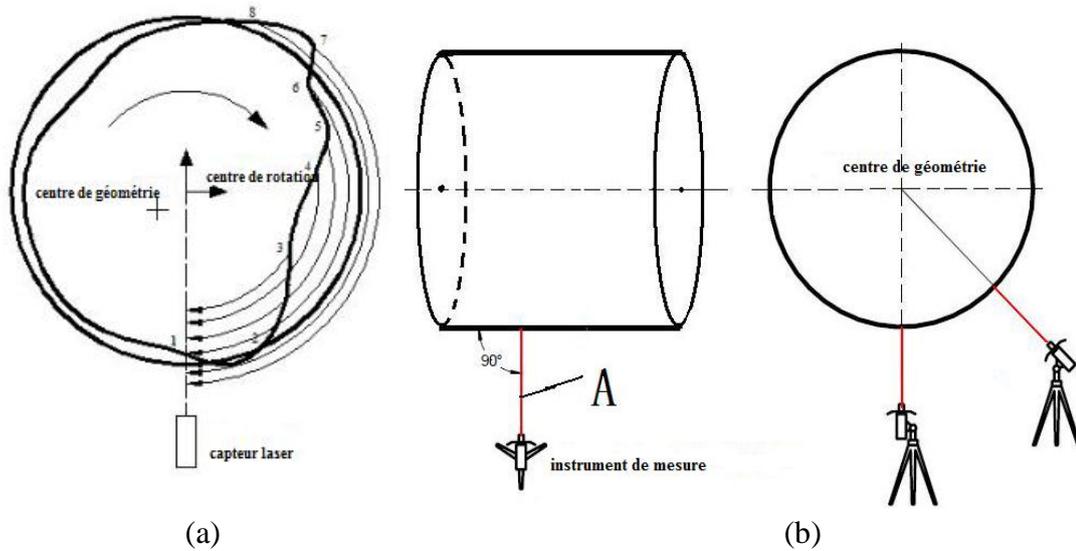


Figure II.17 : schéma de la méthode de mesure

- (a) diagramme schématisant la mesure de la déformation de la section du cylindre tournant en fonction du balayage laser
- (b) schématisant de l'installation de l'instrument de mesure.

II.1.8. La méthode géométrique :

Le cylindre du four est divisé en N section (N > 20) avec la coordonné X pendant la mesure, puis nous mesurons la section transversale l'un après l'autre en utilisant le capteur laser. La droite de rotation est entourée par toutes les sections mesurées tandis que le four rotatif est la courbe incluant tous les centres géométriques des sections. [13] Le problème concernant la déviation de rectitude du four rotatif peut être transformé en résolution du centre géométrique et de l'excentricité de la section mesurée. Nous supposons que la déviation radiale ζ est la valeur de la différence entre les contours et le cercle de base satisfait à restreindre de :

$$\sum_{i=1}^n \xi_i = 0 \quad , \quad \sum_{i=1}^n \xi_i^2 = \min \tag{II.21}.$$

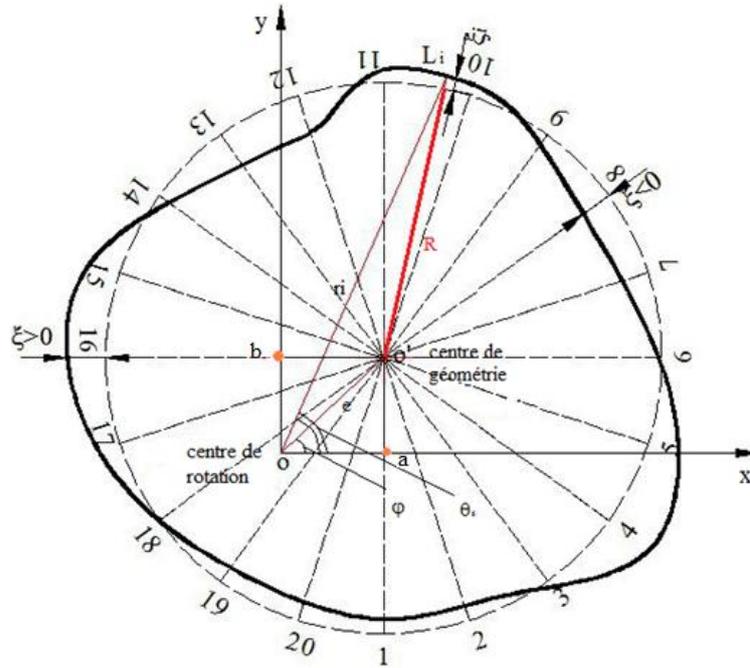


Figure II.18 : le modèle géométrique de la méthode de calcul.

Comme représenté sur la Figure II.18, il y a un cercle moyen de profil de section, qui un cercle en utilisant la méthode de calcul, le cercle de base basé sur les données de mesure peut être calculé. La définition des paramètres est la suivante (Figure II.18) :

L'excentricité est :

$$e = \sqrt{a^2 + b^2} \tag{II.22}.$$

Par l'analyse géométrique de $\Delta L_i O O'$

$$r_i = e \cos(\theta_i - \varphi) + \sqrt{(R + \xi_i)^2 + [e \sin(\theta_i - \varphi)]^2} \tag{II.23}.$$

Puisque $e \ll R$, $\sin(\theta_i - \varphi) \leq 1$, et $a = e \cos \varphi$, $b = e \sin \varphi$ l'équation (II.23) peut être approchée comme :

$$\xi_i = r_i - R - a \cos \theta_i - b \sin \theta_i \tag{II.24}.$$

Où ξ_i est la distance radiale du point $L_i (x_i, y_i)$ au cercle de base.

Comme $\sum_{i=1}^n \xi_i = 0$, $\sum_{i=1}^n \xi_i^2 = \min$. On peut avoir :

$$R = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n r_i \tag{II.25}.$$

$$a = \frac{2}{n} * \sum_{i=1}^n r_i \cos \theta_i \tag{II.26}.$$

$$b = \frac{2}{n} * \sum_{i=1}^n r_i \sin \theta_i \tag{II.27}.$$

Il suppose que le rayon dynamique du four rotatif est $r_i = R_c + \Delta r_i$, où R_c est le rayon moyen de chaque section transversale et Δr_i est la valeur de la différence de rayon de

chaque section qui peut être mesurée par le capteur. Et les formules (II.26) et (II.27) peuvent être transformé on (II.28) et (II.29) :

$$a = \frac{2}{n} * \sum_{i=1}^n \Delta r_i \cos \theta_i + \frac{2}{n} * \sum_{i=1}^n R_c \cos \theta_i \quad (\text{II.28}).$$

$$b = \frac{2}{n} * \sum_{i=1}^n \Delta r_i \sin \theta_i + \frac{2}{n} * \sum_{i=1}^n R_c \sin \theta_i \quad (\text{II.29}).$$

En outre, la formule (II.28) et (II.29) peut être changé en (II.30) et (II.31) :

$$a = \frac{2}{n} * \sum_{i=1}^n \Delta r_i \cos \theta_i \quad (\text{II.30}).$$

$$b = \frac{2}{n} * \sum_{i=1}^n \Delta r_i \sin \theta_i \quad (\text{II.31}).$$

Par conséquent, le centre géométrique (a, b), le rayon de cercle de base R et l'excentricité de chaque section peuvent être calculés par les formules (II.25), (II.30), (II.31). En reliant tous les centres géométriques des sections mesurées, l'écart de rectitude du cylindre de four peut être calculé.

Conclusion :

Le présent chapitre, nous donnée une idée claire sur la formulation mathématique qui sera mis en évidence lors de notre simulation dans le chapitre IV. Elle est séparée en différentes étapes, qui sont la partie dimensionnement de notre four à travers le calcul des épaisseurs des différentes viroles, le calcul des différentes charges qui vont être subit par le four lors de son mise en service. Ensuite, c'est lors de l'exploitation de notre équipement, que vient les endommagements permanents et non permanent, tel que l'ovalité, qui un problème très crucial lorsqu'elle devient dans la phase plastique. Enfin, on vue une formulation, qui aide à diagnostiqué ce type de problème qui est l'ovalité ou la déformation de la virole.

Chapitre III



**Modélisation et simulation
numérique par ANSYS**

Introduction :

Un modèle mathématique est une représentation ou une interprétation abstraite de la réalité physique qui est accessible à l'analyse et au calcul. la simulation permet de calculer sur ordinateur les solutions de ces modèles, et donc de simuler la réalité physique

La simulation numérique tend à prendre de plus en plus d'importance dans le développement des projets scientifiques actuels étant moins onéreuse et plus flexible.

Dans ce chapitre nous souhaitons présenter notre travail de simulation effectué grâce au logiciel ANSYS-WORKBENCH.

III.1. Principales méthodes de discrétisation :

Il existe deux grandes familles de méthodes de discrétisation :

- Les méthodes d'approximation des équations :

Selon ces méthodes, on cherche une solution exacte des équations approchées car les opérateurs différentiels sont discrétisés sur un maillage (la méthode des différences finies et la méthode des volumes finis) ;

- Les méthodes d'approximation des solutions :

Selon ces méthodes on cherche une solution approchée à partir des équations exactes.

Les solutions sont écrites comme des séries de fonctions tronquées aux ordres de précisions désirées (les méthodes spectrales et la méthode des éléments finis) [25].

III.1.1. Méthode des Différences Finis (MDF)

La méthode des différences finies, présente une technique de résolution des équations aux dérivées partielles, par l'approximation de dérivées par des différences finies. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en un nombre déterminé de nœuds et à représenter la fonction recherchée en chacun des nœuds du domaine par un développement limité en série de Taylor. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en équation algébrique pour chaque nœud. La résolution du système d'équations algébriques permet d'obtenir la distribution de la fonction étudiée dans le domaine d'étude.

La méthode de différence finie ne permet pas la prise en compte des conditions de passage d'un milieu physique à un autre et des non-linéarités, cela nécessite un traitement spécifique. D'autre part, elle s'adapte mal aux objets de la géométrie complexe à cause de la rigidité du maillage [26].

III.1.2. Méthode des éléments finis (MEF)

Cette méthode consiste à transformer les équations différentielles sous des formes intégrales basées sur le concept de minimisation d'une quantité (comme l'énergie...), conduisant à la solution exacte. En d'autre terme elle s'agisse de trouver une fonction globale représentant le modèle mathématique dans le domaine étudié.

La MEF est une méthode très puissante pour la résolution des équations aux dérivées partielles surtout dans les géométries complexes. Sa mise en œuvre par contre, est assez compliquée et nécessite une place mémoire assez importante [26].

III.1.3. Méthode des volumes finis (MVF)

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 tel que le terme source par exemple. 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 modélisantes 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 [26].

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.

Dans ce travail on étudie le comportement mécanique d'une virole d'un four rotatif de cimenterie LafargeHolcim OGGAZ, 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.

Dans le but de bien cerner notre problème et de déterminer la répartition des contraintes et des déformations mécaniques pour notre four (brique réfractaire, ensemble des véroles), nous avons utilisés des différents logiciels (ANSYS WORKBENCH et SOLIDWORKS). 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	/
Angle d'alignement des galets	30	Dégré

Tableau III.1 : Dimensions du four de cimenterie LafargeHolcim.

Les différentes caractéristiques physiques, et mécaniques de l'acier 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.1 montre que le four étudié comporte un ensemble des viroles soudées l'une avec l'autre et le brique réfractaire placée à l'intérieur du four comme un revêtement de protection.

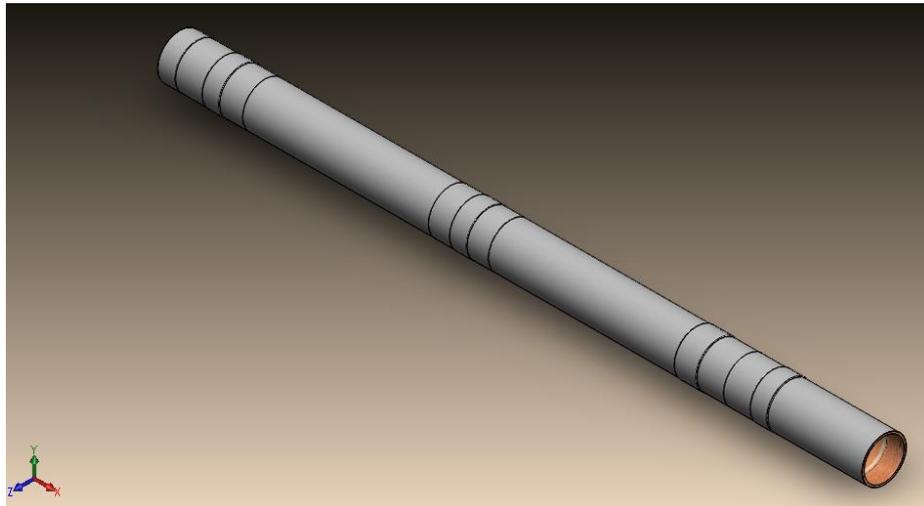


Figure III.1 : Géométrie du four rotatif de cimenterie.

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 croutage, faisant ainsi, on se permet de faire une comparaison entre les cas en se basant sur les résultats obtenus.

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

Nous avons calculé des différentes charges qui sont appliqué sur le four ainsi que la production d'un four à ciment de est égale 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.6)
- Charge linéaire du croûtage par l'équation (II.7)
- Charge linéaire de matière par l'équation (II.8)
- Charge linéaire de la virole du four par l'équation (II.9)
- La charge linéaire totale est donc la somme des charges par l'équation (II.10).

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 Outil de simulation SOLIDWORKS et WORKBENCH :

SOLIDWORKS : Nous avons choisi ce logiciel pour modéliser notre four rotatif car il nous a permis de la réaliser avec une très grande précision du point de vue dimensions et formes géométriques.

ANSYS-WORKBENCH : nous avons utilisé ce logiciel pour l'estimation le cumul de déformation.

III.4.1 Outil SOLIDWORKS :

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur fonctionnant sous Windows. Ce logiciel sert à des ingénieurs, des concepteurs pour l'élaboration de plans de pièces mécaniques, de prévisualisation 3D. Ce logiciel est donc utilisé par des entreprises ayant comme secteurs d'activité l'industrie, la médecine, les transports, la grande consommation, les sciences, etc.

III.4.2 Présentations du logiciel ANSYS et WORKBENCH :

ANSYS est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les outils proposés permettent de résoudre les problèmes de validation produits de manière efficace et d'optimiser le processus de conception (gain de temps). Les industriels conçoivent des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts.

Généralement, les logiciels de calcul par éléments finis sont très peu abordables et nécessitent d'importantes connaissances en calcul. L'interface Workbench d'ANSYS qui englobe les différents niveaux de l'outil de simulation et les différents modules a été conçue pour être utilisée sans avoir nécessairement une formation basée sur les éléments finis :

- L'interface est très intuitive offrant une prise en main très rapide du logiciel.
- L'automatisation de la reconnaissance des zones de contacts et la génération du maillage facilitent la préparation du modèle.

III.4.3. Modélisation dans ANSYS :

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.

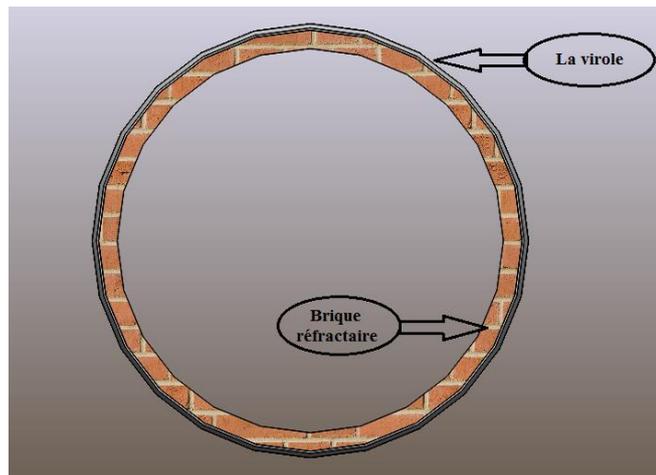


Figure III.2 : Modèle complet dans SOLIDWORKS (vue de face).

Ce modèle est tellement complexe qu'il prend beaucoup de temps. Il faut simplifier le modèle pour obtenir une solution assez précise. L'ensemble virole et brique réfractaire sera modélisé. On prend en considération l'effet de vitesse de rotation et la position des appuis.

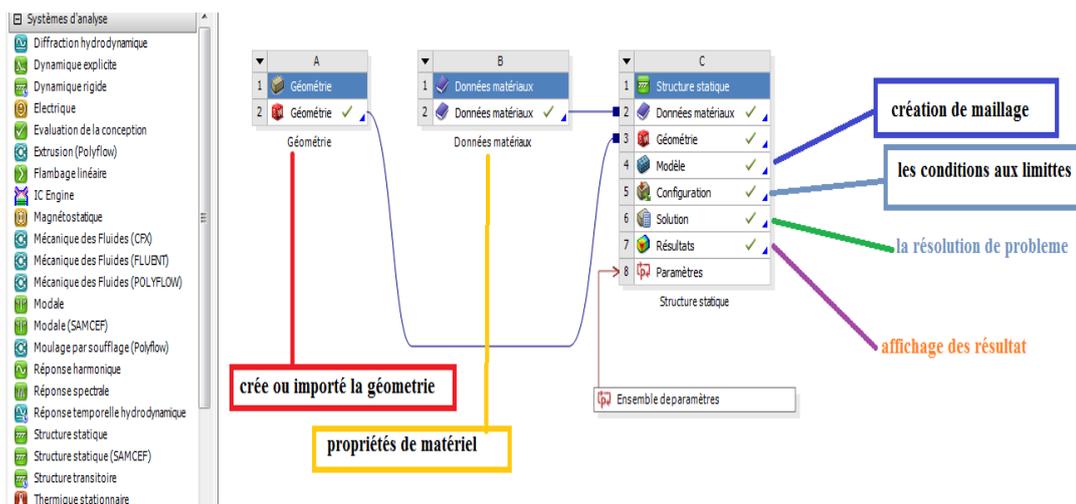
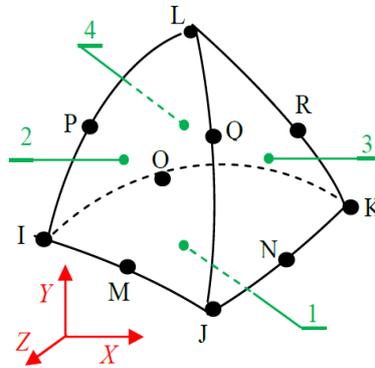


Figure III.3 : définition du domaine étudié dans Workbench.

III.4.5 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 III.4.



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.4 : Élément tétraèdre quadratique iso-paramétrique à 10 nœuds.

Pour déterminer la taille optimale et le nombre d'éléments dans les deux directions circonférentielles et longitudinales, nous avons fait un certain nombre d'expériences ont été réalisées avec différentes topologies de maillage.

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 en vain.

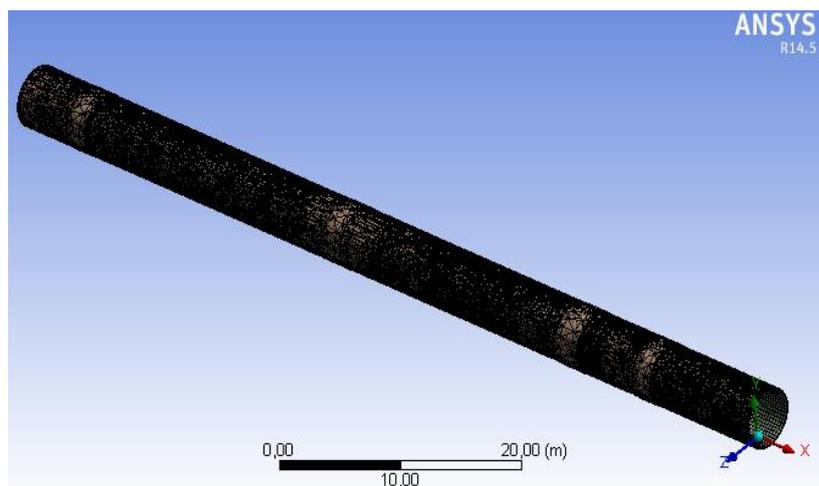


Figure III.5 : Maillage tétraédrique du four.

	Élément	Nœud
Four (ensemble)	55593	182485
Brique réfractaire	14904	101278
Virole	40689	81207

Tableau III.5 : Paramètres de maillage.

III.4.6 Condition aux limites dans ANSYS Workbench :

La simulation a été menée pour les trois cas suivants :

III.4.6.1 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 la brique réfractaire est calculé automatiquement par logiciel.

Dans le cadre de cette simulation, la virole et la brique sont considérées 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/s² ;
- La charge de la couronne d'entraînement de 20000N ;
- Les trois appuis considérés comme des supports cylindriques.

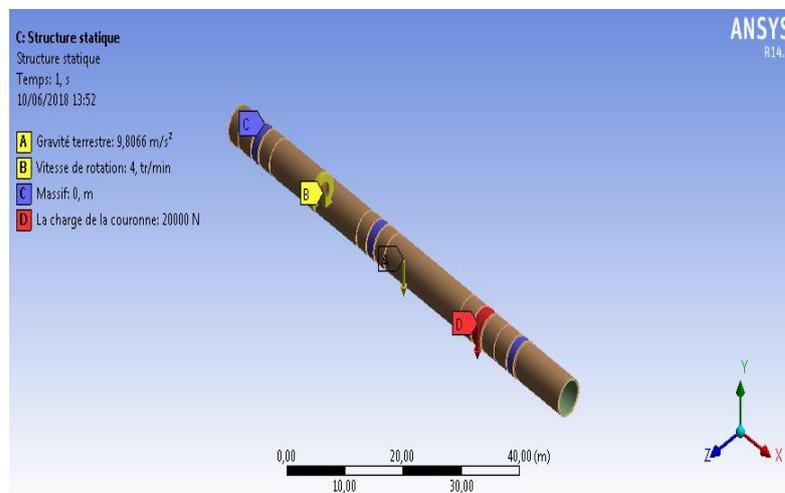


Figure III.6 : Représentation de chargement sur le four de 1^{er} cas.

III.4.6.2 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 3 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.

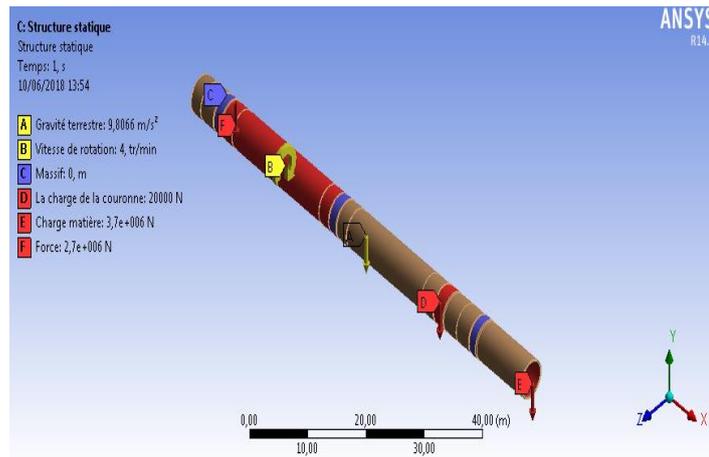


Figure III.7 : présentation des conditions aux limites de 2^{ème} cas.

III.4.6.3 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 figure **III.8** montrée les conditions aux limites sont :

- La vitesse de rotation du four de 3 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 ;
- Epaisseur de brique réfractaire (50,100, 150, 200 mm).

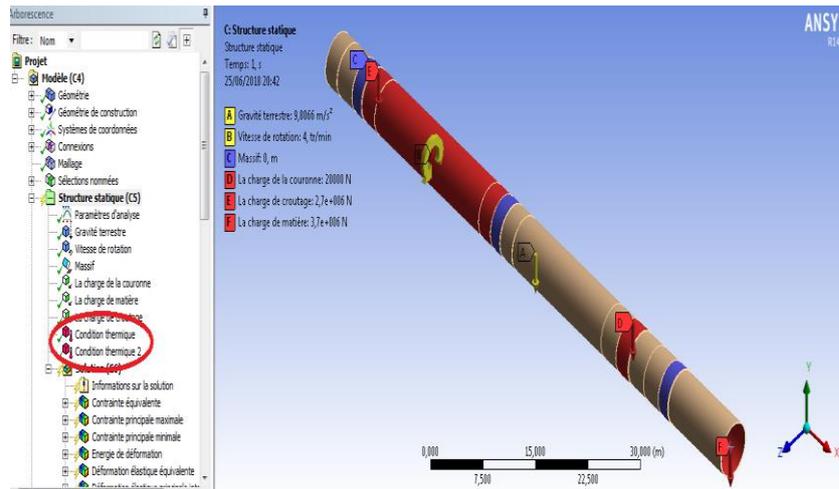


Figure III.8 : présentation des conditions aux limites de 3^{ème} cas.

Conclusion :

Ce chapitre a été consacré pour la présentation des outils numériques utilisés pour la résolution de notre problème à savoir l'ANSYS WORKBENCH. Les résultats et leurs interprétations seront détaillés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV



Résultats et discussion

Introduction :

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

Le chapitre IV est consacré à l'interprétation des résultats numériques obtenus par la simulation de four rotatif. La discussion générale de ces résultats distingue les aspects scientifiques des aspects industriels. 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 trois 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 on néglige l'effet de température;
- 2^{ème} cas : On ajoute les différentes charges (croustage et matière) avec une vitesse de rotation constante on néglige l'effet de température;
- 3^{ème} cas : On applique les différentes charges (croustage et matière) avec une vitesse de rotation constante, une température à l'extérieur et à l'intérieur et on varie l'épaisseur de la brique réfractaire;

IV.1 Discussions des résultats :

Les études suivantes présentent les résultats obtenus par la simulation numérique réalisée sous ANSYS Workbench, avec la représentation de la répartition des contraintes équivalentes, les déplacements totaux, la déformation élastique le long du four et l'illustration de l'ovalisation dans les sections les plus sollicitées.

IV.2. La contrainte mécanique :

Après avoir simulé le four rotatif, nous obtenons les résultats montrés sur les figures IV.1, IV.2, IV.3 et IV.4 qui incluent les contraintes équivalentes (Von-Mises).

IV.2.1. La validation :

Comme première étape, on doit passer par une validation de notre méthode de calcul utilisée et cela pour donner une crédibilité à notre étude. Pour assurer cette validité du modèle numérique, on utilise la méthode des éléments finis, nos résultats montrés ci-dessous ont été comparés avec ceux de K. Pazand [15] qui sont présentés sur la figure IV.1. On constate que, les résultats de notre simulation sont proches de ceux de Pazand.

La figure IV.1.B (notre cas d'étude) montre la distribution de la contrainte équivalente (Von-Mises) sur la surface externe de la virole du four. On distingue que la contrainte de Von Mises varie de 408,09 Pa jusqu'à 11.203 MPa, on peut voir que le niveau de contrainte est maximal au niveau et à proximité des appuis.

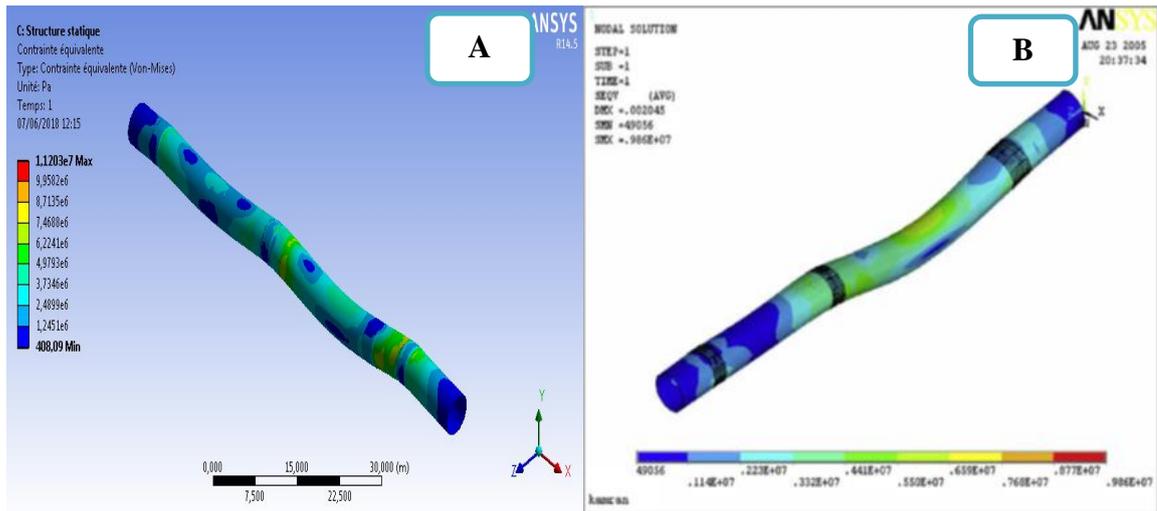


Figure IV.1 : présentation des contraintes équivalentes (Von Mises) A : étude de notre cas; B : PAZAND.

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.1, 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 11.203 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 : K. Pazand a traité un four de longueur de 71,5 m et de diamètre de 4,8 m, d’autre part dans notre cas, la longueur du four est de 80 m et de diamètre de 5 m ;
- Caractéristiques physique de brique réfractaire ;
- Certaines conditions aux limites.

La figure IV.2 représente la trajectoire utilisée pour bien montrer la répartition des contraintes le long du four rotatif.

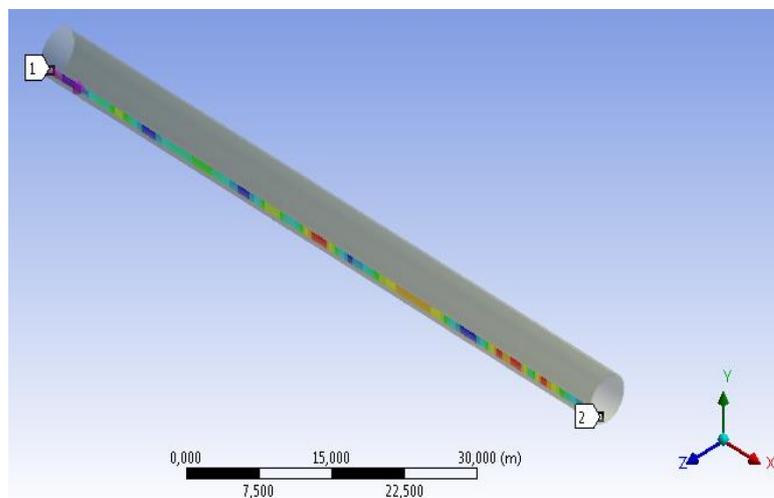


Figure IV.2 : Représentation de la trajectoire utilisée sur la longueur du four.

La figure IV.3 montre l'évolution de la contrainte mécanique le long du four sur la trajectoire que nous avons représenté précédemment dans la figure IV.2 où on peut remarquer que la zone sollicitée au niveau des appuis travaille en compression et en traction ; près des zones d'appui il y'a concentration de contraintes.

On remarque en aval du four la concentration des contraintes qui est présentées dans la figure IV.3 moins importante, après une distance de 7 m les contraintes augmentent en forme de pic dans les trois modes des contraintes. Au niveau de la couronne la contrainte équivalente prend la valeur maximale de 0.3 MPa, qui est dû au poids de la couronne.

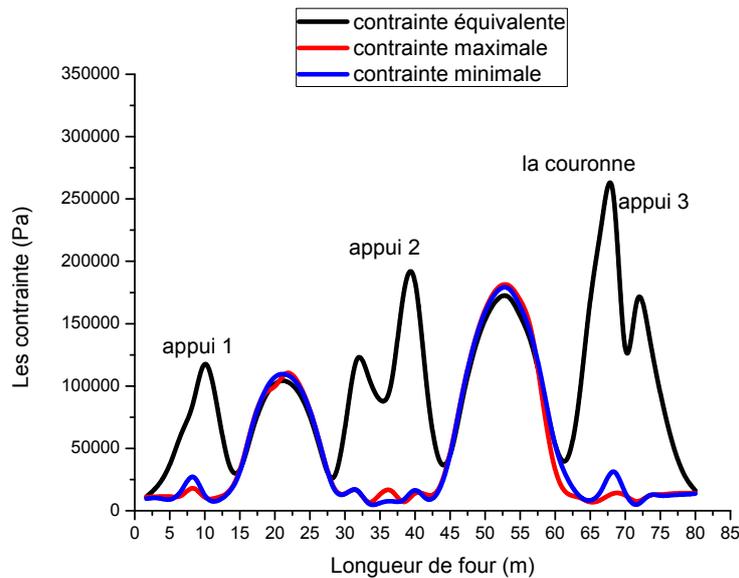


Figure IV.3 : La variation du champ de la contrainte mécanique 1^{er} cas.

La figure IV.4 montre la distribution de contrainte équivalente (Von-Mises) sur la surface externe de la virole du four, qui varie de 4127 Pa jusqu'à 18 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.

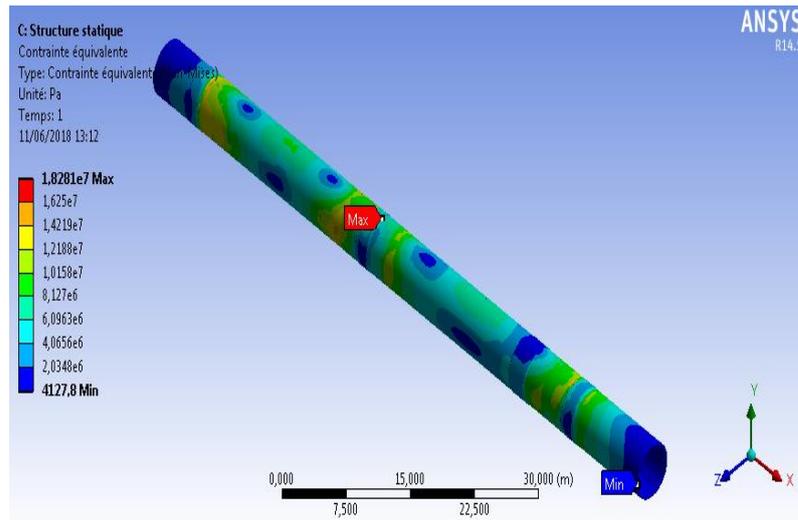


Figure IV.4 : présentation des contraintes équivalentes.

La figure IV.5 montre l'évolution des contraintes en fonction de la longueur du four et avec les conditions aux limites de deuxième cas cité dans le chapitre 3, c'est-à-dire le four en plein charge. On remarque qu'à la distance $L = 32.5$ m, la contrainte équivalente atteint son maximum de 0.35 MPa. Cette variation liée à la nouvelle charge de croustage qui situé dans la premier zone du four depuis 5 m jusqu'à 35 m.

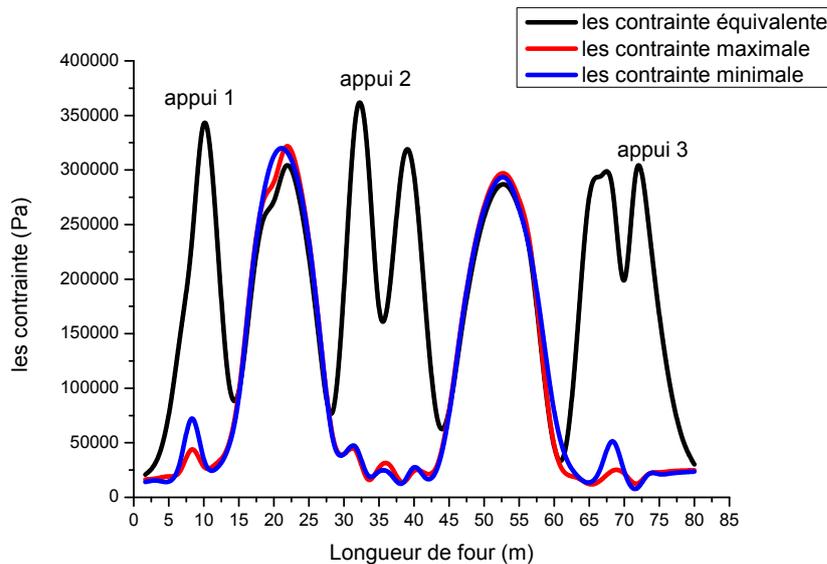


Figure IV.5 : La variation du champ de la contrainte mécanique 2^{ème} cas.

IV.3. La déformation élastique et le déplacement total :

La figure IV.6 montre la variation de la déformation élastique équivalente en fonction de la longueur du four pour les trois cas (Four sans charge, en plein charge et en plein charge plus les conditions thermiques).

On remarque que la déformation dans le premier et le deuxième cas est faible par rapport au troisième cas. Cette différence frappante est visible par rapport au deux autre cas, du fait de l'importance des conditions thermique qui ont une incidence directe sur

cette équipement. Car, on parle d'une température de l'ordre de 1450 °C qui règne à l'intérieur. La déformation maximale est enregistrée dans le troisième cas, et les zones qui sont la plus déformées sont les zone de faible épaisseur, aval avec une valeur maximale de 4,2 mm et amont et au niveau de la couronne d'entraînement.

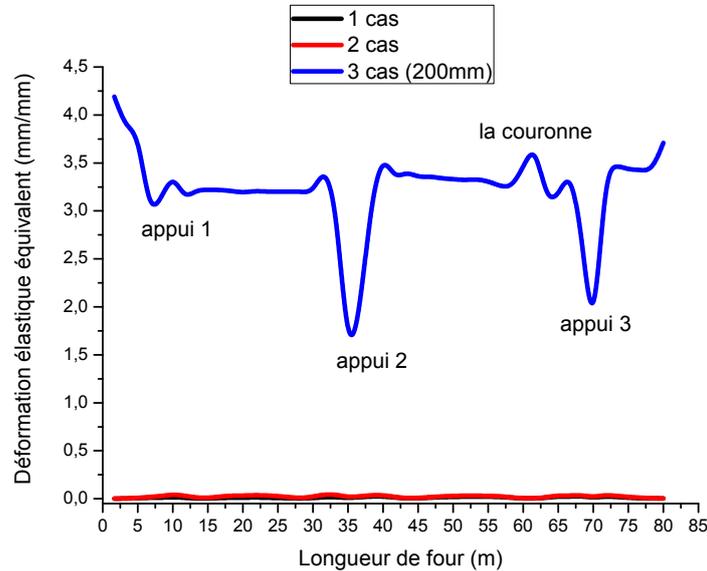


Figure IV.6 : Variation de la déformation élastique équivalente.

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 de la température dans un matériau produit des contraintes thermiques 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.

Concernons le déplacement total la figure IV.7 montre la variation de déplacement total en fonction de la longueur de four pour les trois cas. On remarque qu'au niveau des appuis le déplacement est moins important par rapport aux zones de faible épaisseur et en aval et amont de four dans les trois cas. Le déplacement prend la valeur maximale dans le troisième cas au niveau de l'amont avec une valeur de 26 mm. On peut décomposée la courbe en trois zones :

- 1^{er} zone : on trouve des valeurs maximales des déplacements aux extrémités du four qui est estimé à 16 mm au niveau coté aval du four et 26 mm au niveau coté amont. Ce déplacement est dû du fait que le four dans ces places est en position de port à faux, ainsi que l'épaisseur des viroles est la minimale.
- 2^{ème} zone : au niveau des appuis le déplacement est moins important avec une valeur 0,2 mm, car les appuis sont de zones qui supportée le poids du four.
- 3^{ème} zone : entre les appuis, on remarque que la flèche dépend la distance entre l'appui et l'autre. Concernant la distance entre les appuis 1 et 2, la longueur est de

26 m la valeur maximale de déplacement total est 9 mm. Entre les appuis 2 et 3 la distance est égale 32 m, et le déplacement maximal dans cette zone est de 10 mm.

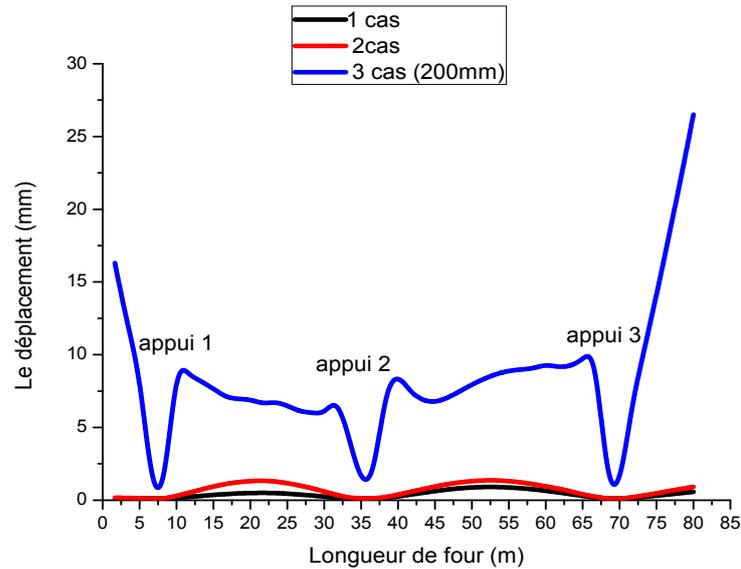


Figure IV.7: Variation du déplacement total.

IV.4.Effet de la variation de l'épaisseur de brique réfractaire :

Compte tenu des résultats de comparaison précédente, nous avons voulu voir l'effet d'un autre paramètre, qui est l'épaisseur de brique réfractaire. Ce dernier joue un rôle très important dans la préservation de la virole du four du phénomène d'ovalisation ou bien des cous de chauffe. Ainsi, le troisième cas traite ce paramètre.

IV.4.1.La contrainte mécanique :

En premier lieu, différentes épaisseurs de brique réfractaire ont été proposées (50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm). La contrainte mécanique équivalente (Von-Mises) qui varie le long de four. La figure IV.8 exprime l'évolution de la contrainte pour différentes épaisseur de brique réfractaire, avec des conditions bien définies.

En remarque que la contrainte augmente d'un pas de 0.2 MPa au niveau des zones de faible épaisseur et en aval de four. Donc, on constate simplement un effet très net de l'épaisseur de brique réfractaire sur le comportement élastique de l'ensemble des viroles. Aussi, on peut dire que la contrainte suit la même variation pour les quatre épaisseurs de la brique. La contrainte est minimale au niveau des trois appuis. Et prend une de plateau le long du four et enfin une augmentation plus au moins importantes des valeurs de la contrainte aux deux extrémités.

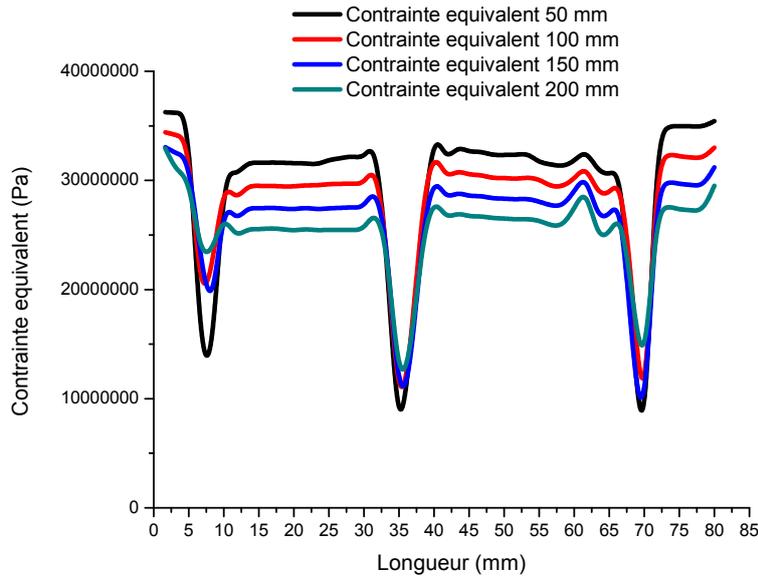


Figure IV.8 : présentation de contrainte en fonction d'épaisseur de brique.

IV.4.2. Le déplacement :

La figure IV.9 représente le déplacement total pour un four. On observe donc le déplacement dépend de l'épaisseur de la brique réfractaire, dans chaque essai on varie l'épaisseur de la brique réfractaire par un pas de 50 mm jusqu'à 200 mm, le déplacement total en amont et entre les massifs (appui) augmente par une valeur de 1 mm, on conclut que le facteur changement de l'épaisseur de brique influe sur le comportement de la virole du four. La courbe du déplacement est presque similaire à celle de la contraintes du point de vue forme. Néanmoins cette courbe prend des valeurs plus importantes au niveau des extrémités, aval et amont qui est plus forte du fait du forte à faux.

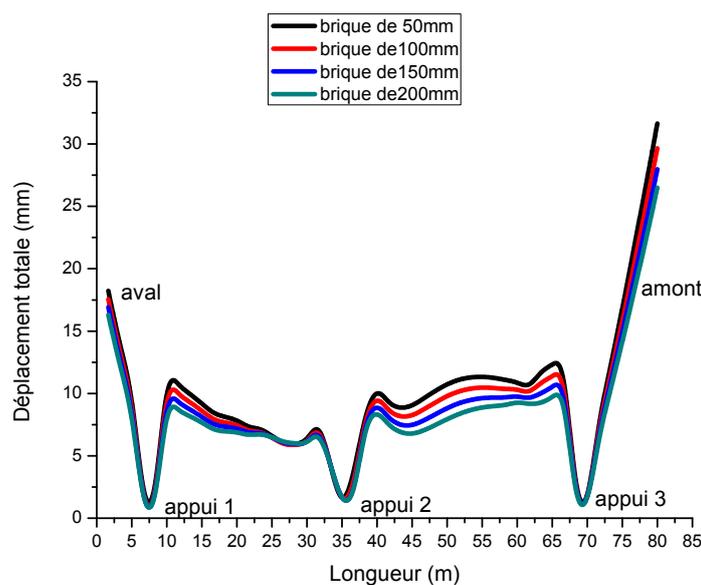


Figure IV.9 : présentation de déplacement total en fonction d'épaisseur de brique.

Concernant le déplacement total, nous avons représenté l'évolution de déplacement en amont, entre les supports (appui 1/2, appui 2/3) et en aval. Il s'avère que les déplacements sont plus importants :

- On remarque que le déplacement entre l'appui 1 et 2 est moins importante que les autres zones, à cause des caractéristiques géométriques (distance de 26m et épaisseur de la virole est égale 30 mm) à chaque fois qu'on diminue l'épaisseur de brique d'une valeur de 50 mm à l'épaisseur précédente le déplacement va augmenter par 1 mm.
- La courbe de figure IV.9 montre que le champ de déplacement augmente en amont du four à partir 70 m de la longueur du four où la virole travail dans un état de flexion, d'une valeur maximale correspond à l'épaisseur de brique de 50 mm est de 31 mm dans l'amont du four. Par contre dans l'aval, le déplacement augmente jusqu'à d'une valeur de 18 mm. Ce qui est logique par rapport aux conditions de chargement.

IV.4.3 La déformation élastique :

La figure IV.10 représente l'évolution de la déformation élastique équivalente en fonction de la longueur de four. On remarque que la déformation au niveau des appuis est moins important que les autres zones (entre les appuis, amont et aval), à chaque fois qu'on diminue l'épaisseur de brique d'une valeur de 50 mm à l'épaisseur précédente la déformation entre les appuis va augmenter par 0,3 mm.

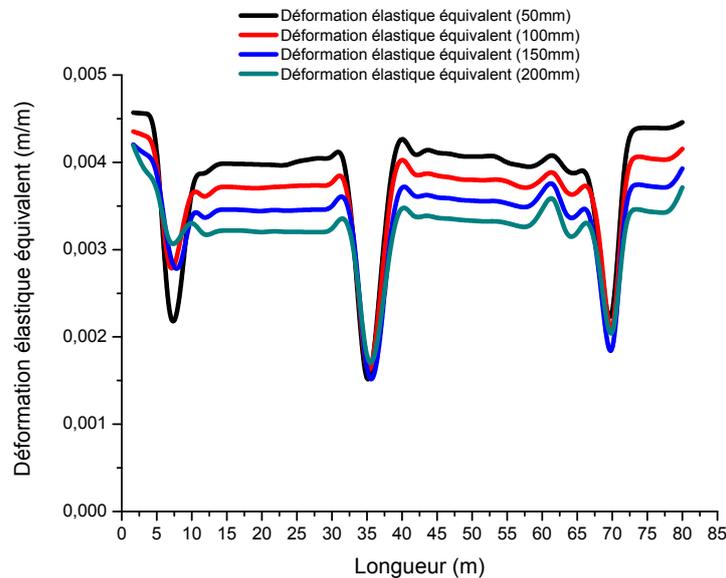


Figure IV.10 : l'évolution de la déformation équivalente.

Lorsque l'épaisseur des briques réfractaires diminue, le flux de chaleur augmente donc la température augmente, qui influe sur le comportement de la virole ainsi que les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé dans la construction du four.

IV.5. L'ovalisation :

Dans cette partie, nous avons voulu savoir comment l'effet des conditions du troisième cas influe sur la déformation ou l'ovalisation de la virole de notre four, surtout celui du champ thermique.

Après la simulation faite, nous avons voulu faire une deuxième validation dans ce cas. Ainsi nos résultats montrés ci-dessous ont été comparés avec ceux de L. BOUSSHINE [16] qui sont présentés sur la figure IV.11, pour assurer la validité de notre étude. On constate que les résultats de notre simulation sont proches de ceux de BOUSSHINE. La figure IV.11 montre les résultats en termes des déplacements radiaux dans la partie milieu du four. B notre cas d'étude et A le cas de BOUSSHINE.

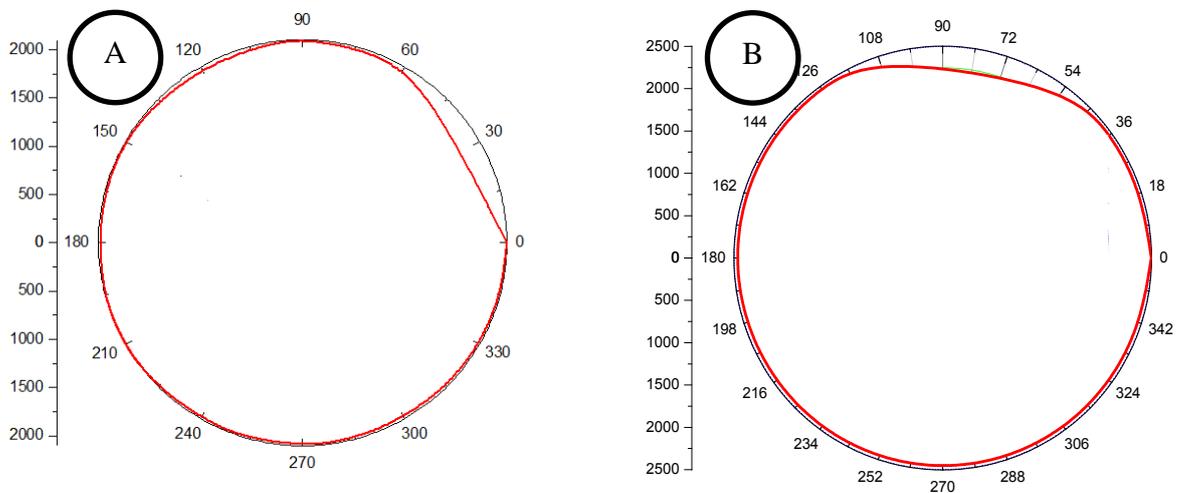


Figure IV.11 : Ovalisation de la partie milieu du four.

Dans cette partie, on compare la variation du déplacement radial à la même section pour différentes épaisseurs de brique réfractaire en fonction des angles de section. Les différents résultats obtenus sont présentés dans la figure IV.12 et figure IV.13.

Le graphique représenté sur la figure IV.12 montre la différence entre le déplacement radial en fonction de la longueur du four à la position de 15 m, le déplacement augmente au fur et à mesure que l'on réduit l'épaisseur de brique réfractaire. On remarque que le déplacement radial est moins important dans le cas de l'épaisseur de 200 mm par rapport aux autres cas. Et le déplacement maximal est enregistré dans le cas de l'épaisseur de 50 mm avec une valeur de 9 mm.

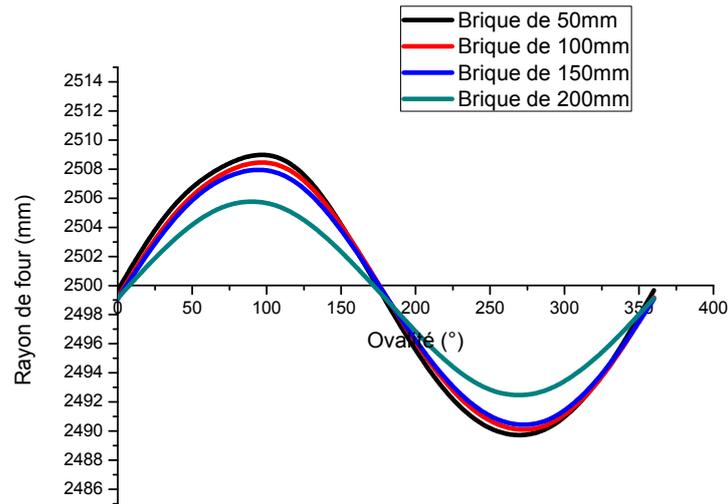


Figure IV.12 : l'évolution de déplacement au tour de four à 15m.

La figure IV.13 représente l'évolution de déplacement radial à la position de 35 m pour les différentes épaisseurs de brique. Le déplacement ne dépasse pas 1.5 mm à tous les cas par ce que la position 35 m été au niveau de l'appui 2.

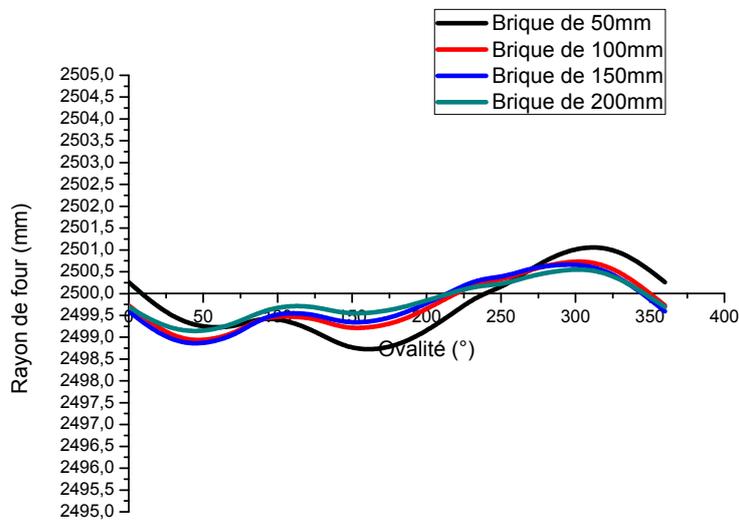


Figure IV.13 : l'évolution de déplacement au tour de four à 35m.

Par contre dans cette partie, on prend le déplacement au tour de four pour différentes sections dans la zone entre les appuis 2 et 3 (à 5 m, 10 m, 20 m et 35 m) pour l'épaisseur de brique réfractaire de 150 mm (figure IV.14). On remarque que le déplacement est moins important à la position 35 m par rapport aux les autres, qui ont des valeurs plus élevé à 10 m et 20 m.

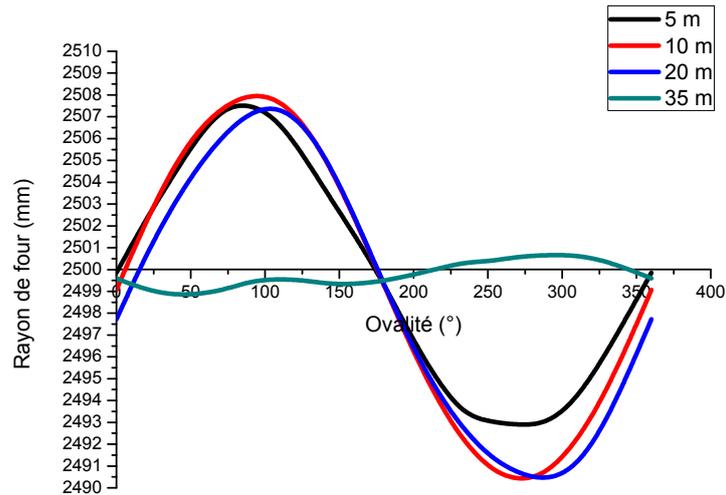


Figure IV.14 : l'évolution de déplacement au tour de four de 150mm.

Pour l'épaisseur de 50 mm, on prend le déplacement radial aux différentes sections (5 m, 10 m, 20 m et 35 m). Les sections des positions 10 m et 20 m sont plus déformés, le déplacement radial maximal est de 12 mm aux angles 100° et 250° à la section de 10 m.

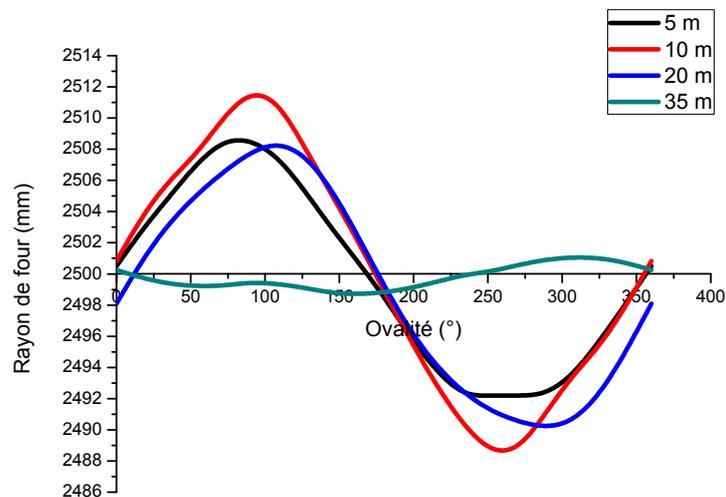


Figure IV.15 : l'évolution de déplacement au tour de four de 50mm.

Conclusion

Pour conclure ce chapitre, le comportement mécanique d'un four en acier E24.2 sous charge avec ou sans la considération des conditions thermique et avec différent épaisseur de brique.

La répartition des contraintes σ dans l'ensemble des viroles présente une valeur importante au niveau des appuis. Néanmoins 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. Combinée avec les différentes épaisseurs de brique réfractaire, les contraintes deviennent plus importantes et le risque d'endommagement de notre virole sera plus présent.

On conclue à partir des résultats obtenus, que la couche de brique est très importante à l'intérieure du four, parce qu'elle peut résister à des températures très élevées, et de plus elle protège et isole thermiquement l'acier (virole) contre les flux de chaleur élevés.

CONCLUSION GÉNÉRALE



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 ANSYS-14.5 (workbench) 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 trois 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), tandis que, le troisième cas on ajoute sur le deuxième cas l'effet thermique et la variation de l'épaisseur de brique réfractaire.

Afin de voir l'effet de l'épaisseur de brique réfractaire sur le comportement de la structure, on varie cette dernière pour les quatre cas : le premier cas on prend l'épaisseur de 50 mm, le deuxième est de 100 mm, le troisième de 150 mm et le quatrième de 200 mm, pour accéder à la distribution des contraintes et les déformations élastiques le long du four. On peut citer que la diminution considérable de l'épaisseur provoque une augmentation de la contrainte et la déformation élastique.

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. A partir des résultats obtenus, nous avons constaté que la variation des paramètres géométriques de la brique influe 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 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 cas du champ thermique.

Référence bibliographique

- [1] I. Jacoboweiz, « Fours industriel », BE8842 Editions techniques de l'ingénieur.
- [2] Y. Demagh, «Modélisation par Eléments Finis des transferts thermiques : application au four de la cimenterie de Hamma Bouziane», Mémoire de Magistère, Université de Batna 2002.
- [3] B. Gilbert, Alain Regnault « Fours de cimenterie, FOUR ROTATIF » BE 8845 Editions techniques de l'ingénieur.
- [6] Engineering Measurements Enterprise LTD, Technical Report Results Of Deviation Measurements And Geometry Of Rotary Kiln, 2012.
- [7] S.Haddaoui, «Mise en place de la maintenance conditionnelle et ameliorative du four rotatif de HOLCIM RAS EL MA », Mémoire de Master, Université de Sidi Med Ben Abdellah-Fès 2015.
- [8] M.H. Vaccaro, « Low Nox Rotary Kiln Burner Technology: Design Principles and Case Study », IEEE – IAS/Pca 44th Cement Industry Technical Conference Jacksonville 2002.
- [9] J. Bai, J.M Chaipanich, M. O'farrell, B.Sabir, B. S.Lewis M.A, «Compressive Strength and Hydratation of Waste P Sludge Ash Ground Granulated Blast Furnace Slag Blended Paste » Cement and Concrete Research 33, Pp.1189-1202 (2003).
- [10] I. Janati, L. Bousshine, « Contribution à l'Etude du Comportement Thermo-Elastique de la virole des Fours Rotatifs des Cimenteries» 23ème Congrès Français de Mécanique Lille, 28 Août au 1er Septembre 2017
- [11] S.El Fakkoussi, H. Moustabchir, A. Elkhalfi. « Analyse analytique et numérique du système calage du bandage four cimenterie» 13^{ème} Congrès de Mécanique 11 - 14 Avril 2017 (Meknès, MAROC)
- [12] M. Bideq, K. Janati et L. Bousshine, « Etude de l'ovalisation d'un four rotatif de cimenterie: Modélisation par éléments finis et expérimentation» 13^{ème} Congrès de Mécanique 11 - 14 Avril 2017 (Meknès, MAROC)
- [13] J. Ravindran and S. Krishnan, « Studies on Thermal Analysis of Cement Rotary Kiln Based on Clinker Coating Materials on Refractories, Energy and Monetary Savings »International Congress on Recent Development in Engineering and Technology (RDET-16) August 22-24, 2016 Kuala Lumpur (Malaysia)
- [14] K. Zheng, Y. Zhang, C. Zhao and L. Liu, « Rotary Kiln Cylinder Deformation Measurement and Feature Extraction Based on EMD Method.
- [15] K. Janati, et al. «Déformabilité à chaud d'un four rotatif pour cimenteries expérimentation et simulation numérique » (Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique B.P. 8118, Oasis, Casablanca, Maroc), 21-24 Avril 2015.
- [16] K. Pazand, et al, « Simulating the mechanical behavior of a rotary cement kiln using artificial neural networks », 30 (2009) 3468-3473.
- [17] D. Fidaros et al. Available online 29 November 2006, University of Thessaly,Athens Avenue, 38334 Volos, Greece.
- [18] V. Ranade and K. Mujumdari. « industrial flow modeling group,National Chemical» Laboratory,pune ,India, 2 Departement of Chemical Engineering, Indian Institue of Technology-Bombay, Powai,Mumbai.India 2006.

Référence bibliographie

- [19] F. Rodriguez et al, «Design and finite element analysis of a wet cycle cement rotary kiln», 39 (2002) 17–42.
- [20] Mastorakos et al, «CFD predictions for cement kilns including flame modelling, heat transfer and clinker chemistry», Applied Mathematical Modelling, 23 (1999) 55-76.
- [21] S. Tscheng et al, 1979, «Convective heat transfer in a rotary kiln», Canadian Journal of Chemical Engineering, 57 4 433-443.
- [22] G. Palmer et al, «Heat transfert in rotary kilns» Technologies Pty Ltd, Brisbane, Australia 1998.
- [23] Notes de calcul « Mécanique des équipements lourds ».
- [24] Engineering Measurements Enterprise LTD, Technical Report Results Of Deviation Measurements And Geometry Of Rotary Kiln, 2012.
- [25] Loan et al «Modélisation numérique du transfert thermique – méthode des volumes finis», Universitaria Craiova, pp. 36-43 (2002).
- [26] Pierre Saramito, «Méthodes numériques avancées pour la résolution des équations aux dérivées partielles».