



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 02 محمد بن احمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institut de Maintenance et Sécurité Industrielle

Département : Maintenance en électromécanique

**MÉMOIRE**

Pour l'obtention de diplôme master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance-Fiabilité-Qualité

**Thème**

*Simulation numérique pour la détection des contraintes subit par de la virole  
d'un four rotatif*

Présenté et soutenu publiquement par :

**HALEM SALAH EDDINE**

**HAMDI ZAKARIA**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
<b>ACHACHE HABIB</b>	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	<b>Présidente</b>
<b>BOUHAFS MOHAMMED</b>	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	<b>Encadrante</b>
<b>ADJELOUA ABDELAZIZ</b>	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	<b>Examineur</b>

**Promotion 2022**



# REMERCIEMENT

EN TOUT PREMIER LIEU, NOUS TENONS À REMERCIER ALLAH LE  
SUBLIME, QUI NOUS FACILITE NOTRE PARCOURS POUR RÉALISER CE  
MODESTE TRAVAIL DE RECHERCHE.

LA PREMIÈRE PERSONNE QUE NOUS REMERCIONS PROFONDÉMENT  
C'EST BIEN NOTRE ENSEIGNANT ET ENCADRANT DE MÉMOIRE MR  
BOUHAFS MOHAMED, ENSEIGNANT À L'UNIVERSITÉ D'ORAN 2, POUR  
SES ORIENTATIONS FRUCTIFIÉES ET SES PRÉCIEUX CONSEILS DURANT  
LA PÉRIODE DU TRAVAIL.

UN REMERCIEMENT CHALEUREUX ET UN HOMMAGE VIVANT  
S'ÉTENDENT AUX MEMBRES DE JURÝ QUI NOUS ONT FAIT L'HONNEUR  
D'EXAMINER NOTRE MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE, ET DE PARTICIPER À  
SA SOUTENANCE.

NOUS EXPRIMONS SINCÈREMENT UN GRAND MERCI AUX ENSEIGNANTS  
DE L'INSTITUT DE MAINTENANCE ET DE SÉCURITÉ INDUSTRIELLE, QUI  
ONT ENRICHÍ GÉNÉREUSEMENT NOS ESPRITS PAR DES  
CONNAISSANCES ET DES ACQUIS ASSEZ MARQUANTS ET  
INTÉRESSANTS.

À LA FIN, NOUS AIMONS AUSSI ADRESSER UN REMERCIEMENT  
HONNÊTE À NOS CHERS COLLÈGUES POUR LES BONS MOMENTS ET LES  
SOUVENIRS INOUBLIABLES QUE NOUS AVONS PASSÉS ENSEMBLE  
PENDANT LES CINQ ANS DE FORMATION.

*Merci*





# DÉDICACE

C'est avec grand plaisir que je dédie cet humble acte : à ma chère mère, quoi que je fasse ou dise, je ne peux pas te remercier comme je le devrais. Vous avoir à mes côtés a toujours été ma force pour affronter de nombreux obstacles. A mon cher papa, tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager que ce travail reflète ma gratitude et mon affection. A mes chères sœurs, en particulier mes sœurs Salwa, Kaltum et Fatima Al-Zahra et à mon frère hamza et A ma fiancée, Khoulood, qui m'a soutenu tout au long de mes études. A Habib Berrekia, qui m'a soutenu tout au long du travail. A mes amis Miloud, Adel, Nasreddin et Abderraouf pour leurs efforts. A tous mes amis de ma classe. A tous mes amis de l'institut.

*Halem salah eddine*



# DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail A mes parents qui m'a encouragé

Tout au long de mes études, que dieu le préserve.

A mes frères YAHA, MONDHER, et mes soeurs.

A tous mes amies et mon binôme "SALAH".

Et Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ce travail

Et à mes amies surtout Imad, akram et taki... Qui

J'ai partagé les meilleurs moments.

**HAMDİ ZAKARIA**

## **Résume :**

Le but de cette étude est une simulation numérique pour découvrir les contraintes auxquelles est soumise la virole du four rotatif dans SOLIDWORKS.

La géométrie et les conditions aux limites ainsi que les conditions opératoires ont été utilisées pour valider les calculs numériques. Les résultats de la simulation numérique sont cohérents avec les résultats mesurés en usine. Ensuite, une solution a été proposée pour réduire les contraintes sur l'enveloppe du four, en effet, Les résultats obtenus, états de contrainte, de déformation et déplacement permettent la mise en place d'un modèle de prédiction des zones fortement sollicitées et par conséquent améliorer les paramètres de conception et de maintenance des fours rotatif

## **Abstract:**

The purpose of this study is a numerical simulation to discover the constraints to which the shell of the rotary kiln is subjected in SOLIDWORKS.

Geometry and boundary conditions as well as operating conditions were used to validate the numerical calculations. The results of the numerical simulation are consistent with the results measured in the factory. Then, a solution was proposed to reduce the stresses on the envelope of the furnace, indeed, The results obtained, states of stress, deformation and displacement allow the installation of a model of prediction of the strongly solicited zones and by consequently improve the design and maintenance parameters of rotary kilns

## **ملخص:**

الغرض من هذه الدراسة هو محاكاة عددية لاكتشاف القيود التي يتعرض لها غلاف الفرن الدوار في SOLIDWORKS.

تم استخدام شروط الهندسة والحدود بالإضافة إلى ظروف التشغيل للتحقق من صحة الحسابات العددية. تتوافق نتائج المحاكاة العددية مع النتائج التي تم قياسها في المصنع. بعد ذلك، تم اقتراح حل لتقليل الضغوط على غلاف الفرن، وبالفعل، فإن النتائج التي تم الحصول عليها، وحالات الإجهاد والتشوه والإزاحة تسمح بتركيب نموذج للتنبؤ بالمناطق المطلوبة بشدة وبالتالي تحسين التصميم ومعلومات الصيانة للأفران الدوارة

# Sommer

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	IV
Sommer.....	V
Liste des figures.....	VII
Liste de tableau.....	X
Nomenclature.....	IX
Introduction générale.....	1

## Chapitre I : Généralité sur les fours rotatifs de cimenterie

I.1 Introduction.....	2
I.2 L'historique et l'évolution du four rotatif.....	2
I.3 Définition sur le ciment .....	2
I.4 Différents procédés de fabrication du ciment .....	3
I.4.1 La fabrication du ciment .....	3
I.5 Les fours rotatifs de cimenterie.....	5
I.6 Les éléments principaux dans les Fours Rotatifs.....	6
I.6.1 La virole .....	6
I.6.2 Station des galets.....	7
I.6.3 Station de bandage .....	8
I.6.4 Les briques dans le four rotatif de ciment.....	8
I.6.5 Le bruleur.....	9
I.7 Position du four.....	11
I.8 Conclusion .....	11

## Chapitre II : Calcul du four rotatif de la cimenterie

II.1 Introduction .....	12
II.2 Technologie de four rotatif de ciment .....	12
II.3 Station des galets .....	12
II.3.1 Palier de galet .....	13
II.3.2 Butée hydraulique de retenue du four.....	13
II.3.3 Contraintes de flexion dans la section du bandage.....	14
II.3.4 La déformation du bandage .....	15
II.4 Virole .....	16

# Sommer

II.4.1 Calcul des viroles.....	16
II.4.2 Dimensionnement des épaisseurs des viroles .....	18
II.4.3 Ovalisation des viroles.....	19
II.4.4 Maîtrise de l'ovalisation de la virole .....	22
II.5 Charges linéaires du maçonnerie réfractaire .....	22
II.5.1 Charge linéaire du croûtage .....	22
II.5.2 Charge linéaire de matière .....	22
II.5.3 Charge linéaire de la virole.....	23
II.5.4 La charge linéaire totale.....	23
II.5.5 Recherche Bibliographique .....	23
II.6 Conclusion .....	26

## Chapitre III : Simulation numérique par Solidworks

III.1 Introduction .....	27
III.2 Méthode des différences finies.....	27
III.3 Méthode des éléments finis .....	27
III.4 La méthode des volumes finis.....	28
III.5 Choix du maillage .....	28
III.6 Description du problème .....	29
III.7 Formulation de l'équation de la charge du four.....	31
III.8 Mise en œuvre de la simulation dans solidworks.....	31
III.8.1Présentations du logiciel solidworks .....	31
III.8.2Les avantages de la simulation numérique.....	32
III.8.3Simulation dans solidworks .....	32
III.8.4Condition aux limites dans Solidworks.....	33
III.9 Conclusion.....	37

## Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 Introduction .....	38
IV.2 Discussions des résultats .....	38
IV.2.1 Premier cas .....	38
IV.2.2 La validation .....	38
IV.2.3 L'évolution de la contrainte mécanique du four .....	39
IV.2.4 La déformation élastique.....	40



# Sommer

IV.2.5 Le déplacement .....	42
IV.3 Deuxième cas .....	43
IV.3.1 Les contraintes mécaniques.....	43
IV.3.2 La déformation élastique.....	44
IV.3.3 Le déplacement .....	45
IV.4 Troisième cas .....	46
IV.4.1 La déformation élastique.....	46
IV.4.2 Le déplacement .....	47
IV.5 Quatrième cas.....	48
IV.5.1 Le déplacement .....	49
IV.6 Conclusion .....	50

## Liste de figure

Figure I.1 : produit principale de ciment. ....	3
Figure I.2 : Les cinq opérations principales réalisées dans l’atelier de cuisson. ....	4
Figure I.3 : Organigramme des procédés typiques de fabrication du ciment. ....	5
Figure I.4 : Four rotatif de cimenterie. ....	6
Figure I.5 : La combustion dans un Four rotatif. ....	6
Figure I.6 : Épaisseurs de viroles. ....	7
Figure I.7 : Station des galets. ....	8
Figure I.8 : bandage creux oméga. ....	8
Figure I.9 : Briquetage dans un four rotatif de cimenterie. ....	9
Figure I.10 : Brûleur à pré-mélange. ....	9
Figure I.11 : vue de face bruleur. ....	10
Figure I.12 : Bruleur du four rotatif de ciment LAFARGE. ....	11
Figure II.1 : Station de roulement ....	12
Figure II.2 : Butée hydraulique de retenue du four. ....	13
Figure II.3 : Courbe des moments fléchissant. ....	15
Figure II.4 : Déformation du bandage. ....	15
Figure II.05 : Evolution du module de Young avec la température. ....	16
Figure II.06 : Déflexion des différentes travées du four. ....	17
Figure II.07 : Les différentes épaisseurs des viroles du four. ....	19
Figure II.08 : Ovalisation de la virole. ....	19
Figure II.9 : Principe de méthode de SHELLTEST. ....	21
Figure II.10 : Diagrammes méthode de SHELLTEST. ....	21
Figure III.1 : Schéma représentant le volume de contrôle bidimensionnel. ....	28
Figure III.2 : four rotatif de cimenterie. ....	30
Figure III.3 : présentation d’espace géométrique du Solidworks. ....	32
Figure III.4 : Maillage tétraédrique du four. ....	33
Figure III.5 : Représentation de chargement sur le four de 1er cas. ....	34
Figure III.6 : présentation des conditions aux limites de 2ème cas. ....	34
Figure III.7 : présentation des conditions aux limites de 3ème cas. ....	35
Figure III.8 : présentation le Zone d'entré ....	35
Figure III.9 : présentation le Zone de transition ....	36
Figure III.10 : présentation zone de cuisson ....	36
Figure III.11 : présentation zone de refroidissement. ....	36

Figure IV.1 : Représentation des zones critiques dans un four rotatif. ....	38
Figure IV.2 : présentation des contraintes équivalentes (Von Mises) A étude PAZAND, B notre cas. ....	39
Figure IV.3 : La variation du champ de la contrainte mécanique .....	40
Figure IV.4 : présentation des contraintes. ....	40
Figure IV.5 : représentation de la déformation élastique équivalente. ....	41
Figure IV.6 : Variation de la déformation élastique équivalente. ....	41
Figure IV.7 : représentation du déplacement total du four. ....	42
Figure IV.8 : La variation de déplacement total. ....	43
Figure IV.9 : présentation des contraintes équivalentes. ....	43
Figure IV.10 : l'évolution des contraintes mécanique applique sur la virole. ....	44
Figure IV.11 : présentation des déformations élastique équivalentes. ....	45
Figure IV.12 : l'évolution de la déformation élastique équivalente. ....	45
Figure IV.13 : La variation de déplacement total. ....	46
Figure IV.14 : l'évolution de la déformation équivalente .....	47
Figure IV.15 : présentation de déplacement en fonction de température. ....	48
Figure IV.16 : Courbe de la variation de la température en fonction de la longueur du four. ....	48
Figure IV.17 : présentation de déplacement directionnelle en fonction de température. ....	49

## Liste de tableau

Tableau II.1 : Valeurs admises pour l'ovalisation de la virole.....	22
Tableau III.1 : Les différentes formes de maillage des faces.....	29
Tableau III.2 : Description des types de maillages des faces.....	29
Tableau III.3 : caractéristique du four rotatif. ....	29
Tableau III.4 : Les caractéristiques de virole. ....	30
Tableau III.5 : Les caractéristiques de brique réfractaire.....	30
Tableau III.6 : les charges applique sur le four. ....	31
Tableau III.7 : Paramètres de maillage.....	33

$E$  : module d'élasticité en  $N/mm^2$ .

$I$  : Le moment d'inertie  $mm^3$ .

$e$  : 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.

$\rho$  : Masse volumique de brique Réfractaire basique,  $\rho \approx 3000 \text{ kg/m}^3 = 3 \text{ t/m}^3$ .

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

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

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

$h_{\text{brique}}$  : hauteur de brique en mm.

$P_a$  : 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.

$\omega_v$  : l'ovalisation de la virole.

$\omega_b$  : L'ovalisation du bandage.

$DS$  : diamètre de virole non déformée en m.

DL : diamètre interne du bandage non déformé en m.

DV : diamètre vertical interne du bandage déformé en m.

Dh : diamètre horizontal interne du bandage déformé en m.

f : Amplitude de tracé du SHELLTEST en mm.

L : Longueur de l'appareil SHELLTEST en mm.

DN : diamètre nominal intérieur du four en m.

$\Phi_N$ : diamètre nominale de four en m.

Q : La charge radiale.

$\sigma_{\max}$  : contrainte de flexion maximale en dan /mm<sup>2</sup>.

$M_{f_{\max}}$  : Mouvement de flexion maximale en m /s.

Dg : diamètre de galet non déformée en m.

$\sigma_f$  : contrainte de flexion.

$\delta_b$ : Contrainte du bandage

L : longueur de galet.

$\beta_f$  : Coefficient de flexion.

P : la charge linéaire.

PS : Pression solide en [Pa]

$Q_f$  : Poids du four rotatif pour chaque appui en [Kg]

i : Le moment d'inertie en [mm<sup>3</sup>]

Ff : la force de frottement.

$\mu$  : Viscosité solide de frottement.

Rb : rayon moyen du bandage en mm

$\Delta_{b_{\max}}$  :La déformation maximale du bandage

## **NOMENCLATURE**

---

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**



## INTRODUCTION GÉNÉRALE :

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. 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.

Le processus de fabrication du ciment comprend plusieurs les opérations suivantes :

Le calcaire (carbonate de calcium), est extrait par minage du front de taille, ajoutés dans le concasseur dans des proportions bien déterminées, donne après sortie du concasseur, homogénéisation et broyage, la farine, produit fin prêt pour la cuisson dans le four rotatif la matière sortant du refroidisseur, est transporté jusqu'au hangar au silo du stockage après d'ajoutant.

Les fours rotatifs sont largement utilisés dans l'industrie chimique et cimentière, l'industrie métallurgique, le processus de séchage, le traitement des déchets, le processus d'incinération, etc. Il est d'une grande importance dans le domaine de la production de ciment, Car il est considéré comme le cœur de toute cimenterie, et aussi l'élément qui transmet la plus grande quantité de chaleur, il comprend toutes les interactions, et comprend également l'échange massif de chaleur et d'énergie, des apports importants et de grandes pertes dans la compréhension de tous ces phénomènes conduisent à améliorer les performances du four.

Cependant, les erreurs ralentissent les opérations normales et entraînent une perte de bénéfices pour l'entreprise. La capacité de détecter les erreurs critiques tout en travaillant sur la conception de divers éléments critiques, Cette étude a été réalisée avec SOLIDWORKS.

Les charges mécaniques et thermiques sont les plus importantes de ces aspects, car dans de nombreux cas, ce sont les forces mécaniques qui limitent les performances du four rotatif. Le four rotatif est le plus thermiquement stressant, englobant toutes les réactions, et cela implique également des échanges de chaleur massifs, et une puissance d'entrée de grande capacité, des pertes importantes ; La compréhension de tous ces phénomènes conduite à un meilleur fonctionnement du four. Pour résoudre ces problèmes, nous avons initié cette thèse pour examiner les contraintes mécaniques et la déformation des enveloppes de fours rotatifs afin d'améliorer la détection des défauts critiques.

L'étude prévue dans cette thèse est divisée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre dans lequel nous décrivons les phases de fabrication du ciment, puis nous présentons le four rotatif à ciment avec tous les organes qui le composent, ainsi que ses fonctions et particularités.
- Le deuxième chapitre concerne les différents calculs des éléments essentiels du four, allant du calcul de la charge totale appliquée, des contraintes thermiques et des erreurs de géométrie à l'ovalité du pneu et de la carcasse.
- Le troisième chapitre comprend les méthodes numériques, une introduction au logiciel SOLIDWORKS et la création de modèles.
- On rassemble dans le chapitre quatre la validation de notre programme de calcul ainsi que les principaux résultats numériques de cette étude. Les commentaires, interprétations et analyses des divers résultats de cette étude sont également présentés.

# **Chapitre I**



## **Généralité sur le four rotatif de cimenterie**

**I.1 Introduction :**

Les fours tournants (rotatif) sont très utilisés dans l'industrie. Ils sont utilisés dans la production du clinker pour l'industrie du ciment, la fabrication de la chaux, la fabrication des charbons. . . Ils possèdent plusieurs avantages sur d'autres types des fours comme les lits fixes notamment le fait d'être des fours continus (permettant donc une production continue) et le fait que les débits de production peuvent être élevés. L'industrie de ciment utilise seulement les fours tournants [1].

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

**I.2 L'historique et l'évolution du four 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 fait 190 tonnes par jour. Les grands fours à voie humide (exemple : capacité 3000 t/j et ont été d'environ 6,3 x 227 m, reposant sur huit appuis) ont fait place dans les années 1980, aux fours à voie sèche reposant sur trois appuis et les plus grands fours aujourd'hui produisent environ 10000 tonnes par jour. Les fours rotatifs fonctionnent sans arrêt, et ils ne sont arrêtés que durant la période d'entretien annuel [2].

**I.3 Définition sur le ciment:**

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

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

Aujourd'hui, environ 98 % du ciment produit dans le monde est du Ciment Portland, c-à-dire du ciment contenant principalement des silicates de calcium. Parmi les 2% restants, citons par ordre d'importance décroissante les ciments alumineux (aluminates de calcium exclusivement), les ciments magnésiens.

Actuellement, la production annuelle de ciment dans le monde atteint 5 milliards de m<sup>3</sup> correspondant à la production annuelle de 1,5 milliards de tonnes de ciment Portland. La production européenne en 1975 était de 172 millions de tonnes (437 fours), soit environ 12 % de la production mondiale.

D'après la norme "AFNOR", le ciment est défini comme étant une matière finement broyée composée d'un pourcentage de clinker portland et d'ajouts (gypse, pouzzolane,...).

Le clinker est le produit de cuisson, à une température de 1450 à 1500°C, d'un mélange de Calcaire ( $\approx 75\%$  de la masse) et d'argile ( $\approx 25\%$  de la masse) et parfois d'autres additifs en très faibles pourcentages pour ajuster la composition chimique de départ.

Le ciment, ainsi défini, forme en présence d'eau une pâte liante plus au moins fluide susceptible de faire prise et de durcir tant dans l'eau qu'à l'air en formant des composés stables et agglomérant des substances adéquates [3].

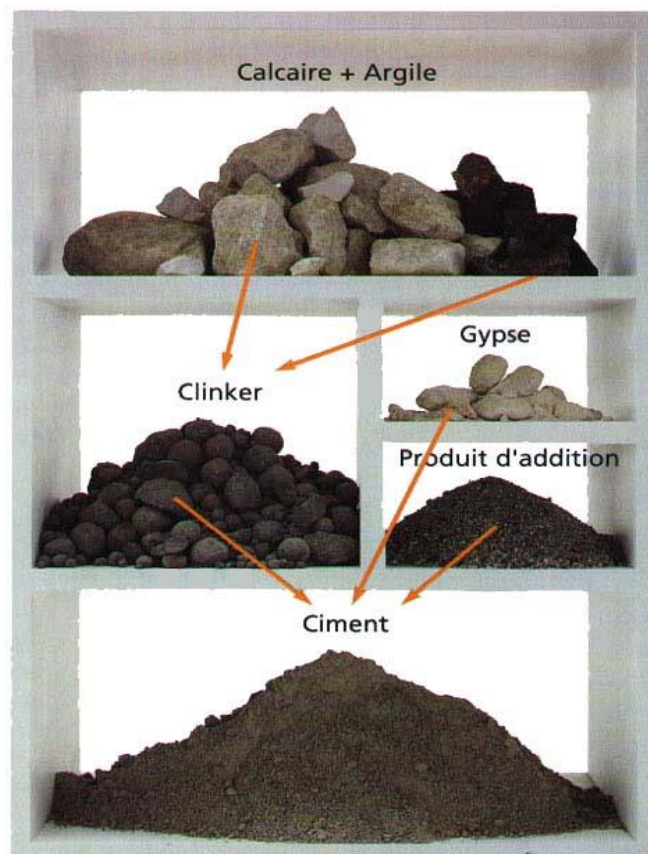
#### **I.4 Différents procédés de fabrication du ciment : [4]**

Il existe quatre procédés pour fabriquer le ciment :

- Fabrication par voie sèche,
- Fabrication par Semi-sèche,
- Fabrication par semi humide,
- Fabrication par humide.

##### **I.4.1 La fabrication du ciment :**

Tout commence à la carrière par l'extraction de calcaire en suite la roche est concassé et tamisé en carrière. Ce traitement permet d'éliminer des grandes parties présentes dans le calcaire.



**Figure I.1** : produit principale de ciment.

Le calcaire est acheminé vers une aire de pré-homogénéisation dans l'usine via une courroie transporteuse. Le calcaire y est stocké en couches longitudinales et repris transversalement pour en assurer une première homogénéisation. Les composants sont

broyés et séchés pour obtenir une farine.

Le cru (la farine) est préparé automatiquement sous forme de poudre (voie sèche) ou de pâte (voie semi humide ou humide), en fonction de la technique de fabrication utilisée.

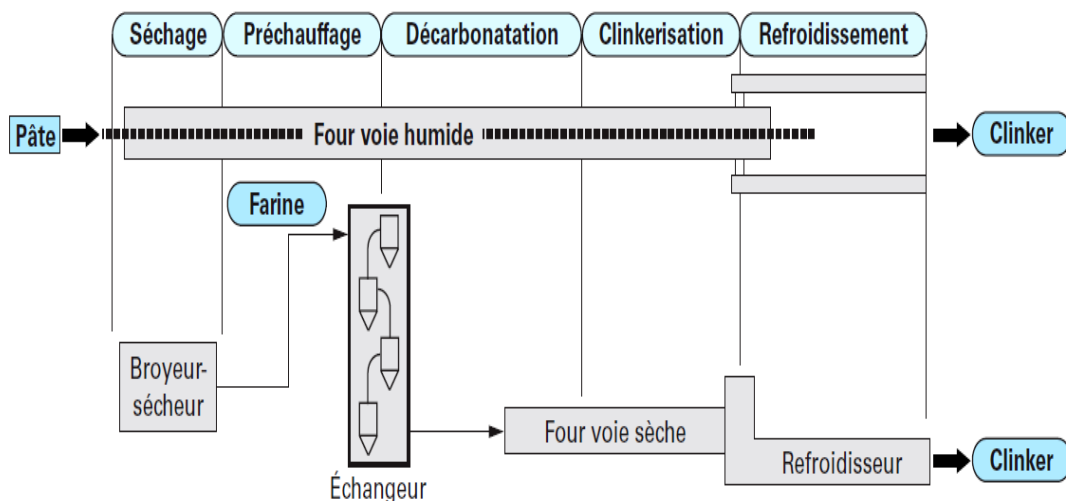
On a deux procédés les plus utilisés dans le monde « la Voie Sèche et la Voie Humide » ; Dans la précédente de voie sèche, la farine crue est introduite au sommet d'une tour de préchauffage composée de cyclones. Pendant sa chute, la farine s'échauffe au contact des gaz chauds pour atteindre une température d'environ 800°C. Au niveau du pré-calciateur, elle se déshydrate et se décarbonate.

Dans le procédé de voie humide, les matières premières (souvent avec une forte teneur en humidité) sont broyées dans l'eau pour former une boue pompable. La boue est introduite soit directement dans le four, soit d'abord dans un sécheur. La voie humide est un procédé plus ancien, utilisé dans le cas du broyage humide des matières premières. Elle demande plus d'énergie que la voie sèche à cause de l'évaporation de l'eau de la boue [3-4].

En tous les cas le cru (matière première) pénètre ensuite dans un four rotatif, incliné, chauffé par une flamme dont la température de l'ordre de 2000°C assure la cuisson de la matière à 1450°C.

La chimie de base du procédé de fabrication de ciment commence par la décomposition du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) en oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ , chaux) à environ 900°C avec un dégagement gazeux de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ; cette étape s'appelle la calcination. Elle est suivie du procédé de formation de clinker durant lequel l'oxyde de calcium réagit à température élevée (typiquement 1400-1500°C) avec de la silice, de l'alumine et de l'oxyde ferreux pour former des silicates, des aluminates et des ferrites de calcium qui composent le clinker Portland [5].

À la sortie du four, le clinker passe dans un refroidisseur à air pour l'amener à 100°C environ. L'air chaud sortant du refroidisseur est récupéré comme air de combustion du four, ainsi que pour le séchage des matières premières.



**Figure I.2** : Les cinq opérations principales réalisées dans l'atelier de cuisson.

Le clinker est alors stocké dans des silos. Les matières premières qui entrent dans la composition du ciment sont le clinker et le gypse. Le dosage de ces matières premières dépend du type de ciment désiré ; Après dosage, les constituants sont introduits

dans un broyeur et après le broyage, le ciment est refroidi avant d'être stocké ; Il est ensuite entreposé dans des grands silos attribués chacun à une qualité précise de ciment. Le ciment est expédié en vrac dans des réservoirs ou en sacs de 50 kg par camion vers les clients [6].

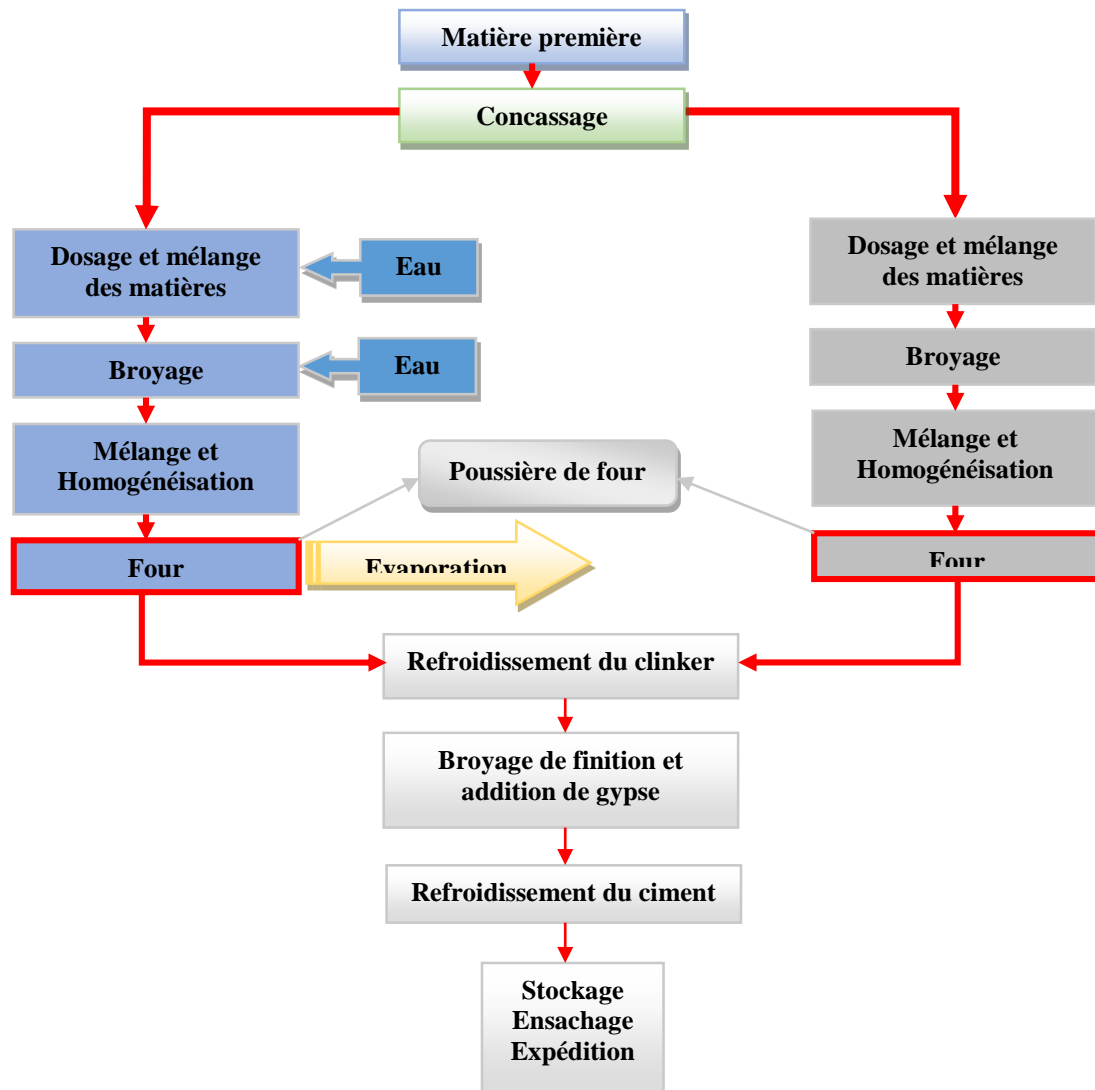


Figure I.3 : Organigramme des procédés typiques de fabrication du ciment.

### I.5 Les fours rotatifs de cimenterie

Un four rotatif est un cylindre qui tourne autour de son axe cylindrique et fonctionne essentiellement comme un dispositif d'échange de chaleur [1]. Les fours rotatifs des cimenteries permettent la cuisson des matériaux de base pour l'obtention de clinker. Son inclinaison pendant la rotation permanente permet le déplacement du matériau. Un brûleur chauffe le matériau, et les gaz chauds circulent dans le sens contraire du déplacement du matériau [2].

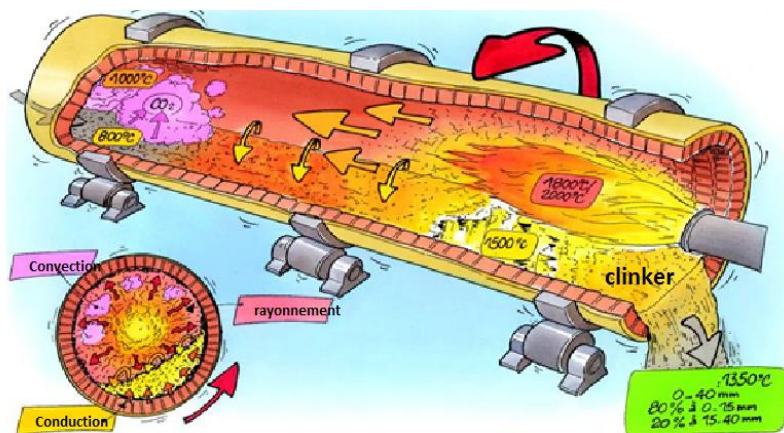


**Figure I.4 :** Four rotatif de cimenterie.

Les fours rotatifs se fonctionnent en maintenant le matériau à traiter à une température spécifiée pendant une durée précise. Les températures et les temps de rétention sont déterminés par la création de profils de température, basés sur des analyses chimiques et thermiques approfondies du matériau.

### I.6 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 :



**Figure I.5 :** La combustion dans un Four rotatif.

#### I.6.1 La virole:

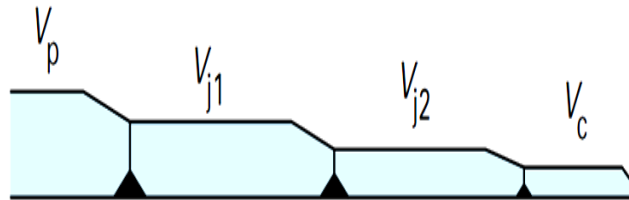
Le tube est constitué par un assemblage d'éléments soudés appelés viroles. Elles sont fabriquées à partir de tôles en acier de qualité E 24.2 ou A42 CP. Les tôles d'une largeur de 2200 mm environ sont arrondies au diamètre intérieur du four ; les demi-viroles ainsi obtenues sont ensuite soudées suivant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

L'assemblage des viroles bout à bout s'effectue en quinconce de manière à ne pas avoir un alignement des soudures longitudinales. 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.6 :** 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 [7].

### I.6.2 Station des galets:

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 (contact optimal entre les surfaces de roulement des galets et du bandage et supportée isostatique fiable de la virole). 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 [8].

Ceci est obtenu par un mécanisme de réglage automatique 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 [9].





Figure I.7 : Station des galets.

### I.6.3 Station de bandage :

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

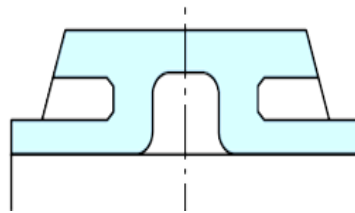


Figure I.8 : bandage creux oméga.

Le diamètre intérieur des bandages est légèrement supérieur au diamètre extérieur de la virole avec ses platines pour permettre une dilatation différente, car la température de la virole est toujours plus élevée que celle du bandage. On utilise deux techniques différentes pour le positionnement radial du bandage, selon qu'il est du type flottant ou cranté [10].

### I.6.4 Les briques dans le four rotatif de ciment :

Les briques dans four rotatif du ciment, ils Ya trois différents modèles de briques dans les zones de four (zone de calcination et zone de cuisson) par ce que à l'intérieur du four à clinker, les grandes températures dans les deux zones de calcination et de cuisson environ 2000 - 2350 °C (flamme). À 1050 °C, tandis que la matière passe un revêtement réfractaire, principalement du type briquetage, de 850-900 °C, à 1420-1450 °C protège la virole de four rotatif, réduit les pertes de chaleur de l'acier, évite les problèmes des arrêts dans four et augmente la production du clinker [11].



**Figure I.9** : Briquetage dans un four rotatif de cimenterie.

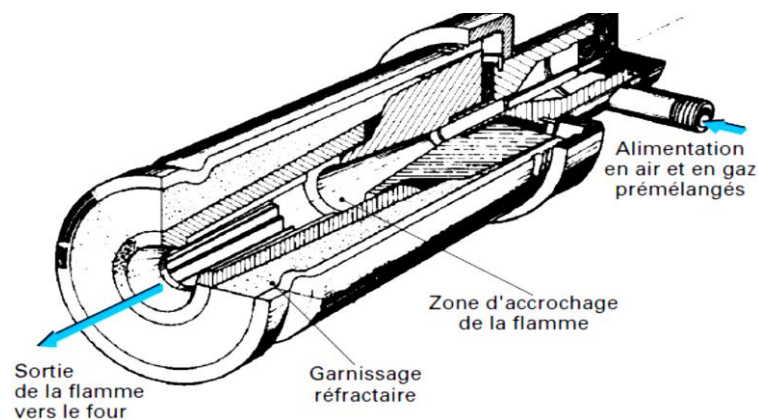
### I.6.5 Le brûleur:

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 [12].

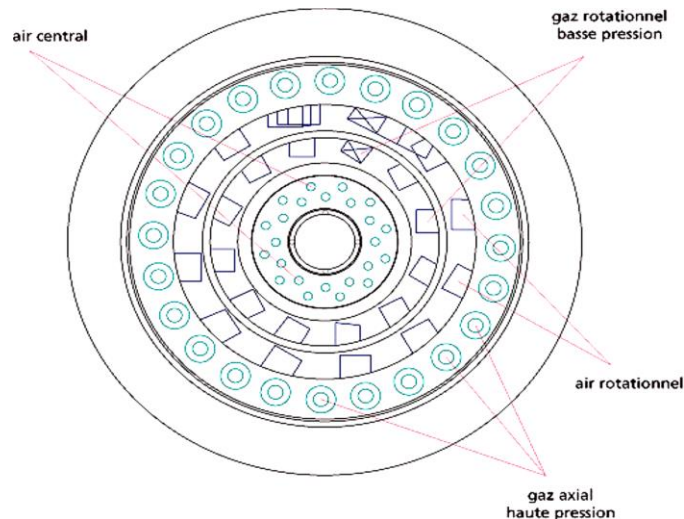
On distingue deux types de brûleur pour un mélange combustible-comburant :

➤ Les brûleurs à pré-mélange : dans ce type de brûleur le mélange entre le combustible et le comburant se fait préalablement à son introduction dans le four. Ces brûleurs sont uniquement des brûleurs à combustible gazeux. Ils produisent des flammes courtes et permettent d'obtenir localement des températures très élevées. Des précautions particulières doivent être prises pour éviter la propagation de la combustion, vers l'amont, jusqu'au dispositif de mélange.



**Figure I.10** : Brûleur à pré-mélange.

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



**Figure I.11** : vue de face bruleur.

Le brûleur dans le four rotatif fonctionne comme un injecteur, l'air secondaire est aspiré du refroidisseur dans le four de telle façon que la flamme dégagée se concentre autour de la ligne centrale du four [12]. 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<sub>x</sub>). Il faut toutefois noter qu'un brûleur qui peut être utilisé pour un combustible solide, liquide et gazeux en même temps n'existe pas en Algérie parce que, par disponibilité du gaz naturel à bas prix, on n'est pas encore arrivés à la nécessité d'un brûleur à combustibles multiples [13].
- 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. [8-11].
- 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.

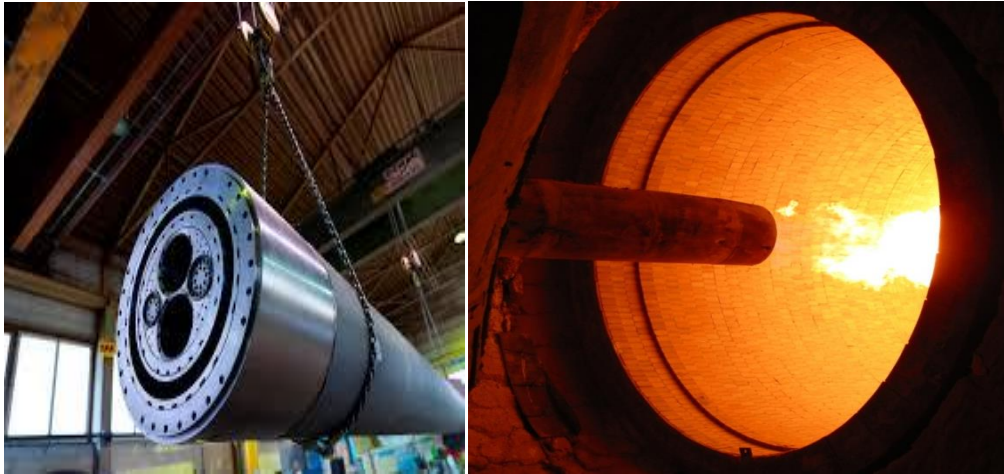


Figure I. 12 : Bruleur du four rotatif de ciment LAFARGE.

### I.7 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 [14].

### I.8 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons vu des notions générales sur le procédé de fabrication du ciment ainsi qu'une présentation du four rotatif. Ce dernier est l'élément central du procédé de production du ciment du fait qu'il assure une étape déterminante pour la qualité du ciment. Il est le siège des réactions chimiques et opère sous des conditions de pression et de température très élevée. D'où l'intérêt d'une étude sur le four rotatif. Les contraintes mécaniques que subit ce four seront l'objet du chapitre suivant

# **Chapitre II**

---

## **Calcul du four rotatif de la cimenterie**

**II.1 Introduction**

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

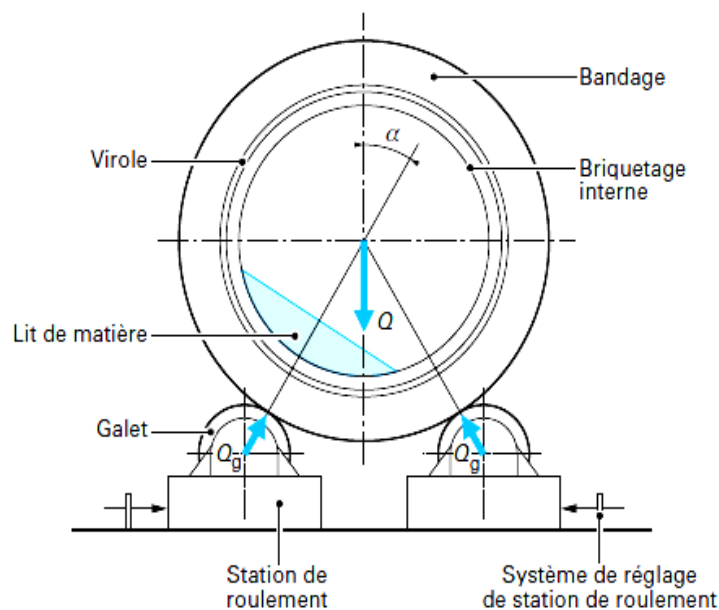
Les charges mécaniques, mises en œuvre ou appliquées, peuvent être, uniformément réparties (poids propre de la virole, poids du réfractaire, poids de la matière.), Concentrées (poids de la couronne, poids sur les extrémités du four (joints, satellites), force et couple d'entraînement.) Évolutives (croûtage,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

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

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

**II.2 Technologie de four rotatif de ciment :**

Les charges radiales de la virole sont transmises aux fondations par l'intermédiaire des bandages, galets et paliers ; les stations de roulement supportent le poids de four, chaque station comporte trois éléments principaux [19], deux galet chaque galet fixe par deux palies et bandage.



**Figure II.1 : Station de roulement**

**II.3 Station des galets :**

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

$$Q_g = \frac{Q}{2 \cos \alpha} \quad (\text{II.01}).$$

Soit :  $Q_g = 0,577 Q$  pour  $\alpha = 30^\circ$

Q : La charge radiale.

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

### II.3.1 Palier de galet :

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

$$\sigma_{f_{\max}} = \frac{M_{f_{\max}} \cdot \alpha_f \cdot \beta_f}{10^{-1} d_g^{-3}} \quad \text{Et} \quad M_{f_{\max}} = \frac{P_1 \cdot 0,577 \cdot L_f}{12} \quad (\text{II.02}).$$

$\sigma_{f_{\max}}$  : contrainte de flexion maximale en dan /mm<sup>2</sup>.

$M_{f_{\max}}$  : Mouvement de flexion maximale en m /s.

$D_g$  : diamètre de galet non déformée en m.

$\sigma_f$  : contrainte de flexion.

L : longueur de galet.

$\beta_f$  : Coefficient de flexion.

P : la charge linéaire.

### II.3.2 Butée hydraulique de retenue du four :

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

$$P_s = i * Q_f / 100 \quad (\text{II.03}).$$

$P_s$  : Pression solide en [Pa]

$Q_f$  : Poids du four rotatif pour chaque appui en [Kg]

$i$  : Le moment d'inertie en [mm<sup>3</sup>]

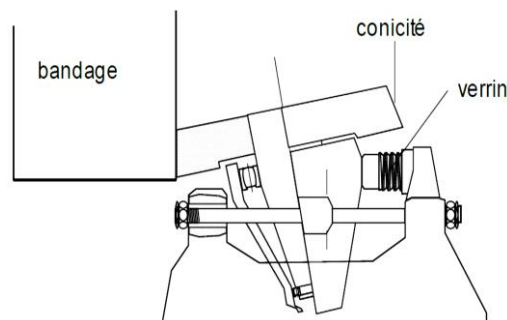


Figure II.2 : Butée hydraulique de retenue du four.

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

$$F_f = Q_f(\sin \alpha_1 + \mu \cos \alpha_1) \quad (\text{II.04}).$$

$F_f$  : la force de frottement.

$\mu$  : Viscosité solide de frottement.

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

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

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

### II.3.3 Contraintes de flexion dans la section du bandage :

Le principe du calcul consiste à considérer un bandage comme une poutre circulaire fermée sur deux appuis en tenant compte de la symétrie verticale et à analyser cette structure par la méthode des déplacements.

On détermine, en chaque point de la structure, les valeurs de l'effort tranchant, du moment fléchissant et de la contrainte de flexion. En prendre les mesures des différents moments fléchissant, avec une valeur  $\alpha$  de 30° entre chaque point de mesure, prennent les valeurs suivantes :

$$M_I = -0.056QR_b ;$$

$$M_{Ia} = -0.031QR_b ;$$

$$M_{Ib} = +0.024QR_b ;$$

$$M_{II} = +0.066QR_b ;$$

$$M_{IIa} = +0.041QR_b ;$$

$$M_{III} = M_{\max} = -0.086QR_b ;$$

$$M_{IV} = -0.024QR_b.$$

Avec :  $Q$  : effort à l'appui en dan et  $R_b$  : rayon moyen du bandage en mm

On en déduit la courbe représentée sur la figure II 3.



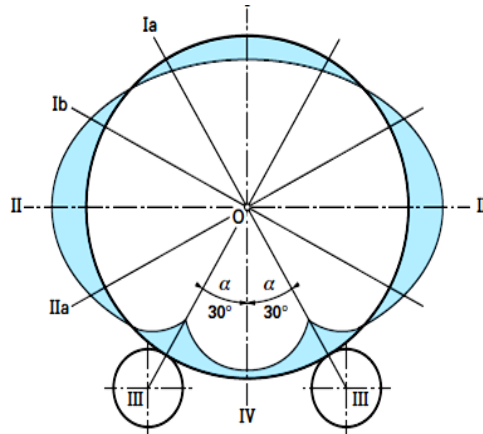


Figure II.3 : Courbe des moments fléchissant.

La contrainte de flexion maximale a pour valeur :

$$\sigma_{f_{max}} = \frac{M_{III}}{W} = 0.086 \frac{Q.R_b}{W} \quad (II.05).$$

Le module de flexion  $W$  ( $mm^3$ ) d'un bandage à section rectangulaire, de largeur  $b$  (mm) et épaisseur  $h$  (mm), est donné par :

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (II.06).$$

**II.3.4 La déformation du bandage :**

La déformation de bandage est la variation relative de longueur d'un solide lorsque ce dernier est soumis à une action extérieure. Peut s'exprimer par la formule :

$$\delta = 0.0208 \cdot \frac{Q \left[ \frac{1}{2}(D_{bi} + h) \right]^3}{E \frac{1}{12} b \cdot (h)^3} \quad (II-07)$$

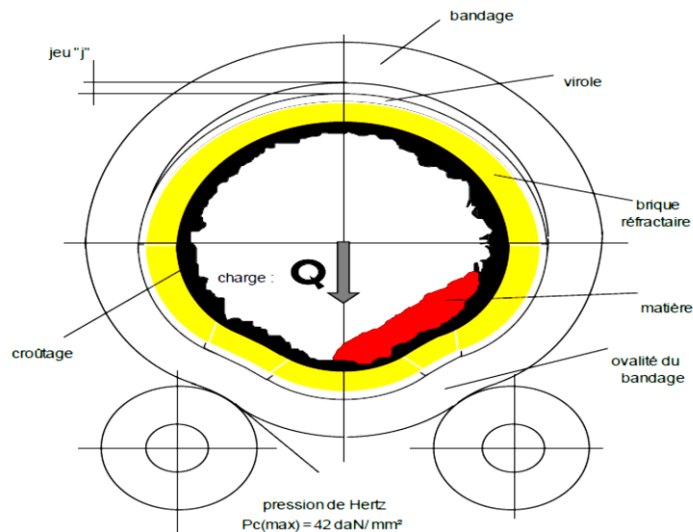


Figure II.4 : Déformation du bandage.

**II.4 Virole :**

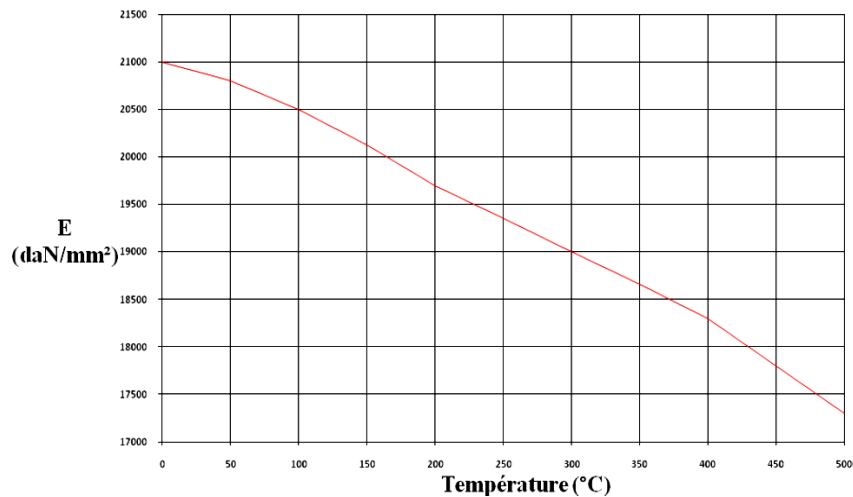
Le calcul des structures par la méthode des éléments finis est couramment employé dans l'élaboration du projet de construction d'un four rotatif.

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.4.1 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 ne 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<sup>2</sup> chute avec la température, du fait que l'acier devient en quelque sorte plus plastique donc moins résistant à l'allongement.



**Figure II.05 :** Evolution du module de Young avec la température.

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

$$I = \frac{d^3 * \pi * e}{8} = 0.39d^3 * e \tag{II-08}$$

Le diamètre moyen  $d$  du tube ou du four dans notre cas et "e" l'épaisseur de la virole. Nous constatons que le module d'inertie est proportionnel à l'épaisseur de la virole et au cube du diamètre, autrement dit, une augmentation du diamètre de 10 % pour une épaisseur constante provoque une augmentation de la rigidité du four de 33 % alors que pour un diamètre constant, il faut une augmentation de l'épaisseur de la virole de 33 % pour donner la même rigidité. Ceci explique 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 et avant tout une affaire de diamètre. Cependant, l'augmentation du diamètre n'entraîne pas que des avantages, [15]

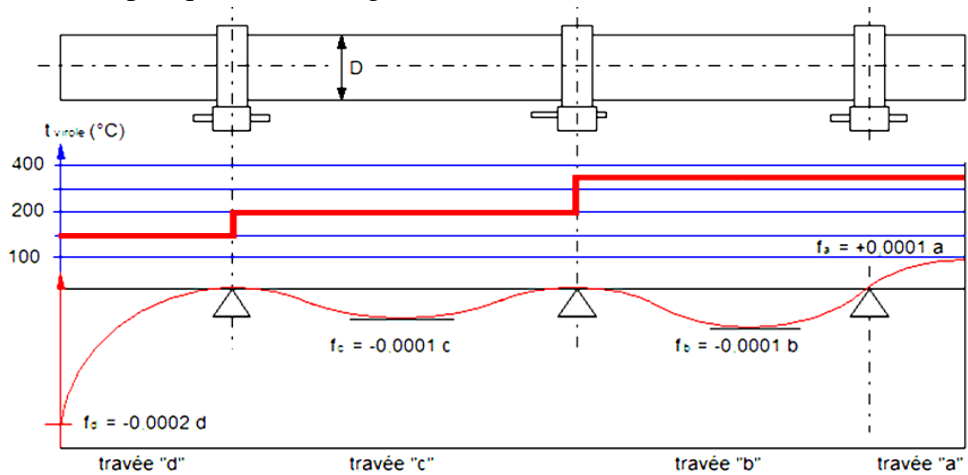


Figure II.06 : Déflexion des différentes travées du four.

Dans la figure II.06 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. [18]

La détermination des épaisseurs se déduit à partir des principes de calcul de la résistance des matériaux en assimilant le four à une poutre reposant sur trois appuis la flèche de la travée "a" se déduit de la formule:

$$f_a = \frac{P_a * a * (a+b)}{24 * E * 0.39 * D_N^3 * e_a} * (3a^2 + a * b - b^2) \tag{II-09}$$

$F_a$ : la flèche de la travée « a » en m.

$P_a$ : la charge linéaire de travée « a » en N.

$D_N$ : diamètre nominal intérieur du four en m.

$e_a$ : épaisseur de la vérole de la travée « a » en mm.

$E$ : module d'élasticité en N/mm<sup>2</sup>.

$a$ : 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.

Dans cette même travée, la charge linéaire  $P_a$  en tonne par mètre linéaire qui comprend la charge du maçonnerage réfractaire, le croûtage et la charge de la matière ainsi que le poids linéaire du four La flèche de la travée "b" se déduit de la formule :

$$f_b = \frac{P_d * a * (a+b)}{384 * E * 0.39 * D_N^3 * e_b} * (5b^2 - 12a^2) \quad (II-10)$$

$f_b$  : la flèche de la travée « b » en m.

$P_d$  : la charge linéaire de travée « d » en N.

$e_b$  : épaisseur du vérole de la travée « b » en mm.

$P_d$  : la charge linéaire de travée « d » en N.

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

$$f_c = \frac{P_c * c^2}{384 * E * 0.39 * D_N^3 * e_c} * (5c^2 - 12b^2) \quad (II-11)$$

$P_c$  : la charge linéaire de travée « c » en N.

$f_c$  : la flèche de la travée « c » en m.

$e_c$  : épaisseur du vérole de la travée « c » en mm.

c : Travée entre l'appui 2 et l'appui 3 du four en m.

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

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

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

$$f_d = \frac{P_d * d * (c+d)}{24 * E * 0.93 * D_N^3 * e_d} * (3d^2 + c * d - c^2) \quad (II-12)$$

$f_d$  : la flèche de la travée « d » en m.

d : Travée entre l'appui 3 et l'aval du four en m.

$P_d$  : la charge linéaire de travée « d » en N.

$e_d$  : épaisseur du vérole de la travée « d » en mm.

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

#### II.4.2 Dimensionnement des épaisseurs des viroles :

En général la virole de la zone de cuisson du four, est exécutée en acier A42 CP ou E 26-3 (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/mm<sup>2</sup>,
- Limite de déformation permanente = 20 kg/mm<sup>2</sup>.
- Allongement = 25 %.
- Le reste de la virole est exécuté en acier E-23 (A-36)

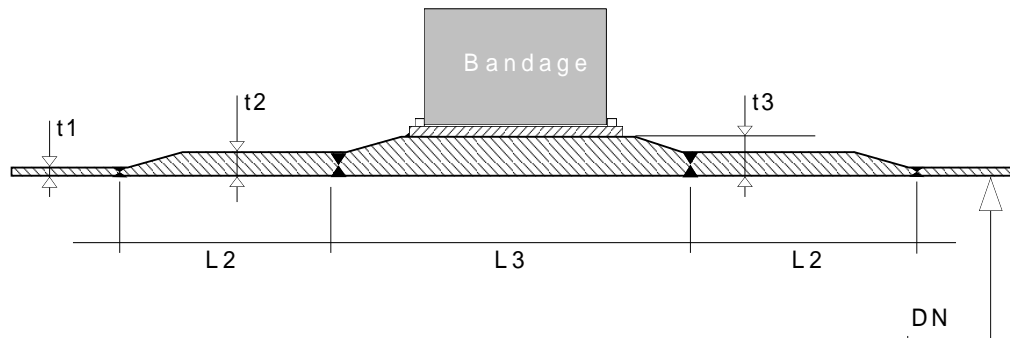
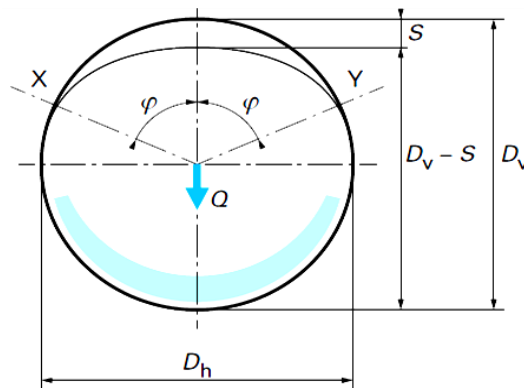


Figure II.07 : Les différentes épaisseurs des viroles du four.

**II.4.3 Ovalisation des viroles :**

L'ovalisation de la virole c'est la déformation du cylindre, elle est exprimée par le (%) est la suivante :

$$\omega_v = \frac{D_h - (D_v - S)}{D_s} 100 \tag{II-13}$$



(b) cylindres déformés

Figure II.08 : Ovalisation de la virole.

Avec :

$\omega_v$ : l'ovalisation de la virole.

$D_s$ : diamètre de virole non déformée ;

$D_L$ : diamètre interne du bandage non déformé ;

$D_v$ : diamètre vertical interne du bandage déformée :  $D_v < D_L$  ;

$D_v - S$ : diamètre vertical interne de la virole déformée :  $D_v - S < D_s$  ;

$D_h$ : diamètre horizontal interne du bandage déformée :  $D_v > D_L > D_v$ .

- soit en considérant que les deux cylindres sont déformés (Figure II 08), « S » étant le jeu réel entre deux corps déformés de manière plus ou moins elliptique.

La valeur du jeu réel « S » et de l'angle « φ » entre la verticale et les points de contact X et Y des platines sous bandage et de la surface interne du bandage dépendent de :

- ✓ La distance théorique C ;
- ✓ La température ;
- ✓ La rigidité de la virole ;
- ✓ L'effet de raidissement de la virole dû au réfractaire et au croûtage ;
- ✓ La déformation du bandage.

Des mesures ont montré que l'angle φ à une valeur comprise entre 70 et 90 °, tandis que S prend des valeurs entre 1.5C et 2C.

Le bandage se déforme sous l'action de son propre poids, de sorte que le diamètre horizontal  $D_h$  est plus grand que le diamètre vertical  $D_v$ . La déformation du bandage est :

$$\delta_b = D_h - D_v \quad (\text{II.14}).$$

Et l'ovalité du bandage :

$$\omega_b(\%) = \frac{\delta_b}{D_L} 100 \quad (\text{II.15}).$$

L'ovalisation du bandage peut être approchée par le calcul en utilisant la formule de NIES qui donne une estimation de la déformation maximale du bandage :

$$\Delta_{b\max}(\text{mm}) = 0.0208 \frac{QR_b^3}{EJ} \quad (\text{II.16}).$$

Dans le cas d'un bandage à section rectangulaire, de largeur « b » et d'épaisseur « h », on a :

$$J = \frac{bh^3}{12}$$

D'où :

$$\Delta_{b\max}(\text{mm}) = 0.25 \frac{QR_b^3}{Ebh^3} \quad (\text{II.17}).$$

L'ovalisation et la déformation maximale du bandage sont reliées, selon Nies, par la formule suivante :

$$\omega_b(\%) = 4 \frac{\Delta_{b\max}}{D_L} 100 \quad (\text{II.18})$$

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

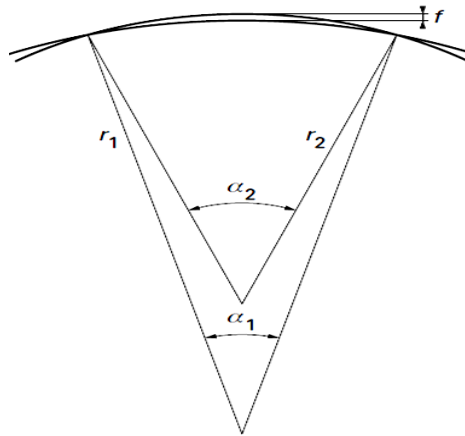


Figure II.9 : Principe de méthode de SHELLTEST.

L'appareil SHELLTEST consiste en une poutre métallique rigide de 1m de longueur, fixée sur la virole dans le sens radial par des aimants. Au centre de cette poutre, une jauge est appliquée de façon continue sur la virole. Au cours de la rotation de la virole, un index associé à la jauge trace sur un disque, toujours maintenu en position verticale, une courbe amplifiée 10 ou 15 fois, qui est l'image de la déformation de la virole. [16]

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 :

$$\omega_v = \frac{4 D_s}{3 L^2} * f * 100 \tag{II.19}.$$

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.10, pour illustrer.

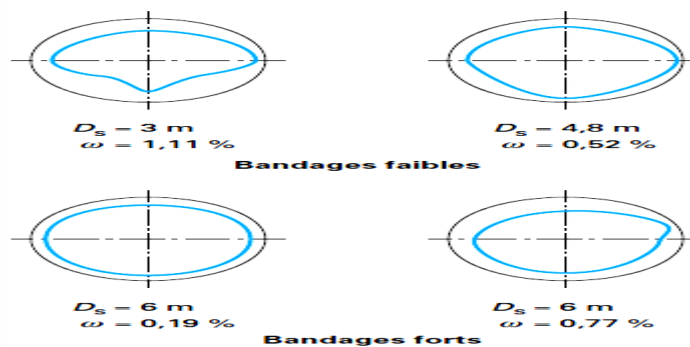


Figure II.10 : Diagrammes méthode de SHELLTEST.

**II.4.4 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. [17]

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.1 :

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

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

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

**II.5 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.

$$Cr(a) = h_{brique} * 10^{-3} * \phi_N * \pi * \rho \tag{II-20}$$

**II.5.1 Charge linéaire du croûtage :**

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

$$Cc(a) = h_{croustage} * 10^{-3} * (\phi_N - 2h_{brique}) * \pi * \rho' \tag{II-21}$$

**II.5.2 Charge linéaire de matière :**

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



$$Cm(a) = 0.14 * [\phi_N - 2 * (h_{brique} + h_{croustage})]^2 * \rho'' \quad (II.22).$$

### II.5.3 Charge linéaire de la virole :

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

$$Cv(a) = \phi_N^2 * 6.5 * 10^{-3} * \pi * \rho''' \quad (II.23).$$

### II.5.4 La charge linéaire totale :

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

$$Ct = Cr(a) + Cc(a) + Cm(a) + Cv(a) \quad (II.24).$$

### II.5.5 Recherche Bibliographique :

Les sollicitations mécaniques 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 :

**Bouhafs et al, (2018)** : Les fours sont des machines très utilisées dans l'industrie, notamment des cimenteries. Ils sont souvent soumis à de fortes contraintes mécaniques et thermiques. Le présent travail consiste à modéliser le comportement mécanique d'un four rotatif en régime stationnaire. Le cas étudié est celui de la cimenterie LAFARGE Oggaz, Mascara, Algérie. Cette étude a pour objectif de déterminer les conditions optimales de fonctionnement sous sollicitations mécaniques variables. Les deux cas de charge considérés sont la traction et la compression des viroles. Les résultats obtenus, états de contrainte, déformation et déplacement permettent l'établissement d'un modèle de prédiction des zones fortement sollicitées et par conséquent d'améliorer les paramètres de conception du four notamment en phase de dimensionnement. La méthode numérique utilisée est celle des éléments finis telle qu'elle est implémentée dans le code de calcul ANSYS Workbench

**Janati et al, (2017)** : L'objet de ce travail est l'étude du comportement mécanique et de la déformabilité des viroles sous effet thermique pour un four rotatif de cimenterie. Cette étude entre dans le cadre de la maintenance préventive de ces fours avec plus de précision. Il s'agit de la validation du modèle par éléments finis, qui simule le comportement élastoplastique du four. Ce travail est basé sur l'étude de cas du four rotatif d'une cimenterie d'un groupe industriel marocain. Tout d'abord, nous prenons des mesures expérimentales pour les déformations du four en présence de chaleur. Nous utilisons la

méthode des éléments finis numériques pour simuler la virole et la paroi réfractaire. Cette simulation est obtenue par l'utilisation du logiciel commercial PATRAN-NASTRAN. Enfin, pour une meilleure approche de la réalité du comportement du four, les résultats de la méthode des éléments finis sont comparés à ceux obtenus par les tests expérimentaux.

**Janati et al, (Avril 2017)** : Le présent travail à pour objectif l'étude la désalignement et les caractéristiques du vilebrequin d'un four rotatif pour les cimenteries. Cette étude entre dans le cadre des travaux de la maintenance préventive de ces fours. Il s'agit de valider les modèles par la méthode des paramètres initiaux, programmé par le langage Visual Studio C++, qui simule les surcharges tolérées comme le ratio entre les efforts générés par le désalignement et les efforts statiques au niveau des appuis. Une surcharge due au désalignement égal au maximum à 10.0 % de la charge statique est tolérée. Dans un premier temps, une campagne des mesures expérimentales des charges et déplacements sur les appuis du four a été réalisée à vide, ensuite la modélisation de la virole et le mur réfractaires sous forme d'une poutre avec des appuis simples, Pour une meilleure approche de la réalité de la matrice de rigidité, la surcharge et le désalignement, les résultats obtenus par la méthode des paramètres initiaux sont comparés à ceux obtenues par les essais expérimentaux.

**Žiga et al, (2017)** : Dans l'analyse de la tension du papier des rouleaux de support de four rotatif est réalisée. L'état de tension dans les rouleaux de support est provoqué par le gradient de température, la connexion par contraction entre l'arbre et le rouleau et par le contact avec l'anneau du four. L'analyse des contraintes est effectuée analytiquement et numériquement et les résultats obtenus sont comparés.

Dans les usines de mélange d'asphalte, le four rotatif est une machine gigantesque dont la fonction est de sécher et de chauffer un mélange de sable et de gravier. La rotation du four est transférée à travers des anneaux de support qui sont montés sur la coque du tambour au moyen de rayons (bretelle). Les charges agissant sur ces rayons sont à la fois thermiques et mécaniques. En effet, le four rotatif est fortement chauffé par un brûleur et chargé aussi bien par son poids propre que par la matière première qui le traverse. Les rayons sont soudés à la fois sur la bague de support et sur la coque du tambour. La fatigue peut conduire, après un certain temps d'utilisation, à parler ou à souder une fissure. Dans cet article, une étude de charge est réalisée à l'aide d'approches analytiques et numériques. Les résultats de contrainte sont obtenus par simulation d'éléments finis et le modèle numérique est comparé aux mesures par jauge de contrainte effectuées sur un four rotatif en fonctionnement. Ensuite, une analyse de fatigue est effectuée pour déterminer la durée de vie attendue du rayon et des soudures. Enfin, une refonte optimisée du rayon est présentée pour améliorer la durée de vie en fatigue.

**Li et al, (2015)** : Avec le développement de l'industrie métallurgique et l'amélioration de la technologie des fours, les propriétés de traitement des équipements des fours font l'objet d'une attention accrue. Le four rotatif est l'un des plus représentatifs de l'équipement du four ; Les exigences du four rotatif sont plus élevées en réponse à l'appel lancé par le gouvernement national en matière d'économie d'énergie et de réduction des émissions. C'est-à-dire que le nouvel équipement conçu présente les caractéristiques de consommation d'énergie optimale et de performances stables. Afin d'analyser la

consommation d'énergie du four rotatif, il est nécessaire d'étudier le processus de transfert de chaleur des fours rotatifs. Le modèle numérique tridimensionnel du four rotatif est configuré en utilisant la technologie des éléments finis. Après analyse des données, il a été constaté que différentes épaisseurs de la croûte du four et différentes conditions de travail ont une influence certaine sur le champ de température et le champ de contraintes du four rotatif. Après analyse des données, il a été constaté que différentes épaisseurs de la croûte du four et différentes conditions de travail ont une influence certaine sur le champ de température et le champ de contraintes du four rotatif. Après avoir analysé les résultats de la simulation, la température de la paroi extérieure du four rotatif a une relation linéaire approximative avec l'épaisseur de la croûte du four. Changer l'épaisseur de la croûte du four va non seulement modifier la valeur de la contrainte maximale, mais également influencer sur la position de la contrainte maximale. L'augmentation de l'épaisseur de la croûte du four peut réduire la valeur extrême du stress. Lorsque la vitesse du vent du ventilateur à l'intérieur du four est plus grande, la température de chaque couche est également relativement élevée, la courbe de température est plus douce et la variation de température est plus stable. Il a également été constaté que lorsque le coefficient d'échange de chaleur global en dehors de la surface du four est plus grand, la contrainte thermique créée par le corps du four est plus petite. Le phénomène de contrainte thermique excessive peut être amélioré en modifiant les conditions de ventilation de la surface extérieure du four rotatif. Pour que la température élevée de la paroi du four n'influence pas le fonctionnement des roues et pour que la température de la paroi du four soit bien répartie dans le sens de la longueur du four, l'épaisseur de la croûte du four dans le sens de la longueur est changé, et la structure du cylindre avec des roues est modifiée. Après une simulation numérique supplémentaire, l'épaisseur optimisée de la croûte et de la structure du four est trouvée et le problème ci-dessus est résolu efficacement. Les résultats peuvent réduire les intrants de la conception du four rotatif et les coûts de production. Il peut également réduire la consommation d'énergie et donne des indications sur le processus de production des fours.

**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.

**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.

**II.6 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**

---

**Simulation numérique par  
SOLIDWORKS**

**III.1 Introduction :**

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

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

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

Il existe plusieurs méthodes numériques dans la mécanique des fluides et chaque méthode a ces avantages et ces inconvénients spécifiques. [19]

**III.2 Méthode des différences finies :**

Une discrétisation par méthode des différences finies est basée sur la forme différentielle de l'EDP (Équations aux Dérivées Partielles) à résoudre. Chaque dérivée est remplacée par une formule de différence approximative (qui peut généralement être dérivée d'une extension de la série Taylor). Le domaine de calcul est divisé en cellules hexaédriques (la grille) et la solution sera obtenue à chaque point nodal. Cette méthode est plus facile à comprendre lorsque la grille physique est cartésienne. La discrétisation se traduit par un système d'équations de la variable aux points nodaux, et une fois la solution trouvée, nous avons une représentation discrète de la solution. [21].

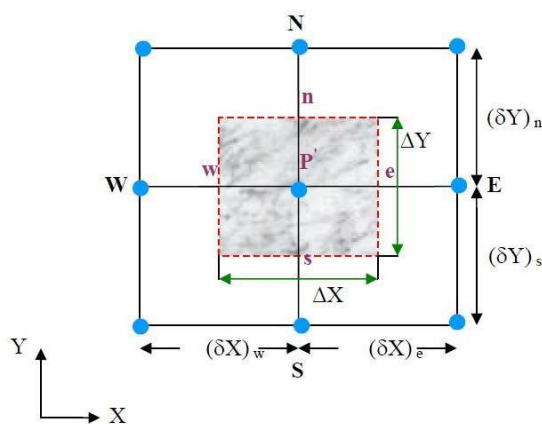
**III.3 Méthode des éléments finis :**

La méthode des éléments finis subdivise le domaine en sous-domaines avec certaines formes, par exemple des formes triangulaires, avec un certain nombre d'inconnues aux nœuds qui dépendent de la fonction de forme sélectionnée. La fonction inconnue est approchée par un polynôme dont le degré peut varier d'une application à l'autre mais reste en général faible. Cette méthode se décompose en deux étapes :

- approximation nodale des fonctions inconnues par sous-domaines (fonctions d'interpolation).
- utilisation de la méthode des résidus pondérés qui permet de construire une formulation intégrale à partir des équations aux dérivées partielles. [22].

**III.4 La méthode des volumes finis :**

Dans la simulation par la méthode des volumes finis, le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés le volume de contrôle. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles, décrites au chapitre précédent, sur chaque volume de contrôle. Chacun de ces derniers (volume de contrôle) contenant un nœud appelé le nœud principale. Un exemple de volume de contrôle est montré dans la figure ci-dessous. Pour un nœud principale ( $P'$ ), les points E et W (E : Est, W : West) sont des voisins dans la direction X, tandis que N et S (N : Nord, S : Sud) sont ceux dans la direction Y. Le volume de contrôle entourant ( $P'$ ) est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux point (e) et (w) dans la direction X, (n) et (s) dans la direction Y. [23].



**Figure III.1 :** Schéma représentant le volume de contrôle bidimensionnel.

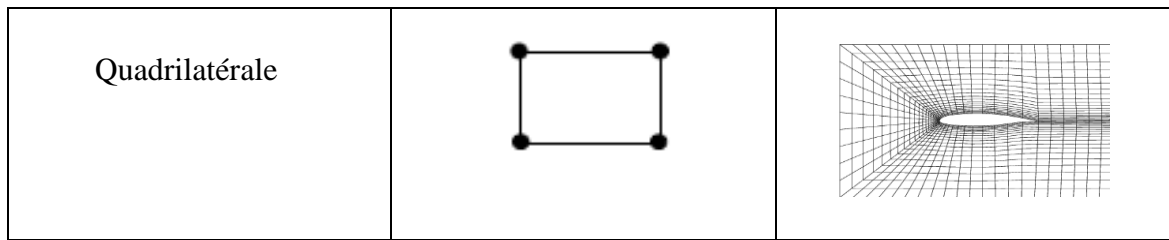
**III.5 Choix du maillage**

Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des Résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui répond à nos objectifs, Parmi ces paramètres, on peut citer :

- le nombre de mailles ;
- la distance entre les mailles (concentration des mailles) ;
- la forme de la maille ;
- les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

Les différentes formes de maillage des faces montré dans le tableau III-1 :

Type des cellules en 2D	La forme de maillage	Exemple
Triangulaire		



**Tableaux (III.1) :** Les différentes formes de maillage des faces.

Aussi il permet de choisir le type de maillage des faces selon les options suivantes :

Option	Description
Map	Crée une grille régulière et structurée des éléments du maillage.
Submap	Divise une face en plusieurs régions de façon à ce qu'on puisse leur appliquer Map.
Pave	Crée une grille non structurée des éléments du maillage.
Tri primitive	Divise une face en trois régions quadrilatérales et crée un maillage dans chaque région de la face.

**Tableaux (III -2) :** Description des types de maillages des faces

### III.6 Description du problème

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

On procède à une simulation numérique dans le logiciel solidworks pour démontrer la répartition des contraintes par plusieurs formule, déformations mécaniques et la fléché de flexion pour notre étude de four (brique réfractaire, ensemble des véroles). Ainsi, on cherche à étudier la résistance de système de four. Les dimensions du domaine étudié et les caractéristiques des matériaux sont représentés au tableau III.3.

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

**Tableau III.3 :** caractéristique du four rotatif.



Les différentes caractéristiques physiques, et mécaniques de l'acier de la virole Acier allié et le brique réfractaire du four étudié sont résumées dans les tableaux III.4 et III.5.

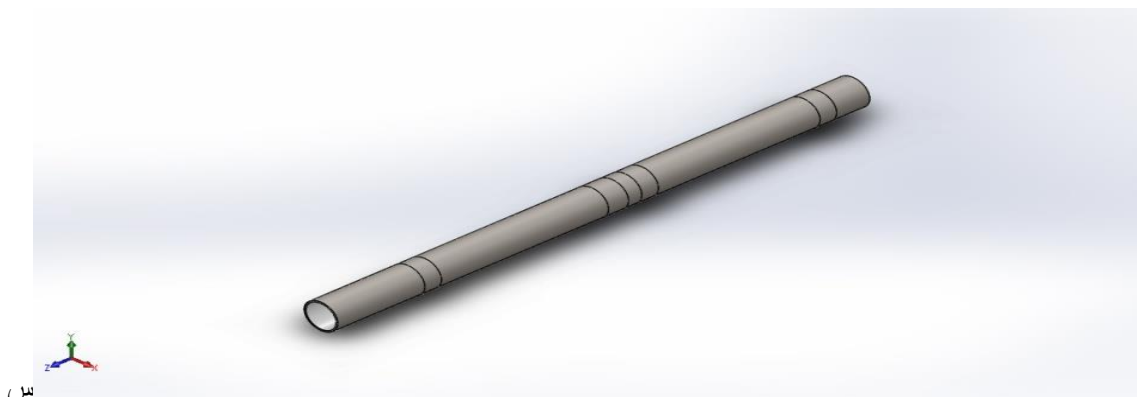
Propriété d'acier allié	Valeur	Unité
Module d'élasticité	210000	N/mm <sup>2</sup>
Module de cisaillement	79000	N/mm <sup>2</sup>
Coefficient de Poisson	0.28	/
Masse volumique	7700	kg/m <sup>3</sup>
Limite de traction	723.8256	N/mm <sup>2</sup>
Limite d'élasticité	620422	N/mm <sup>2</sup>
Epaisseur	25	mm
Chaleur spécifique	460	J/ (kg .K)
Conductivité thermique	50	w/ (m.k)

**Tableau III.4** : Les caractéristiques de virole.

Propriété de brique réfractaire	Valeur	Unité
Conductivité thermique	1.629	W/ (m.°C)
Masse volumique	3000	kg/ m <sup>3</sup>
Module de Young	105000	MPa
Epaisseur	200	Mm
Coefficient de Poisson	0.35	/
Limite d'élasticité	90	MPa
Module d'élasticité	4.8E+11	N/mm <sup>2</sup>
Charge de rupture	120	N/mm <sup>2</sup>

**Tableau III.5** : Les caractéristiques de brique réfractaire.

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



**Figure III.2** : four rotatif de cimenterie.

L'étude est basée sur une analyse mécanique à partir de l'application des différentes forces sur le four, on prendra les charges selon la variation de débit de température et le croûtage, faisant ainsi, on se permet de faire une comparaison entre les cas en se basant sur les résultats obtenus.

### III.7 Formulation de l'équation de la charge du four :

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

- Charge linéaire du maçonnerie réfractaire par l'équation (II.1) avec :

$h$  : hauteur de la brique en mm (dépend du diamètre du four)

$\rho$  : Masse volumique de la brique réfractaire ( $\rho = 3 \text{ t/m}^3$ )

- Charge linéaire du croûtage par l'équation (II.15) avec :

$h'$  : hauteur du croûtage en mm ( $h' \sim 80 \text{ mm}$ )

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

- Charge linéaire de matière par l'équation (II.16) avec :

Taux de remplissage du four est égal 0.14

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

- Charge linéaire de la virole du four par l'équation (II.17) avec :

$\rho$  : Masse volumique de l'acier en  $\text{t/m}^3$  ( $\rho''' = 7,85 \text{ t/m}^3$ )

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

Charge linéaire	tonnes /mètre	N
du maçonnerie 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.6 :** les charges appliquées sur le four.

### III.8 Mise en œuvre de la simulation dans solidworks :

#### III.8.1 Présentations du logiciel solidworks :

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

### III.8.2 Les avantages de la simulation numérique :

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

### III.8.3 Simulation dans solidworks :

Pour analyser le problème de la déduction des contraintes subit par de la virole d'un four rotatif de cimenterie, il faut tout d'abord calculer les différentes charges en état de fonctionnement normal.

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

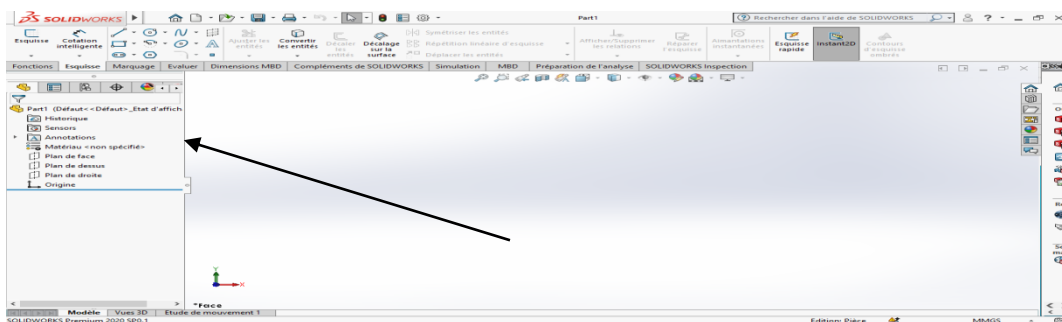
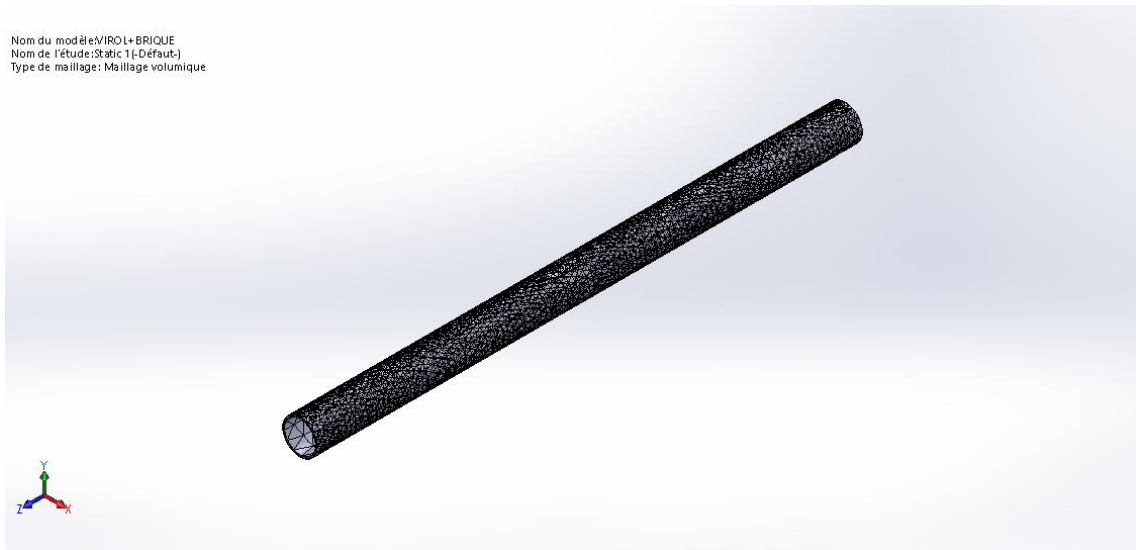


Figure III.3 : présentation d'espace géométrique du solidworks

Comme prévu, On en conclut qu'un maillage très fin augmentera de façon exponentielle le temps de calcul de l'analyse et un maillage trop grossier sacrifiera la précision des résultats. Et il y a toujours un intervalle où la précision de la solution est acceptée, donc le raffinement du maillage qui donnera toujours une précision à l'intérieur de l'intervalle serait une perte du temps.



**Figure III.4 :** Maillage tétraédrique du four.

	<b>Element</b>	<b>Nœud</b>
Four (ensemble)	26989	49273

**Tableau III.7 :** Paramètres de maillage.

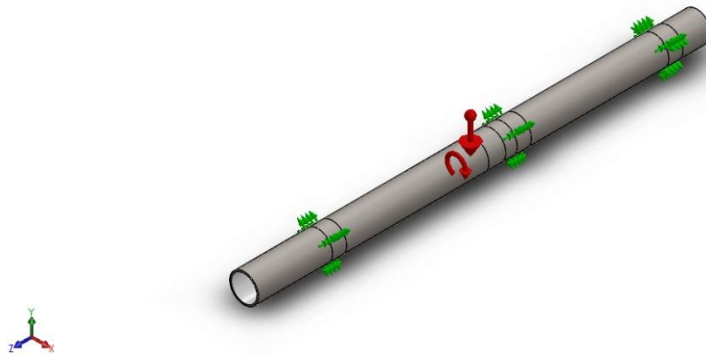
**III.8.4 Condition aux limites dans SOLIDWORKS :**

La condition aux limites dans notre étude numérique selon les conditions réelle dans le four, La simulation a été menée pour les quatre cas suivants :

**III.8.4.1 Premier cas :**

La figure (III.5) présente le modèle géométrique avec Les conditions initiale pour faire une étude globale sur le comportement mécanique du four. Une fois déclarée la gravité terrestre, la charge de l'ensemble des viroles et le brique réfractaire, commence notre simulation par logiciel utilise. Dans le cadre de cette simulation, la virole et le brique sont considérée comme étant isotrope, linéaire élastique. Les conditions initiales sont :

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

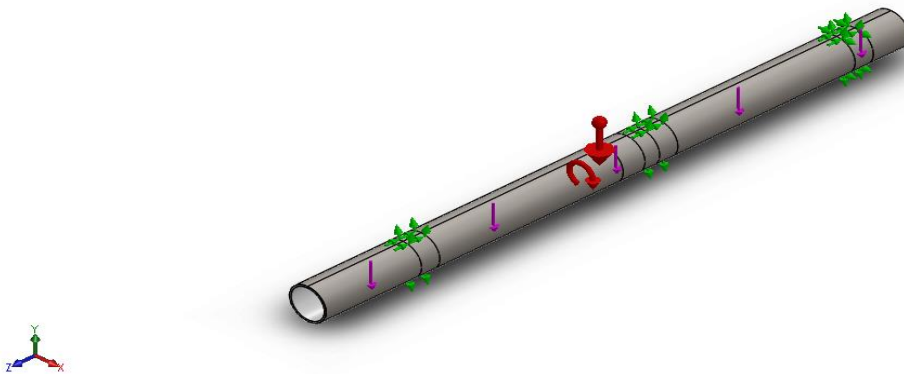


**Figure III.5 :** Représentation de chargement sur le four de 1<sup>er</sup> cas.

#### III.8.4.2 Deuxième cas :

La figure (III.6) présente le modèle géométrique et le chargement mécanique appliqué sur le four. Les conditions initiales sont :

- La vitesse de rotation du four de 4 tr/m ;
- La gravité terrestre de  $9.81 \text{ m/s}^2$  ;
- 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.6 :** présentation des conditions aux limites de 2<sup>ème</sup> cas.

#### III.8.4.3 Troisième cas :

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

- La vitesse de rotation du four de 4 tr/m ;
- La gravité terrestre de  $9.81 \text{ m/s}^2$  ;

- 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 ;
- Une variation d'épaisseur du croutage (50, 100, 200, 300 mm).

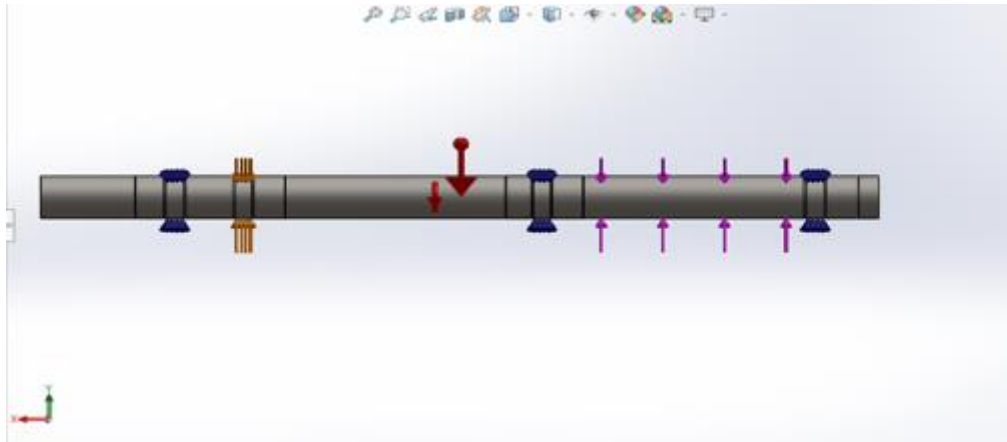


Figure III.7 : présentation des conditions aux limites de 3<sup>ème</sup> cas

#### III.8.4.4 Quatrième 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 du troisième cas, ce qui complique de plus en plus cette étude. Les conditions initiales sont :

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

Zone d'entrée : Le brique de cette zone est plus résistant et la température est comprise entre 850 – 900, comme montre le Figure (III.8) :

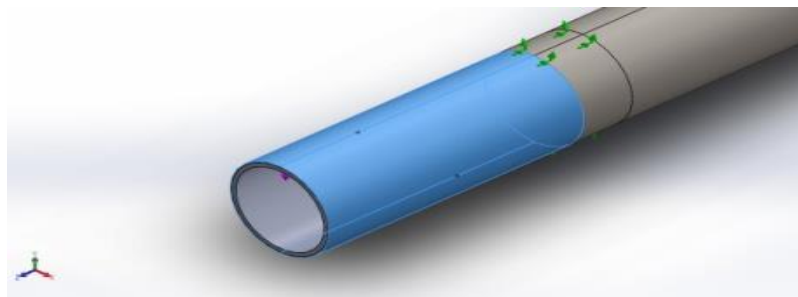


Figure (III.8) : présentation le Zone d'entré

**Zone de transition :** Dans cette zone le revêtement du four devient plus fragile, lorsque la phase liquide commence à apparaître dans le brut, la température est comprise entre 1300-1400 °C. Démontré dans la Figure (III.9)

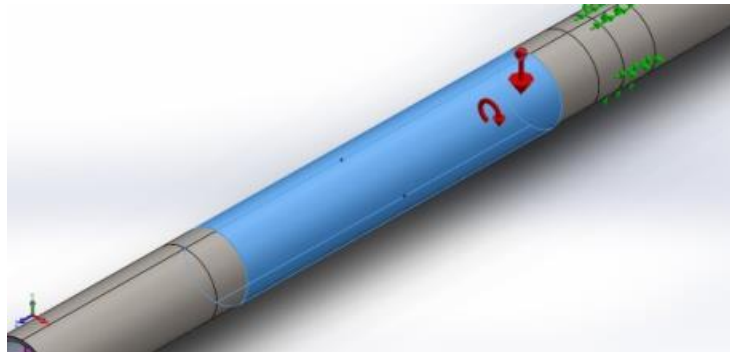


Figure (III.9) : présentation le Zone de transition

**Zone de cuisson :** La zone de cuisson permet d'obtenir le clinker, mais le brique devient faible et friable en raison de la fatigue thermomécanique, car la température de cette zone est plus élevée, elle est comprise entre 1300-1600 °C. Présente dans la Figure (III.10)

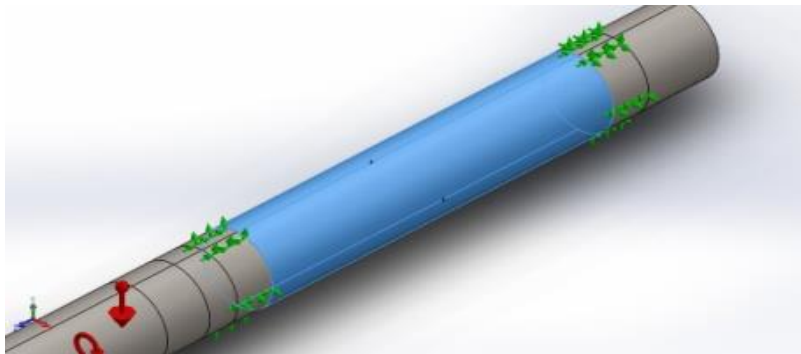


Figure (III.10) présentation zone de cuisson

**Zone de refroidissement :** la résistance d'origine de la brique dans cette zone doit être flexible, élevée et résistante à l'usure, car le flux de clinker peut entraîner une détérioration (corrosion) des réfractaires et des segments en acier, la température est comprise entre 1 000 °C et 1 200 °C. Voir la Figure (III.11)

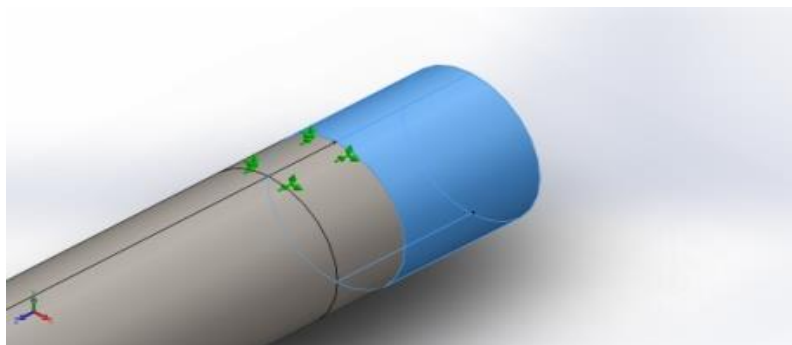


Figure (III.11) : présentation zone de refroidissement.

**III.9 Conclusion :**

La définition du modèle est l'étape la plus importante pour résoudre un problème d'ingénierie, en effet il faut bien le simplifier autant que possible afin qu'on soit capable de le résoudre avec les outils dont on dispose. On cherche un modèle le plus simple possible et qui simule au mieux le cas réel. Ce chapitre a été consacré pour la présentation des outils numériques utilisés pour la résolution de notre problème à savoir solidworks. Les résultats et leurs interprétations seront détaillés dans le chapitre suivant.



# **Chapitre IV**



## **Résultats et discussion**

### IV.1 Introduction :

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

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

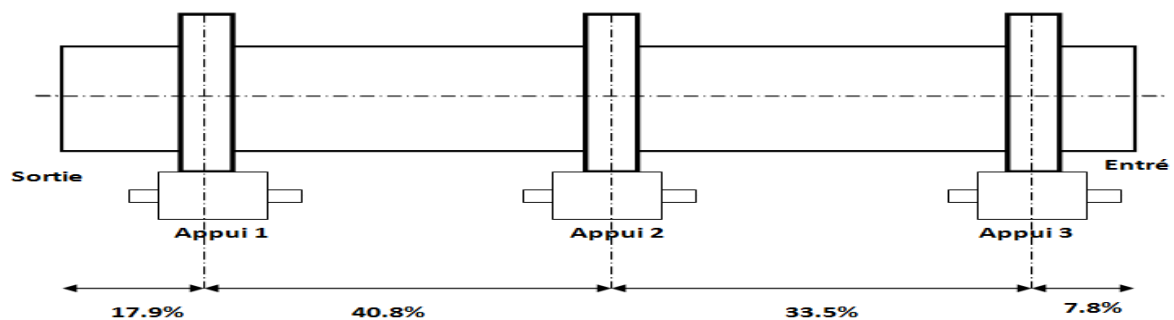
Les conclusions qui en découlent peuvent ensuite être transposées à l'échelle de la structure pour répondre à la problématique industrielle posée. Les cas cités aux préalables vont être étudié et interprété par la mise en évidence par la distribution des contraintes pour les quatre cas défini dans le chapitre III.

### IV.2 Discussions des résultats :

Les figures suivants présente les résultats obtenus par la simulation numérique réalisée sous Solidworks, avec la représentation de la répartition des contraintes équivalents, les déplacements totale, la déformation élastique le long du four.

#### IV.2.1 Premier cas :

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



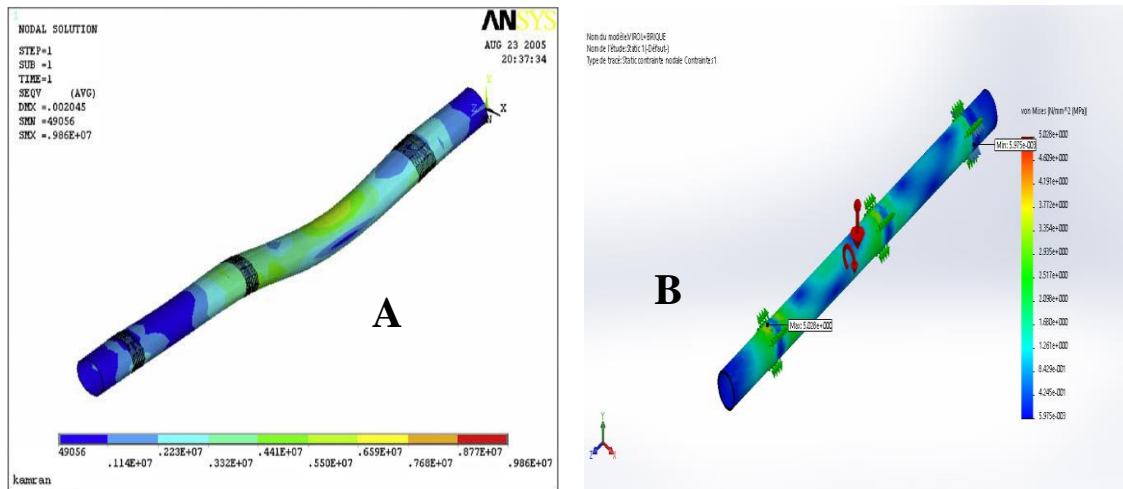
**Figure IV.1 :** Représentation des zones critiques dans un four rotatif.

#### IV.2.2 La validation :

On simule le four rotatif sous son propre poids (acier et brique réfractaire) animé par une vitesse de rotation de 4 tr/min. cette validation donnée une certaine crédibilité à notre étude ainsi qu'à la méthode de calcul utilisé. Le modèle numérique utilisé est la méthode des éléments finis, les résultats illustré ont été comparés avec ceux de K.Pazand [20] qui sont présenté sur la Figure IV.2.A, on constate que les résultats de notre simulation sont proche à ceux du cas de validation.

On distingue que la contrainte de Von mises varie au niveau de l'appui 1. On remarque que la distribution des contraintes sont plus importantes dans la premier zones à savoir le tronçon situé entre l'appui 1 et l'appui 2, tandis que le tronçon qui se trouvant entre

l'appui 2 et l'appui 3 et relativement moins sollicité. Par contre au niveau des zones en amont et en aval les contraintes prennent des valeurs minimales.



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

En prend les mêmes conditions de chargement avec ceux de Pazand, on a déduit la distribution des contraintes suivant le critère de Von Mises. La figure IV.2 A, montre la répartition des contraintes sur le système étudié à savoir le four rotatif. La différence réside au niveau de concentration de contrainte maximale qui est de 5028000 Pa pour notre cas d'étude, tandis que celle de Pazand est de 986000 Pa. Le comportement des deux fours sont compatibles sauf que la différence réside dans la géométrie du four rotatif : dans notre cas d'étude a une longueur de 80 m et un diamètre intérieur de 5 m, par contre celui traité par Mr K.Pazand possède une longueur de 71.5 m et un diamètre de 4.8 m ; Les caractéristiques physiques de brique réfractaire ; Certaines conditions aux limites et La charge de gravité

**IV.2.3 L'évolution de la contrainte mécanique du four :**

L'évolution de la contrainte mécanique le long du four est sollicitée au niveau des appuis, près des zones d'appui il y'a concentration de contraintes.

Les contraintes augmentent de forme de pic au niveau des appuis et près des zones d'appui dans les trois modes des contraintes cette phénomène mécanique des pièces avec une matière homogène isotopique dans notre cas c'est l'acier de virole. Au niveau de la couronne la contrainte équivalente prend la valeur maximale, qui est dû au poids de la couronne.

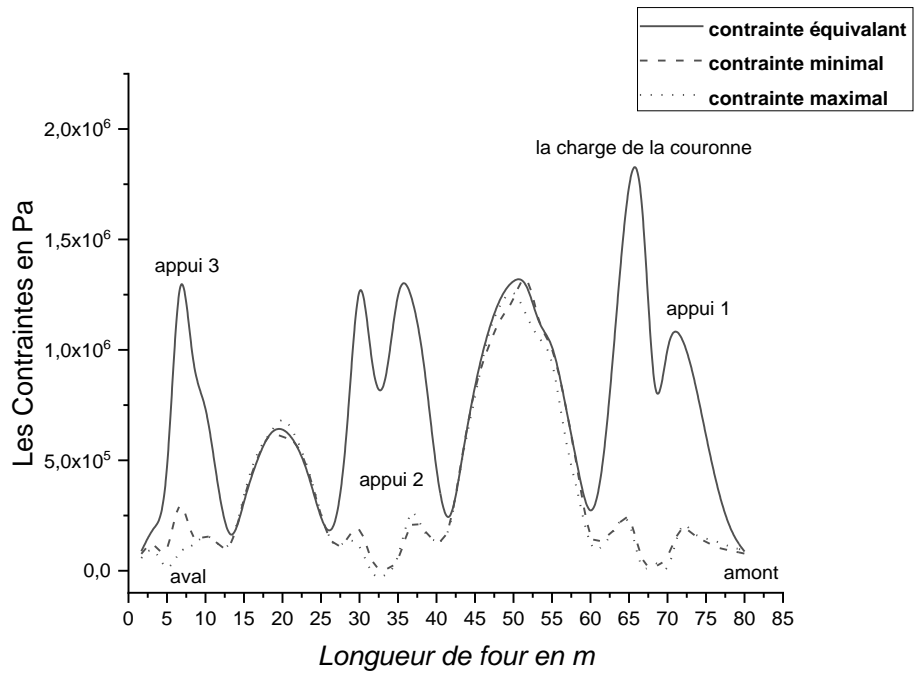


Figure IV.3 : La variation du champ de la contrainte mécanique

La figure IV.4 montre la distribution de contrainte équivalente (Von-Mises) sur la surface externe de la virole du four jusqu'à 4612000 Pa, 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 38400 Pa.

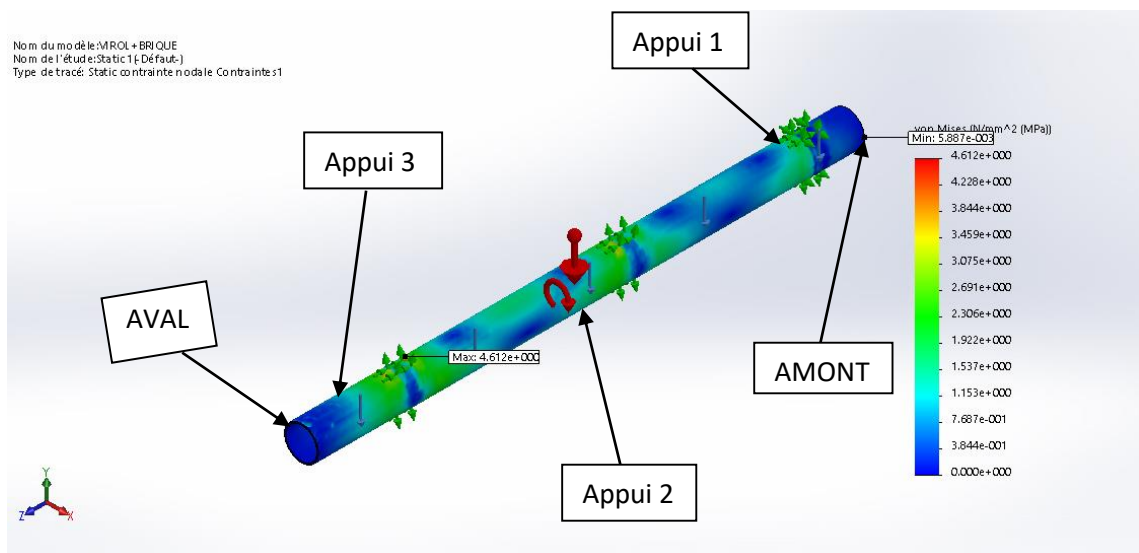
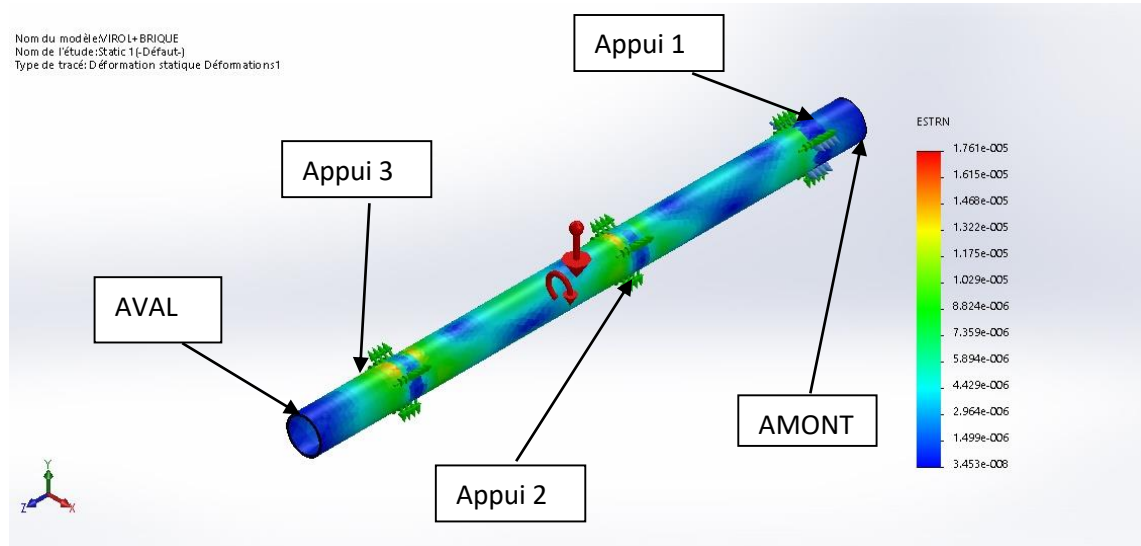


Figure IV.4 : présentation des contraintes de four.

#### IV.2.4 La déformation élastique :

La figure IV.5 et IV.6 montrent que la déformation élastique le long du four est très importante près des appuis au niveau des stations des roulements d'une valeur de 0.003453m que dans les autres zones, parce que la concentration des contraintes est très élevée à cause la pression et l'effet de rotation.



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

Les figures 14 présente les déformations élastiques totales dans le cas de chargement normal de four. La figure montre que les déformations sont très importantes par rapport le premier cas sur les appuis sous forme de déformation en compression et entre les appuis sont déformée en flexion.

On remarque que les zones plus déformées sont les zone de faible épaisseur (depuis 42 m jusqu'à 60 m), La plus grande déformation est enregistrée suivant la direction de chargement en compression et flexion c'est-à-dire suivant Y ( $1.468 \times 10^{-5}$  la valeur max) au niveau des stations de roulement et la couronne d'entraînement (65 m). Cette augmentation lie par les chargements additifs de croutage et matière.

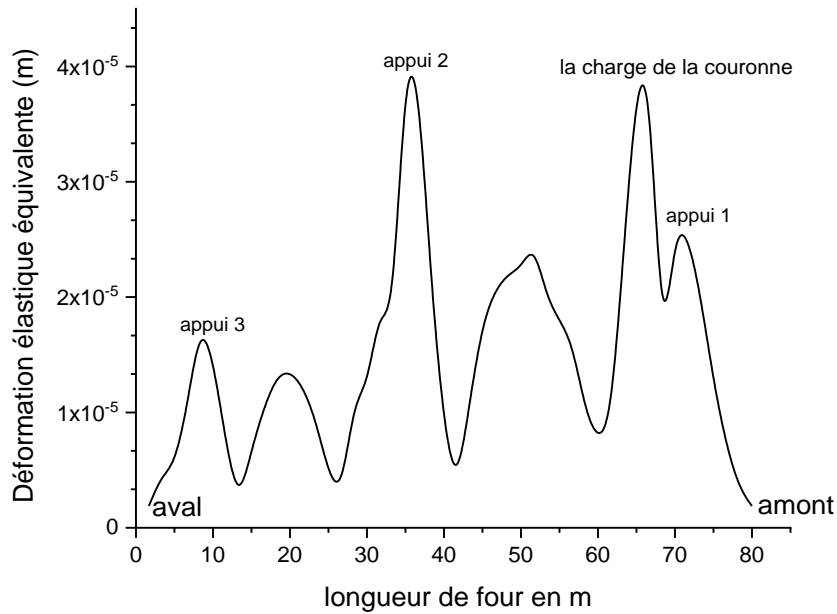


Figure IV.6 : Variation de la déformation élastique équivalente.

**IV.2.5 Le déplacement :**

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

La figure IV.7 montre que le champ de déplacement augmente entre l'appui 1 et l'appui 2 dans le cas où la virole dans un état de flexion, d'une valeur maximale de 0.424 E-3 m Par contre dans les autres zones, le déplacement diminue jusqu'à d'une valeur de 0.001 E-3 m Ce qui est logique par rapport aux conditions de fonctionnement du four de ciment.

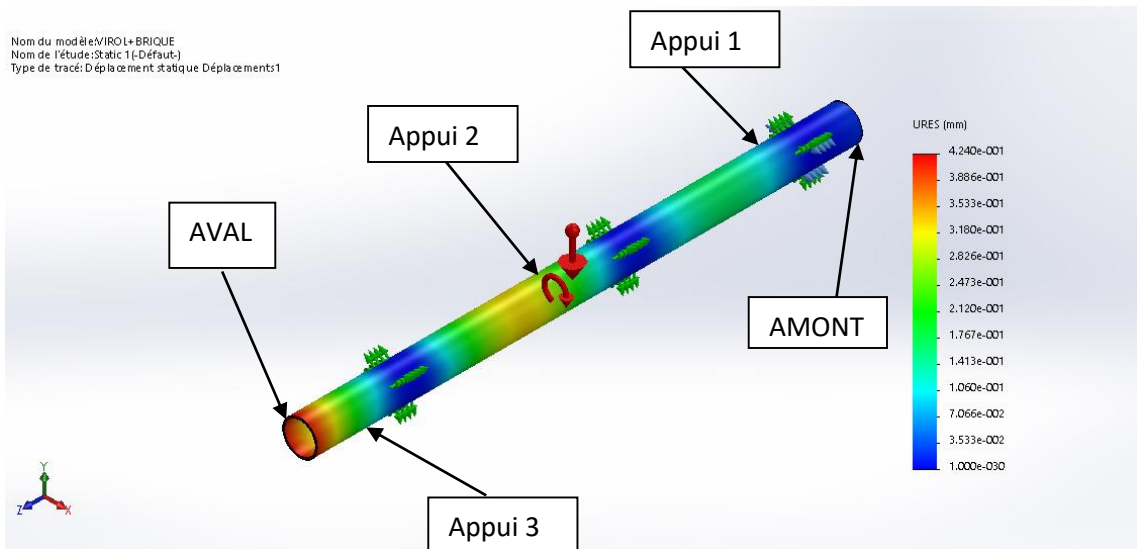
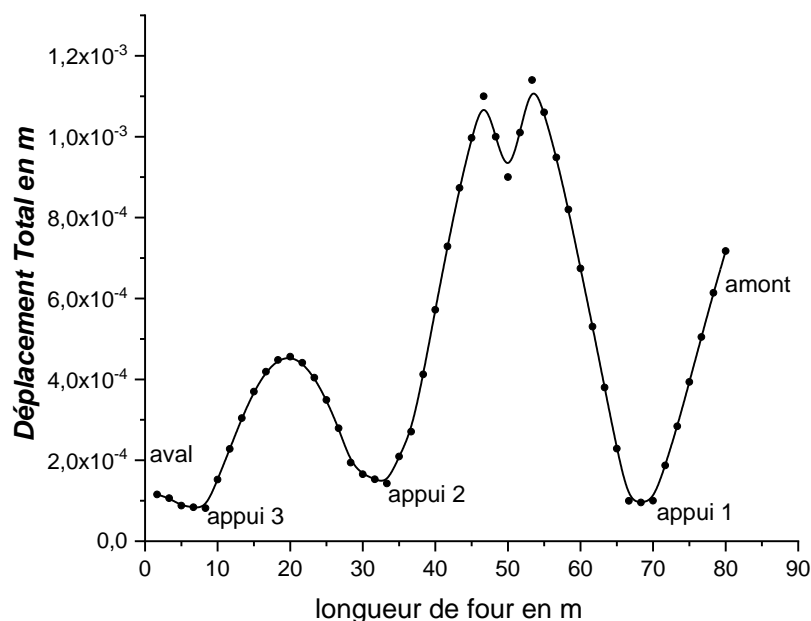


Figure IV.7 : représentation du déplacement total du four.

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

- 1<sup>er</sup> zone : en aval du fou déplacement total est très faible valeur de  $0.11 \text{ E-3m}$ , à cause de la longueur (8.33 m), par contre en amont du four le déplacement devient important  $0.71 \text{ E-3m}$
- 2<sup>ème</sup> zone : au niveau des appuis le déplacement est presque nul de valeur de  $0.083 \text{ E-3m}$ , les appuis sont de zones qui supporte le poids du four.
- 3<sup>ème</sup> zone : entre les appuis, on remarque que la flèche dépend à la distance entre les appuis. Concernant la distance entre les appuis 3 et 2, la longueur entre les deux 27 m et le déplacement total  $0.45 \text{ E-3m}$ , et entre les appuis 2 et 3 la distance est égale 35m et le déplacement égal à  $1.19 \text{ E-3m}$



**Figure IV.8 :** La variation de déplacement total de four.

### IV.3 Deuxième cas :

Compte tenu des résultats de comparaison précédente, nous avons voulu voir l'effet d'un autre paramètre, qui est la charge de croutage. Elle joue un rôle très important dans le comportement mécanique du four rotatif de cimenterie.

#### IV.3.1 Les contraintes mécaniques :

La figure IV.9 montre la distribution de contrainte équivalente de Von-Mises sur la surface externe de la virole du four, La contrainte équivalente varie de 5975 Pa jusqu'à 5028000 Pa, la valeur maximale des contraintes équivalentes positionnées au niveau des appuis. On remarque que les valeurs des contraintes sont plus élevées dans l'appui 1 et l'appui 2 valeur de 2517000 Pa. Par contre au niveau des zones en amont et en aval la contrainte prend la valeur minimale.

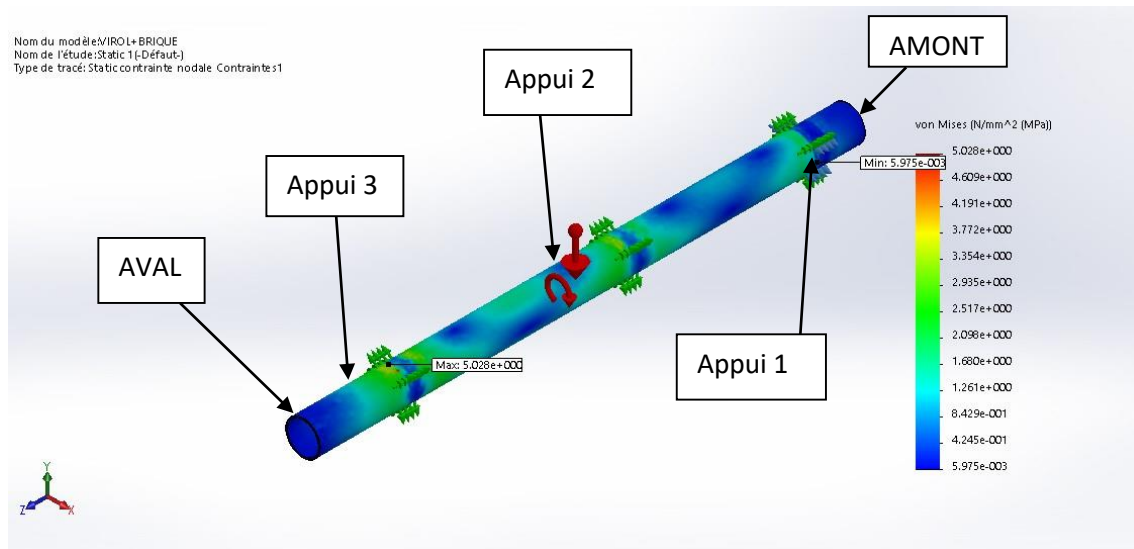


Figure IV.9 : présentation des contraintes équivalentes.

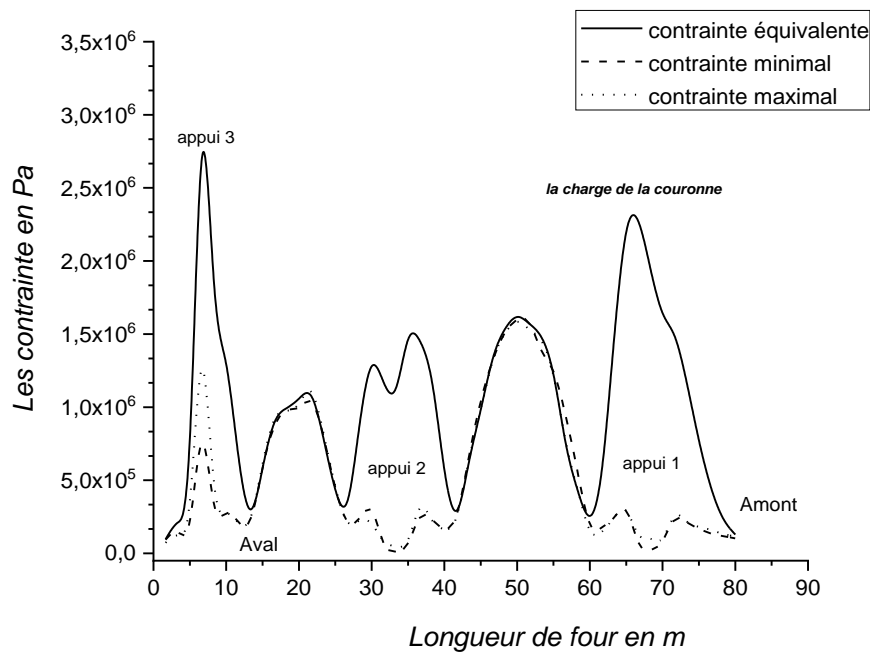


Figure IV.10 : l'évolution des contraintes mécanique applique sur la virole.

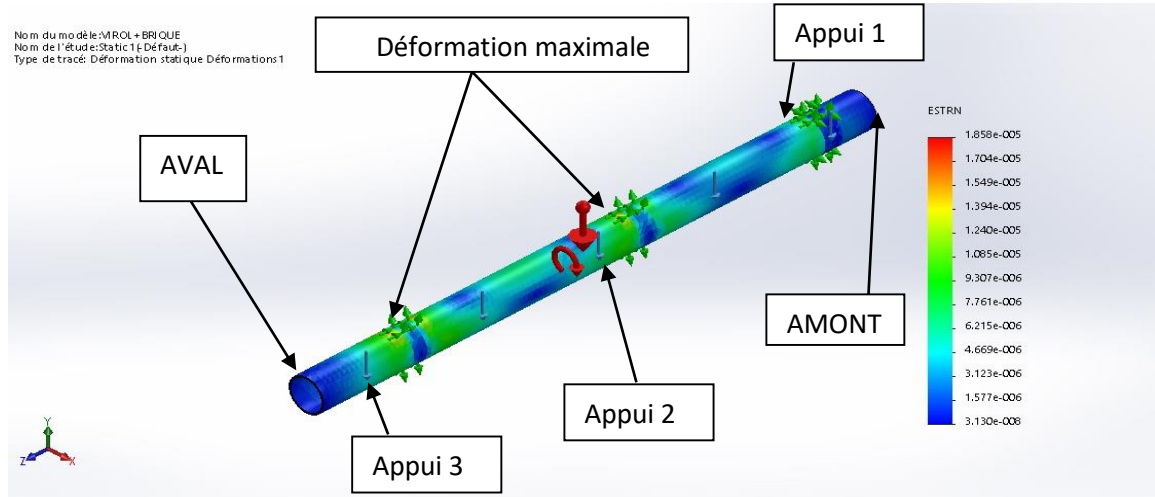
La figure IV.10 montre l'évolution des contraintes en fonction de la longueur du four et des dites conditions de service, c'est-à-dire four à pleine charge. On constate qu'à la distance  $L = 6.5\text{m}$  (appui 3), la pression équivalente atteint sa valeur maximale de  $2270000\text{ Pa}$ . La pression présente une grande variation et monte jusqu'à un niveau maximum de  $1600000\text{ Pa}$ , cette différence est liée à la nouvelle charge du matériau et des manomètres. Au niveau de l'appui 2, à une distance de  $30\text{ m}$ , la concentration de contraintes devient moins importante que sur les autres appuis et le sommet et atteint  $1700000\text{ Pa}$ . Il y a alors une nouvelle valeur localisée au niveau du sommet et de l'appui 1, avec une valeur de  $2250000\text{ Pa}$ .



**IV.3.2 La déformation élastique :**

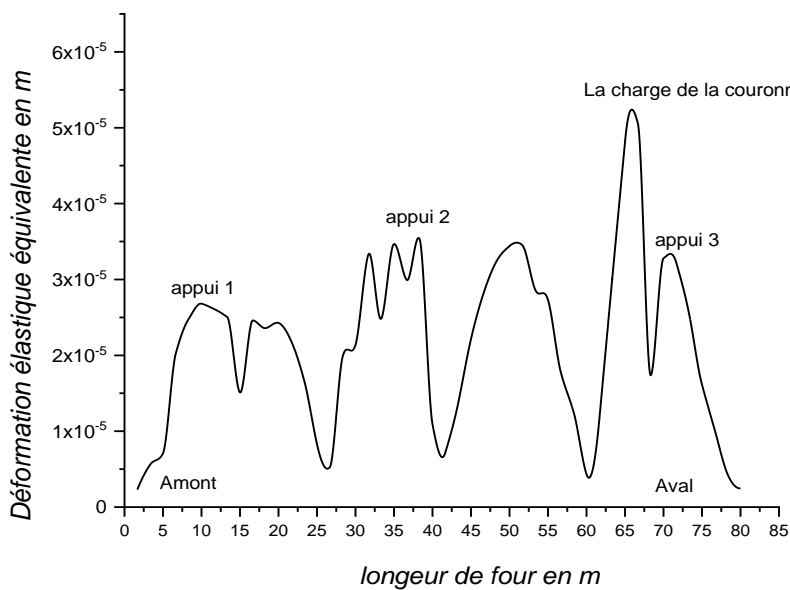
La déformation élastique du projectile illustrée à la Figure IV.11 ne concerne que les déformations causées par le chargement mécanique.

Les déformations partagées de façon logique et acceptable, elles atteignent la valeur maximale  $1.858E-8$  m au niveau des appuis sous l'effet de pression, et la valeur minimale en amont du four est  $3.13E-11$  m



**Figure IV.11 :** présentation des déformations élastique équivalentes.

La Figure IV.12 présente les déformations élastiques totales dans ce cas. Montre que les déformations sont très importantes par rapport le premier cas sur les appuis sous forme de déformation en compression d'une valeur  $0.000055$ m et entre les appuis sont déformée en flexion d'une valeur  $0.000028$  E-3m .Cette augmentation lie par les chargements additifs de croutage et matière, la déformation élastique dans ce cas est une indication de la présence d'une ovalisation de la virole au niveau des stations.



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

### IV.3.3 Le déplacement :

La figure IV.13 montre les déplacements enregistrés en fonction de la condition de chargement. Le champ de déplacement entre l'appui 1 et l'appui 2 augmente dans le cas où la coque est en état de flexion, avec une valeur maximale de  $0,119 \text{ E-5m}$ . Par contre, le déplacement entre l'appui 3 et l'appui 2 diminue pour atteindre  $0.456 \text{ E-6m}$ . Ce qui est logique par rapport à l'échelle industrielle.

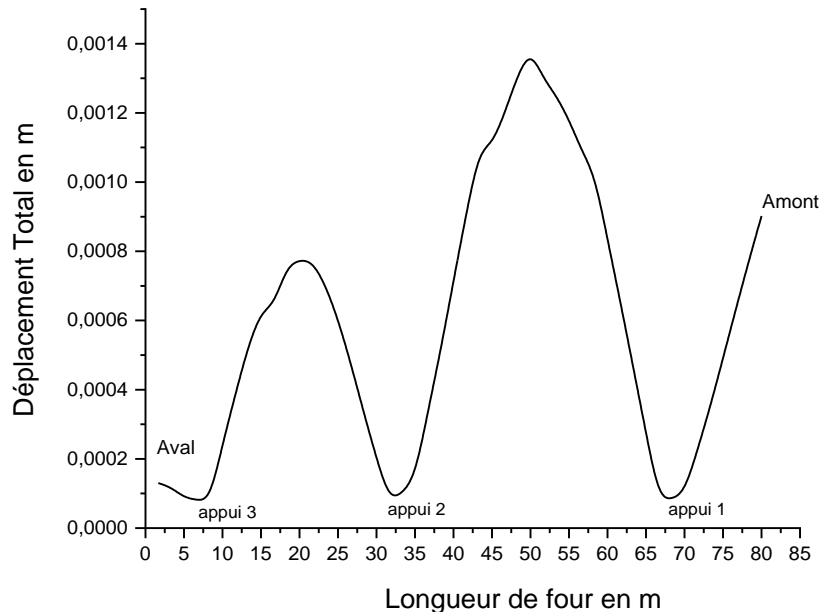


Figure IV.13 : La variation de déplacement total de four.

### IV.4 Troisième cas :

Compte tenu des deux cas de simulation précédente, nous avons ajouté un autre facteur, qui s'avère très important dans un four rotatif, à savoir une variation d'épaisseur du croutage de l'ensemble des viroles et cela en plus des conditions déjà citées et qui sont le poids propre du four, la vitesse de rotation.

#### IV.4.1 La déformation élastique :

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

En remarque que la déformation est très importante, au niveau de l'appui 3 avec une valeur de  $0.275 \text{ E-5m}$ . Donc, on constate simplement un effet très net de la variation d'épaisseur du croutage sur la virole.

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

appropriés pour quantifier ces phénomènes, sont les coefficients de dilatation thermique et le module de Yong.

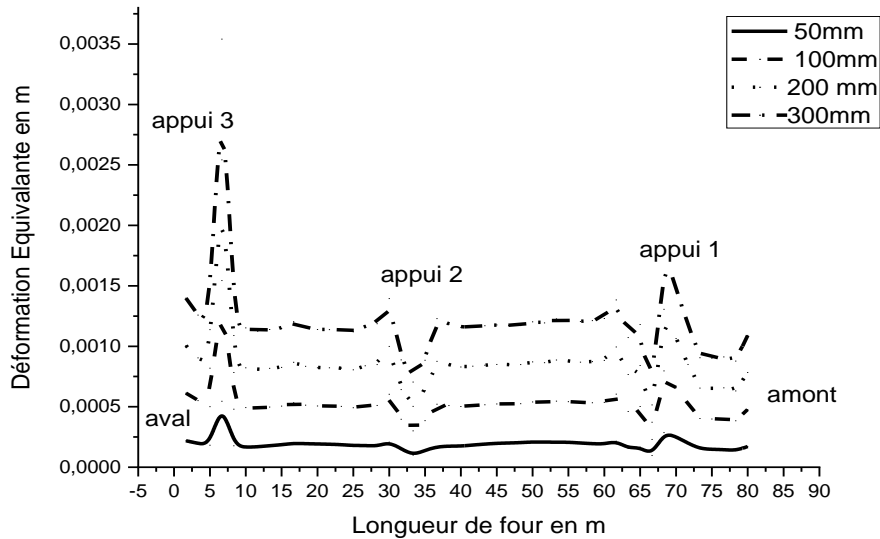


Figure IV.14 : l'évolution de la déformation équivalente

**IV.4.2 Le déplacement :**

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

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

- On remarque que le déplacement entre l'appui 3 et 2 est moins important que les autres zones, à cause des caractéristiques géométriques (distance de 26.3 m et épaisseur de la virole est égale à 33 mm) à chaque fois qu'on augmente l'épaisseur du croutage précédente le déplacement va augmenter.
- La figure IV.15 montre que le champ de déplacement augmente en amont du four à partir de 70 m de la longueur du four où la virole est dans un état de flexion, d'une valeur maximale correspond à l'épaisseur de 300 mm est de 12 mm dans l'amont du four.

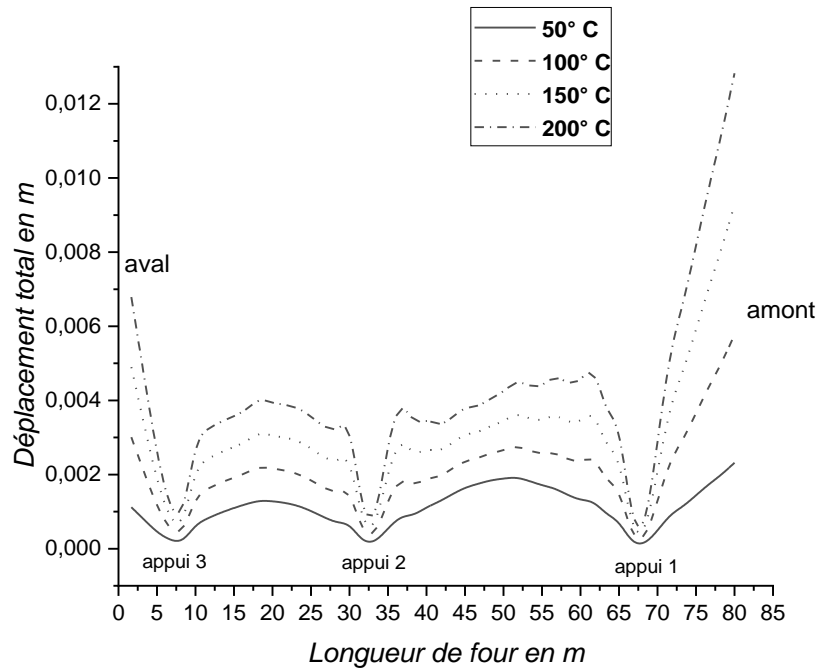


Figure IV.15 : présentation de déplacement en fonction de température.

**IV.5 Quatrième cas :**

Compte tenu des simulations précédente, nous avons assemblé tous les cas dans un seul cas générale proche de réalité, qui s'avère très important dans un four rotatif, à savoir l'effet de la variation de la température de l'ensemble des viroles et cela en plus des conditions déjà cité.

La figure IV.16 montre la variation de la température en fonction de la longueur du four.

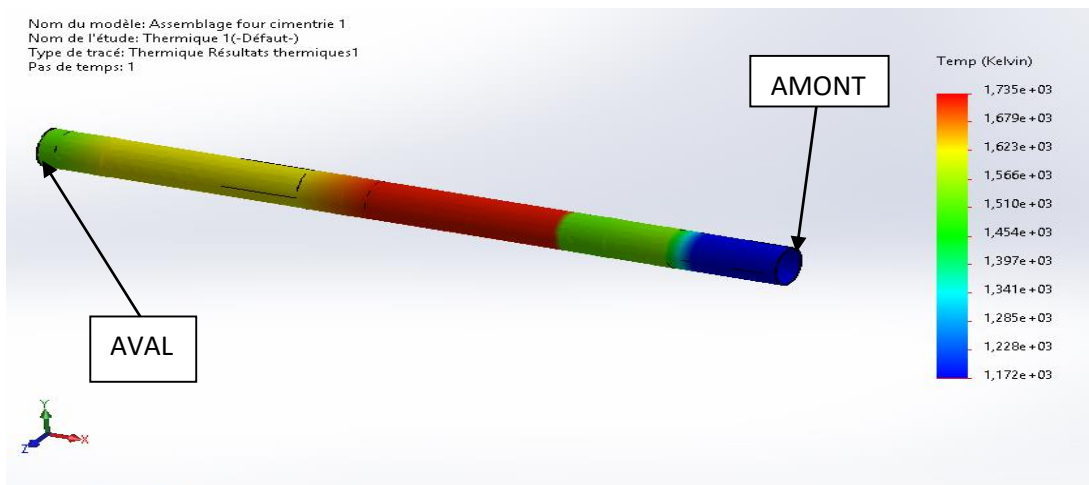
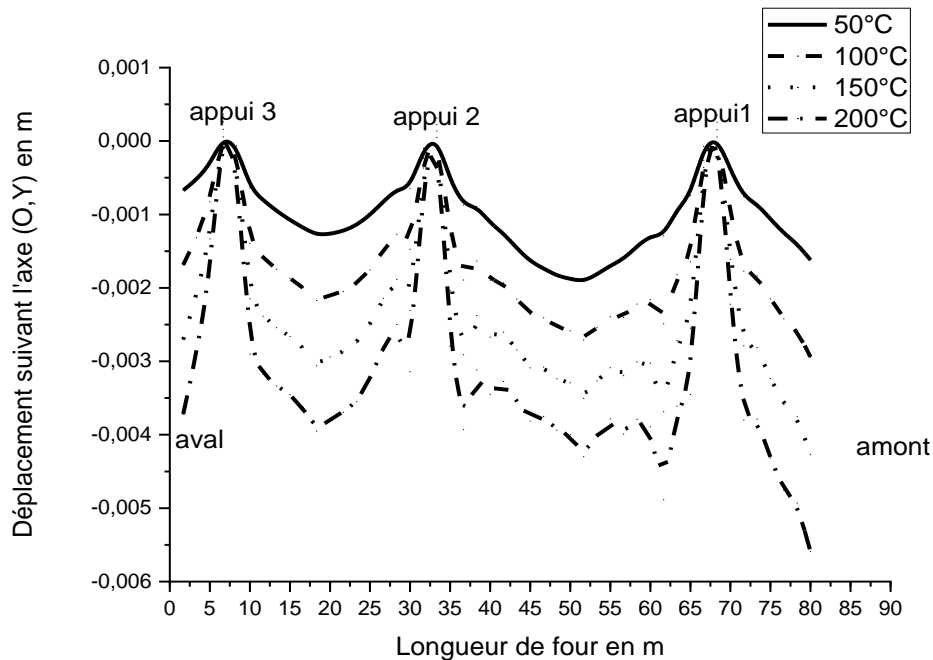


Figure IV.16 : Courbe de la variation de la température en fonction de la longueur du four.

### IV.5.1 Le déplacement

La figure 17 représente l'évolution de la flèche ou le déplacement directionnel suivant l'axe (O, Y). On constate bien l'effet du paramètre température, avec des valeurs bien de la flèche. Les valeurs les plus importantes se situent sur le côté amont du four avec  $-0.0016$  m pour  $T = 50$  °C jusqu'à atteindre  $-0.0056$  m pour  $T = 200$  °C. Entre l'appui 1 et l'appui 2, la flèche prend des valeurs comprises entre  $-0.0018$  m pour  $T = 50$  °C et  $-0.0045$  m pour  $T = 200$  °C. Entre l'appui 2 et l'appui 3, la flèche prend des valeurs comprises entre  $-0.0012$  m pour  $T = 50$  °C et  $-0.004$  m pour  $T = 200$  °C. Enfin, à la partie aval du four, la flèche prend les valeurs les plus minimales pour notre cas d'étude, à savoir  $-0.0007$  pour  $T = 50$  °C et atteint  $-0.0038$  pour  $T = 200$  °C. On constate les valeurs négatives, car l'axe (O, Y) est pris dans l'autre sens qui est perpendiculaire à l'axe de rotation dans la même direction des forces.

La flèche est la source des problèmes à l'échelle industrielle, elle crée un balourd lors de la rotation du four. A l'échelle industrielle, le balourd c'est la source des problèmes qui peut induire des fissures, des ruptures ou des déformations au niveau des viroles ou les éléments de transmission de la puissance couronne et pignon d'attaque.



**Figure IV.17** : présentation de déplacement directionnelle en fonction de température.

#### IV.6 Conclusion

Dans ce papier, nous avons établi une simulation numérique par SOLIDWORK du problème La répartition des contraintes dans la virole. Le présent travail, a pour objet de modéliser le comportement mécanique de la virole d'un four de cimenterie L'analyse de l'évolution des contraintes en fonction de la charge sur le four permet de localiser les zones de concentration de contraintes et par la suite proposer des solutions pour réduire ces contraintes pour différentes conceptions et conditions de services.

La répartition des contraintes dans l'ensemble des viroles présente un danger de flexions au niveau des appuis. Néanmoins la contrainte maximale de traction reste très inférieure à la limite élastique. Les zones les plus sollicitées sont localisées au niveau des viroles se situant au contact avec les bandages.

Selon la validation, les résultats obtenus sont en bonne concordance. La charge mécanique est la plus dominante. Combinée avec les conditions thermiques, les contraintes deviennent plus importantes et le risque d'endommagement de notre virole et le brique devient aussi très résistant à haut température.

# CONCLUSION GÉNÉRALE



### **Conclusion générale :**

Les effets des contraintes mécaniques et thermiques et de la vitesse de rotation dans le four rotatif à ciment sont très importants du fait de leur influence sur toutes les enveloppes de ce dernier, d'où la nécessité d'un programme de maintenance en fonction des priorités afin de réduire les différentes contraintes au niveau du four.

Cette intégrité structurelle est désormais devenue une préoccupation majeure pour les entreprises impliquées dans l'industrie du ciment afin d'assurer une productivité, une durabilité structurelle, une sécurité humaine et une protection de l'environnement plus élevées.

Dans ce mémoire de fin d'études nous avons mis en place une figure du problème d'interaction structure modélisé avec le logiciel Solidworks. L'objectif de ce mémoire est d'étudier le comportement mécanique d'une virole d'un four rotatif de la cimenterie.

Notre simulation est basée sur quatre cas différents, le premier cas où nous simulons un four sous son propre poids entraîné par une vitesse de rotation de 4 tr/m. Le deuxième cas ajoute aux conditions du premier cas, les différentes charges (enveloppe et matériau), le troisième cas ajoute l'effet thermique au deuxième cas, et le quatrième cas applique des charges thermiques différentes au carter du four. Enfin on peut dire que cette étude a été très fructueuse car elle nous a permis de réaliser des simulations numériques permettant de déterminer et d'optimiser les dimensions des éléments structuraux du four, évitant ainsi des dommages permanents à la virole sous charges thermiques.

Afin d'éviter les contraintes élastiques et les déformations, il faut veiller pendant le fonctionnement à ne pas dépasser les épaisseurs minimales admissibles responsables de la déformation plastique de notre boîtier ou des dommages corrects. D'après les résultats obtenus, nous n'observons que la variation des paramètres géométriques de brick affecte la variation des contraintes élastiques et des déformations.

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 mécanique et thermique.

Compte tenu du peu de travail publié, il est difficile de dire exactement dans quel ordre se trouvent les bogues réels. Il serait intéressant de pouvoir faire d'autres expériences numériques dans un futur projet pour déterminer plus précisément cette erreur. Pour les recommandations futures, il est prévu de réaliser une analyse non linéaire pour suivre l'évolution des contraintes et déformations toujours au niveau de l'ensemble des coques sous l'influence de la variation de la vitesse de rotation, et il est en outre proposé de réaliser une analyse de simulation plus réaliste de la formation de la croûte, ainsi que la prise en compte de la convection interne et externe en cas de champ thermique.



## Références bibliographiques

---

- [1] I. Jacoboweiz, « Fours industriel », BE8842 Editions techniques de l'ingénieur.
- [2] B. Gilbert, Alain Regnault « Fours de cimenterie, FOUR ROTATIF », BE 8845 Editions techniques de l'ingénieur.
- [3] 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.
- [4] F.L.Smidth; Mechanical kiln inspection; « [https://wAww.lafarge.dz/2\\_2\\_1-fabrication-du-ciment](https://wAww.lafarge.dz/2_2_1-fabrication-du-ciment) ».
- [5] Centre d'activités régionales pour la production propre (CAR/PP) Plan d'action pour la Méditerranée ; « Manuel de prévention de la pollution dans le secteur du Ciment » ; Étude publiée en mai 2008.
- [6] Ricardo Araujo Mosci; « Refractories in cement manufacturing »; 17-Feb-2015.
- [7] Phillips kiln services blog; « calculating cold gap using temperature differences »; Wednesday, January 12.2012.
- [8] Fathi Habashi; « history of the rotary kiln »; Laval University, Quebec City, Canada 2010.
- [9] Indra D. Winarko; « Ring and snow Ball formation in the kiln »; Dec03, 2016.
- [10] Ai-chun Ma, Jie-min Zhou, Jian-ping Ou & Wang-xing Li; « CFD prediction of Physical field for multi-air channel pulverized coal burner in rotary kiln »; Journal of Central South University of Technology 13, pages75–79(2006).
- [11] Hasan Basri, Irsyadi yani; « Fatigue Analysis of Rotary Cement kiln welded Using finite element method »; 01 august 2016.
- [12] Dr. Abdulkadhum J K Al-Yasiri Montadher A. Muhammed; « Estimating the Thickness of coating in the burning zone of cement kilns including the aging factor »; Iraqi journal of mechanical and material engineering 2012, Volume 12, Issue 3.
- [13] Eero Immonen, Process Flow Ltd Oy; « Advanced Multiphase Simulation of Rotary Kilns: Coupling of ANSYS Fluent and a Third Party Solver ».
- [14] 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).
- [15] Notes de calcul « Mécanique des équipements lourds ».
- [16] Engineering Measurements Enterprise LTD, Technical Report Results Of Deviation Measurements And Geometry Of Rotary Kiln, 2012.
- [17] I. Janati, L. Bousshine, « Contribution à l'Étude du Comportement Thermo- Elastique de la virole des Fours Rotatifs des Cimenteries », 23ème Congrès Français de Mécanique Lille, 28 Août au 1er Septembre 2017.
- [18] S. Tscheng et al, 1979, « Convective heat transfer in a rotary kiln », Canadian Journal of Chemical Engineering, 57 4 433-443.
- [19] 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).
- [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] G. Palmer et al, « Heat transfert in rotary kilns », Technologies Pty Ltd, Brisbane, Australia 1998.

## Références bibliographiques

---

[22] Pierre Saramito, «Méthodes numériques avancées pour la résolution des équations Aux dérivées partielles».

[23] Loan et al «Modélisation numérique du transfert thermique – méthode des Volumes finis», Universitaria Craiova, pp. 36-43 (2002).