



MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du
Diplôme de Master Sciences et Techniques
Spécialité : Ingénierie Mécanique

« Mise en place de la maintenance conditionnelle et améliorative du four rotatif de HOLCIM Ras El Ma »

Réalisé par :

Mlle HADDAOUI SABAH

Encadré par :

- **Mr. ABOUCHITA JALIL, Professeur département Génie Mécanique, FST Fès**
- **Mr. BENCHAKROUN MOHAMMED, Responsable maintenance mécanique, HOLCIM Fès**

Effectué à : **HOLCIM RAS EL MA**

Soutenu le : **25 /06/2015**

Le jury :

- **Mr A. El BIYAALI, FST Fès**
- **Mr M. El MAJDOUBI , FST Fès**

Année Universitaire : 2014-2015

Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma mère :

Vous êtes la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur. Maman que j'adore le plus dans ce monde.

A mon père :

Vous avez tant sacrifié pour mon bonheur, mon bien-être et ma réussite sans rien attendre en retour, je vous dédie cet humble travail en témoignage de mon affection et ma reconnaissance pour les efforts que vous avez déployés pour moi durant toutes ces années.

A mon très cher oncle et sa femme :

Vous êtes mes deuxièmes parents, vous avez toujours été présents pour les bons conseils. Vos affections et vos soutiens m'ont été d'un grand secours au long de ma vie. Veuillez trouver dans ce modeste travail ma reconnaissance pour tous vos efforts. Je vous aime très fort.

A mon fiancé :

Dédicace à celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet. Mon futur mari : Abdelwahad.

A mes beaux-parents et mes beaux-frères :

Ma belle-famille, que Dieu vous protège et vous offre santé et longue vie.

A mes deux très chères sœurs :

Mes chères petites sœurs Hanane et Hiba, vous êtes mes deux yeux. Merci d'avoir été toujours là pour moi, votre joie de vivre et votre humour remplissent mon quotidien de bonheur et de joie. Votre présence dans ma vie m'aide à surmonter les moments difficiles et me redonne le sourire.

A mes grands-mères, mes très chers oncles et tantes, à toute ma famille :

Que Dieu vous bénisse.

A mes très cher(e)s cousin(e)s et ami(e)s :

A tous ceux qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études supérieures, qui étaient toujours à mes côtés. Dédicace spéciale à ma très chère cousine Salma et meilleure amie Chaimae, merci d'avoir été toujours là pour moi.

Remerciement

S'il est vrai qu'un rapport de stage est le fruit d'un travail personnel, beaucoup de personnes ont cependant contribué à son élaboration.

Je tiens tout d'abord à remercier vivement mon encadrant de la FST, Mr Abouchita Jalil, d'avoir mis à ma disposition ses connaissances, ses expériences, et ses précieux conseils.

Encore une fois merci pour vos conseils attentionnés, vos réponses précises et pour avoir su me transmettre les bons conseils et les bonnes recommandations au moment où il le fallait pour pouvoir atteindre les objectifs souhaités.

Je tiens à exprimer mes gratitudes les plus profondes à mon encadrant de l'entreprise Mr. Mohammed Benchekrout, responsable de la maintenance qui n'a pas cessé de m'orienter et m'aider dans mon travail durant toute la période de stage.

Par la même occasion, mes remerciements vont aussi à Mr Menkal, Mr. Azri et Mr Neurdine Bourazzak pour la disponibilité dont ils ont fait preuve durant le déroulement du projet.

Ma gratitude s'adresse aussi à l'ensemble du personnel de Holcim, cadres, employés et ouvriers qui nous ont comblés de leurs bienveillances et amabilité, aussi à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Résumé

Notre stage PFE s'articule autour de la maintenance conditionnelle et améliorative du four rotatif de cimenterie, lequel présente une étape essentielle pour la production du ciment.

Nous avons été amenés pendant le stage à connaître et comprendre la technologie des fours rotatifs, à analyser les défaillances existantes et probables, puis à agir afin de minimiser leur criticité.

Nous avons diminué la criticité des pannes à travers deux types d'actions :

Des actions amélioratrices : Nous avons étudié la conception des organes défaillants, puis nous avons agi sur les causes des pannes en proposant des changements de conception.

Des actions de maintenance conditionnelle : Nous avons installé de nouveaux outils de suivi de défaillances, lesquels permettent la mesure des paramètres significatifs et anticiper les pannes.

Abstract

Our internship is about the conditional and ameliorative maintenance of the rotary kiln, which is essential for the production of cement.

We were being informing during the internship to explore and understand rotary kiln technology, to analyze existing and probable failures and finally to take action to minimize their criticality.

We have minimised the criticality of failures by taking two actions:

- Ameliorative actions: we studied the design of failing organs, then we acted on the causes of failures by proposing changes in the design.
- Conditional actions: we installed failure monitoring tools, which allow measuring significant parameters to anticipate failures.

ملخص

يرتكز مشروع ختام دراستنا الهندسية على الصيانة المشروطة والتطويرية للفرن الدوار للإسمنت، و الذي يمثل دورا أساسيا في إنتاج الإسمنت.

لقد مكّنا المشروع من التعرف و استيعاب تكنولوجيا الفرن الدوار ، كما مكّنا من تحليل الأعطاب الموجودة و المحتملة ، لنقوم بعد ذلك بتقليص حدتها.

لقد تمكنا من تقليص حدة الأعطاب من خلال نوعين من الإجراءات و اللتي تتمثل في:

إجراءات تحسينية: قمنا بدراسة تصميم عناصر الفرن الحرجة، ثم درسنا اسباب العطل و قمنا باقتراح تغييرات على التصميم. -مستوى

إجراءات الصيانة المشروطة : لقد قمنا بتهيئة ادوات رصد الأعطاب ، و اللتي مكّنتنا من تتبع المعايير المنذرة .
-بالعطب

Liste des figures

Figure 1: Rupture de l'arbre de galet	3
Figure 2: Organigramme de HOLCIM Fès Ras El Ma.....	8
Figure 3: Schéma d'obtention du ciment	10
Figure 4 : Préparation du cru.....	11
Figure 5 : Alimentation broyeur cru	12
Figure 6 : Tour de préchauffage	13
Figure 7 : Les phases de cuisson.....	14
Figure 8 : Refroidisseur.....	15
Figure 9 : Broyage ciment.....	16
Figure 10 : Stockage et expédition	18
Figure 11 : Support visuel.....	19
Figure 12 : Coffre de sécurité	19
Figure 13 : Sensibilisation à la sécurité.....	20
Figure 14 : Règles de sécurité.....	21
Figure 15 : Four à 3 appuis [6]	23
Figure 16: Types de bandages	27
Figure 17 : Bandage flottant.....	28
Figure 18 : Propriétés du matériau de la virole [2]	29
Figure 19 : Evolution de la température entre bandage et les briques	30
Figure 20 : Butée hydraulique	31
Figure 21 : Les composantes de la butée hydraulique.....	32
Figure 22 : Joint amont.....	32
Figure 23 : Joint aval.....	33
Figure 24 : Plaque nose-ring.....	33
Figure 25: Diagramme ABC des criticités	41
Figure 26 : Plan de butée hydraulique	46
Figure 27 : Modélisation des appuis de butée	48
Figure 28: Modélisation de l'arbre de butée.....	48
Figure 29 : Rupture d'arbre du galet	59
Figure 30 : Modélisation de l'arbre du galet	60
Figure 31 : Détermination de Kt pour un arbre avec épaulement [3].....	63
Figure 32 : Virole du four en vilebrequin	69
Figure 33 : variation du chargement sur les galets	70
Figure 34 : Installation du système MKM.....	72
Figure 35 : Dimensions du nouvel arbre du galet	74
Figure 36 : Conditions aux limites de l'arbre du galet.....	74
Figure 37 : Contraintes équivalentes du nouvel arbre du galet.....	75

Figure 38 : Causes de l'ovalisation des viroles	76
Figure 39 : Conséquences de l'ovalisation des viroles	77
Figure 40 : Conséquences d'une grande ovalisation	77
Figure 41 : Capteur de l'ovalisation	79
Figure 42 : Les composants du système de suivi d'ovalisation	80
Figure 43 : Prise de mesures d'ovalisation	81
Figure 44 : Calibrage horizontal.....	81
Figure 45 : Calibrage vertical	81
Figure 46 : Choix du type de mesure.....	82
Figure 47 : Les informations de la mesure et du four	82
Figure 48 : Emplacement de l'outil.....	83
Figure 49 : Collecte des résultats	83
Figure 50 : Valeurs admises d'ovalisation	84
Figure 51 : Résultats des mesures.....	84
Figure 52 : Limite d'ovalité de notre four.....	85
Figure 53 : Mesures de la station 3 avant bandage	85
Figure 54 : Mesure de la station 3 après bandage	86
Figure 55 : Mesure de la station 2 avant bandage2	87
Figure 56 : Mesure de la station 2 après bandage 2	87
Figure 57 : Illustration du frettage de virole	88
Figure 58 : Mesure de la station 1 avant bandage 1	89
Figure 59 : Mesures de la station 1 Downhill	89
Figure 60 : Mesure de la station 1 après bandage 1	89
Figure 61 : Joint amont/aval.....	91
Figure 62 : Schéma du joint amont/aval	91
Figure 63 : Critère de résistance et température.....	92
Figure 64 : Critère de ténacité et résistance	93
Figure 65 : Diagramme de la constante d'usure Ka en fonction de la dureté H	94
Figure 66 : L'outil laser	96
Figure 67 : Positionnement de l'outil laser.....	96
Figure 68 : Connexion du capteur	97
Figure 69 : Choix de la mesure	97
Figure 70 : Informations de la mesure et de la section de mesure.....	98
Figure 71 : Emplacement optimal du capteur	98
Figure 72 : Collecte des mesures.....	99
Figure 73 : Les paramètres de mesure	99
Figure 74 : Affichage des mesures.....	100
Figure 75 : Pique de déformation.....	101
Figure 76 : Représentation 3D des déformations du four.....	101
Figure 77 : Pourcentage d'avancement de déformation maximale selon l'axe du four	102
Figure 78 : Conception actuelle des plaques nose-ring.....	104
Figure 79 : Dessin de coupe de la nouvelle conception nose-ring	105

Liste des tableaux :

Tableau 1: Historique générale de HOLCIM-MAROC	7
Tableau 2: Services de HOLCIM-Ras El Ma	9
Tableau 3 : Cahier de charges fonctionnelles.....	25
Tableau 4 : Tableau d'AMDEC	40
Tableau 5: Criticités cumulées.....	41
Tableau 6 : Valeurs admises de l'ovalisation des viroles [6].....	78
Tableau 7 : Composition chimique de l'acier BÖH LER W302	93
Tableau 8 : Composition chimique de l'acier BÖH LER W403	93
Tableau 9 : Comparaison des deux aciers choisis	94
Tableau 10 : Les déformations mesurées et les piques calculés.....	102
Tableau 11 : Résultat de l'analyse AMDEC.....	111

Tables des matières

Dédicace.....	2
Remerciement.....	3
Résumé.....	4
Abstract	5
ملخص.....	6
Liste des figures.....	7
Liste des tableaux :	9
Tables des matières	10
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Contexte du PFE et présentation de l'entreprise.....	2
1.2. Présentation	5
1.2.1. Introduction de la société HOLCIM.....	5
1.2.2. Historique	5
1.2.3. Organigramme de HOLCIM Fès.....	7
1.2.4. Les différents services de HOLCIM Ras El Ma.....	9
1.2.5. Procédé de fabrication de ciment	9
1.3. Politique de sécurité	18
Chapitre 2 : Four rotatif de cimenterie	22
2.1.1. Généralités.....	23
2.2.1. Bête à cornes:	24
2.2.2. Diagramme des Pieuvre :.....	24
2.2.3. Cahier des charges fonctionnelles :	25
2.2.4. Diagramme des solutions technologiques :	26
2.3.1. Le bandage :	27
2.3.2. La virole :	28
2.3.3. Les briques réfractaires :	29
2.3.4. Les galets :	30
2.3.5. La butée hydraulique :	31
2.3.6. Les joints du four :	32
2.3.7. Les plaques nose-ring :	33
Chapitre 3 : Etude AMDEC du four rotatif	34
3.2.1. L'échelle de cotation	35

3.2.2. Tableau d'AMDEC	35
3.2.3. Calcul de criticité.....	40
Chapitre 4 : Calcul et vérification des éléments de la butée hydraulique.....	43
Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques	58
5.1.1. Etude de résistance de l'arbre du galet	59
5.1.3. Le contrôle de flexion d'arbre du galet :	67
5.2.1. Introduction	76
5.2.2. Causes de l'ovalisation	76
5.2.3. Conséquences de l'ovalisation des viroles	77
5.2.4. Contrôle et procédure	78
5.2.4. Analyse de mesures de l'ovalisation	84
5.2.5. Conclusion :	90
5.3.1. Introduction	91
5.3.2. Choix de matériau Joint amont :	92
5.3.3. Choix de l'acier :	93
5.3.4. Choix de matériau pour joint aval :	95
5.4.1. Introduction :	95
5.4.2. Le mode opératoire.....	96
5.4.3. Analyse des mesures.....	100
5.4.4. Conclusion.....	103
5.5. Les plaques nose-ring.....	104
5.6. Conclusion.....	105
Chapitre 6 : Etude technico-économique	112
Conclusion générale	116
Bibliographie	117
Liste des annexes :	118
3.1.1 Introduction	123
3.1.2. Analyse AMDEC [7].....	125

Introduction générale

Le four rotatif de cimenteries présente une grande importance dans le domaine de cimenterie, or, les défaillances freinent sa marche normale et entraîne des pertes de production. Pour remédier à ces problèmes, nous avons entamé ce projet qui vise l'amélioration de l'existant et la mise en place d'une maintenance conditionnelle pour enfin améliorer la détectabilité des pannes critiques, tout en agissant sur la conception de plusieurs éléments critiques.

Notre est rapport est articulé autour de 5 chapitres :

Le premier chapitre présente le contexte de l'étude et la présentation de l'entreprise, il décrit les points suivants :

Une présentation du contexte de notre projet PFE.

- Une présentation de HOLCIM Maroc à savoir HOCIM Ras El Ma.
- Une description détaillée du procédé de fabrication du ciment.
- Une sensibilisation aux règles de sécurité à HOLCIM.

Le deuxième chapitre présente le four rotatif de cimenterie sujet de notre étude, où on a établi :

- Une analyse fonctionnelle du four.
- Une description des différents composants du four rotatif.

Le troisième chapitre présente une étude AMDEC des différents éléments du four où on a présenté :

- Une étude des modes de défaillances critiques.
- Une étude Pareto afin de conclure un seuil de criticité

Le quatrième chapitre présente une analyse détaillée du problème de la butée hydraulique jugée comme le plus critique, on a élaboré :

- Un calcul de vérification des éléments constituant la butée hydraulique.
- Une modélisation de l'arbre de butée sur CATIA V5 afin de calculer les efforts et réactions aux supports pour en déduire les contraintes sur les vis de fixation.
- Redimensionnement des vis.

Le cinquième chapitre présente une étude de tous les modes de défaillances liés aux organes du four, où on a présenté :

- Une proposition des solutions correctives pour chaque défaillance critique.
- Une description des modes opératoires des outils de la maintenance conditionnelle mise en place.

Le sixième chapitre présente une étude technique et économique qui nous a permis de chiffrer les gains des solutions apportées, ainsi que leur temps de retour sur investissement.

Chapitre 1

Chapitre 1 : Contexte du PFE et présentation de l'entreprise

Dans ce chapitre nous allons définir le contexte de notre projet PFE, donner un aperçu sur l'organisme HOLCIM MAROC, à savoir HOLCIM Ras El Ma de Fès, son organigramme, les services qui le constituent et par la suite le procédé détaillé de fabrication, allant de l'exploitation de la matière première jusqu'à l'étape d'expédition.

Enfin, nous allons définir le système de sensibilisation de sécurité à HOLCIM

1-1- Contexte du sujet PFE

HOLCIM Fès possède son four rotatif depuis 22 ans, celui-ci est indispensable à la production du ciment, de ce fait, aucun arrêt non programmé du four n'est permis, puisque ceci se répercute directement sur la productivité de la société.

L'arrêt du four n'implique généralement pas de frais supplémentaire du personnel, cependant, le démarrage à froid nécessite un coût supplémentaire de carburant.

Le four a subi un changement de conception en 2012 afin d'augmenter, voire de doubler la production en augmentant sa vitesse de rotation de 2,6 tr/mn à 5,2 tr/min, La productivité a donc nettement augmenté

L'événement majeur derrière la nouvelle politique de HOLCIM est la rupture d'un arbre de galet, qui constitue l'un des trois paliers du four. La casse était totalement imprévue, elle a donc entraîné des coûts élevés de maintenance et d'un arrêt de production non planifié.

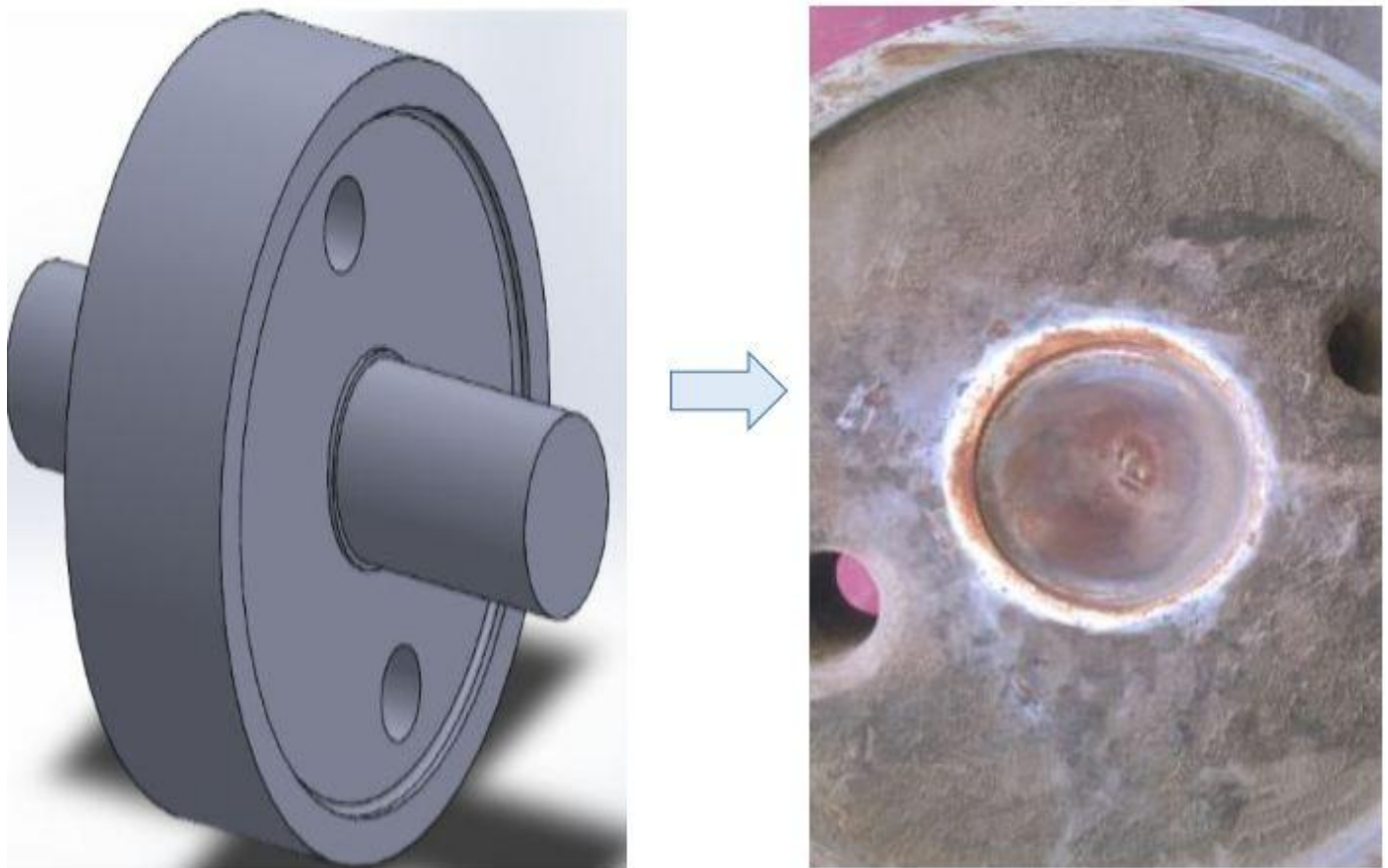


Figure 1: Rupture de l'arbre de galet

HOLCIM Fès a opté pour une nouvelle politique de maintenance, afin de prévenir les pannes dont la gravité potentielle est élevée, et de minimiser les arrêts non planifiés.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre sujet de PFE : Mise en place de politique de maintenance conditionnelle, dont les objectifs sont :

- Analyse de l'historique des pannes et déduction des pannes critiques
- Recherche des causes et conséquences sur les organes du four
- Mise en place d'un système de contrôle et de suivi des paramètres significatifs
- Analyse des paramètres et proposition de solutions
- Amélioration de conception des éléments critiques.

1.2. Présentation

1.2.1. Introduction de la société HOLCIM

HOLCIM (Maroc), HOL : rappelle les origines du groupe (le village HOLDERBANK) et CIM : symbolise l'activité du ciment, a été créé en 1976 par l'office du développement industriel (ODI) avec le concours de la banque Islamique sous le nom de CIOR (les Ciments de l'Oriental). Sa première cimenterie a été construite à Oujda et elle a démarré en 1979 avec une capacité de production de 1.2 millions de tonnes par ans.

En 1993, HOLCIM (Maroc) a mis en service sa deuxième cimenterie à Ras El Ma dans la région de Fès, lieu de mon stage, avec une capacité de production de 600000 T/ans pour répondre aux besoins croissants du marché national. En outre, deux centres de broyage et de distribution ont été ouverts à Fès et à Casablanca dont la capacité totale est de 800000 T/ans.

Le 15 Avril 2002 CIOR devient HOLCIM (Maroc), ce changement affirme son apparence au groupe International HOLCIM, Groupe suisse leader dans le domaine de fabrication du ciment, du béton et du granulat. La nouvelle vision adoptée par la société permet de tenir ses engagements vis-à-vis de ses clients, de développer le système de formation de ses collaborations et de prendre en considération les problèmes liés à l'environnement.

1.2.2. Historique

Les événements clés ayant marqué l'histoire de HOLCIM (Maroc) depuis sa création sont les suivants [2]:

1976	▪ Création par l'Office de Développement Industriel (ODI) de la société CIOR, pour objet la réalisation d'une cimenterie dans la région d'Oujda.
1978	▪ Mise en service de l'usine d'Oujda qui démarre avec une capacité de production de 1,2 millions de tonnes par an.
1979	▪ Installation à Fès Doukkarat d'un centre d'ensachage de distribution d'une capacité de 500000 tonnes par an, transformé en centre de broyage en clinker en 1989
1982	▪ Mise en service du centre d'ensachage et de distribution de Casablanca d'une capacité de 350000 tonnes.
1985	▪ Création de la société Ciments Blancs du Maroc à Casablanca.
1986	▪ Création de la filiale Andira, dont l'activité consiste en la location du siège de Holcim(Maroc).
1990	▪ Installation d'un centre de broyage à Fès Ras El Ma d'une capacité de 350000 tonnes par an. ▪ Création de la société Holcim Béton, afin de porter le développement de l'activité BPE de Holcim(Maroc).
1992	▪ Changement de dénomination de la société CIOR qui devient Ciments de l'oriental.

1993	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Privatisation par voie de cession de 51% du capital social de la société Ciments de l'oriental au groupe suisse Holcim Ltd. Et introduction en bourse. ▪ Mise en service d'une ligne complète de production de clinker à Fès Ras El-Ma.
1997	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Installation d'une centrale à béton à Rabat et à Casablanca.
1999	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Construction d'une seconde centrale à béton à Casablanca et mise en service d'une centrale de broyage et d'ensachage.
2000	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mise en service des installations de valorisation de combustibles des substitutions à l'usine des Fès Ras El-Ma, d'une troisième centrale à béton à Casablanca et d'une autre à Nador .
2001	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Certification ISO 9001 et ISO 14001 de la cimenterie de Fès.
2002	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Changement de l'identité visuelle : la société Ciment de l'orientale devient Holcim(Maroc). ▪ Absorption par Holcim(Maroc) des sociétés Atlacim et de la société Holcim (méditerranée). ▪ Création de la filiale granulats (Holcim Granulats) et démarrage l'unité de production à ben Slimane. ▪ Certification ISO 9001 et ISO 14001 de la cimenterie d'Oujda.
2004	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Extension de la capacité de broyage et stockage du ciment à Fès Ras-El Ma. ▪ Acquisition de 51% du capitale de la société Asment Ouled Ziane qui devient Holcim AOZ, la société chargée d'exploitation la cimenterie de Settat. Holcim(Maroc) entend à travers cette opération disposer d'une capacité de production compétitive afin de consolider sa position sur le marché du centre-ouest du Maroc. ▪ Fermeture du centre de broyage de Doukkarat en raison du surcout qu'il générerait du fait de son éloignement de la cimenterie de Fès Ras El Ma.
2005	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mise en service du centre d'ensachage et de distribution de Settat, comme première étape du processus de réalisation graduelle d'une cimenterie.
2006	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Extension du centre de broyage de Nador (500 000 tonnes de Clinker). ▪ Création de la filiale Ecoval, spécialisée dans le traitement des déchets industriels. ▪ Mise en service du broyage de Settat.
2007	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entrée en production de l'usine de Settat avec une capacité de production 1,7 millions de tonnes de ciments. ▪ Création de la société « Promotion H.A.S », spécialisée dans les opérations immobilières afin de promouvoir la construction durable avec des matériaux innovants, dans le cadre d'un partenariat avec des opérateurs spécialisés.

2008	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lancement du projet de doublement de l'usine de Fès pour une capacité totale de 1.2 Mt à horizon 2012. ▪ Lancement d'une émission obligatoire de 1,5 milliards de dirhams. ▪ Certification ISO9001 et ISO 14001 du centre de Nador.
2009	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Démarrage de la carrière de Shkirat qui permet de stimuler le volume des ventes de granulats (1160KT en 2009 vs.653 KT en 2008). ▪ Création du premier réseau de distribution des matériaux de construction au Maroc : Batipro Distribution avec un réseau de plus de 100 franchisés travers le Maroc. ▪ Mise en service d'une station de traitement de déchets liquides dans l'unité de traitement de déchets industriels Ecoval. ▪ Signature d'une convention avec le Groupe AL OMRANE pour la réalisation d'une opération de 1000 logement à BOUZNIKA et BENSLIMANE dont 400 logements à 140 000 MAD.
2010	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Certification ISO 9001 et ISO 14001 du centre de distribution de Casablanca, de la cimenterie de Settat et de la plateforme de traitement de déchets d'Ecoval à TL GARA. ▪ Recrutement de 70 nouveaux franchisés par Bartipro dont le réseau atteint 170 points de vente à fin 2010
2011	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Implémentation d'une nouvelle organisation commerciale.
2012	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mise en service de la nouvelle capacité de production de l'usine de Fès. ▪ Le réseau de Batipro atteint les 215 franchisés à fin 2012.
2013	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mise en arrêt d'une des deux lignes de cuisson de l'usine d'Oujda en mai 2013 en raison d'un ralentissement de la demande au niveau national.

Tableau 1: Historique générale de HOLCIM-MAROC

1.2.3. Organigramme de HOLCIM Fès

L'organisation opérationnelle de HOLCIM (Maroc) repose sur un comité de direction, présidé par Monsieur Dominique Drouet, dont le rôle est de coordonner l'action de l'ensemble des directions de la Société. Dans un souci d'efficacité fonctionnelle l'ensemble des processus et des tâches à accomplir sont répartis en catégories associées chacune à un service.

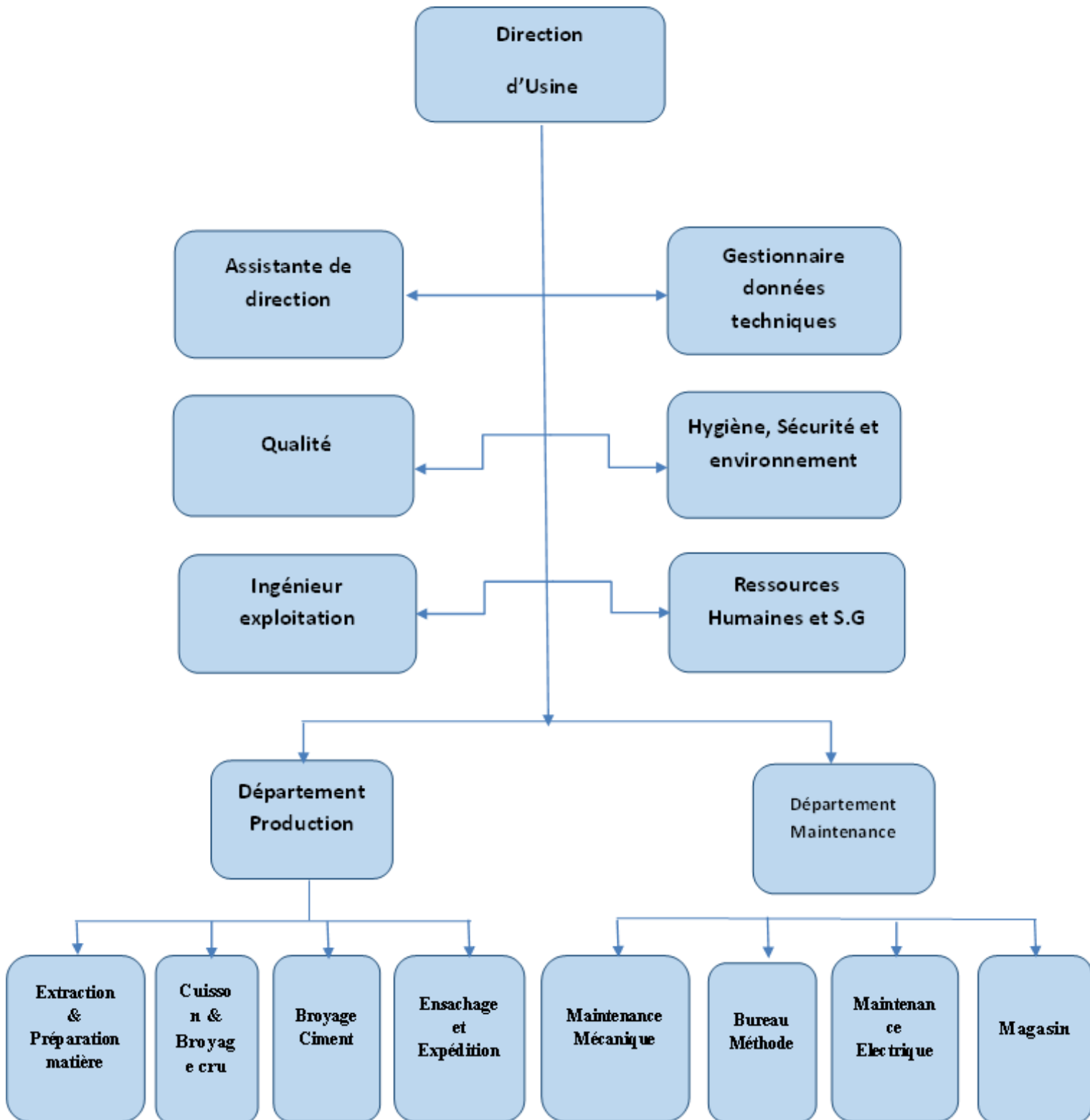


Figure 2: Organigramme de HOLCIM Fès Ras El Ma

1.2.4. Les différents services de HOLCIM Ras El Ma

<u>Service</u>	<u>Activité</u>
Service contrôle & Qualité	Organisation assurée par un laboratoire de qualité pour améliorer les produits et réduire les risques de mise en marché de produits défectueux
Service Sécurité & Environnement	Chargée d'assurer une qualité du ciment, du béton et des granulats, répondant aux meilleurs standards internationaux
Service Exploitation	Mettre en œuvre la stratégie opérationnelle de la Société y compris la gestion technique et commerciale (Gestion des achats et Gestion des stocks)
Service des Ressources Humaines	Recrutement, assurance maladie, gestion sociale, gestion des congés, paie de personnel, et la gestion de la formation
Service Production	Service d'accueil divisé en trois secteurs : <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Secteur 1 et 2</u> : Concassage, broyage et cuisson des MP pour préparer le Clincker ▪ <u>Secteur 3</u> : Chargé au broyage ciment et expédition
Service Maintenance	Assurer la disponibilité des machines, pour produire dans les meilleures conditions de qualité, sécurité et coût

Tableau 2: Services de HOLCIM-Ras El Ma

1.2.5. Procédé de fabrication de ciment

Le ciment est généralement fabriqué en cuisant vers 1450°C des mélanges de calcaire, d'argile (pélite et phtanite) et minerai de fer. On obtient alors des nodules durs, appelés clinkers ; c'est en broyant très finement ceux-ci, additionnés d'un peu de gypse, qu'on produit le ciment.

L'obtention du ciment peut se schématiser comme suit :

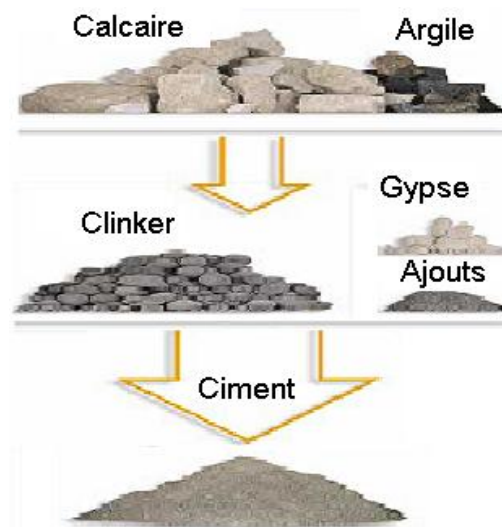


Figure 3: Schéma d'obtention du ciment

1.2.5.1. L'extraction & concassage du calcaire

1.2.5.1.1. Extraction :

La carrière en cimenterie constitue la source en matières premières qui subissent des transformations pour fabriquer le produit fini donc le ciment est fabriqué à partir de quatre composantes chimiques principales : carbonates de calcium, alumine, silice et oxyde de fer. Ces éléments se trouvent généralement dans la nature sous forme de calcaire de marnes, d'argiles, de schistes, de minerai de fer et de sable.

Constituant la matière première principale, le calcaire est extrait d'une carrière située à proximité de l'usine, sous forme de blocs de dimensions très variées (~1 m³), pour réduire les coûts de transport.

Les argiles, les marnes ou les schistes constituent la matière secondaire. Celle-ci sont extraites dans des carrières situées dans les environs de l'usine.

Le minerai de fer et de sable, sont des matières de correction utilisées dans des faibles proportions. Ils sont exploités dans des carrières relativement éloignées de l'usine ou livrés par des fournisseurs.

1.2.5.1.2. Concassage :

L'atelier de concassage est situé à 50 m de la carrière calcaire. Il comprend un concasseur à marteau à double rotor, qui convient pour le concassage de toutes matières friables ou demi-dure.

Toutes les matières premières et les ajouts (à part les cendres volantes) sont concassés séparément pour assurer les stocks nécessaires à la marche du broyeur cru et des broyeurs à ciment. La marche du concasseur est entièrement automatisée. Lui conférant un fonctionnement optimum et très sécurisé.

Les blocs du calcaire et d'argile sont concassés en même temps (pré homogénéisation) pour donner un mélange qui est la matière principale de la fabrication du cru avec des proportions bien déterminés (78% calcaire et 22% d'argile), cette répartition est contrôlée par un PGNAA (analyse instantané par activation neutronique).

1.2.5.2. Préparation de la matière première

1.2.5.2.1. Préhomogénéisation

Le mélange (calcaire + argile), le calcaire pur, le schiste, le minerai de fer, et le gypse concassés alimentent une « sauterelle » située juste à la sortie du concasseur par un transporteur à courroie permettant ainsi de les stocker séparément dans des trémies.

Le pré homogénéisation des matières premières est une opération qui consiste à assurer une composition chimique régulière du mélange des matières premières. Des échantillons du mélange des matières premières sont prélevés lors de la constitution des tas dans une station d'échantillonnage, ces échantillons sont analysés au niveau. Des échantillons du mélange des matières premières sont prélevés lors de la constitution des tas dans une station d'échantillonnage, ces échantillons sont analysés au niveau du laboratoire de l'usine. Les résultats de ces analyses permettent de définir les corrections nécessaires à apporter au mélange des matières premières, «Analysé et corrigé par le PGNAA et validé par le chimiste» ce mélange est dénommé le cru.

1.2.5.3. Préparation du Cru

La préparation du cru consiste à réaliser un dosage approprié des 4 constituants de bases : chaux, silice, Alumine et Fer..



Figure 4 : Préparation du cru

Les matières premières constituant le cru doivent être finement broyées et parfaitement homogénéisées de manière à faciliter les réactions au cours de la cuisson.

1.2.5.3.1. Broyage du Cru

Les matières premières constituant le cru doivent être finement broyées de manière à faciliter les réactions au cours de la cuisson. Pour assurer la régularité du cru, il est impératif de contrôler par des analyses ses caractéristiques. Pour cela, les composants du cru sont corrigés pour aboutir à la qualité du clinker exigé. On utilise des « modules » qui permettent de prévoir au préalable la composition (théorique) des minéraux du clinker et ainsi corriger les constituants du cru afin d'aboutir à la qualité de clinker désiré.

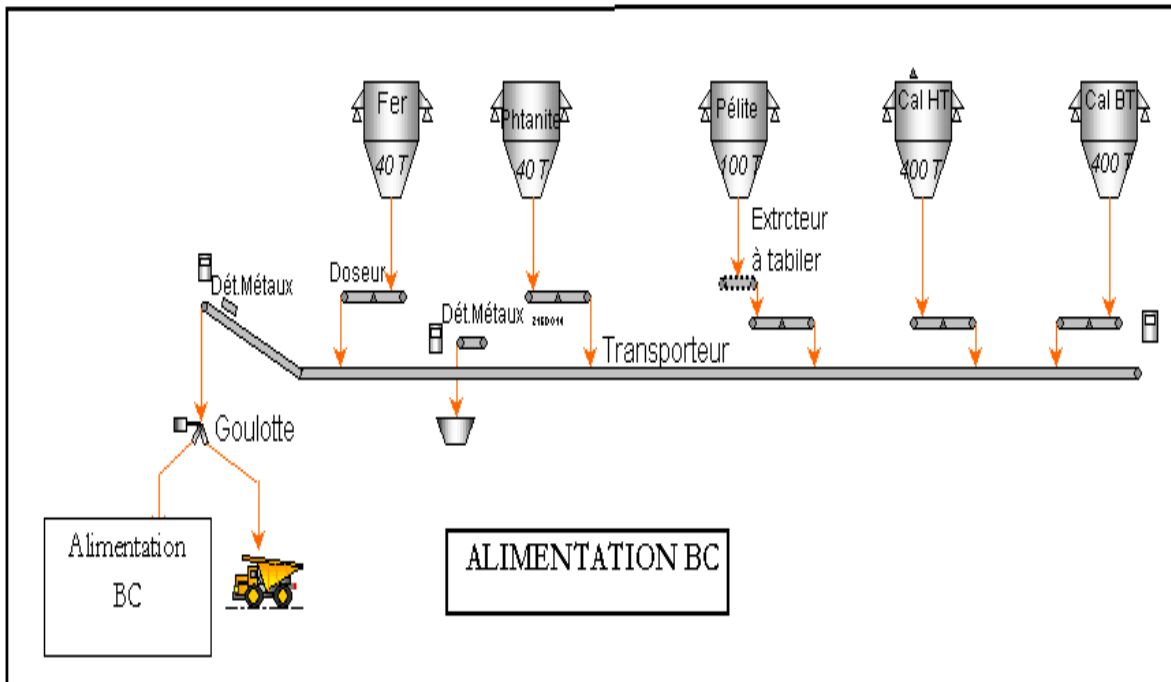


Figure 5 : Alimentation broyeur cru

1.2.5.3.1.1. Extraction du cru et alimentation du broyeur :

Cinq doseurs et un extracteur à tablier sont installés sous les trémies. Calcaire, mélange calcaire et schiste, sable et fer sont respectivement extraits par des doseurs, et la péliste est extraite par un extracteur à tablier métallique, puis dosée par un doseur. Les quantités d'extraction de chaque doseur sont contrôlées proportionnellement en rapport avec le contrôle de la quantité d'alimentation du broyeur.

Les matières premières extraites sont chargées sur un convoyeur à bande puis transportée au broyeur cru. Le séparateur magnétique et le détecteur de métaux sont installés sur ce convoyeur. Une goulotte à deux directions est utilisée pour diriger les matériaux étrangers une fois détectée vers le sol.

1.2.5.3.1.2. Partie Broyage cru

Le broyeur cru est un broyeur vertical à 4 galets ayant une capacité de 160t/h. Les matières premières extraites des trémies alimentent le broyeur via la goulotte à deux voies.

Broyage, séchage et séparation des matériaux au broyeur cru, puis la farine crue produite dans celui-ci est extraite et transportée par les gaz, puis envoyée aux cyclones pour pré collecter la production, puis envoyée au filtre à manche.

La matière première rejetée du broyeur cru est évacuée à l'extérieur de celui-ci, puis transportée par un couloir vibrant et un convoyeur à bande.

Les refus sont recerclés et réintroduits avec les matières premières alimentant le broyeur ou sont évacués à l'extérieur par la goulotte à deux voies. Ce sont les gaz du pré chauffeur qui sont utilisés pour le

séchage des matières premières. La farine crue transportée du broyeur cru par des gaz chauds, premièrement est collectée par les cyclones, puis, alimente le silo homogénéisation par des aéroglisteurs.

A la fin de broyage la matière première est dirigée vers un séparateur qui sélectionne les particules selon leur taille.

1.2.5.3.2. Stockage de Cru

A la suite du broyage et après séparation les matières premières sont transformées en en une poudre de grande finesse appelée dans le jargon cimentier « FARINE » cette matière sera acheminées vers l'atelier d'alimentation four possédant un silo d'un débit de 8h de stockage de cru.

1.2.5.4. Cuisson

La cuisson recouvre toutes les étapes de transformation chimique de la farine crue, jusqu'à la formation du clinker.

A la cuisson, les composants du mélange cru se décomposent et, en se recombinaut entre eux, ils forment de nouvelles liaisons minérales : ce sont les minéraux du clinker. L'atelier de cuisson est constitué de trois éléments principaux :

1.2.5.4.1. Tour de Préchauffage

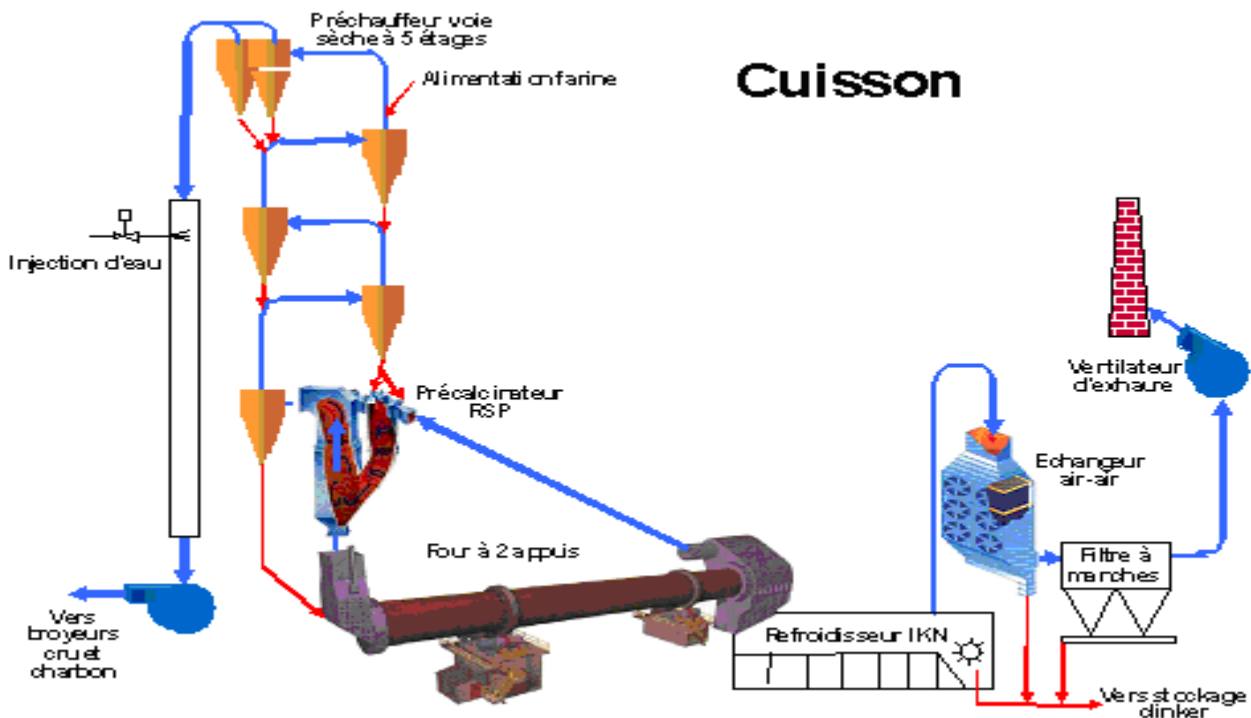


Figure 6 : Tour de préchauffage

Dans la tour, les gaz chauds sortant du four préparent la matière thermiquement et chimiquement. Elle est munie d'un point de combustion, le précalcinateur, permettant de générer des gaz chauds directement dans le bas et diminuant par la même occasion la charge thermique du four.

Grâce à ce procédé, la farine arrive 93% décarbonatée à l'entrée du four à une température avoisinante 900°C, ainsi la longueur du four peut être réduite.

La tour est constituée d'une série de cyclones avec un précalcinateur, disposés verticalement sur plusieurs étages. D'étage en étage, la farine arrive partiellement décarbonatée jusqu'à l'étage inférieur.

1.2.5.4.2. Four Rotatif

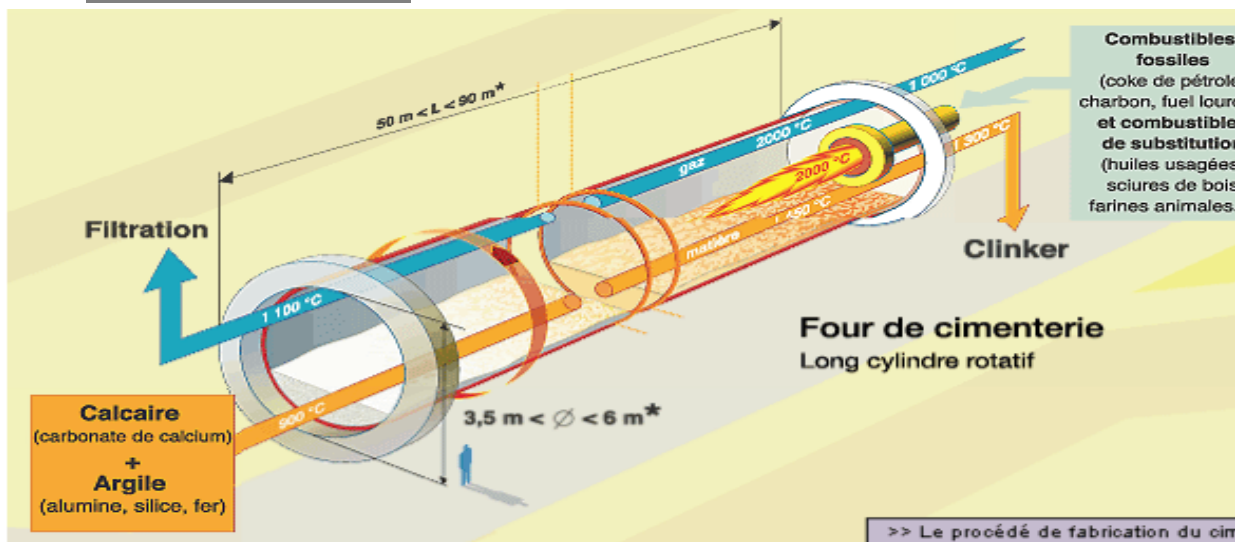


Figure 7 : Les phases de cuisson

C'est un four rotatif cylindrique de longueur 63m, et 3.8m de diamètre incliné par rapport à l'horizontale permettant l'écoulement de la farine et tournant à 5.2 tours/min.

A la sortie de la tour la farine arrive dans le four où s'effectue l'étape la plus importante de sa transformation : la clinkérisation qui commence de 1200°C à 1450°C, l'alimentation en farine est située à l'extrémité opposée du brûleur.

En théorie, cette réaction s'arrête lorsqu'il n'y a plus de chaux disponible. Mais en réalité il reste toujours de la chaux non combinée (chaux libre).

La matière sortant du four est le clinker, elle se présente sous formes des grains gris foncés, arrondis à surface irrégulière et dont le diamètre peut aller jusqu'à 3cm.

1.2.5.4.3. Refroidisseur

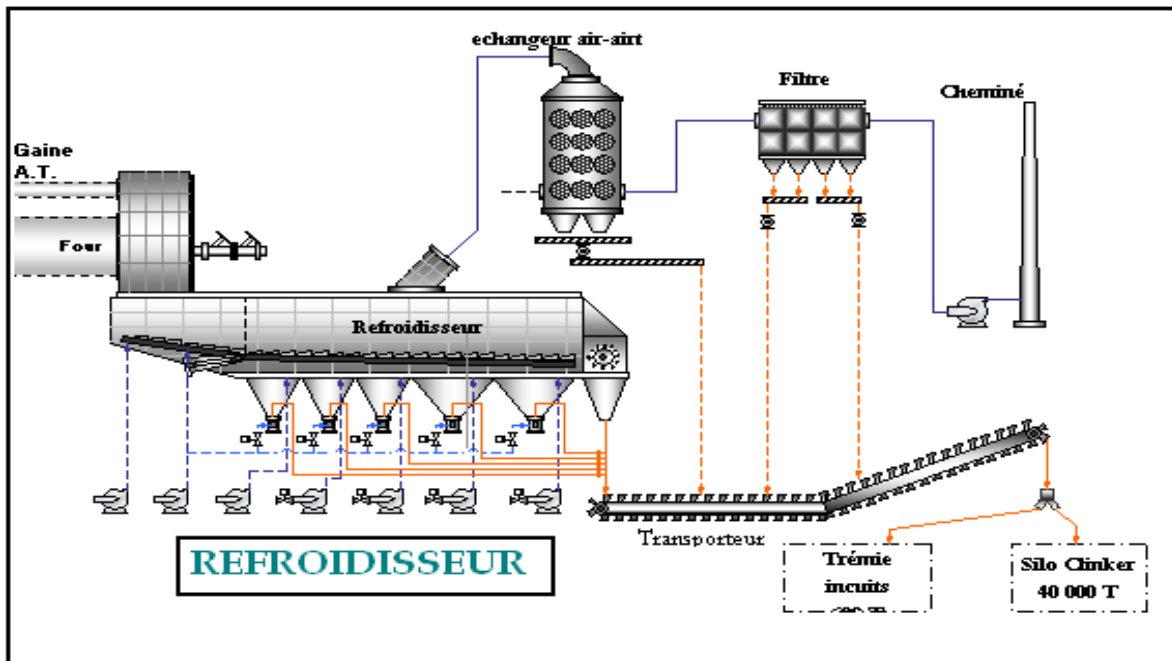


Figure 8 : Refroidisseur

Le clinker produit est trempé (refroidissement rapide) par refroidisseur à grille qui abaisse la température de 1450°C à 100°C par soufflage d'air frais.

La procédure de refroidissement après cuisson joue un rôle très important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker, il évite la décomposition de C_3S en C_2S , la précipitation de MgO sous forme de gros cristaux et le changement de la forme cristalline de C_2S qui provoque la modification des propriétés hydraulique du ciment.

Le clinker sortant du refroidisseur est transporté par un élévateur vers un silo de stockage de capacité de 40 000 tonnes.

1.2.5.5. Broyage du ciment

Le ciment est un liant hydraulique des agrégats (gravier) qui durcit avec le temps. Il en existe plusieurs types dont les plus répandus sont : ciment blanc, gris, alumineux « Prise mer » et spécial, il est fabriqué à partir du :

- Clinker : est un matériau hydraulique qui contient au moins 2/3 en masse de silicates de calcium et 1/3 de la partie restante contenant, de l'oxyde de fer (Fe_2O_3), de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et d'autres oxydes.

- Sulfate de calcium : est un régulateur de prise. il neutralise à court terme les aluminates « C₃A » présents dans le clinker.

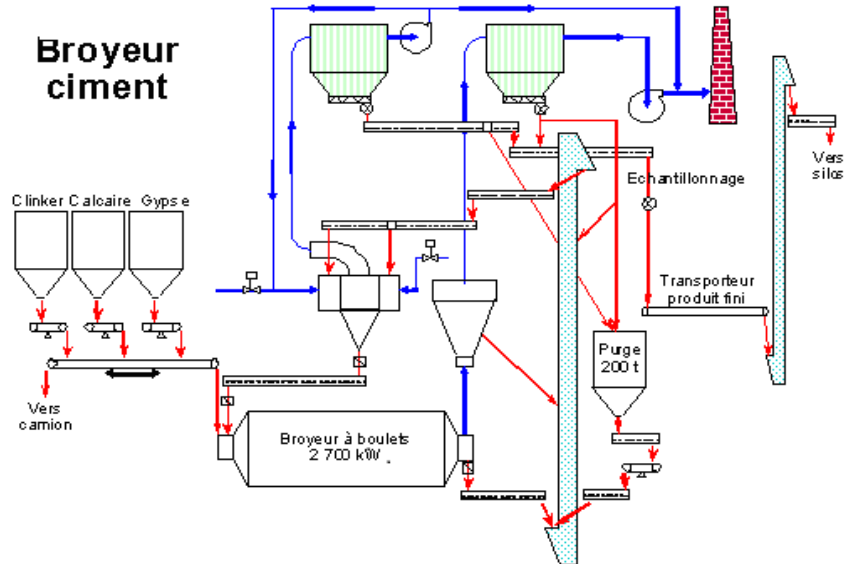


Figure 9 : Broyage ciment

1.2.5.5.1. Ajouts

Il existe deux types d'ajouts :

- ✓ Des ajouts actifs : qui présentent des propriétés hydrauliques (laitier)

Laitier « obtenu par refroidissement très rapide dans l'eau de la scorie fondue de haut fourneau. Il est riche en SiO₂ et Al₂O₃ et Fe₂O₃. »

- ✓ Des ajouts inactifs « filler : Calcaire » : roche finement broyée qui n'a pas de propriétés hydrauliques mais sa finesse donne une meilleure capacité de la pâte.

L'usine produit deux types de ciment portland avec ajouts « selon le besoin de la clientèle et du marché » :

- **CPJ 35** : ciment portland avec ajout contenant au moins 65% de clinker.
- **CPJ 45** : ciment portland avec ajout contenant au moins 79% de clinker.

Selon la qualité du ciment à produire, le service Qualité Environnement Carrière préconise les pourcentages optimums en clinker, gypse et calcaire d'ajouts.

1.2.5.5.2. Alimentation des trémies d'alimentation broyeur ciment

Pour le bâtiment alimentation broyeur ciment, il comporte trois trémies où sont stockés le clinker, le gypse et le calcaire haut titre.

➤ **Le clinker :**

Le clinker est extrait par des alimentateurs gravitaires et transportés par un convoyeur métallique, des convoyeurs à bandes et un élévateur à godets, jusqu'à la trémie clinker alimentation broyeur.

➤ **Le gypse :**

Le gypse stocké dans le parc linéaire est extrait par un équipement de reprise et transporté jusqu'à la trémie alimentation broyeuse.

➤ **Le calcaire HT :**

Le calcaire HT stocké dans le parc linéaire est extrait par un équipement de reprise et transporté jusqu'à un concasseur additionnel où il est concassé à une granulométrie inférieure à 30mm puis transporté par des convoyeurs à bande jusqu'à la trémie alimentation broyeur.

1.2.5.5.3. Alimentation broyeur ciment

Le clinker, le gypse et le calcaire HT seront dosés par des doseurs installés sous les trémies. Chaque doseur est ajusté régulièrement en fonction des contrôles qualité du produit fini et des consignes visées.

Le service qualité donne les pourcentages en clinker et ajouts requis en fonction de la qualité du ciment souhaitée.

Les matériaux ainsi dosés sont transportés par le convoyeur à bande jusqu'au broyeur ciment.

Le broyeur ciment est un broyeur à boulets, type commande centrale ayant une capacité de 80t/h.

La matière ainsi sortant du broyeur est transportée par des aéroglisseurs et élévateur à godets jusqu'au séparateur pour la classification.

Quant au refus du séparateur, il est transporté par un aéroglisseur, pesé par un débitmètre à palette, puis réintroduit dans le broyeur ciment.

1.2.5.5.4. Stockage et expédition du ciment

1.2.5.5.4.1. Stockage du ciment :

Après sa fabrication, le ciment est acheminé, par voies pneumatiques ou mécaniques, vers des silos de stockage dont la capacité est de plusieurs milliers de tonnes.

1.2.5.5.4.2. Expédition :

Il est expédié vers les lieux de consommation sous deux formes :

- ✓ En sac : Les sacs contiennent généralement 25 ou 50 Kg de ciment sur lesquels est marquée la classe de résistance du ciment (35 ou 45).

- ✓ En vrac : la livraison du ciment en vrac se fait sur des citernes. Le ciment est injecté avec l'air dans la citerne jusqu'à ce que le tonnage soit atteint.

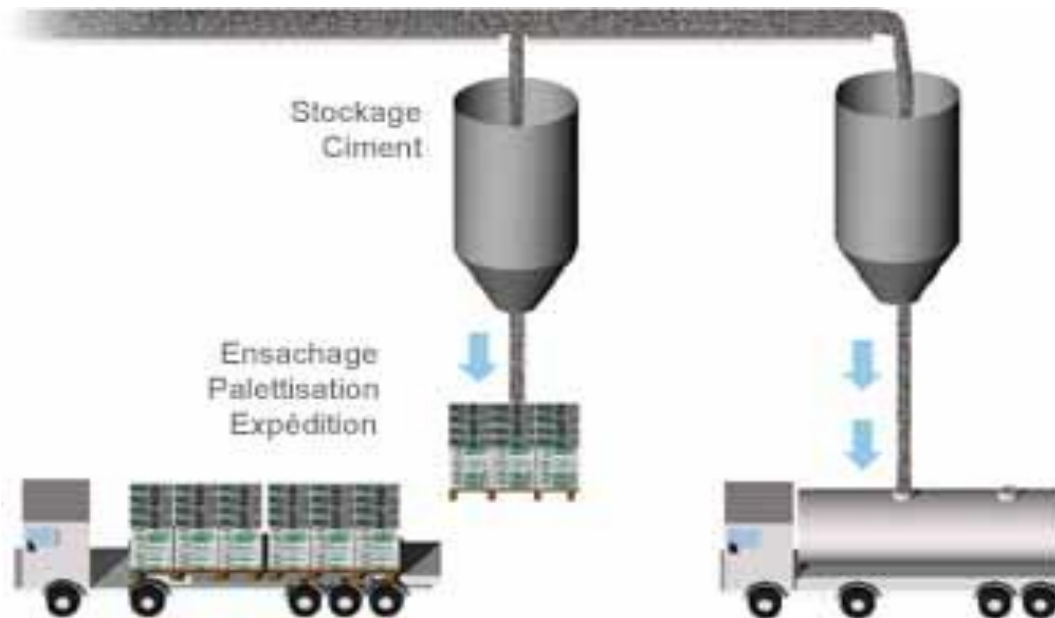


Figure 10 : Stockage et expedition

1.3. Politique de sécurité

Mesures de sécurité HOLCIM Fès Maroc

La sécurité est une affaire d'état d'esprit et de comportement :

- Au niveau de la sensibilisation,
- Au niveau de la rigueur dans la mise en œuvre,
- Au niveau de l'anticipation et de la préparation.

HOLCIM Maroc a parcouru un long chemin en la matière au cours des 5 dernières années. Le non-respect de la sécurité est devenu une vraie faute avec ses conséquences managériales. La protection des salariés, des prestataires n'est plus négociable. Il faut aussi admettre qu'il reste beaucoup d'efforts pour atteindre l'excellence en la matière. Les derniers accidents survenus, tous si facilement évitables, et uniquement liés au comportement très souvent des victimes elles-mêmes, ne peuvent que pousser à encore plus de rigueur et de vigilance. Objectif suprême est : aucun blessé.

➤ **Systeme de sensibilisation à la sécurité – Fès :**
Une « piqûre de rappel » à la sécurité chaque jour

Compte-tenu du challenge sécurité dans lequel Holcim Maroc s'engage tous les jours, le service électrique de Fès a eu l'idée de promouvoir et renforcer la communication au niveau de la sécurité.



Figure 11 : Support visuel

Étant un passage obligé pour la totalité des agents Holcim, le matin, le soir et aux heures de changement de poste, la pointeuse est incontestablement l'emplacement idéal pour l'application. Une fois que l'agent se met en face de la pointeuse, le répondeur se met en marche et lui délivre un message de rappel à la sécurité.

Une « piqûre de rappel » à la sécurité chaque jour garantira le maintien de vigilance en matière de sécurité chez l'ensemble du personnel.

➤ **Arrêt technique de Fès Mars 2011 : mesures de sécurité**

Dans le cadre de la politique sécurité du Groupe Holcim, le service maintenance mécanique de l'usine de Fès a pris l'initiative de développer des outils servant à renforcer la culture sécurité, à sensibiliser davantage le personnel sur les risques liés aux différents travaux et à instaurer des règles de conduite visant à atteindre l'objectif de Zéro Accidents.

Première action : Mise en place d'un tableau d'affichage au niveau de l'atelier mécanique central permettant d'avoir un support visuel lors du moment sécurité quotidien.

Deuxième action : Désignation de deux personnes pour effectuer les travaux de manutention et transport du matériel par chariot élévateur durant la période du grand arrêt. Ces personnes ont suivi des séances de formation spécifiques afin de les habiliter à conduire ce type d'engin.

Troisième action : Affichage, au niveau des lieux des travaux, de la fiche signalétique des travaux à exécuter, du nom des responsables Holcim et des noms des personnes de la sous-traitance travaillant sur les lieux d'intervention.



Figure 12 : Coffre de sécurité

➤ Moment sécurité :

Comme cela a été le cas au sein de l'ensemble des sites de Holcim Maroc, l'équipe Projet Fès 2800 (Augmentation de la Capacité du Clinker) a organisé le Safety Moment au profit de l'ensemble du personnel du chantier, environ 800 personnes. Une réunion, à laquelle ont participé les responsables sécurité des entreprises sous-traitantes et les animateurs sécurité Holcim Projet, a été organisée par l'OH&S Manager Projet. Lors de cette réunion, les décisions suivantes ont été prises :

- Répartition du personnel chantier en 15
- Préparation des moyens logistiques (ordinateurs, datashows et salles de sensibilisation).
- Planning horaire des sensibilisations des groupes.
- Mission d'animation des sensibilisations confiée aux animateurs sécurité Holcim Projet soutenus par les responsables sécurité des Entreprises.
- Mission de sensibilisation sécurité générale des groupes attendant leur tour de Safety Moment confiée aux animateurs sécurité des entreprises (en outdoor).

Le Safety Moment a été axé sur les thèmes suivants :

- Règles Cardinales du Groupe Holcim (Projection du film en arabe pour les Marocains et en Anglais pour les Chinois).
- Présentation et discussion des supports transmis par le Responsable Qualité, Sécurité & Environnement Corporate de Holcim Maroc : . Bilan des accidents de travail avec arrêt survenus sur les sites de Holcim Maroc durant l'année 2010, .Définition et explication des événements indésirables appelés Incident ou «presque accident».
- Présentation d'un support préparé par l'équipe OH&S Projet intitulé « Rappel des règles sécurité de base et spécifiques aux travaux du chantier Fès 2800». La durée totale des séances de sensibilisation des groupes a été de 2h45



Figure 13 : Sensibilisation à la sécurité

1. Nul ne peut enfreindre ou faire entrave à une disposition relative à la sécurité, ni laisser quelqu'un d'autre le faire.
2. Les règles relatives aux Équipements de Protection Individuelle (EPI) applicables à une tâche donnée doivent être respectées à tout moment.
3. Les procédures de consignation doivent toujours être suivies.
4. Il est interdit de travailler sous l'influence de l'alcool ou de drogues.
5. Tous les accidents et incidents doivent faire l'objet d'un rapport à la hiérarchie.

Elles doivent être appliquées et suivies à la lettre, à tout moment et sans compromis de quelque nature qu'il soit. **TOLERANCE = ZERO**

➤ **Les outils « Sécurité » à Holcim Maroc :**

Holcim Maroc a mis à disposition de son personnel plusieurs outils de prévention contre les accidents graves et mortels.

Les observations sécurité et les presque-accidents : Le reporting et le suivi des observations sécurité et des presque-accidents permettent :

- D'impliquer tout le personnel des cimenteries dans la santé et sécurité au travail,
- D'identifier les actes et les comportements dangereux,
- De proposer des solutions sûres et durables.

Les Permis des travaux dangereux : L'élaboration des permis des travaux dangereux permettent aux équipes de maintenance et de production d'exécuter des opérations/travaux en tenant compte des dangers correspondants et en maîtrisant les risques liés à chaque tâche. On distingue plusieurs types de permis de travail (permis des travaux en hauteur, permis d'accès à la tour, Bon de consignation des installations, permis d'accès aux espaces confinés, permis de feu, etc.)

Les casques orange et vert : Le but de la visite Sécurité «casque orange» est de responsabiliser le personnel de l'usine sur leur sécurité et celle de leurs collègues, en adoptant un comportement adéquat. Le «casque vert» vise à impliquer le personnel de l'usine et les responsabiliser davantage sur la protection de l'environnement. Le concept est simple, il s'agit de désigner une personne nommée «casque orange et casque vert», selon une fréquence hebdomadaire et pendant une durée d'une heure, en vu de visiter une ou plusieurs zones de l'usine pour observer et relever les anomalies Sécurité et Environnement.



Figure 14 : Règles de sécurité

Chapitre 2

Chapitre 2 : Four rotatif de cimenterie

Dans le présent chapitre nous allons présenter le four rotatif de cimenterie sujet de notre étude puis nous allons détailler l'ensemble des organes qui le constituent ainsi que, leurs rôles et leurs spécificités.

2.1. Description

2.1.1. Généralités

Un four rotatif de cimenterie a pour rôle de produire le Clinker, qui est à la base du ciment.

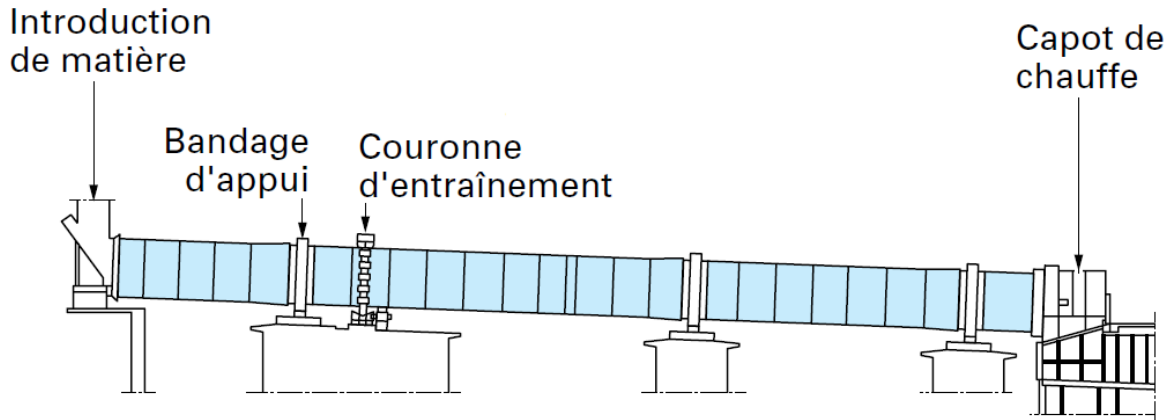


Figure 15 : Four à 3 appuis [6]

La matière est introduite par l'amont du four, après être chauffée à 900°C par les gaz chauds du four ou le gas-oil en cas de démarrage, la rotation du four et sa pente (3,5%) permet à la matière de se mouvoir vers la sortie du four, à travers laquelle une flamme de 1450°C assure le chauffage du four et la cuisson du clinker.

Le four possède trois paliers, sur lesquels il s'appuie par le billet du bandage.

Chaque palier est constitué de deux galets cylindriques, et chaque galet est supporté par deux paliers contenant chacun un coussinet.

Le four est entraîné en rotation par un moteur et réducteur, agissant sur un pignon engrainé avec la couronne d'entraînement.

Les fonctions principales du four rotatif sont :

- Obtenir décarbonatation finale de la farine chaude
- Cuisson de la matière
- Assurer la bonne combustion du charbon
- Permettre le transfert thermique (gaz/solide)
- Transporter la matière

Four de HOLCIM Fès

Le four de HOLCIM Fès est optimisé quand au rapport volume/Production, ce qui permet à HOLCIM Fès d'avoir un fort avantage concurrentiel, et de se situer parmi les 12 premières entreprises du groupe HOLCIM au niveau mondial en Avril 2015.

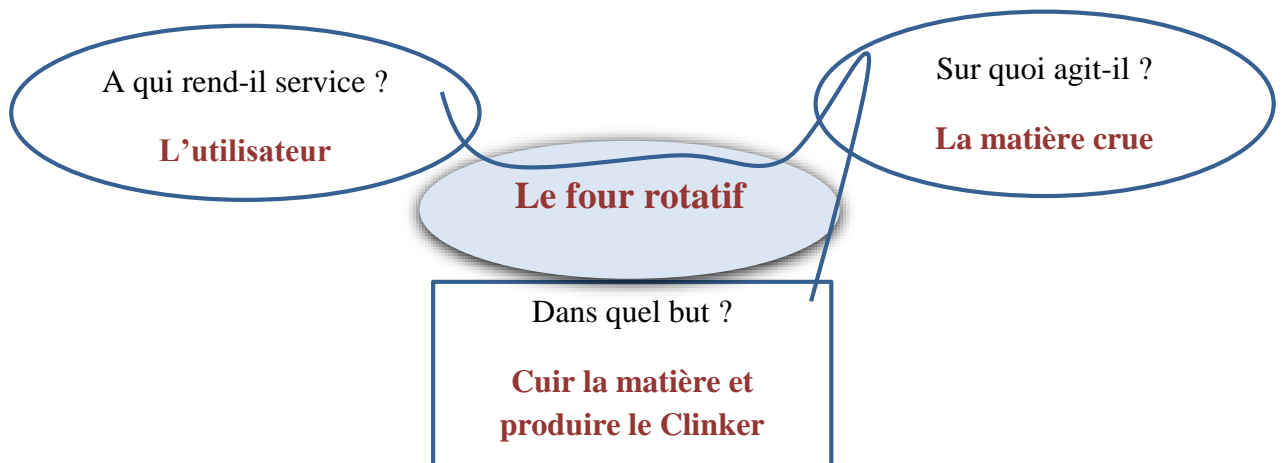
Chapitre 2 : Four rotatif de cimenterie

Le tableau suivant permet une comparaison des fours de cimenterie :

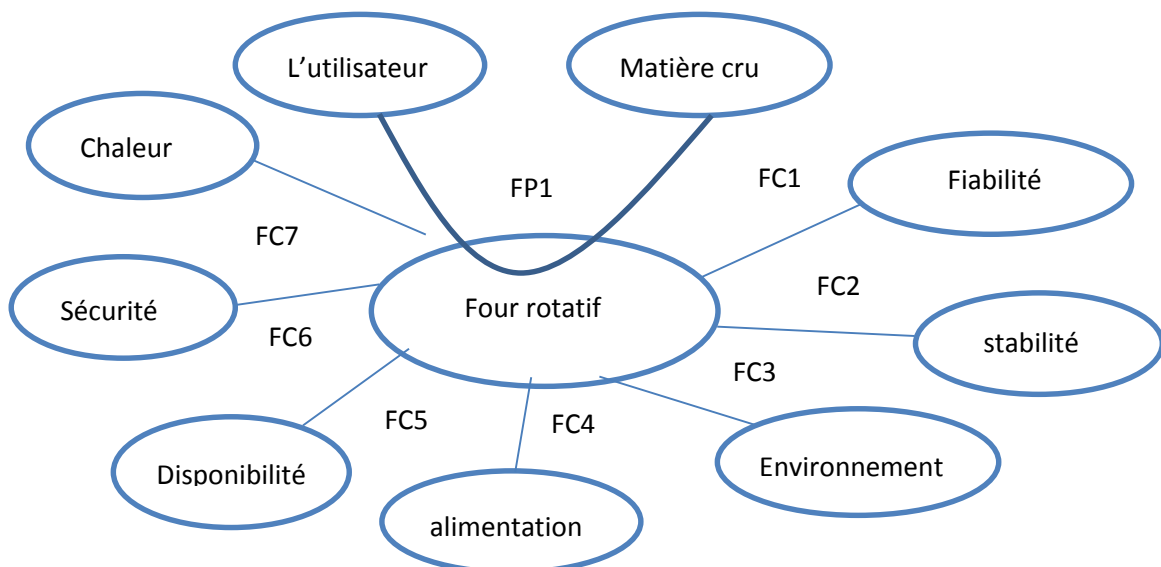
<i>Usine</i>	<i>Longueur(m)</i>	<i>Diamètre (m)</i>	<i>Vitesse (RPM)</i>	<i>Production (t/jour)</i>
<i>HOLCIM Fès</i>	63	3,8	5,2	2600
<i>Dundee 1</i>	140	5/4,6	1-1,5	1500
<i>Clarksville</i>	232	6,9	1-1,5	4000
<i>Altkrich</i>	68	4	2-2,5	1250
<i>Chekka</i>	65	5,2	3,5-4	5800
<i>Portland</i>	78	5,2	3,5-4	5400
<i>St Genevieve</i>	90	6,6	3,5-4	12000

2.2. Analyse fonctionnelle

2.2.1. Bête à cornes:



2.2.2. Diagramme Pieuvre :



Chapitre 2 : Four rotatif de cimenterie

FP1 : Permettre à l'utilisateur de produire le Clinker

FC1 : Avoir une fiabilité satisfaisante

FC2 : Avoir un four stable en rotation

FC3 : Minimiser le dégagement de gaz polluant

FC4 : Entraîner le four par l'énergie électrique

FC5 : Garantir une disponibilité élevée

FC6 : Permettre un fonctionnement sûr

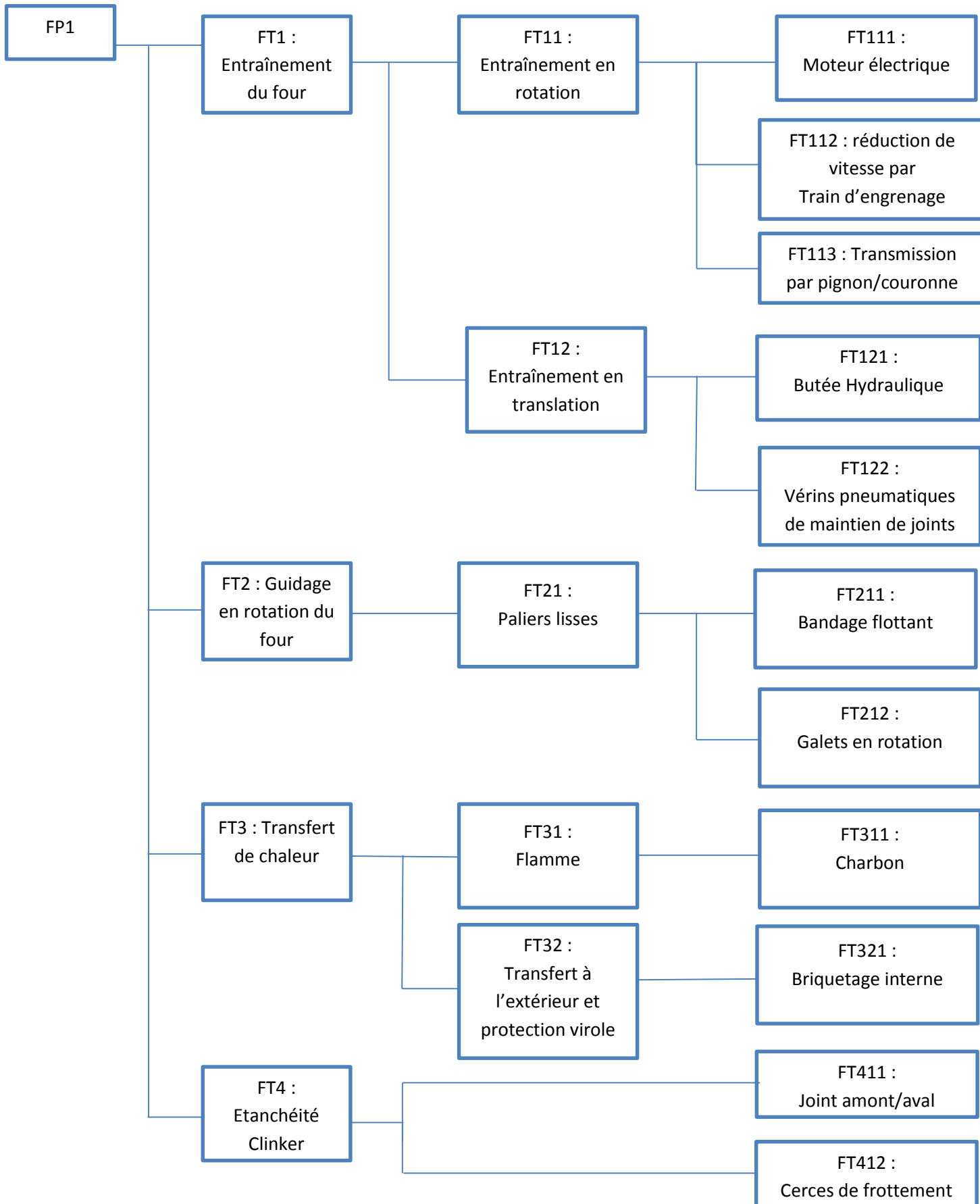
FC7 : Produire la chaleur par combustion de charbon

2.2.3. Cahier des charges fonctionnelles :

Fonction	Critère d'appréciation	Niveau d'exigence	Flexibilité
FP1	Quantité produite	2600t/jour	+/-200t
FC1	Fiabilité	90%	+/-5%
FC2	Angle d'appui	30°	+/-1°
FC3	Norme ISO		
FC4	Puissance	520KW	+/-5%
FC5	Disponibilité	90%	+/-5%
FC6	Nombre d'accident	0 accident / an	0
FC7	Température	1450°C	+/- 50°C

Tableau 3 : Cahier de charges fonctionnelles

2.2.4. Diagramme des solutions technologiques :



2.3. Description des composants du four

2.3.1. Le bandage :

Le bandage est un anneau métallique à section rectangulaire, installé sur la virole du four dans les zones des paliers, leurs nombres diffèrent d'un four à un autre selon sa conception, notre four possède trois station de roulement et donc trois bandages.

2.3.1.1. Rôle du bandage :

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

Le bandage permet aussi de diminuer le flux de chaleur transmis de la virole aux galets supports.

2.3.1.2. Conception des bandages :

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

Il existe deux types de bandage [6] : le bandage flottant et le bandage cranté.

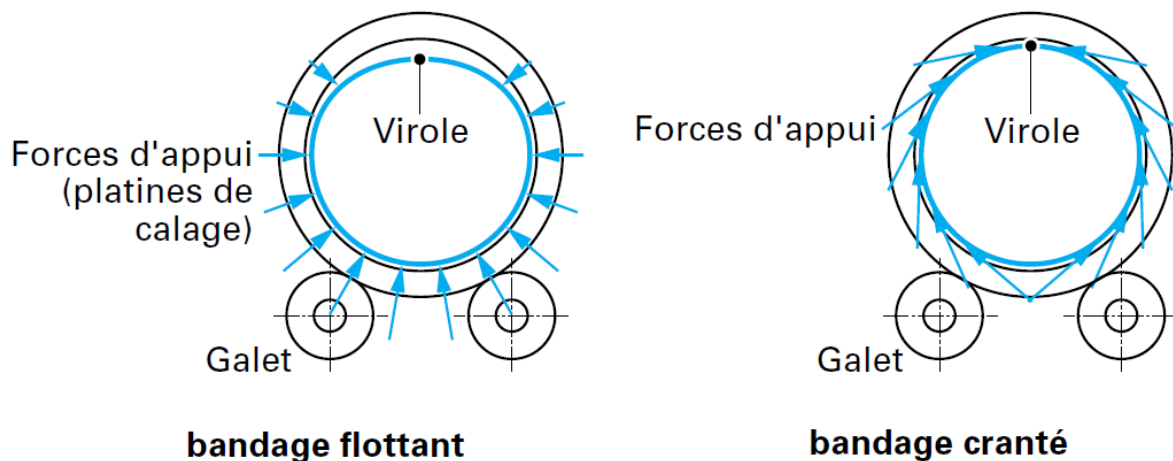


Figure 16: Types de bandages

Chapitre 2 : Four rotatif de cimenterie

Le bandage flottant : la virole du four repose sur le diamètre intérieur du bandage par l'intermédiaire de platine de calage, il en découle que les forces d'appui sont appliquées selon le rayon de la virole. Il doit être assez rigide pour limiter l'ovalisation de la virole.

Le bandage cranté : La virole du four et le bandage sont positionnés de manière quasi concentrique, l'effort d'appui est tangentiel à la circonférence du four, et s'appuie sur les dents taillées à l'intérieur du bandage cranté. La limitation d'ovalisation pour ce type de bandage est plus efficace que le cas du bandage flottant, par contre le coût est plus élevé d'environ 40% du bandage flottant.

Notre four est équipé par des bandages flottants, leur fixation axiale est réalisée par des cerces ou anneaux de poussée des deux côtés du bandage s'appuyant sur des taquets (bloc) d'arrêts soudés sur la virole du four.

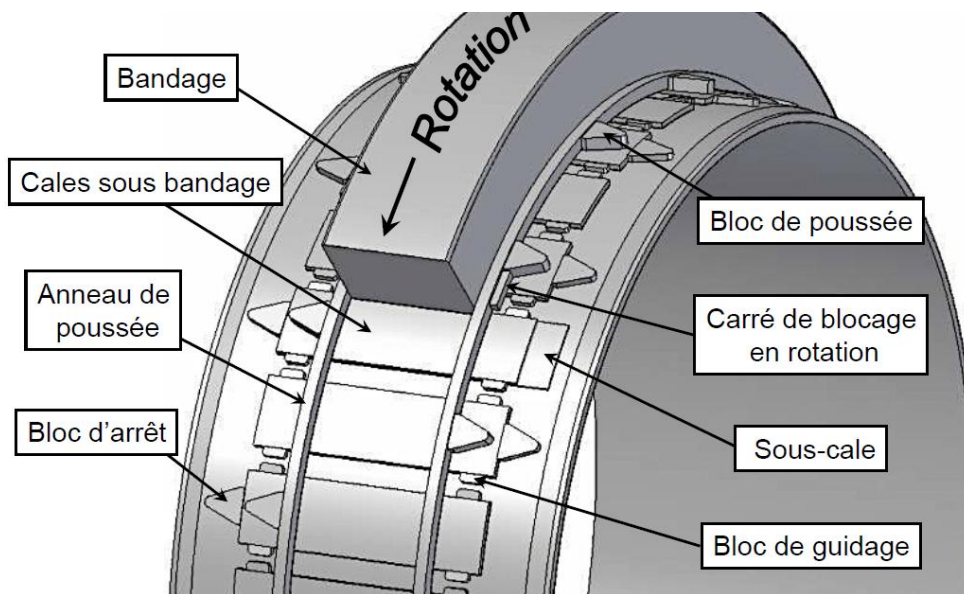


Figure 17 : Bandage flottant

2.3.2. La virole :

La virole est un ensemble de tôles dont le rayon de courbure coïncide avec le rayon du four, les tôles sont soudées deux à deux tout en évitant une continuité de soudure dans la direction axiale.

Propriétés des tôles : les tôles sont en acier de construction S235 JR G2, de composition :

Carbone 0.2% ; manganèse 1% ; d'autres composants <0.01 %

L'acier utilisé présente une excellente conformation, une excellente soudabilité, mais une mauvaise tenue en corrosion, puisqu'il n'est pas allié en chrome, nickel et molybdène.

Les tôles ont une longueur longitudinale d'environ 2000mm, et leurs sections dépendent de leur emplacement axial [6] :

Virole courante : épaisseur de 20mm

Virole intermédiaire : épaisseur de 30mm ou 40mm

Virole sous bandage : épaisseur 60mm

Propriétés de l'acier (S235 JRG2)

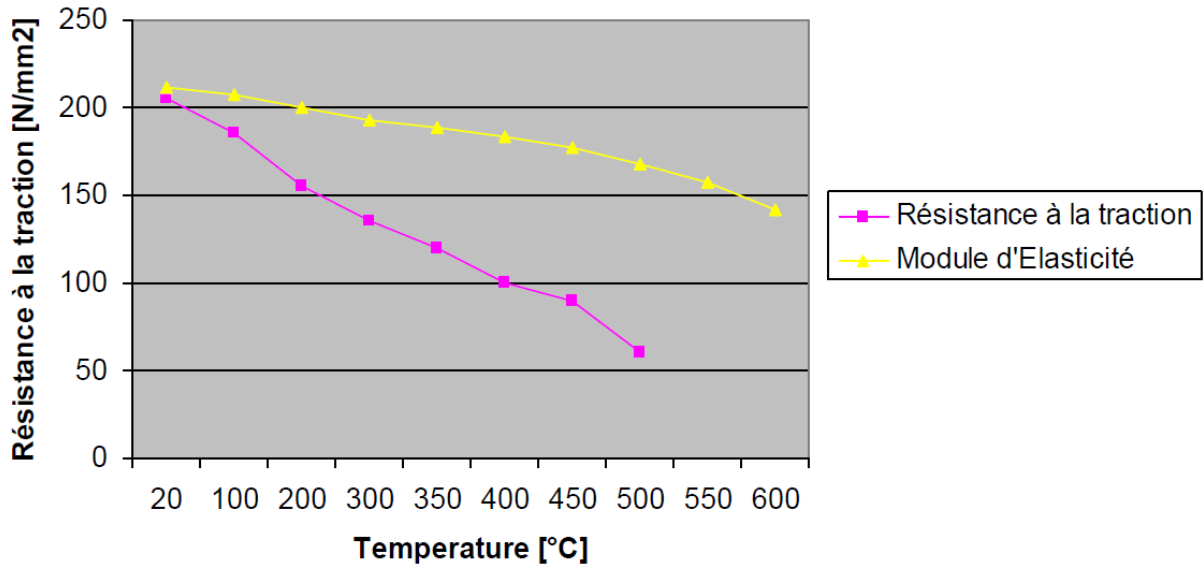


Figure 18 : Propriétés du matériau de la virole [2]

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

La durée de vie de la virole est généralement entre 20 ans à 30 ans, mais la mauvaise tenue en corrosion peut entraîner des changements de viroles en quelques années. La virole de sortie du four est plus sollicitée thermiquement et peut conduire à des changements tous les 5ans.

2.3.3. Les briques réfractaires :

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

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

Elles permettent de protéger la virole en limitant le transfert de chaleur, préserver l'efficacité énergétique en diminuant les pertes de chaleur [2].

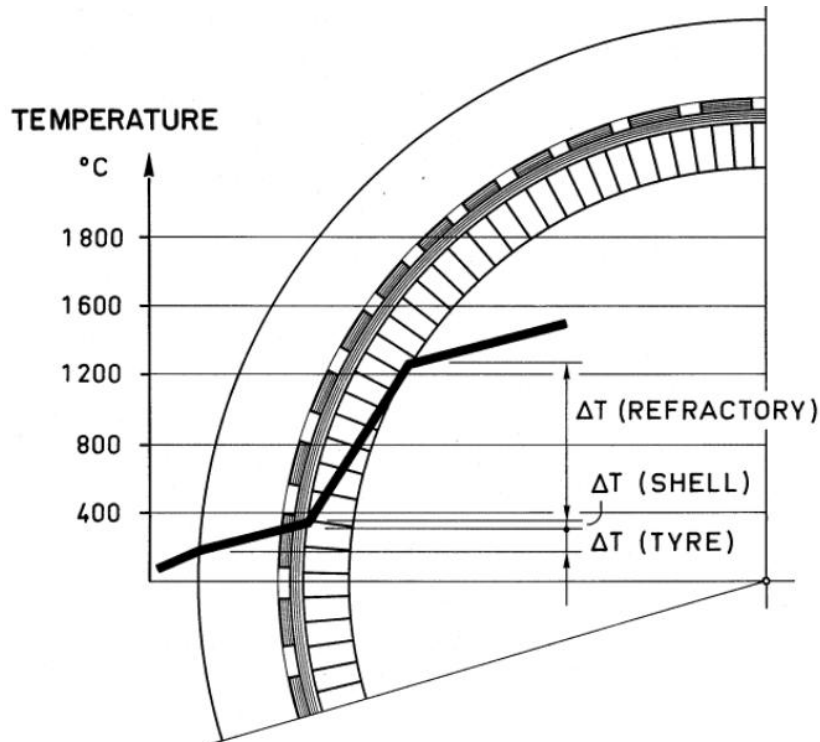


Figure 19 : Evolution de la température entre bandage et les briques

$$\Delta T (\text{briques}) = 900^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T (\text{Virole}) = 60^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T (\text{Bandage}) = 130^{\circ}\text{C}$$

2.3.4. Les galets :

Les galets sont des formes cylindriques d'acier pleines, jouant le rôle de support du four.

Ils permettent de minimiser le frottement par un faible coefficient de frottement de surface, ils sont de même nature que les bandages avec lesquels ils sont en contact, ce qui permet d'avoir une usure uniforme.

Le galet est composé d'un arbre et d'un corps, l'arbre est assemblé avec le corps avec un ajustement serré, l'assemblage se fait par frettage.

Le galet est soutenu par deux palier, sur lequel est interposé un coussinet ou bague de frottement, le contact est constamment lubrifié par bain d'huile, qui est refroidie par un système de refroidissement à eau.

2.3.5. La butée hydraulique :

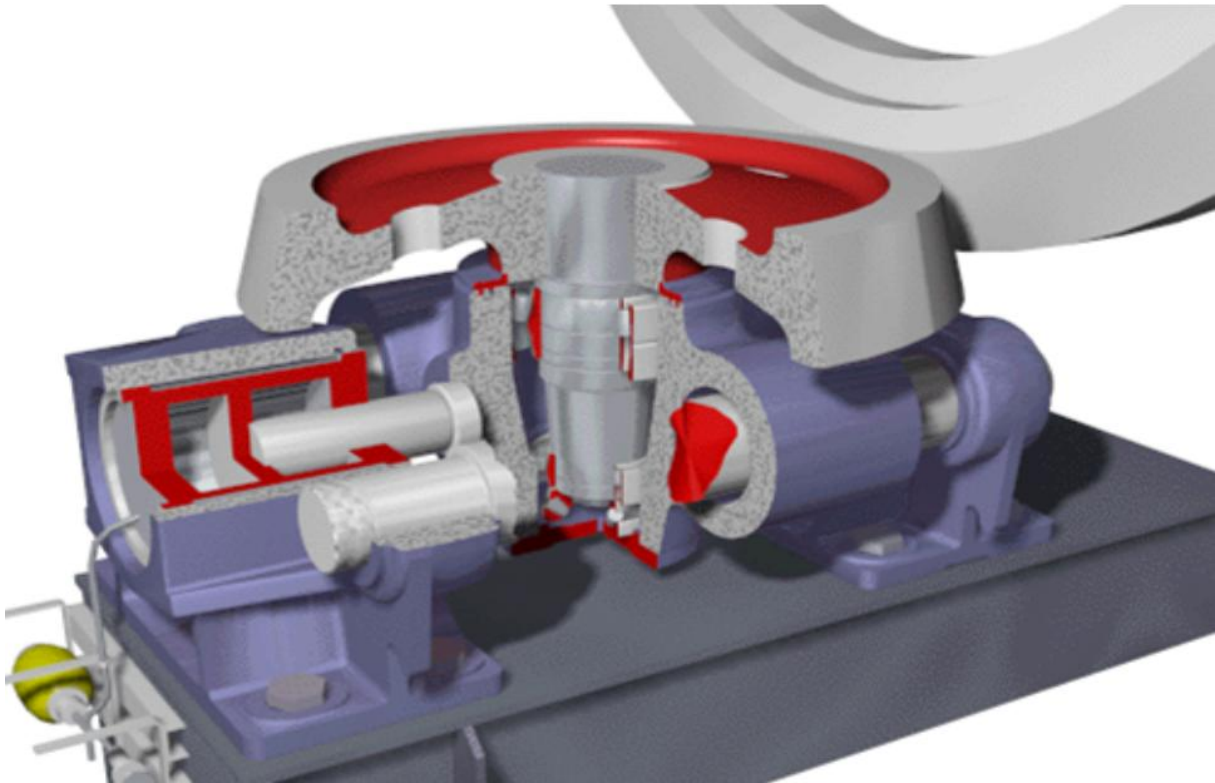


Figure 20 : Butée hydraulique

La butée hydraulique est un ensemble vérin hydraulique et butée, qui a pour but soit de garder la position axiale du four, soit de permettre la translation longitudinale du four.

La translation longitudinale du four est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement et une bonne durée de vie des bandages et galets. Le bandage et le galet sont toujours en contact, la translation en continue du bandage par rapport au galet permet de répartir l'usure de surface et donc d'assurer un bon état de surface et un contact optimal du galet/bandage.

Le mouvement axial du four est périodique, il est composé : d'un mouvement de montée, assuré principalement par la butée qui est entraînée par le vérin hydraulique, lequel est relié à une centrale hydraulique, sa durée nominale est quatre heures, puis d'un mouvement de descente dont la durée est huit heures.

Le déclenchement de la pompe hydraulique permet l'accumulation de débit dans le vérin, ainsi la montée de pression dans la chambre du piston augmente la force de poussé qui est transmise par le galet de poussée au bandage du four. Le four commence à translater et le galet de poussée le suit grâce au guidage sur les deux tiges. Quand la fin de course est déclenchée, la pompe est à l'arrêt, le four commence son cycle de descente pour atteindre la fin de course de descente et relancer le cycle de nouveau.

Chapitre 2 : Four rotatif de cimenterie

Les composantes de la butée :

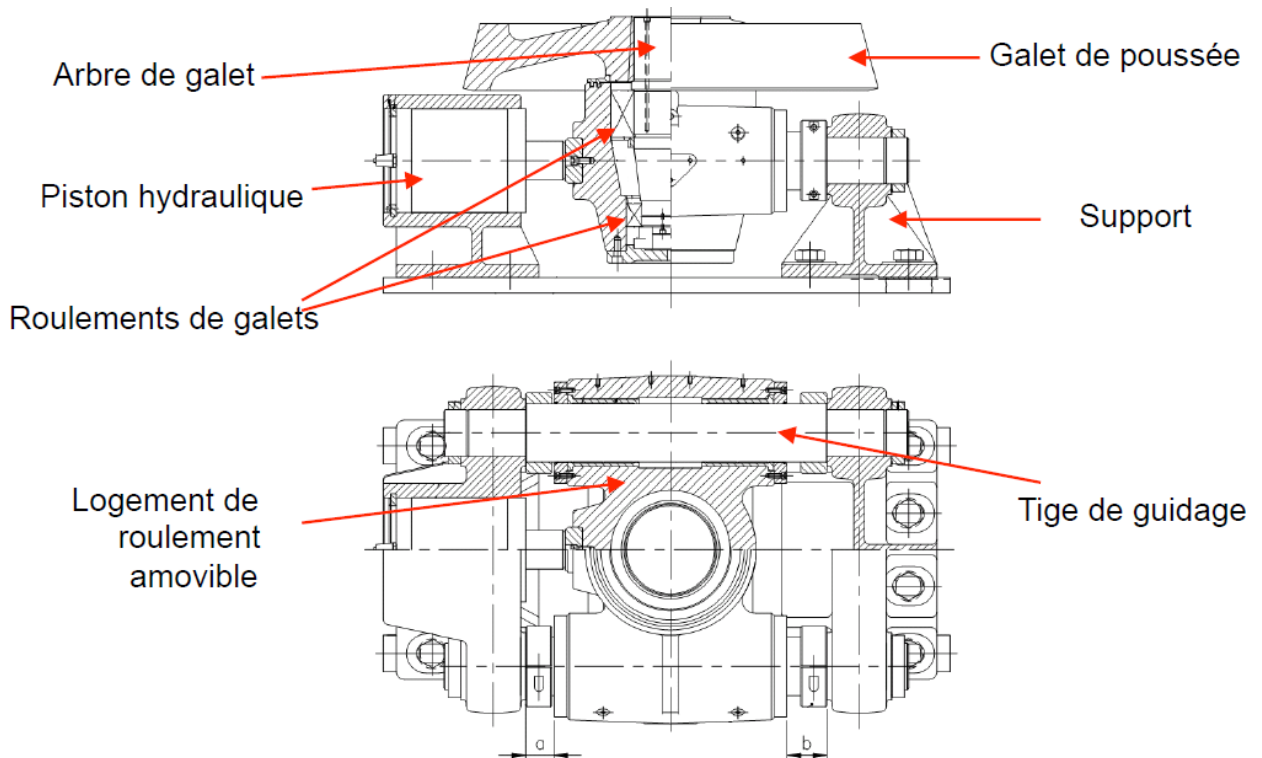


Figure 21 : Les composantes de la butée hydraulique

2.3.6. Les joints du four :

Le four est équipé de deux joints, un joint amont à l'entrée du four, et un joint aval à sa sortie.

Le rôle principal des joints du four est d'assurer l'étanchéité du four face à l'entrée d'air faux, qui peut entraîner des problèmes de qualité de la matière à cuire.

Joint amont [2]:

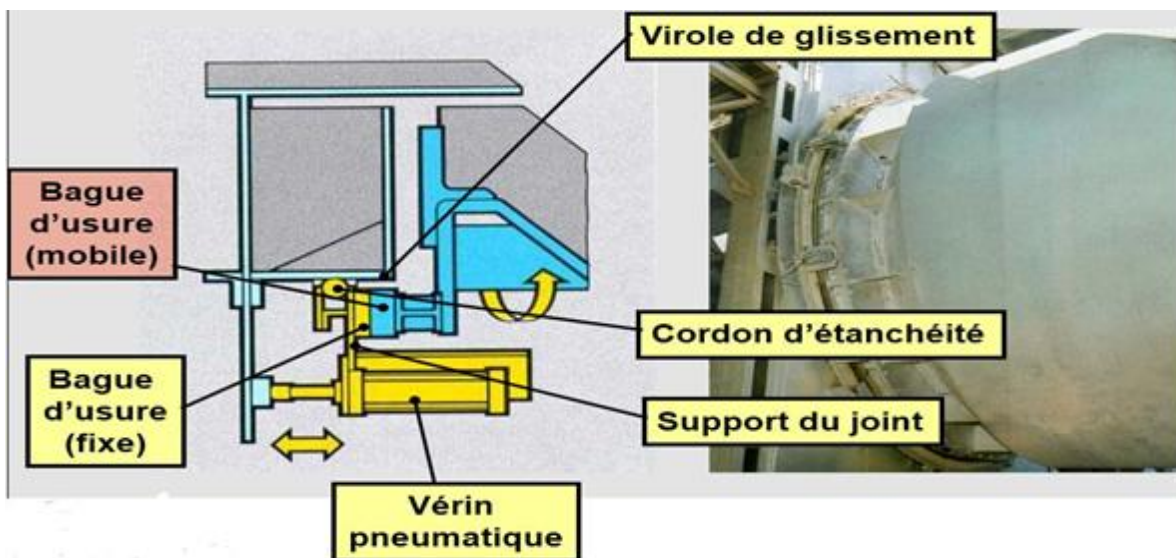


Figure 22 : Joint amont

L'alimentation en matière première se fait à partir de la partie fixe.

Joint aval [2]:

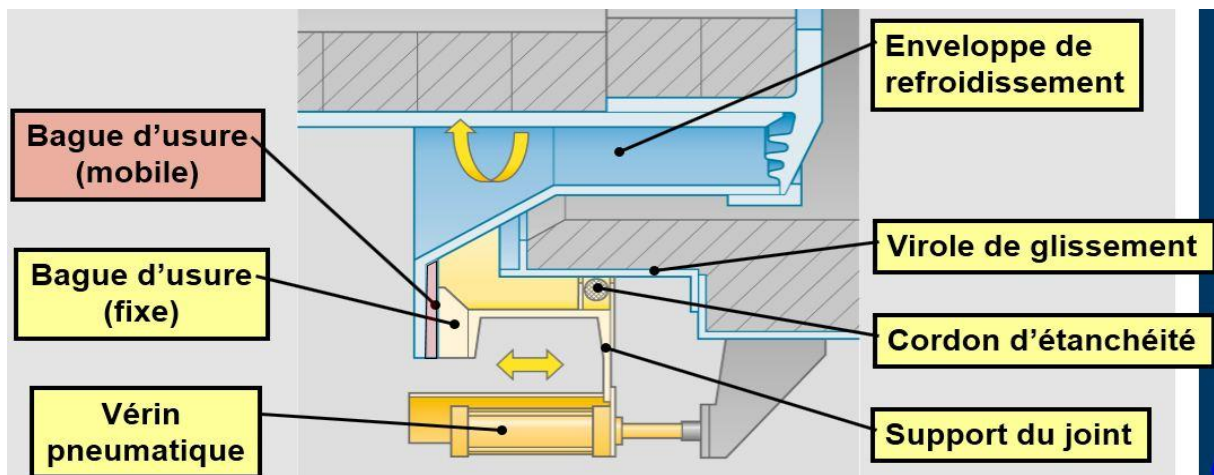


Figure 23 : Joint aval

Pendant la rotation du four, les vérins pneumatiques permettent d'assurer le contact entre les deux parties du joint, le contact se fait entre des cerces de frottement.

Le joint n'est pas supposé éliminer les fuites de matière de cuisson, mais de permettre l'étanchéité face à l'entrée d'air faux (air froid) par le biais du cordon d'étanchéité et le contact permanent.

2.3.7. Les plaques nose-ring :

Dans la sortie du four, la température de matière atteint 1450°C, il s'avère nécessaire de protéger la virole, et d'assurer le maintien axial des briques à cause de leur poids et la dilatation thermique.

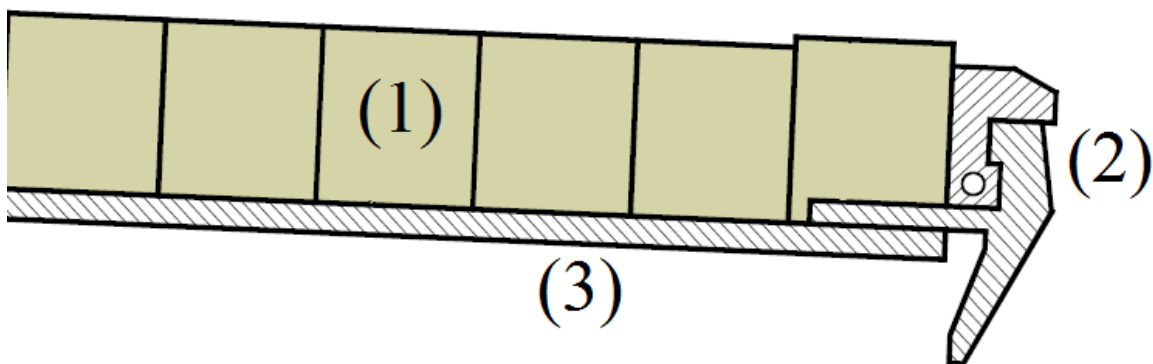


Figure 24 : Plaque nose-ring

- (1) : les briques de la sortie du four
- (2) : Plaque nose-ring
- (3) : Virole de sortie du four

- ✓ Des anneaux de retenues des briques sont associés aux plaques nose-ring pour encaisser la poussée axiale des briques.

Chapitre 3

Chapitre 3 : Etude AMDEC du four rotatif

Dans ce chapitre, nous étudierons les modes de défaillances liés aux organes du four, leurs effets et leur criticité.

Ensuite, nous détaillerons les modes de défaillances critiques et les solutions envisageables dans le but de diminuer leur criticité.

3.1. Théorie de maintenance (voir annexe[5])

3.2. Mise en place de l'AMDEC

3.2.1. L'échelle de cotation

L'analyse AMDEC nous permettra de trouver les pannes et défaillances critiques, les analyser, puis proposer des solutions à mettre en place, en se basant sur l'historique des pannes des éléments du four depuis l'année 2012, pendant laquelle le four a subi certains changements (vitesse de rotation plus importante et débit de production deux fois plus important).

Nous allons tout d'abord définir une échelle de cotation des différents critères choisis, à savoir : la fréquence, la détectabilité et la gravité des défaillances.

Indice de Gravité	Critère G
1	La défaillance n'entraîne pas d'arrêt du four et ne présente aucun risque
2	La défaillance entraîne un arrêt d'une heure, ou un risque minimal
3	La défaillance entraîne deux heures d'arrêt, ou un risque moyen
4	La défaillance entraîne trois heures ou plus d'arrêt, ou un risque élevé
Indice de Fréquence	Critère F
1	Une défaillance jamais apparue à HOLCIM Fès
2	Une défaillance ayant apparue une seule fois depuis 2012
3	Une défaillance ayant apparue deux fois depuis 2012
4	Une défaillance ayant apparue trois fois ou plus depuis 2012
Indice de la non-Détection	Critère D
1	La défaillance est détectable par les capteurs
2	La défaillance est détectable à l'œil nu par le personnel
3	La défaillance est détectable par le visiteur
4	La défaillance nécessite un arrêt pour être détecté

Tableau 4 : Tableau des trois indices G, F, D

3.2.2. Tableau d'AMDEC

Chapitre 3 : Etude AMDEC du four rotatif

Elément	Mode de défaillance	Causes	Effets	F	G	D	C
Moteur électrique	Couple insuffisant	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Défauts internes ✓ Contrôle/réglage ✓ Charge excessive 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Vitesse de rotation du four faible. ⇒ Diminution de production. ⇒ Risque de colmatage. 	1	3	2	6
Réducteur	Diminution de la viscosité d'huile	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Température d'huile élevée 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Inefficacité de lubrification. ⇒ Usure dentures engrenage. ⇒ Mauvais rendement en puissance du réducteur. 	4	1	1	4
	Usure des dentures	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lubrification insuffisante 	Diminution du rendement en puissance	1	1	3	3
Pignon	Usure des dentures	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lubrification défaillante. ✓ Entraxe déréglé. ✓ Désalignement denture pignon/couronne. 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Résistance affaiblie des dentures. ⇒ Durée de vie diminuée. ⇒ Rendement en puissance diminuée. ⇒ Vibration. 	3	2	1	6
Couronne	Usure des dentures	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lubrification défaillante. ✓ Entraxe déréglé. ✓ Désalignement denture pignon/couronne. 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Résistance affaiblie des dentures. ⇒ Durée de vie diminuée. ⇒ Rendement en puissance diminuée. ⇒ Vibration. 	3	2	1	6
Bandage	Fissuration	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mauvais contact bandage/galet. ✓ Usure excessif. ✓ Bandage oscillant. 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Affaiblissement de résistance. ⇒ Rupture du bandage. 	1	3	3	9
	Glissement incorrecte négatif	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmentation de température virole. 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Déformation permanente de la virole. ⇒ Dégradation des briques réfractaires. 	3	4	3	36

Chapitre 3 : Etude AMDEC du four rotatif

		✓ Mauvais suivi de démarrage à froid.					
	Glissement incorrecte positif	✓ Plaques compensations insuffisantes. ✓ Augmentation de température de bandage.	⇒ Ovalisation de la virole. ⇒ détérioration brique. ⇒ point chaud virole	3	4	3	36
	Bandage oscillant	✓ Cylindricité intérieure du bandage incorrecte. ✓ Jeu excessif bandage/virole.	⇒ Pression surfacique excessive. ⇒ Usure de surface. ⇒ Fissuration bandage et galet.	1	3	3	9
	Usure des plaques de compensations	✓ Frottement de glissement.	⇒ Augmentation du jeu	1	2	3	6
	Rupture des blocs de poussée	✓ Fissuration ✓ Oscillation du bandage	⇒ Détachement du bandage	1	3	3	9
	Usure des cerces du bandage	✓ Oscillation du bandage	⇒ Oscillation plus importante	2	1	3	6
Galet	Rupture fragile	✓ Fatigue-effet Vilebrequin. ✓ Flexion rotative. ✓ Charge excessive	⇒ Résistance affaiblie ⇒ Rupture ⇒ diminution de la durée de vie	2	3	4	24
	Flexion excessive	✓ Charge élevée. ✓ Effet vilebrequin. ✓ Bandage oscillant	⇒ Risque de rupture élevée. ⇒ Fissuration	2	4	4	32
	Température élevée au palier	✓ Température virole élevée. ✓ Refroidissement inefficace. ✓ Lubrification insuffisante. ✓ Frottement axial/radial	⇒ Dégradation du coussinet. ⇒ Microsoudure ou soudure entre coussinet et l'arbre.	2	4	1	8
	Inclinaison axe galet/axe bandage	✓ Mauvais réglage. ✓ Oscillation du bandage	⇒ Surcharge au niveau de la surface de contact galet/bandage	1	2	3	6

Chapitre 3 : Etude AMDEC du four rotatif

	Cylindricité	✓ Usure non homogène	⇒ Usure des surfaces de contact galet/bandage à cause de la charge surfacique excessive	1	2	3	6
	Ecaillage de la surface du galet	✓ Dépassement de la durée de vie	⇒ Risque d'endommagement du bandage	1	2	2	4
		✓ Pression d'Hertz excessive	⇒ Risque d'endommagement du bandage	1	2	2	4
Joint amont	Etanchéité insuffisante	✓ Usure des cerces.	⇒ Entrée de l'air faux dans le four.	4	4	2	32
		✓ Cordon d'étanchéité	⇒ Entrée de l'air faux dans le four.	2	2	3	12
		✓ Problème dans le vérin	⇒ Ouverture du joint	2	2	2	8
		✓ Pression insuffisante ✓ Problème de circuit d'air comprimé	⇒ Entrée de l'air faux dans le four	1	2	1	2
Joint aval	Etanchéité insuffisante	✓ Usure des cerces.	⇒ Entrée de l'air faux dans le four.	4	4	2	32
		✓ Cordon d'étanchéité	⇒ Entrée de l'air faux dans le four.	2	2	3	12
		✓ Problème dans le vérin	⇒ Ouverture du joint	2	2	2	8
		✓ Pression insuffisante ✓ Problème de circuit d'air comprimé	⇒ Entrée de l'air faux dans le four	1	2	1	2
Virole	Déformation	✓ Tâche rouge ✓ Ovalisation ✓ flexion du four ✓ température non uniforme ✓ chute des briques ✓ croûtage	⇒ Fissure galet-flexion arbre galet-charge excessive sur galet-chute/fissuration des briques. ⇒ Faux rond sur la couronne.	2	4	3	24
	Ovalisation	✓ Jeu relatif excessif	⇒ Damage des briques. ⇒ Fissuration longitudinale. ⇒ Endommagement virole.	2	4	3	24

Chapitre 3 : Etude AMDEC du four rotatif

	Fissuration circulaire	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Endommagement de la soudure de transition entre deux épaisseurs différentes de la virole. ✓ Mauvais alignement de l'axe du four. ✓ Température élevée virole. ✓ Corrosion. ✓ variation brusque d'épaisseur. ✓ Mauvaise qualité soudure. 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Risque de rupture de la virole. ⇒ Fuite de matière à très haute température. 	2	4	3	24
	Fissuration longitudinale	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Soudure des blocs de fixation du bandage. ✓ Grande ovalisation. ✓ Charge excessive sur le bandage. ✓ Température élevée de la virole 	⇒ Fissuration et diminution de la durée de vie des briques	2	3	3	18
	Déviaton de l'axe	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mauvais réglage de position galet. ✓ Déformation plastique 	⇒ Problème de descente du four	1	2	3	6
	Effet vilebrequin	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Point chaud ✓ Vilebrequin de température 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Flexion importante de l'arbre du galet ⇒ Risque de rupture du galet 	2	4	3	24
Les briques	Usure des briques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ovalisation. ✓ Déformation de la virole. 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Apparition de points chauds. ⇒ chute des briques. 	3	2	2	12
	Chute des briques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Choc thermique 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Apparition de points chauds. ⇒ Effet vilebrequin 	4	4	2	32
Butée hydraulique	Rupture des vis	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Surpression ✓ Surcharge du four ✓ Désalignement de l'axe du four ✓ Fatigue des vis 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Perte de maintien en position de la butée ⇒ Risque de retour brusque du four 	4	3	4	48
	Surpression	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fatigue des vis 	⇒ Risque de rupture des vis à long terme	3	2	1	6

Chapitre 3 : Etude AMDEC du four rotatif

	Chue de pression de descente	✓ Pressostat défaillant	⇒ Temps d'attente supplémentaire en fin de course	3	1	1	3
	Blocage en descente	✓ Alignement du four incorrect	⇒ Usure des bandages et galets à long terme	3	1	2	6
Plaques nose-ring	Usure des plaques	✓ Abrasion à haute température à cause du flux du clinker	⇒ Perte du maintien des briques réfractaires	4	2	4	32

Tableau 4 : Tableau d'AMDEC

3.2.3. Calcul de criticité

Nous allons utiliser la méthode ABC pour déterminer le seuil de criticité, à partir de la détermination de la classe A en traçant le diagramme ABC.

Nous allons trier les modes de défaillances par ordre décroissant selon leur note de criticité, puis calculer le cumul de criticité pour chaque défaillance qui sera représentée par un nombre de 1 à 40 qui est le nombre total des défaillances traitées.

<i>N° de défaillance</i>	<i>Cumul de criticité</i>	<i>Pourcentage cumulé</i>
1	48	8,318890815
2	84	14,55805893
3	120	20,79722704
4	156	27,03639515
5	188	32,58232236
6	220	38,12824957
7	252	43,67417678
8	284	49,22010399
9	316	54,7660312
10	340	58,9254766
11	364	63,08492201
12	388	67,24436742
13	400	69,32409012
14	412	71,40381282
15	424	73,48353553
16	436	75,56325823
17	445	77,12305026
18	454	78,68284229
19	463	80,24263432
20	471	81,62911612
21	479	83,01559792

Chapitre 3 : Etude AMDEC du four rotatif

22	487	84,40207972
23	495	85,78856153
24	501	86,82842288
25	507	87,86828423
26	513	88,90814558
27	519	89,94800693
28	525	90,98786828
29	531	92,02772964
30	537	93,06759099
31	543	94,10745234
32	549	95,14731369
33	555	96,18717504
34	559	96,88041594
35	563	97,57365685
36	567	98,26689775
37	570	98,78682842
38	573	99,3067591
39	575	99,65337955
40	577	100

Tableau 5: Criticités cumulées

✓ Nous allons tracer le diagramme ABC :

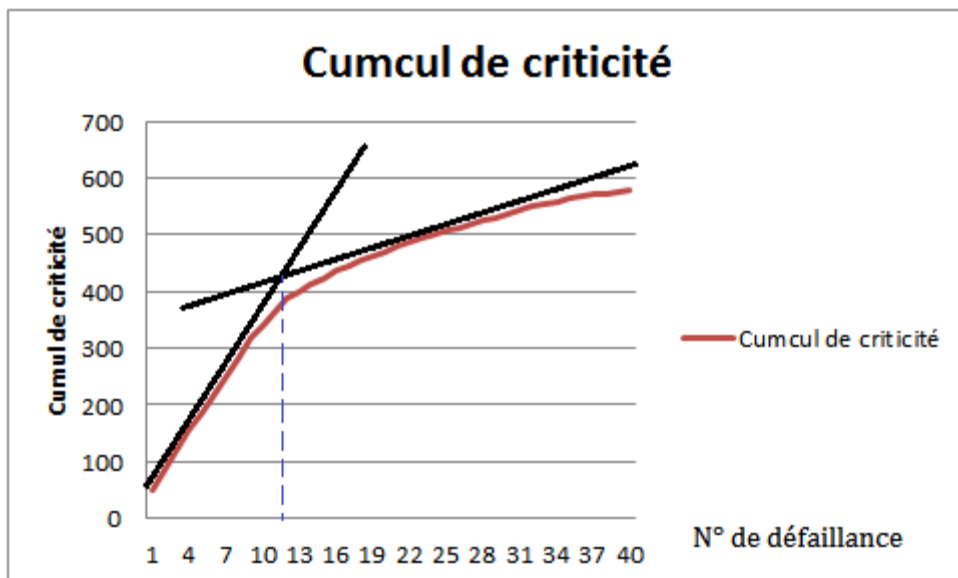


Figure 25: Diagramme ABC des criticités

Chapitre 3 : Etude AMDEC du four rotatif

Le traçage des pentes permet de repérer la partie A du diagramme, et d'identifier le seuil de criticité. On remarque que la partie A est l'ensemble des défaillances de 1 à 12, c'est-à-dire, les défaillances dont la criticité est supérieure ou égale à 24.

Notre seuil de criticité est alors 24.

⇒ **Conclusion**

En guise de conclusion de cette analyse, la butée hydraulique est le siège des défaillances majeur en particulier les boulons de fixation. Dans la suite une étude approfondie de cet élément est indispensable.

Dans la partie suivante nous allons étudier les problèmes liés à la butée hydraulique afin de diminuer leur criticité.

Chapitre 4

Chapitre 4 : Calcul et vérification des éléments de la butée hydraulique

Dans cette partie nous allons élaborer un calcul de vérification des éléments constituant la butée hydraulique.

Nous allons commencer par une modélisation afin de calculer les efforts et les réactions aux supports pour en déduire les contraintes dans les vis et enfin conclure quant à leur résistance et la nécessité de redimensionnement.

4.1. Introduction :

Dans cette partie, nous allons nous focaliser sur les modes de défaillances critiques afin de minimiser leur criticité, soit en diminuant la probabilité d'occurrence et leur gravité, ou en améliorant leur détectabilité.

4.2. Description du problème :

Le four rotatif admet une translation périodique selon son axe, celle-ci a pour rôle de répartir l'usure de ses composants, notamment l'usure de la couronne et le pignon, et le bandage et les galets.

La course de cette translation est de 40 mm, à savoir une durée de 4 heures pendant la montée et 8 heures pendant la descente.

La montée est assurée par la butée hydraulique, la descente est basée sur la projection du poids du four sur son axe puisque celui-ci est incliné par rapport à l'horizontal de 3,5%.

- ✚ Dans cette partie, nous allons traiter le mode de défaillance critique lié à la butée hydraulique, pour ce faire, on va appliquer un outil d'analyse QOOQCP à savoir :

Le QOOQCP c'est une technique de recherche d'informations sur un problème et notamment sur ses causes. Elle sert à identifier le problème dans son ensemble à partir de 6 questions principales :

Qui ? Quoi ? Où ? Quand ? Combien ? Pourquoi ?

Le QOOQCP permet d'avoir une idée sur toutes les causes du problème, des informations suffisantes pour déterminer avec exactitude quelle est la cause principale. Ces informations sont souvent basées sur des observations, des faits que l'on consigne au cours d'enquêtes. Cela permet d'identifier les aspects essentiels du problème.

⇒ **Qui ?**

Qui est concerné ?

Holcim Fès.

Qui est intéressé par le résultat ?

Holcim Fès, service de maintenance mécanique.

⇒ **Quoi ?**

De quoi s'agit-il ?

Traiter le mode de défaillance critique lié à la butée hydraulique entraînant l'arrêt de la montée du four et des risques sur la sécurité, lesquels résident dans le détachement de la butée et éventuellement sa chute (Cas de HOLCIM Oujda), en plus des arrêts de production.

Quel est l'état actuel de la situation ?

La rupture répétitive des boulons de la butée hydraulique.

Quels sont les conséquences ?

Perte de maintien en position de la butée, risque de retour brusque du four.

⇒ **Où ?**

Où cela se produit-il ?

Au niveau de la butée hydraulique du four rotatif de Holcim.

⇒ **Quand ?**

Depuis quand le problème est apparu ?

Depuis 2012.

⇒ Comment?

Comment ce problème se produit ?

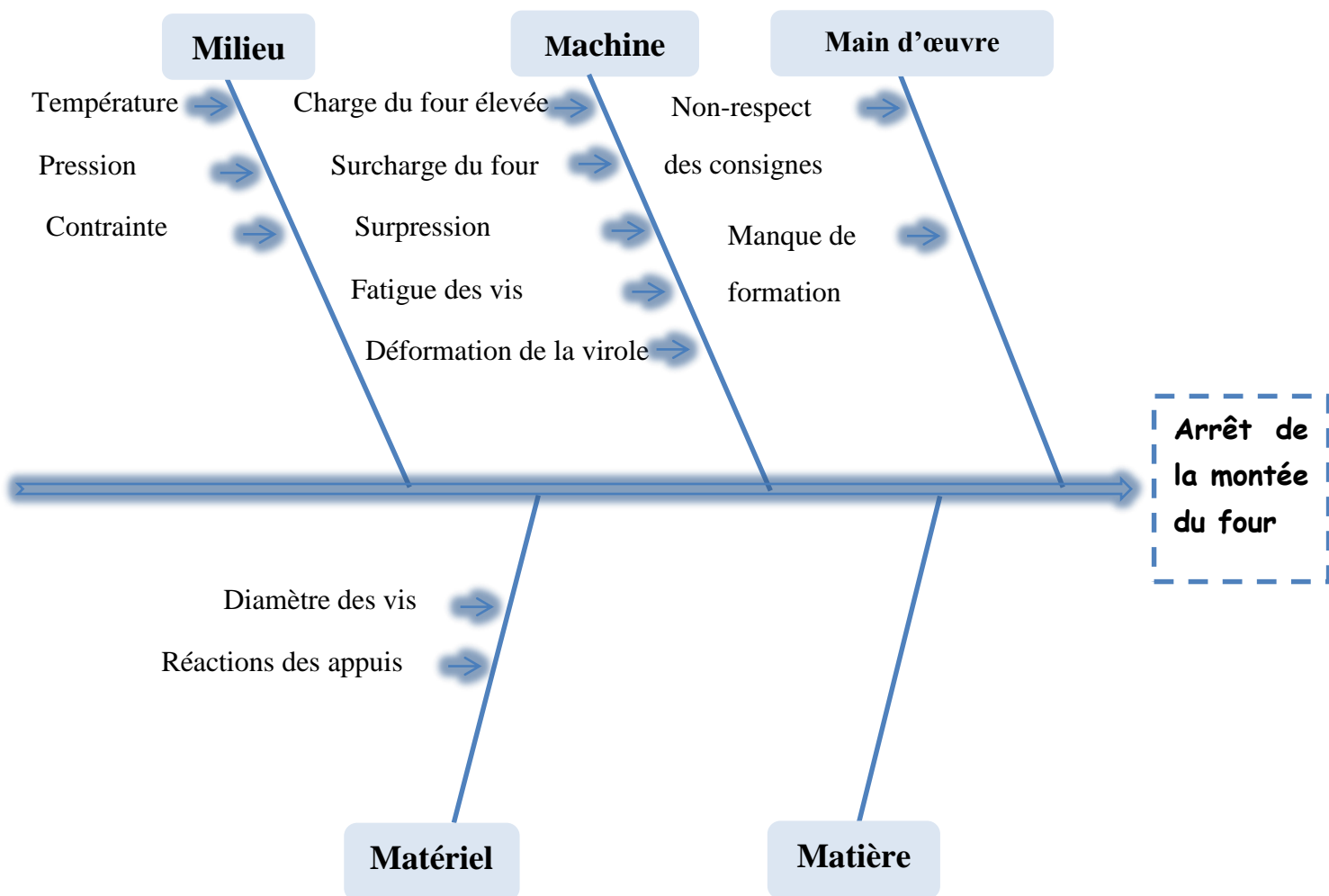
La butée contient des vis qui subissent des ruptures répétitives lorsque la pression de la centrale hydraulique s'approche de 200 bars, alors que la pression de travail est de 160bars à 170bars c'est-à-dire qu'elle atteint une pression de +30 bars.

⇒ Pourquoi?

Pourquoi le problème doit être résolu ?

- Performer la fiabilité de la butée.
- Garder la position axiale du four, soit de permettre la translation longitudinale du four.
- Assurer la montée du four.

✚ La centrale hydraulique subit une augmentation de pression qui atteint +30bar, plusieurs causes sont possibles. On va présenter ces causes sous forme d'un diagramme de causes et effets (Ishikawa), classant les catégories de causes inventoriées selon la méthode des 5M (matière, main d'œuvre, méthode, matériel, milieu). Il permet d'identifier les causes possibles d'un effet constaté et donc de déterminer les moyens pour y remédier.



✚ Analyse des causes :

Charge de four très élevée : le four devrait produire environ 180t/h de clinker, mais, il atteint chez HOLLCIM Fès les 190t/h, ceci constitue alors une surcharge, mais aussi un risque de colmatage plus élevé, lesquels se répercutent sur la butée hydraulique par une contrainte plus élevée, et demande plus de pression pour guider le four en translation.

Déformation de virole : le profil non homogène de virole (à causes des points chauds et des contraintes thermiques variables) lié aux déformations permanentes subies par la virole du four change la direction de l'axe, et même sa forme, ceci entraîne des charges supplémentaires dont la réaction s'oppose à la montée du four et éventuellement sa descente.

L'alignement du four : les galets admettent des mouvements de translation de chaque paliers, afin de redresser l'axe du four, corriger le contact galet/bandage ou assurer un compromis des deux corrections, afin d'assurer un contact optimal et d'atténuer l'effet de la déviation de l'axe du four sur la surcharge des paliers, la suppression de ce problème est possible en agissant sur le braquage des galets, mais, cette solution peut causer d'autres problèmes liés à l'augmentation de la température dans les paliers des galets.

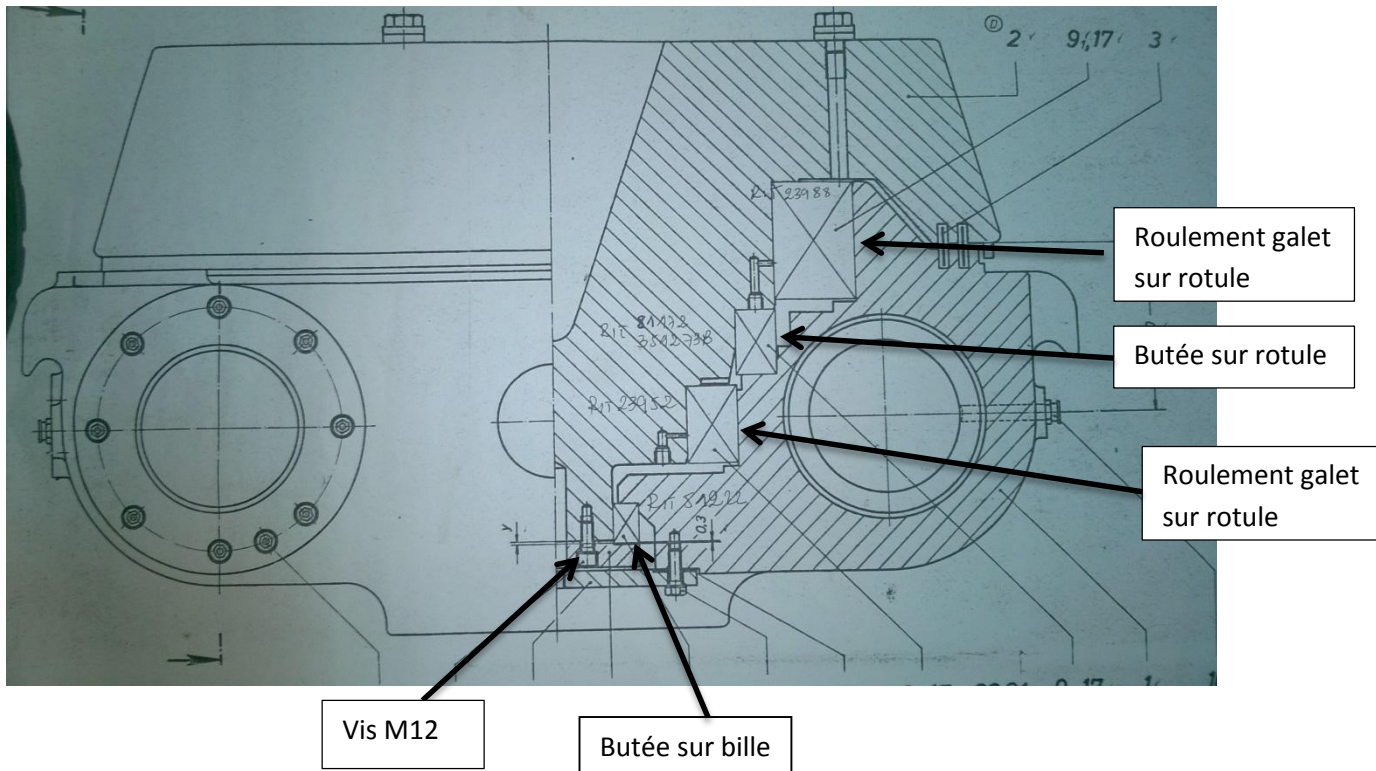


Figure 26 : Plan de butée hydraulique

La butée contient 5 vis M12, de longueur 35mm, ils subissent des ruptures répétitives lorsque la pression de la centrale hydraulique s'approche de 200bar, alors que la pression de travail est de 160bar à 170bar [2].

Nous allons mener une étude RDM afin de relever les contraintes sur les vis et conclure quant au coefficient de sécurité.

4.3. Modélisation de l'arbre de butée

Le guidage de l'arbre de la butée est assuré par plusieurs types de roulement :

Roulement galet sur rotule



⇒ Ils admettent de fortes charges radiales et une charge axiale presque nul, l'angle de rotulage est compris entre 1° et 7°.

Il en découle le torseur des efforts lié au roulement : $\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Y & 0 \\ Z & 0 \end{Bmatrix}$

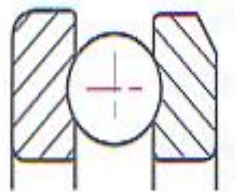
Butée à rotule



⇒ Elle admet uniquement des charges axiales, et un angle de rotulage de 1.5° à 2.5°
Il en découle le torseur des efforts :

$\begin{Bmatrix} X & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & M \end{Bmatrix}$, M peut être négligeable.

Butée sur bille



⇒ Supporte uniquement des charges axiales plus faibles que celles d'une butée à rotule, et n'admet pas d'angle de rotulage.

Il en découle le torseur des efforts : $\begin{Bmatrix} X & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & M \end{Bmatrix}$, avec le moment suivant z plus grand que celui de butée à rotule.

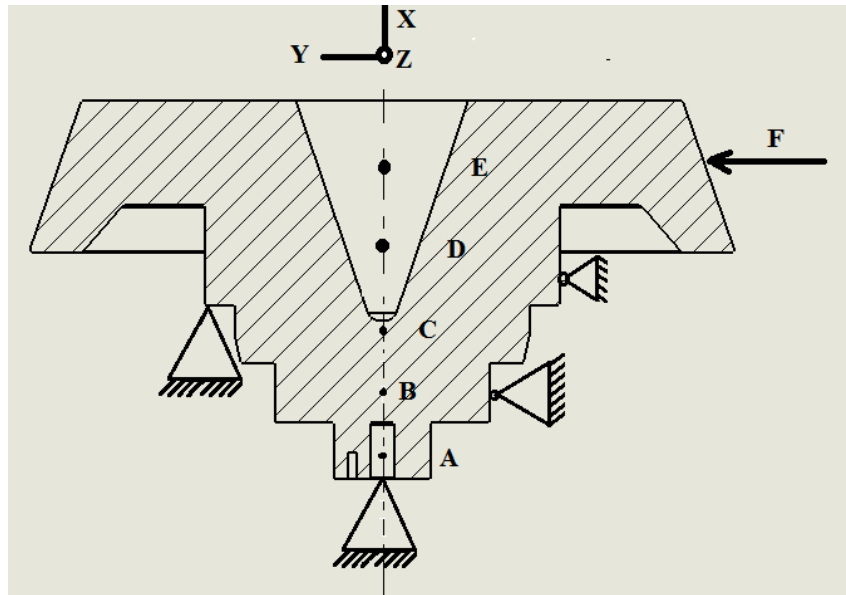


Figure 27 : Modélisation des appuis de butée

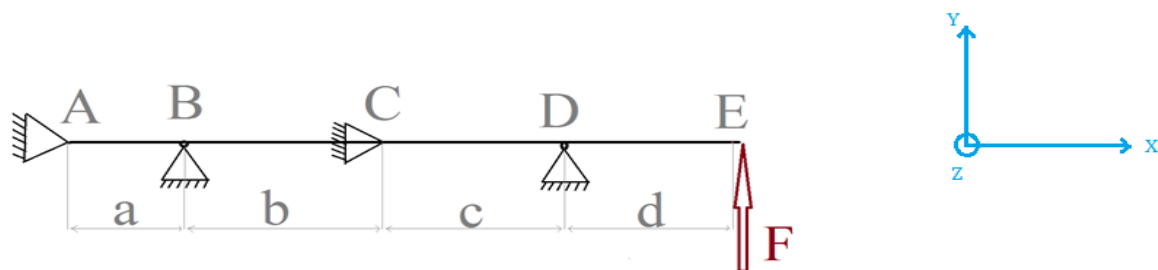


Figure 28: Modélisation de l'arbre de butée

Les cotes de l'arbre de butée seront déduites à partir de la maquette numérique de l'arbre de butée sur CATIA V5.

Modélisation des appuis :

- D : Roulement galet sur rotule
- C : Butée à rotule
- B : Roulement galet sur rotule
- A : Butée sur bille + Réactions des vis.

On nomme les surfaces de butée : A, B, C, D et E contenant respectivement les points A, B, C, D et E.

✓ Les torseurs des efforts :

a- Les torseurs des efforts :

$$\{A\}_A = \begin{Bmatrix} Xa & 0 \\ Ya & 0 \\ 0 & Mza \end{Bmatrix}_A \quad ; \quad \{B\}_B = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Yb & 0 \\ Zb & 0 \end{Bmatrix}_B \quad ; \quad \{C\}_C = \begin{Bmatrix} Xc & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & Mzc \end{Bmatrix}_C$$

$$\{D\}_D = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Yd & 0 \\ Zd & 0 \end{Bmatrix}_D \quad ; \quad \{F\}_E = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ F & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_E \quad : \text{ Force extérieure}$$

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} -P & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} \quad : \text{ Poids de l'arbre}$$

b- Calcul des réactions des supports :

✓ Application des torseurs en A :

$$M_{B/A} = (M_B)_B + (\overline{AB}) \wedge (Y_b \vec{y} + Z_b \vec{z}) \Rightarrow (M_B)_A = 0 + a \vec{x} \wedge (Y_b \vec{y} + Z_b \vec{z})$$

$$(M_B)_A = a \cdot Y_b \vec{z} - a \cdot Z_b \vec{y}$$

$$\text{Donc: } \{B\}_A = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Yb & -a \cdot Zb \\ Zb & a \cdot Yb \end{Bmatrix}_A$$

De même:

$$\{C\}_A = \begin{Bmatrix} Xc & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & Mzc \end{Bmatrix}_A \quad ; \quad \{D\}_A = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Yd & -(a+b+c)Zd \\ Zd & (a+b+c)Yd \end{Bmatrix}_A$$

$$\{F\}_A = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ F & 0 \\ 0 & (a+b+c+d)F \end{Bmatrix}_A \quad ; \quad \{P\} = \begin{Bmatrix} -P & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} \quad : \text{ Poids de l'arbre}$$

✓ Application du PFS:

$$\Sigma \vec{F} = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} Xa + Xc - P = 0 & (1) \\ Yd + Yb + Ya + F = 0 & (2) \\ Zb + Zd = 0 & (3) \end{cases}$$

$$\Sigma \vec{M} / A = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} 0 + 0 = 0 & (4) \\ -a * Zb - (a + b + c)Zd = 0 & (5) \\ Mza + a * Yb + Mzc + (a + b + c)Yd + (a + b + c + d)F = 0 & (6) \end{cases}$$

- (1) $\rightarrow Xa + Xc = P$
- (2) $\rightarrow Yd + Yb + Ya = -F$
- (3) $\rightarrow Zb = -Zd$
- (4) $\rightarrow 0 + 0 = 0$
- (5) $\rightarrow Zd = \frac{-a}{a+b+c} Zb$
- (6) $\rightarrow Mza + a * Yb + Mzc + (a + b + c)Yd + (a + b + c + d)F = 0$

Le système est hyperstatique, nous ne pouvons pas calculer les efforts aux appuis, nous allons alors modéliser notre arbre sur le logiciel CATIA, et déduire les efforts appliqués sur les vis.

Pour ce faire, nous devons calculer l'effort F appliqué sur la butée hydraulique.

Effort appliqué :

✓ Calcul de l'effort des vérins de butée :

L'effort engendré par la butée est due à la pression qu'engendre l'accumulation du débit de la pompe, cette pression est égale à 170bars en fonctionnement normal, et arrive à 200bars.

La pression subit une chute lors du passage du débit par l'étrangleur, d'une valeur approchée de 30bars. La pression dans le vérin est alors de 140bars à 170bars.

La section utile du vérin est de 122.7 cm², nous allons calculer l'effort transmis par le vérin : $F = P * S$

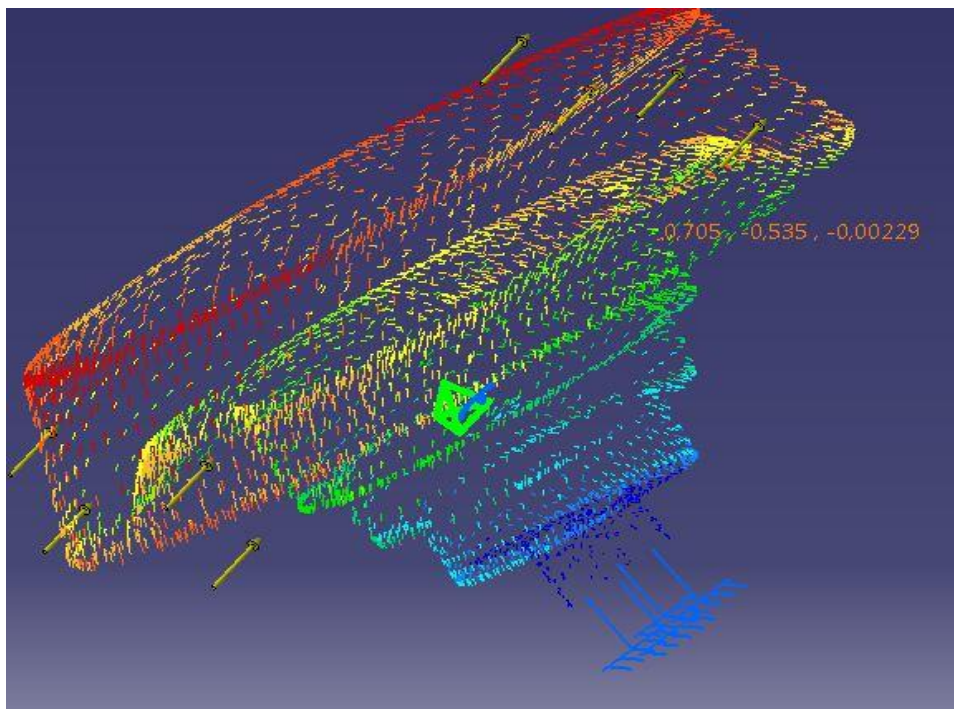
A.N. : $F_n = 140 * 10^5 * 122.7 * 10^{-4} = 171.8 \text{ KN}$ avec F_n : effort nominal

$F_{\max} = 170 * 10^5 * 122.7 * 10^{-4} = 208.6 \text{ KN}$ avec F_{\max} : effort maximal

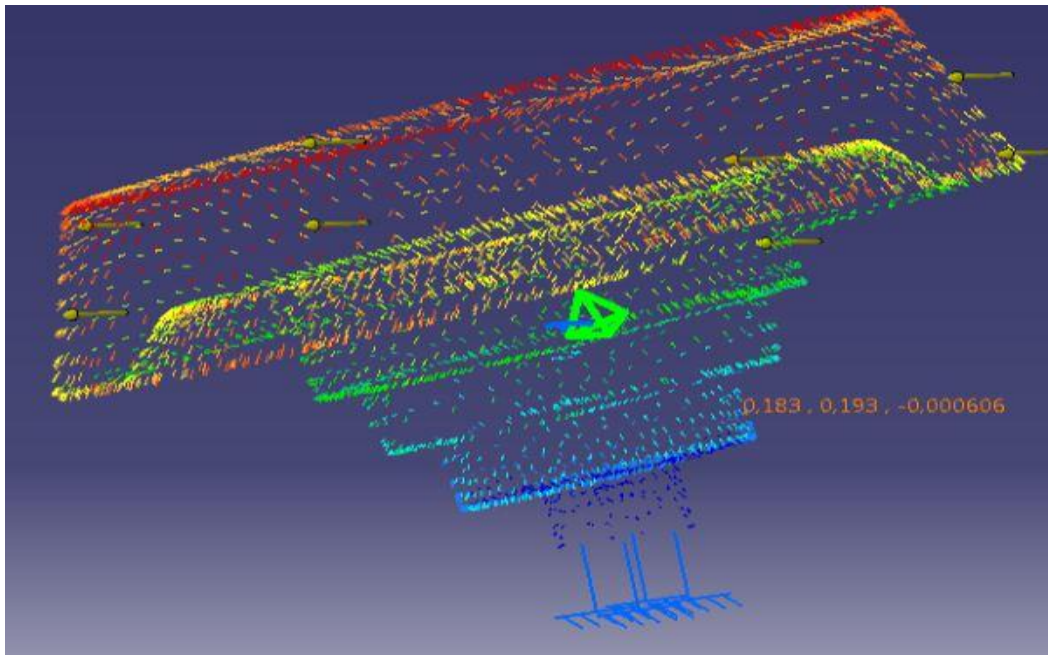
Le calcul du poids à partir de CATIA V5 donne : $P = 8,56 \text{ KN}$

Nous allons considérer l'effort maximal pour les calculs qui suivent.

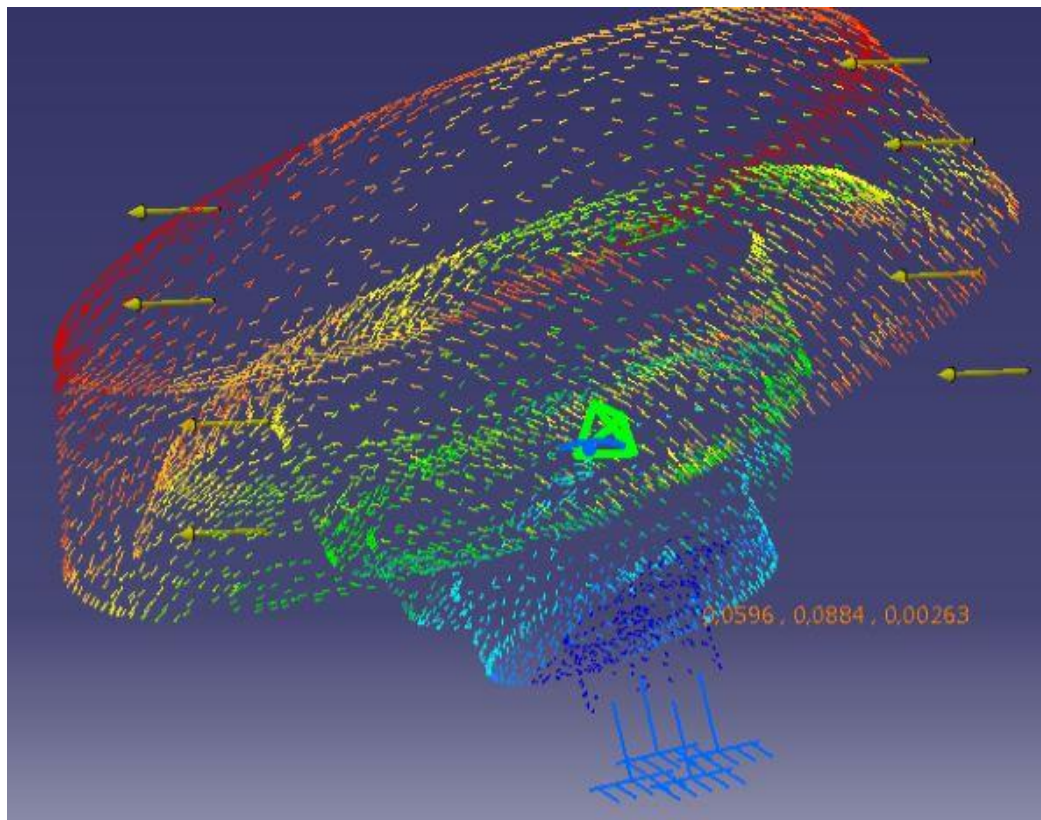
✚ Au voisinage de D, on a :



✚ Au voisinage de B, on a :



✚ Au voisinage de A, on a :



Nous relevons les flèches suivant y :

Au voisinage de D : 0.7mm

Au voisinage de B : 0.18mm

Au voisinage de A : 0.05 mm

Chapitre 4 : Calcul et vérification des éléments de la butée hydraulique

Soit les coefficients W_1 , W_2 et W_3 , qui représentent la proportion de la force F pour les paliers respectifs D, B et A.

$$\begin{cases} W_1 = \frac{0.7}{0.7+0.18+0.05} = 0.75 \\ W_2 = \frac{0.18}{0.7+0.18+0.05} = 0.19 \\ W_3 = \frac{0.05}{0.7+0.18+0.05} = 0.053 \end{cases}$$

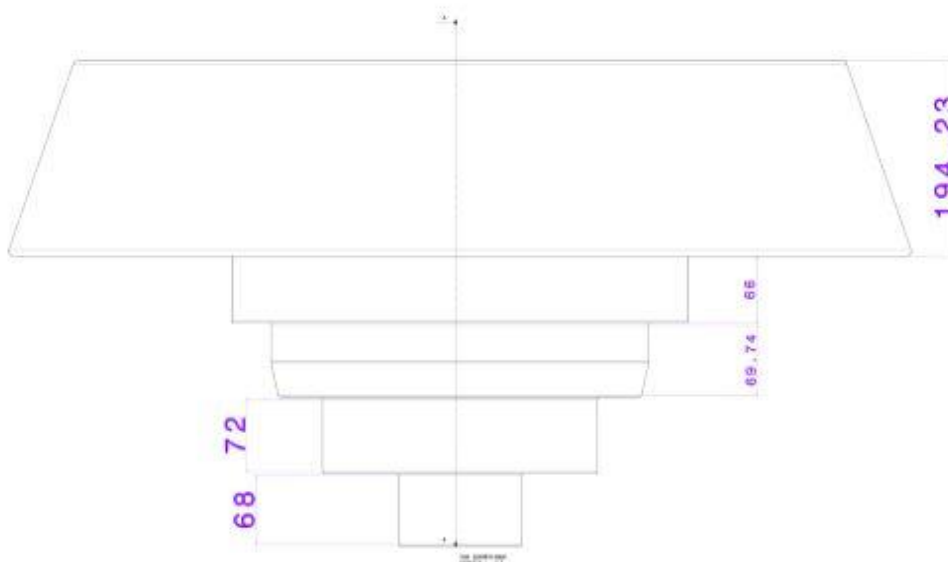
Le moment M_{zc} est prépondérant par rapport à M_{za} du fait du rôle des butées dans la conception, on néglige M_{za} devant M_{zc} .

On admet que la totalité du poids de l'arbre est supporté par la butée au point C, donc :

$$X_a = 0 \text{ et } X_c = P \text{ (puisque } X_c + P = 0 \text{)}$$

$$\text{Donc : } \begin{cases} Y_d = -F \cdot 0.7 & ; & Y_b = -F \cdot 0.18 & ; & Y_a = -F \cdot 0.12 \\ Z_b = Z_d = 0 \\ M_{zc} = -\frac{(b+c)}{2} F - d * F \end{cases}$$

On se base sur le dessin suivant pour relever les valeurs de a, b, c et d :



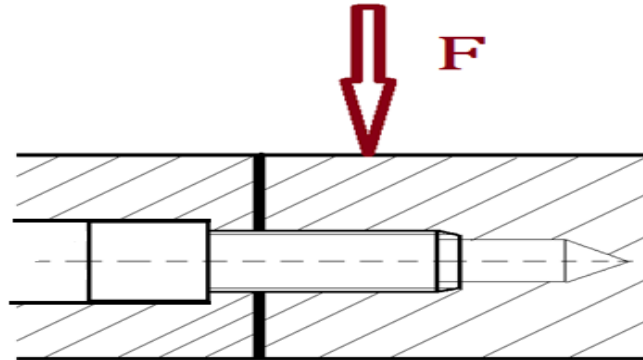
Nous déduisons les cotes : $a=70\text{mm}$, $b=71\text{mm}$, $c=68\text{mm}$, $d=130\text{mm}$

Pour en déduire en fin les réactions des supports :

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_a = 25.03 \text{ KN} \\ Z_b = 0 \\ M_{zc} = \left(-\frac{(71 + 68)}{2} * 208.6 \right) - (130 * 208.6) = -41.6 \text{ KN.m} \\ X_c = 8.56 \text{ KN} \end{array} \right.$$

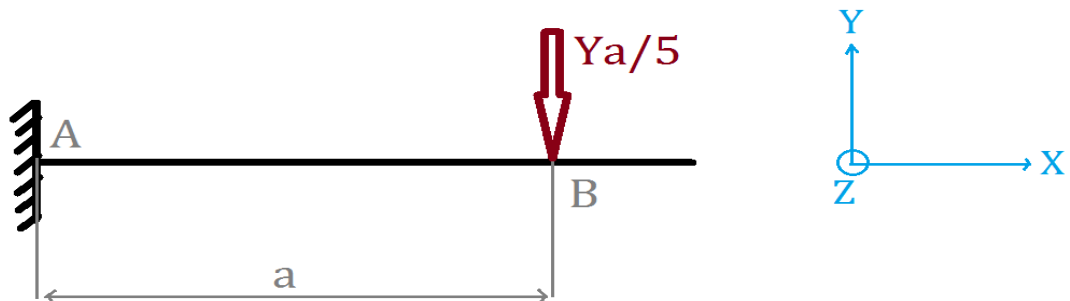
c- Calcul des contraintes sur les vis :

Nous considérons que les efforts appliqués sur la butée sur billes sont retenus par les vis.



Nous allons assimiler la vis à une poutre circulaire en porte-à-faux, subissant l'effort F qui n'est autre que $Y_a/5$ si l'on admet que chaque vis supporte une charge égale par rapport aux autres.

- ✓ Modélisation de la tige en porte-à-faux :



Avec $a = 17.5 \text{ mm}$ et $F = Y_a/5 = 2.21 \text{ KN}$

On a $\sigma_e = \sigma_f * K_{tf}$, la proportionnalité entre la force et la contrainte implique que $F_{eff} = K_{tf} * F$

Le tableau suivant nous permettra de relever la concentration de contrainte de la vis à cause des filets :

Localisation de la zone dans la vis	K_t : effet d'entaille sous chargement statique	K_f : effet d'entaille sous chargement cyclique
Raccordement entre tête et fût (lisse) de la vis	3 à 5	2 à 4
Fût (lisse) de la vis	1	1
Premier filet de la vis	3 à 4	~ 2
Filet courant de la vis	2 à 3	1.5 à 2
Premier filet sous écrou ou alésage	jusqu'à 10	4 à 8

Chapitre 4 : Calcul et vérification des éléments de la butée hydraulique

En effet, on assimile l'assemblage de la partie supérieure de la vis à un encastrement, il en découle que la concentration de contrainte due au raccord tête et fût, et le premier filet de la vis sont négligés. La concentration existante est alors celle du filet courant de la vis.

On choisit un coefficient de concentration de contrainte $K_t=2.5$

La force effective est alors : $F_{eff}=2.5*2.21=5.5$ KN

✓ Représentation de la vis sur le logiciel RDM6 :

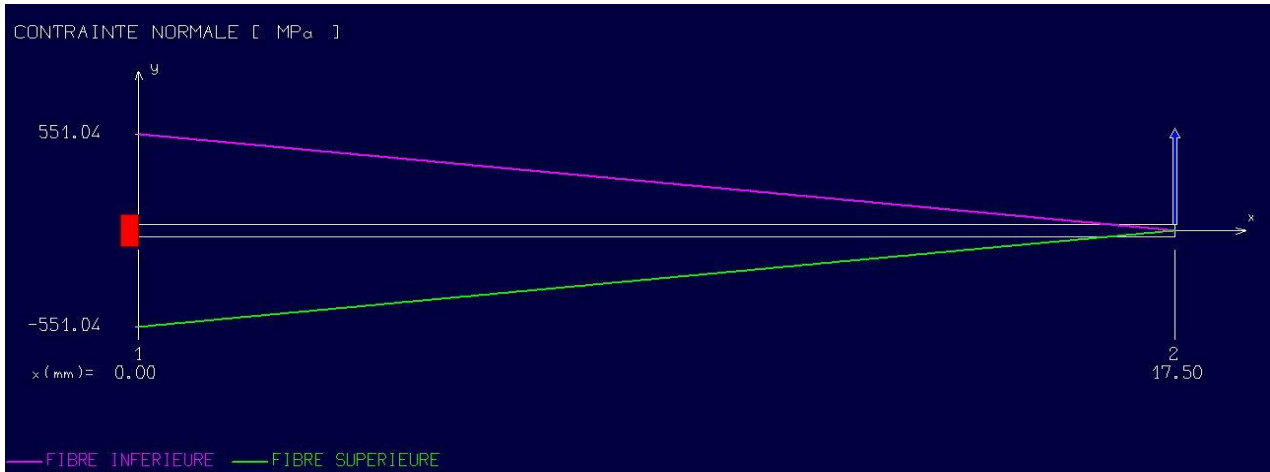


Figure: Modélisation de la vis sur le logiciel RDM6

On retient $\sigma=551$ MPa , et on a $R_e=900$ MPa ;

On déduit alors le coefficient de sécurité des vis par rapport à la limite élastique:

$$S = \frac{R_e}{\sigma} = 1.63$$

Conclusion 1 :

Le coefficient de sécurité montre que les vis résistent à un effort statique avec un coefficient de sécurité acceptable, ce qui nous mène à étudier les vis en fatigue.

d- Etude en fatigue :

La butée est animée d'un mouvement de rotation transmis par le bandage avec lequel elle est en contact, ainsi, la force appliquée sur la butée se transmet aux vis, et varie dans leurs sections sous forme d'une fonction sinusoïdale de période égale à un tour de butée.

La classe d'acier utilisé pour ces vis est 10.9 avec $R_m=1000$ MPa et $R_e=900$ MPa

La contrainte de flexion est une contrainte alternée de moyenne nulle :

Résistance à la traction (Rm)	<800MPa	800 à 1300 MPa	≥ 1300 MPa
A	0.56	0.57	0.56
B	$-1,4 \cdot 10^{-4}$	$-1,2 \cdot 10^{-4}$	$-1,4 \cdot 10^{-4}$

On a : $\sigma_D = R_m (a + b R_m)$, limite de fatigue.

Le tableau représente les valeurs de a et b pour une fatigue sous sollicitation de flexion rotative.

A.N. : $\sigma_D = 1000 (0.57 - 0.12) \rightarrow \sigma_D = 450$ MPa.

Chapitre 4 : Calcul et vérification des éléments de la butée hydraulique

La concentration de contrainte en fatigue est donnée dans le tableau des concentrations de contraintes : **Kf=1,75**

On déduit alors le facteur de sécurité des vis par rapport à la fatigue :

$$S = \frac{\sigma_D}{\sigma} = 0.81 \quad , \text{ avec : } \sigma_D = 450\text{MPa et } \sigma = 551\text{MPa}$$

e- Conclusion 2 :

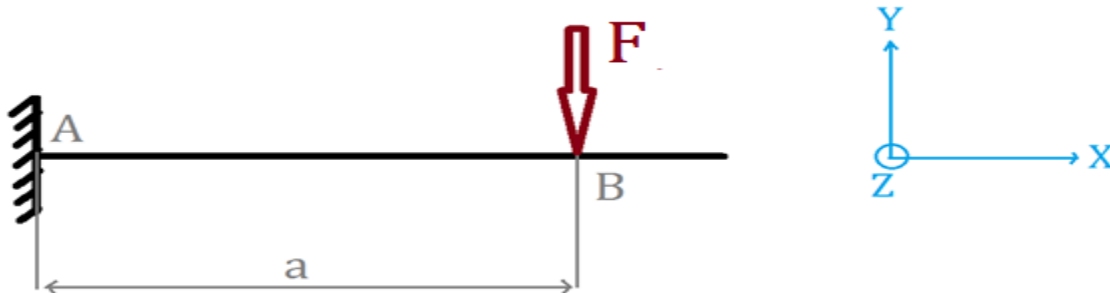
Les vis ne peuvent pas résister en fatigue.

f- Dimensionnement des vis :

Nous allons nous baser sur la résistance à la fatigue pour dimensionner les vis, en particulier sur σ_D . Notre but est d'obtenir un facteur de sécurité en fatigue supérieur ou égal à 2 afin d'éviter toute rupture des vis.

C'est-à-dire que :
$$S = \frac{\sigma_D}{\sigma} = 2 \quad , \text{ et donc : } \sigma_{\max} = \sigma_D/2 = 225\text{MPa}$$

Nous devons calculer le torseur de cohésion à l'intérieur de la vis, puis en déduire la contrainte. Nous travaillons avec la force $F=F_{\text{eff}}$, et $\sigma=225\text{MPa}$. Soit la schématisation :



✓ Le torseur de l'encastrement en A et de la force F en B :

$$\{A\}_A = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Ya & 0 \\ 0 & Ma \end{Bmatrix}_A \quad , \quad \{F\}_B = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_B$$

✓ Le torseur de l'effort en A est :

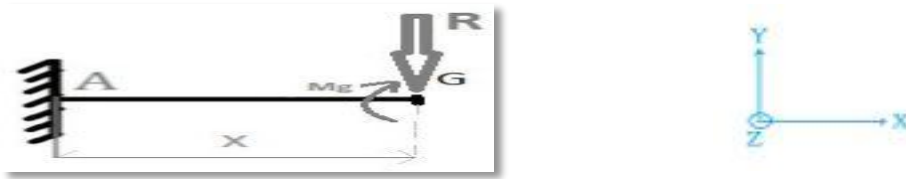
$$\{F\}_A = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & -aF \end{Bmatrix}_A$$

✓ Application du PFS en A :

$$\begin{cases} \sum \vec{F} = \vec{0} \\ \sum \vec{M} / A = \vec{0} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Y_a - F = 0 \\ M_a - aF = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Y_a = F \\ M_a = aF \end{cases}$$

Chapitre 4 : Calcul et vérification des éléments de la butée hydraulique

- ✓ Torseur de cohésion en un point G d'abscisse x :



A l'équilibre,

$$\begin{cases} \sum \vec{F} = \vec{0} \\ \sum \vec{M} / A = \vec{0} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} -R-F=0 \\ -M_G-(a-x)F=0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R=-F \\ M_G=(X-a)F \end{cases}$$

Donc:

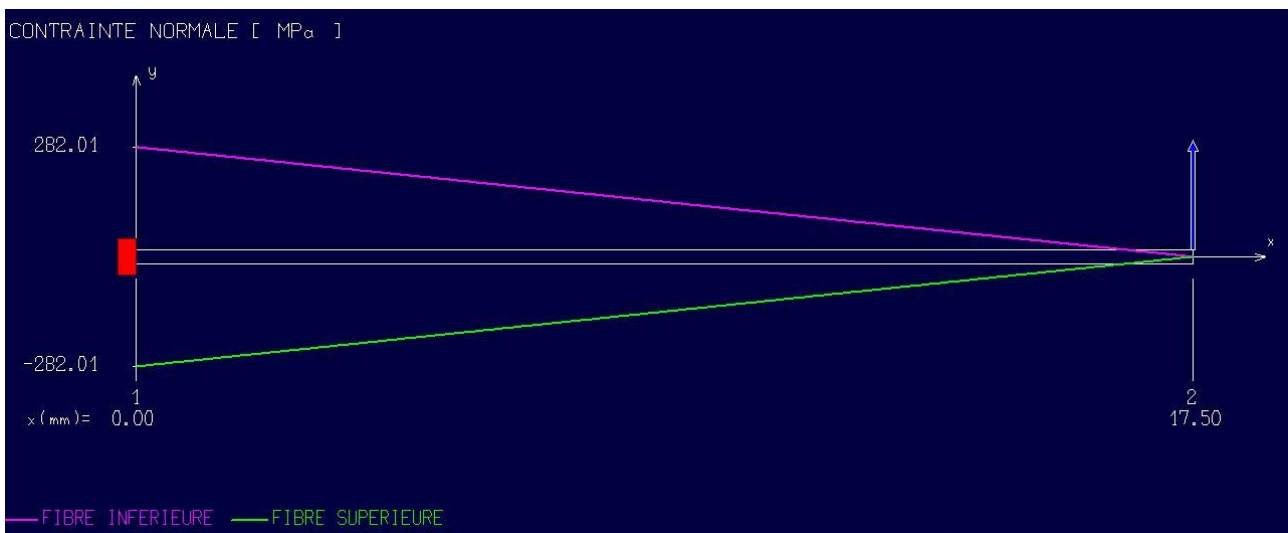
$$\{\tau\}_G = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & (X-a)F \end{Bmatrix}_G$$

On déduit les contraintes sur les vis :

$$\sigma_f = 32M_f / \pi d^3 : \text{contrainte de flexion} \rightarrow d = \sqrt[3]{32 M_f / \pi \sigma_f}$$

Pour $\sigma_f = \sigma_{max} = 225 \text{ MPa}$, $F = 2.21 * 1.75 = 3.86 \text{ KN}$ par vis ; On a : **d=14.3 mm**

- ✓ L'utilisation de 5 vis de type M15x35 pour le même type de matériau nous permettra d'éviter la rupture par fatigue.
- ✓ Vérification de la résistance en statique sous RDM6 :



On retient $\sigma = 282 \text{ MPa}$, et on a $R_e = 900 \text{ MPa}$;

On déduit alors le facteur de sécurité des vis en statique :

$$S = \frac{R_e}{\sigma} = 3.2$$

g- Conclusion

Les vis M12x35 ont :

- Un coefficient de sécurité acceptable par rapport à la limite élastique $S=1.63$, ce qui mène à dire que les vis ont une bonne tenue en statique.
- Un très faible coefficient de sécurité par rapport à la fatigue $S=0.81$, ce qui montre que les vis ne résistent plus en fatigue.

Nous n'avons pas mis l'accent sur le matériau du fait qu'on choisit le matériau le moins cher, mais nous avons mis l'accent sur la géométrie des vis ce qui nécessite leur redimensionnement.

Notre but est d'obtenir par rapport à la fatigue, un facteur de sécurité supérieur ou égale à **2** afin d'éviter toute rupture des vis. Ceci mène à diminuer la limite élastique, augmenter le diamètre des vis $d=14.3\text{mm}$, et par conséquent à avoir un facteur de sécurité acceptable $S=3.2$.

Du coup, nous avons pu atténuer la criticité de la défaillance en utilisant 5 vis de type M15x35 pour le même type de matériau.

En agissant sur la probabilité d'occurrence, nous pouvons dès lors octroyer un point de « 1 » pour la fréquence d'apparition du mode de défaillance. La nouvelle criticité est alors $C=1 \times 4 \times 3 = 12$.

Chapitre 5

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

Dans ce chapitre, nous étudierons les modes de défaillances liés aux organes du four, leurs effets et leur criticité.

Ensuite, nous détaillerons les modes de défaillances critiques et les solutions envisageables dans le but de diminuer leur criticité.

5.1. Etude de l'arbre du galet de la station 3:

La station 3 a subi une rupture de l'un de ses galets, qu'on a considéré comme critiques après notre étude AMDEC.

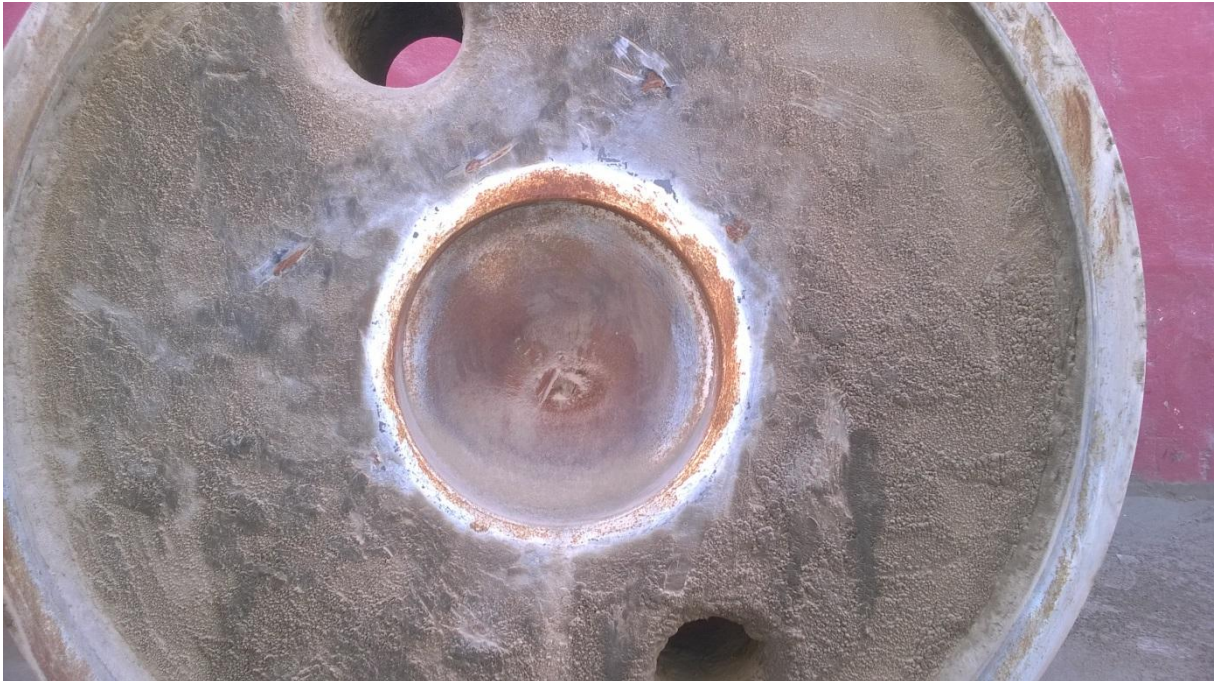


Figure 29 : Rupture d'arbre du galet

La surface de rupture contient deux zones principales :

- Une zone lisse : une fissure s'est propagée rapidement dans la section de l'arbre du galet, jusqu'à diminution de sa résistance sous la limite de rupture.
- Une zone rugueuse : cette zone n'a pas subi de rupture fragile, l'arbre a continué sa rotation jusqu'à l'arrêt du four, la fissure ne s'est pas propagée dans cette zone car la flèche de l'arbre a permis de diminuer la charge qu'il supporte.

On conclue que l'arbre a subi une rupture fragile par propagation rapide de fissure, qui est due à la fatigue.

5.1.1. Etude de résistance de l'arbre du galet

✓ Chargement de l'arbre :

La consultation des plans de génie civil a permis de relever les charges supportées par les arbres de galets. Les galets de stations 3 supportent 1110 KN pour chacun, avec une marge de +50%.

L'arbre subie une flexion rotative, qui donne lieu à une charge variable et donc la possibilité de rupture par fatigue.

Nous allons étudier la résistance de l'arbre du galet, sous chargement nominal.

✓ Matériau du galet :

34CrMo4 (35 CD4) trempé revenu, avec la limite à la rupture $R_m=920\text{MPa}$, et la limite élastique $\sigma_e=550\text{MPa}$.

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

✓ Calcul des torseurs :

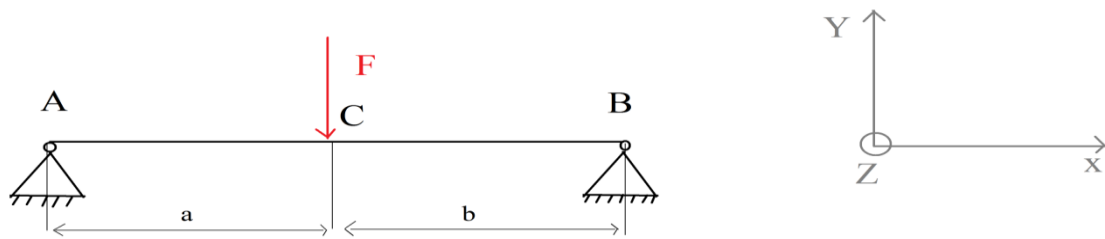


Figure 30 : Modélisation de l'arbre du galet

Notre arbre est modélisé par une poutre continue appuyé sur deux appuis A et B de type appuis simples.

On choisit de travailler dans le cas de flèche maximale, pour $a=b=950\text{mm}$.

✓ Calcul des torseurs :

$$\{A\}_A = \begin{Bmatrix} Xa & Ma = \frac{F}{2} * f * \frac{0.4}{2} \\ Ya & 0 \\ Za & 0 \end{Bmatrix}_A \quad : \text{réaction du palier A ;}$$

Pour un coefficient de frottement $f=0.02$ au niveau des paliers (coussinets) [2] et le diamètre de l'arbre de galet est égale à 400mm, on a $Ma = 2.22 \text{ KN.m}$

On a $Xa=Za=0$ (pas de réaction suivant x et z en A).

$$\text{Donc : } \{A\}_A = \begin{Bmatrix} 0 & 2.22 \\ Ya & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_A$$

$$\{B\}_B = \begin{Bmatrix} Xb & Mb = Ma \\ Yb & 0 \\ Zb & 0 \end{Bmatrix}_B \quad : \text{réaction du palier B}$$

On a : $X_b=Z_b=0$ et $M_b = M_a = 2.22 \text{ KN.m}$

$$\text{Donc : } \{B\}_B = \begin{Bmatrix} 0 & 2.22 \\ Yb & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_B$$

Et on a :

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

$$\{F\}_c = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_c \quad : \text{ force appliquée par le bandage sur le galet}$$

✓ Calcul des torseurs en A :

$$\{A\}_A = \begin{Bmatrix} 0 & 2.22 \\ Y_a & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_A \quad ; \quad \{B\}_A = \begin{Bmatrix} 0 & 2.22 \\ Y_b & 0 \\ 0 & 2a.Y_b \end{Bmatrix}_A \quad ; \quad \{F\}_A = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & -a.F \end{Bmatrix}_A$$

✓ On applique le PFS au point A :

$$\sum \vec{F} = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} X_a + X_b = 0 & (1) \\ Y_a + Y_b - F = 0 & (2) \\ Z_b + Z_a = 0 & (3) \end{cases}$$

$$\sum \vec{M} / A = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} M_a + M_b + C_m = 0 & (4) \\ Y_d + Y_b + F = 0 & (5) \\ 2a * Y_b - a * F = 0 & (6) \end{cases}$$

Avec : C_m le couple d'entraînement

(2) $\Rightarrow Y_a = Y_b = F/2 = 555 \text{KN}$

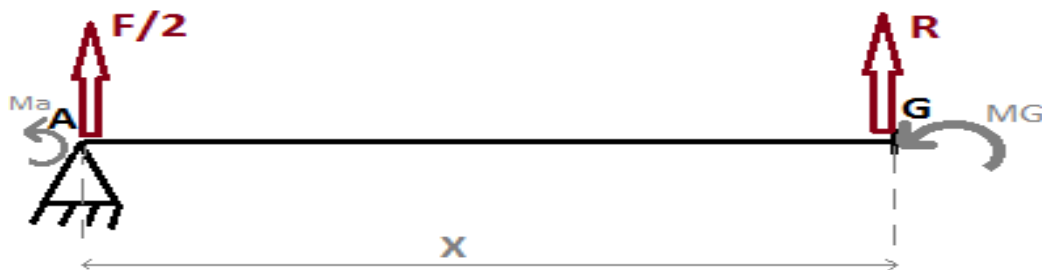
(4) $\Rightarrow M_a = M_b = 2.2 \text{ KN.m}$

(6) $\Rightarrow Y_b = F/2$

✓ Calcul du torseur de cohésion :

On effectue une coupe transversale en point G, et on calcule le torseur de cohésion $\{\tau\}_G$ avec G dans [AC] d'abscisse x.

✓ Application du PFS :



Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

✓ Application du PFS :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Sigma \vec{F} = \vec{0} \\ \Sigma \vec{M} / A = \vec{0} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} F/2 \vec{Y} + R\vec{Y} = \vec{0} \\ \vec{M}_g + M_a \vec{X} - X.F/2 \vec{Z} = \vec{0} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R = -F/2 = -Y_a = -555 \text{KN} \\ \vec{M}_g = -M_a \vec{X} + X.F/2 \vec{Z} \end{array} \right.$$

Donc :

$$\{\tau\}_G = \begin{Bmatrix} 0 & -2.22 \text{KN.m} \\ -555 \text{KN} & 0 \\ 0 & 555X \end{Bmatrix}_G$$

Le problème est symétrique, on se limite donc au calcul dans la partie [AC].

✓ Calcul de la contrainte dans la section, avec le critère Von Mises :

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_f)^2 + 3(\tau^2 + \tau_c^2)}$$

Avec :

La contrainte de flexion : $\sigma_f = 32M_f/\pi d^3$, **A.N :** $\sigma_f = (32*555X) / (\pi * 0.4^3) = 84 \text{MPa}$

La contrainte de torsion : $\tau = 16M_t/\pi d^3$, **A.N :** $\tau = (16*2.2) / (\pi 0.4^3) = 0.17 \text{MPa}$

La contrainte de cisaillement : $\tau_c = F/S$, **A.N :** $\tau_c = 555 / (\pi 0.2^2) = 4.4 \text{MPa}$

Les contraintes τ et τ_c sont négligeables devant la contrainte σ_f , d'où : $\sigma_e = \sigma_f * K_{tf}$

Prise en compte des concentrateurs de contraintes, en se basant sur les figures ci-dessous, nous allons retenir le facteur de concentration de contrainte le plus élevé :

Pour : $d=410\text{mm}$; $D=430\text{mm}$; $r=4\text{mm}$; $t=20\text{mm}$

On a : $\frac{r}{t} = 0.2$ et $\frac{d}{D} = 0.95 \Rightarrow \mathbf{K_{tf} = 2.8}$

A.N : $\sigma_e = \sigma_f * K_{tf} \Rightarrow \sigma_e = 235 \text{Mpa}$

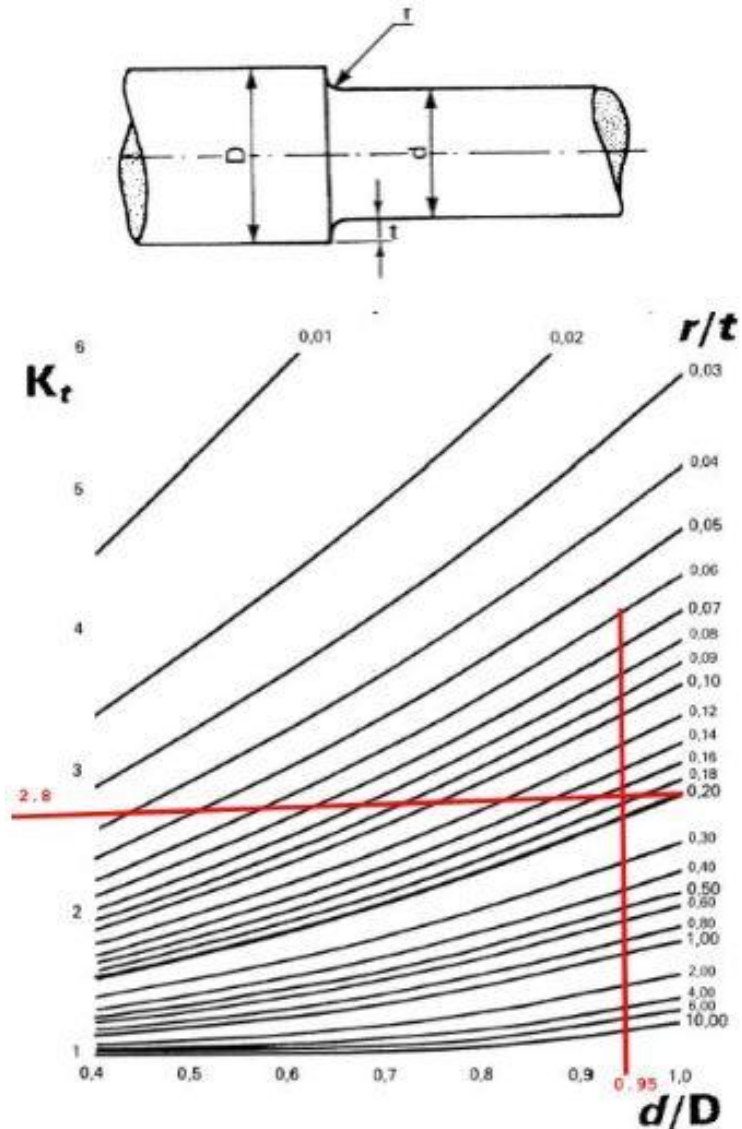


Figure 31 : Détermination de K_t pour un arbre avec épaulement [3]

⇒ Coefficient de sécurité élastique :

$$Se = \frac{Re}{\sigma_e} = 2.34$$

Avec : $R_e=550\text{MPa}$ et $\sigma_e=235\text{MPa}$

⇒ Coefficient de sécurité de rupture :

$$Sr = \frac{Rm}{\sigma_e} = 3.9$$

Avec : $R_m=920\text{MPa}$ et $\sigma_e=235\text{MPa}$

⇒ L'arbre est bien dimensionné par rapport à la rupture et la déformation plastique.

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

✓ Calcul en fatigue :

La contrainte de flexion est une contrainte alternée de moyenne nulle :

$$\sigma_{ae} = K_{tf} * \sigma_{fa} = \sigma_e, \quad \sigma_{me} = 0$$

✓ Détermination de la limite pratique de rupture :

$$R_{mp} = R_m (0.25 \text{Log} (\chi) + 1.4)$$

✓ Calcul de χ :

On utilise la table de détermination du gradient de contrainte ci-dessous :

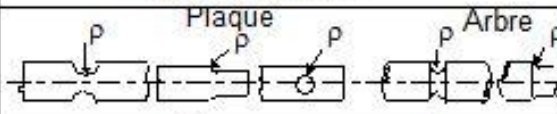


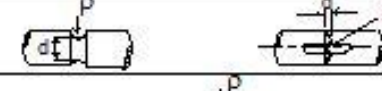
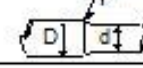
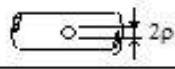
Sollicitation	Types de pièces	χ
Traction		$\frac{2}{p}$
Flexion		$\frac{2}{p} + \frac{2}{d}$
		$\frac{2}{p} + \frac{4}{d+D}$
Torsion		$\frac{1}{p} + \frac{2}{d}$
		$\frac{1}{p} + \frac{4}{d+D}$
Flexion	Arbre percé	$\frac{4}{p}$
Torsion		$\frac{3}{p}$

Figure: Table de détermination du gradient de contrainte

On retient : $\chi = \frac{2}{r} + \frac{4}{d+D}$, **A.N :** $\chi = \frac{2}{4} + \frac{4}{840} = 0.5$

On a : $R_{mp} = R_m (0.25 \text{Log} (\chi) + 1.4)$, donc : **$R_{mp} = 1218 \text{ MPa}$**

✓ Détermination de la limite pratique de fatigue σ_{dp} :

La limite pratique de fatigue est de la forme : $\sigma_{dp} = K_s (a \text{Log}(\chi) + b)$, avec a et b des valeurs retenues de la table suivante , et K_s de l'abaque ci-dessous :

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

Classe acier (R_m en $N.mm^{-2}$)	a	b
$R_m \geq 1400$	100/3	655
$1200 \leq R_m < 1400$	110/3	585
$1000 \leq R_m < 1200$	120/3	520
$900 \leq R_m < 1000$	130/3	465
$800 \leq R_m < 900$	130/3	430
$700 \leq R_m < 800$	135/3	390
$600 \leq R_m < 700$	135/3	335
$500 \leq R_m < 600$	140/3	295
$400 \leq R_m < 500$	140/3	245
$R_m < 400$	140/3	195
Classe acier moulé (R_m en $N.mm^{-2}$)	a	b
$350 \leq R_m < 500$	140/3	180
$R_m < 350$	140/3	135

Figure: Table de détermination des paramètres pour le calcul de σ_{dp}

Pour $R_m = 920$ MPa ; on retient : $a=43.33$ et $b=465$

La figure suivante montre l'abaque permettant de définir le facteur correctif K_s en fonction de R_m et de la rugosité totale R_t :

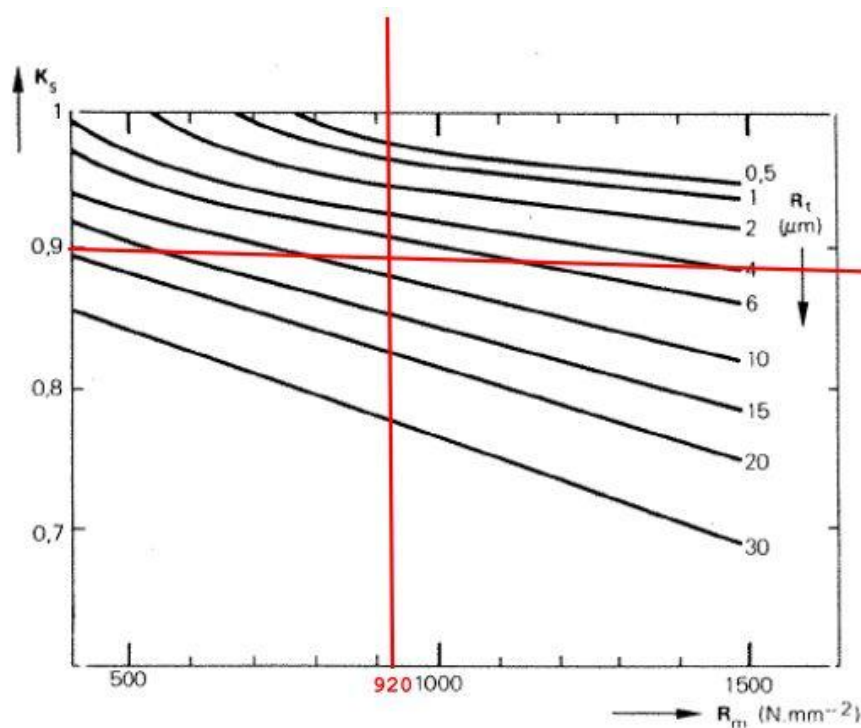


Figure: Détermination de K_s

Pour $R_m=920$ MPa et $R_t=4\mu m$; On a : $K_s = 0.9$

A.N : $\sigma_{dp} = 0.9 (43.66 \log(0.5) + 465) \rightarrow \sigma_{dp} = 406.75$ MPa

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

- ✓ Détermination de facteur de sécurité par rapport à la fatigue :

$$S = \frac{\sigma_{dp}}{\sigma_{ae}} = 1.7$$

Avec : $\sigma_{dp}=406.75\text{MPa}$ et $\sigma_{ae}=235\text{MPa}$

⇒ L'arbre a donc une bonne tenue en fatigue pour un fonctionnement normal sans tenir compte de la tolérance de charge (+50%) dans la phase de conception.

- Nous allons vérifier la résistance de l'arbre dans les conditions maximales pour lesquelles il est conçu :
La charge F devient : $F=1110+50\%=1665\text{ KN}$

La contrainte de flexion : $\sigma_f = 32M_f/\pi d^3$, **A.N :** $\sigma_f = (32*832.5) \times /(\pi 0.4^3) = 125.8\text{ MPa}$

$\sigma_e = K_{tf} * \sigma_f$, **A.N :** $\sigma_e = 2.8 * 125.8 \rightarrow \sigma_e = 352.24\text{ Mpa}$

- ✓ Facteur de sécurité élastique :

$$S = \frac{Re}{\sigma_e} = 1.56$$

Avec : $Re = 550\text{MPa}$ et $\sigma_e = 352.24\text{MPa}$

- ✓ Facteur de sécurité de rupture :

$$S = \frac{Rm}{\sigma_e} = 2.6$$

Avec : $Rm = 920\text{MPa}$ et $\sigma_e = 352.24\text{MPa}$

- ✓ L'arbre a une tenue moyenne par rapport à la déformation plastique, et une bonne tenue par rapport à la rupture statique.

- ✓ Calcul du coefficient de sécurité en fatigue :

$$S = \frac{Rdp}{\sigma_e} = 1.15$$

Avec : $Rm = 406.75\text{MPa}$ et $\sigma_e = 352.24\text{MPa}$

- ✓ La tenue en fatigue de l'arbre est critique pour des conditions de chargement **élevées**.

Le risque de rupture de l'arbre est donc présent, ce qui explique la rupture par fatigue de l'arbre du galet de station 3.

⇒ Conclusion :

Par rapport à la rupture statique, l'arbre a une bonne tenue dans les deux cas de chargement nominal ou extrême : $S_{nom}=3.9$ et $S_{ext}=2.6$.

Par rapport à la déformation plastique, l'arbre a une bonne tenue pour un chargement nominal ou et moyenne pour un chargement extrême : $S_{nom}=2.34$ et $S_{ext}=1.56$. Mais ceci ne peut expliquer la rupture brutale de l'arbre.

La tenue en fatigue est :

- ✓ Assez bonne en fonctionnement normal : $S_{nom}=1.7$.
- ✓ Critique pour des conditions de chargement **élevées** : $S_{ext}=1.15$. Le risque de rupture de l'arbre est donc présent, ce qui explique la rupture par fatigue de l'arbre du galet de station 3.

Or la charge peut croître à cause de plusieurs facteurs, à savoir :

- **Le colmatage de la matière sur les parois intérieures du four**, ce qui entraîne un chargement supplémentaire des arbres de galets.
- **L'effet vilebrequin** qui entraîne un chargement excessif sur les arbres, il s'agit d'un effort cyclique qui entraîne la propagation de fissures et affaiblit la tenue de l'arbre par rapport à la fatigue.

Par conséquent, on propose deux solutions :

- ✚ Le suivi continu de la flexion des arbres des galets, qui s'avère un outil efficace révélateur de l'effet vilebrequin dont l'étude sera détaillée par la suite.
- ✚ Le changement de conception, notamment le diamètre de l'arbre du galet, afin d'obtenir une meilleure tenue en fatigue dans les conditions extrêmes.

5.1.3. Le contrôle de flexion d'arbre du galet :

Le contrôle de la flèche de l'arbre du galet sera assuré en continu par l'installation d'un système MKM : Mechanical Kiln Monitoring.

5.1.3.1 Sécurité pendant les mesures

Les fours rotatifs, où ces outils sont utilisés, sont des équipements rotatifs énormes avec de nombreux points de pincement, ils peuvent causer des blessures graves. Par conséquent, seuls les spécialistes et les personnels formés doivent travailler à proximité de ces machines. Pour utiliser l'outil, il faut strictement suivre les règles de sécurité locales données par les usines et de discuter l'application de la sécurité par l'ingénieur en charge.

Les outils fournis par TomTom-Tools GmbH ont prouvé leur fonctionnalité dans diverses applications; néanmoins TomTom-Tools GmbH ne prend aucune responsabilité pour l'application sur le site en matière de sécurité. L'usine est responsable de la sécurité, conformément à la loi locale, d'une manière qui personne ne peut

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

être blessé. Les instructions d'application et de sécurité ci-dessous sont des lignes directrices et non épuisées qui comprennent l'expérience de campagnes de mesures précédentes et pourraient avoir besoin d'être adaptées aux exigences de sécurité locales.

Attention:

Ne mettez pas vos mains ni aucun objet à proximité ou dans les points de pincement (par exemple, la couronne / pignon, bandage du four / support du galet, ...)

Garder une distance sécuritaire pour éviter d'être pris par des pièces en mouvement.



Pour la mesure des déviations des engrenages, ne jamais placer des capteurs sur le côté où les dents sont en prise; placez-les toujours sur le côté en courant, à éviter le coincement entre les éléments.



Soyez conscient du champ magnétique fort des aimants.

Gardez l'outil loin des gens avec tout autre élément sensible comme les cartes de crédit ou support de données magnétique.



Ne pas mettre les doigts entre les aimants et la surface magnétique. Il y'a grand risque de pincement ou de serrage, en raison de la force magnétique.



Portez des gants appropriés pour protéger vos mains des surfaces chaudes et rugueuses et des arêtes vives.

- ❖ Le système MKM est un outil de mesure en ligne du four rotatif avec au moins deux stations pour détecter les anomalies mécaniques durant le fonctionnement. L'objectif principal est de détecter la manivelle thermique ou permanente dans la virole, le degré du glissement entre le bandage et la virole et les problèmes dans la navigation axiale du four. Les résultats sont stockés dans une carte mémoire pour pouvoir les analyser et les comparer à n'importe quel moment.

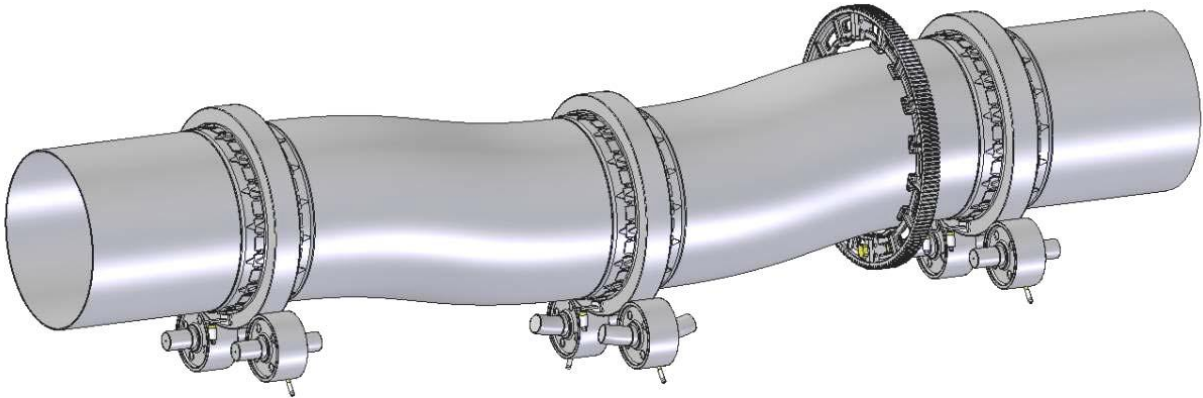


Figure 32 : Virole du four en vilebrequin

La configuration permet de connecter plusieurs outils de mesure :

L'objectif majeur est de mesurer la manivelle du four par la mesure de la flexion de l'arbre du galet. Le système permet de mesurer :

- La vitesse du four (1)
- La flexion de l'arbre du galet (2)
- Le mouvement relatif ou le glissement entre le bandage et la virole (3)
- La position axiale du four (4)

5.1.3.2. Principe de mesure :

Le système MKM est équipé par des capteurs de distance inductifs avec des sorties analogiques de 0..20mA ou des sorties digitales de 24 VDC.

Les signaux des capteurs sont mesurés et enregistrés par l'enregistreur de données dans la boîte de commande MKM.

L'enregistreur de données (DALOG 376) calcule les différentes valeurs (flexion de l'arbre du galet, le mouvement relatif du bandage par rapport au four et la position axiale) et fournit en conséquence un signal de sortie (4 ... 20mA).

En outre, le boîtier de commande est équipé d'un lecteur de carte, où périodiquement (toutes les 2 semaines) tous les données de l'enregistreur de données sont stockées dans la carte SD.

Le téléchargement des données de l'enregistreur de données pour la carte SD peut être forcé en appuyant sur le bouton du lecteur de carte.

✓ **La mesure de la flexion de l'arbre du galet (unité 1 et 2) :**

Dans le support du galet, la variation de la déflexion de l'arbre du galet indique la possibilité de la manivelle du four.

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

Les manivelles sont des erreurs de rectitude dans la virole du four, qui affectent les charges sur les galets des stations avec chaque rotation du four.

Il y'a deux types de manivelle :

- Manivelle mécanique / permanente: Causée par des déformations plastiques dans la virole du four ou des erreurs lors de la construction du four.
- Manivelle thermique: Causée par répartition inégale de la température / dilatation thermique autour de la circonférence de la virole du four (la plus grave près du bandage du milieu).

Les changements de charges causées par les manivelles peuvent être très fortes et surcharger les bandages et les galets, qui donnent des fissures dans les bandages, galets et arbre du galet.

La manivelle pousse le galet vers le bas; où la distance entre le capteur et la surface du galet est réduite. Un demi-tour du four plus tard, la manivelle tourne vers le haut et la charge se réduit sur cette station; donc la distance du capteur devient plus grande.

Pour mesurer l'effet d'une manivelle, un capteur inductif est placé sous le support du galet dans la ligne de force. Cela signifie que sur le côté opposé du contact du bandage du four.



En raison de la grande rigidité des arbres du galet, ces mouvements sont très petites (quelques dixièmes de millimètre), donc des capteurs faibles Ø12mm pour avoir une grande précision.

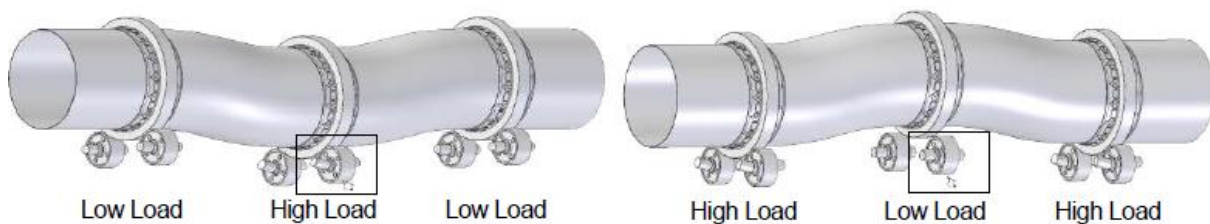


Figure 33 : variation du chargement sur les galets

✓ Mouvement relatif du bandage (unité 3) :

Pour mesurer le mouvement relatif du bandage (aussi appelé « navigation ou migration bandage ») la vitesse du bandage doit être mesurée et comparée avec la vitesse du four. Cela se fait avec l'indicateur de commutateur magnétique et les capteurs de vitesse du bandage, qui donne une impulsion (24V) à l'appareil de commande.



✓ Position axiale (unité 4) :

La position réelle du four dans la direction axiale est mesurée avec deux capteurs de distance inductifs et deux interrupteurs de commutation des deux côtés de la couronne.



✚ Positionnement des capteurs :

- B2.1 : capteur de vitesse de rotation du four.
- B1.1 / B1.2 / B1.4 capteurs de flexion de l'arbre du galet 1, 2, 3 (Note: B.1.3 n'est pas connecté).
- B3.1 / B3.2 / B3.3 mouvement relatif du bandage 1, 2, 3.
- B4.1 / B4.2 position axiale du four capteur à placer sur la couronne (montée / descente) en ligne avec le capteur de vitesse.

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

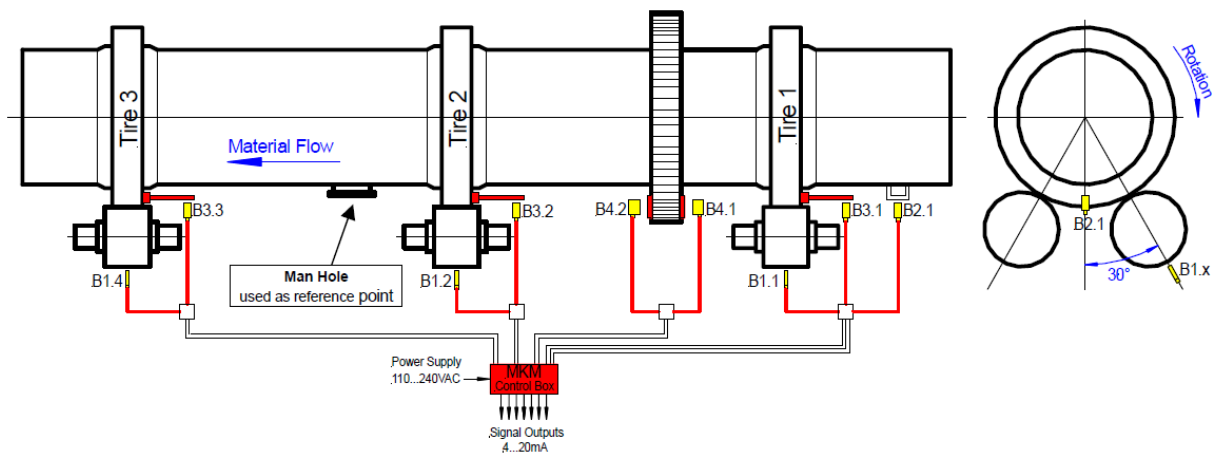
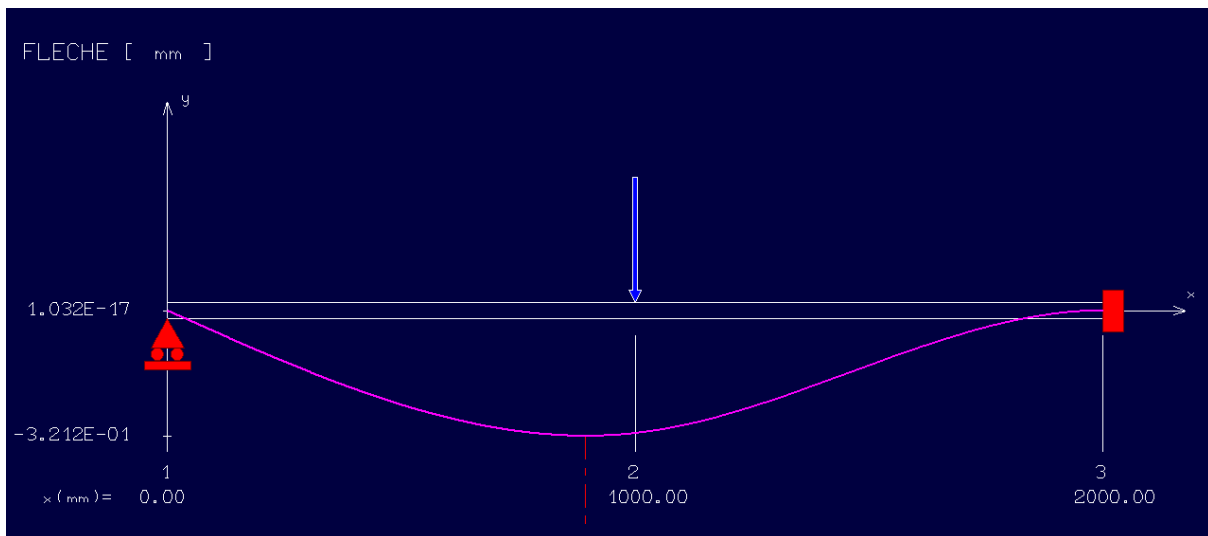


Figure 34 : Installation du système MKM

- ✓ Nous allons d'abord vérifier la flèche de l'arbre de galet dans les conditions de travail extrême pour déduire la valeur limite qu'il ne faudrait pas dépasser.
- ✓ Calcul de la flèche maximale de l'arbre sous chargement :

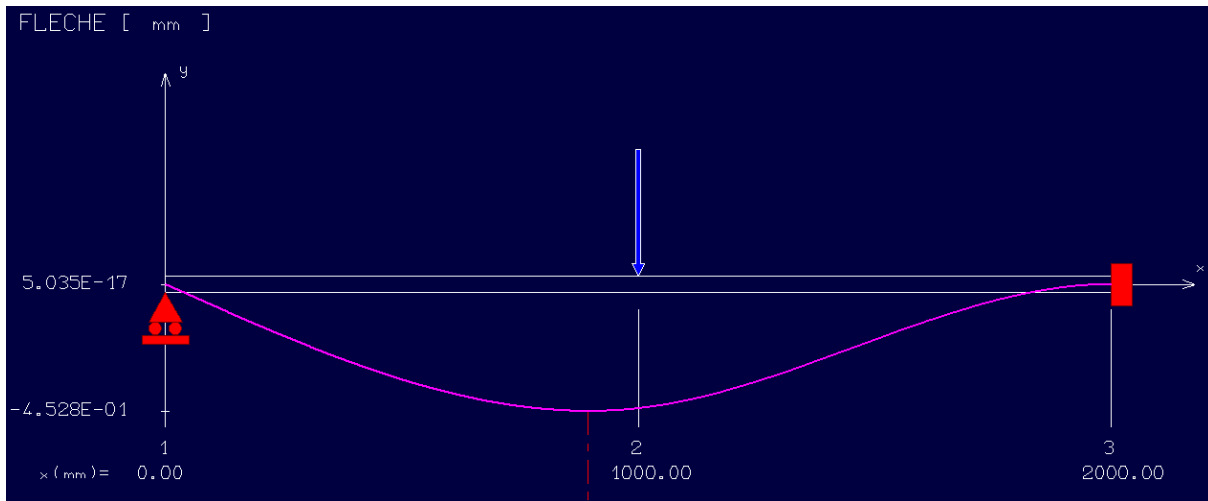
Modélisation de la flèche maximale sur RDM6 :



La flèche maximale pour un chargement nominal de 1110KN est de 0,3mm.

Pour un chargement maximal, la flèche augmente de 0.15mm, pour donner une flèche maximale admise de 0.45mm

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques



Nous allons donc retenir que la flèche maximale admise par les arbres de galets est $0.3 \pm 0.15\text{mm}$

- ⇒ Tout dépassement de cette valeur entrainera l'arrêt du four, et nécessitera un contrôle non destructif de l'arbre des galets.

a- Redimensionnement de l'arbre de galet :

Nous allons changer la section de l'arbre de galet afin qu'il puisse résister au chargement et à la fatigue due à la flexion rotative.

Nous allons conserver la forme du galet, et mettre le diamètre comme paramètre inconnu.

Nous nous baserons sur le coefficient de sécurité :

$\alpha_{\text{Fab}} = \sigma_{\text{dp}} / \sigma_{\text{ae}}$ qu'on fixera à une valeur égale à 2 pour éviter toute rupture par fatigue.

✓ Calcul de χ :

On utilisera les figures ci-dessous :

$\chi = \frac{2}{r} + \frac{4}{d+D}$, comme on a conservé la forme de l'arbre du galet, nous pouvons négliger $\frac{4}{d+D}$ devant $\frac{2}{r} = 0.5$ On note $\chi = \frac{2}{r} = 0.5$

✓ Détermination de la limite pratique de rupture :

$R_{\text{mp}} = R_m (0.25 \text{Log}(\chi) + 1.4)$, **A.N :** $R_{\text{mp}} = 1219 \text{ MPa}$

✓ La limite pratique de fatigue : $\sigma_{\text{dp}} = K_s (a \text{Log}(\chi) + b)$

Pour les mêmes valeurs retenues précédemment : $K_s = 0.9$, $a = 43.33$ et $b = 465$

A.N : $\sigma_{\text{dp}} = 0.9 (43.66 \text{Log}(0.5) + 465) = 406.75 \text{ MPa}$

Le coefficient de sécurité en fatigue est fixé à une valeur de 2 :

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

$$S = \frac{\sigma_{dp}}{\sigma_f} = 2 \quad \rightarrow \quad \sigma_f = \frac{\sigma_{dp}}{2} \quad \text{A.N. : } \sigma_f = 203.4 \text{ MPa}$$

On a :

$$\sigma_f = \frac{\sigma_e}{K_{tf}} \quad \text{or } \sigma_f = 32Mf / \pi d^3 = 203.4 \text{ MPa} \quad , \text{ d'ou : } d = \sqrt[3]{32Mf * \frac{K_{tf}}{\pi * \sigma_e}}$$

$$\text{A.N. : } d = \sqrt[3]{32 * 832.5 * 0.95 * \frac{2.8}{\pi * 203.4}} \quad \rightarrow \quad d = 480 \text{ mm}$$

Nous allons modéliser notre arbre sur CATIA V5 et vérifier sa résistance en statique par éléments finis:

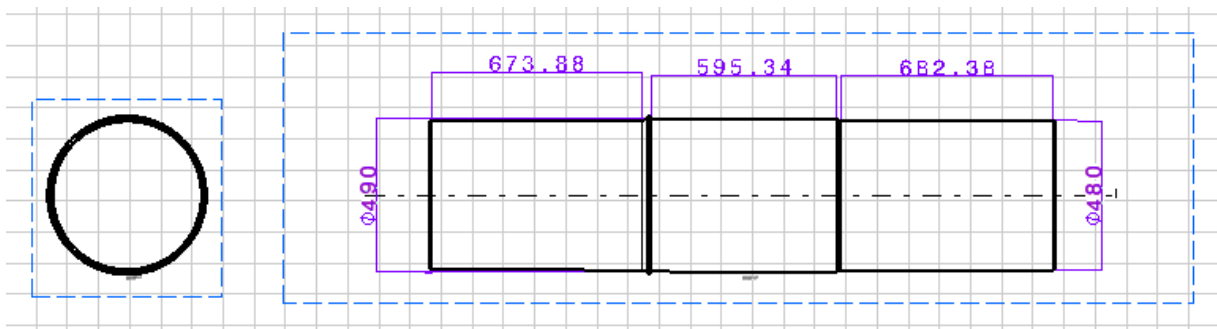


Figure 35 : Dimensions du nouvel arbre du galet

✓ Application des efforts sur l'arbre :

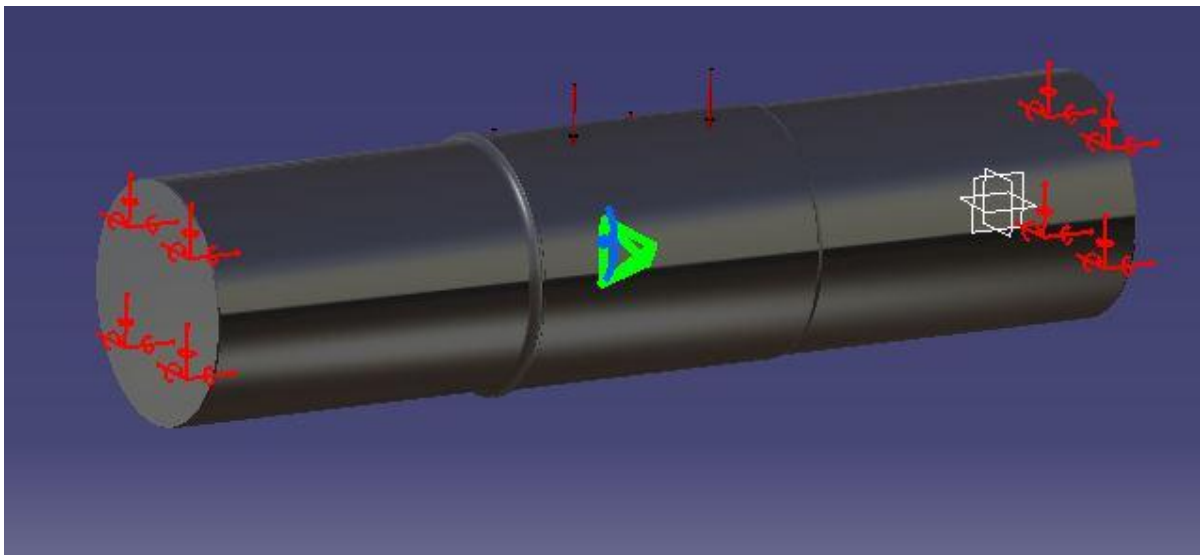


Figure 36 : Conditions aux limites de l'arbre du galet

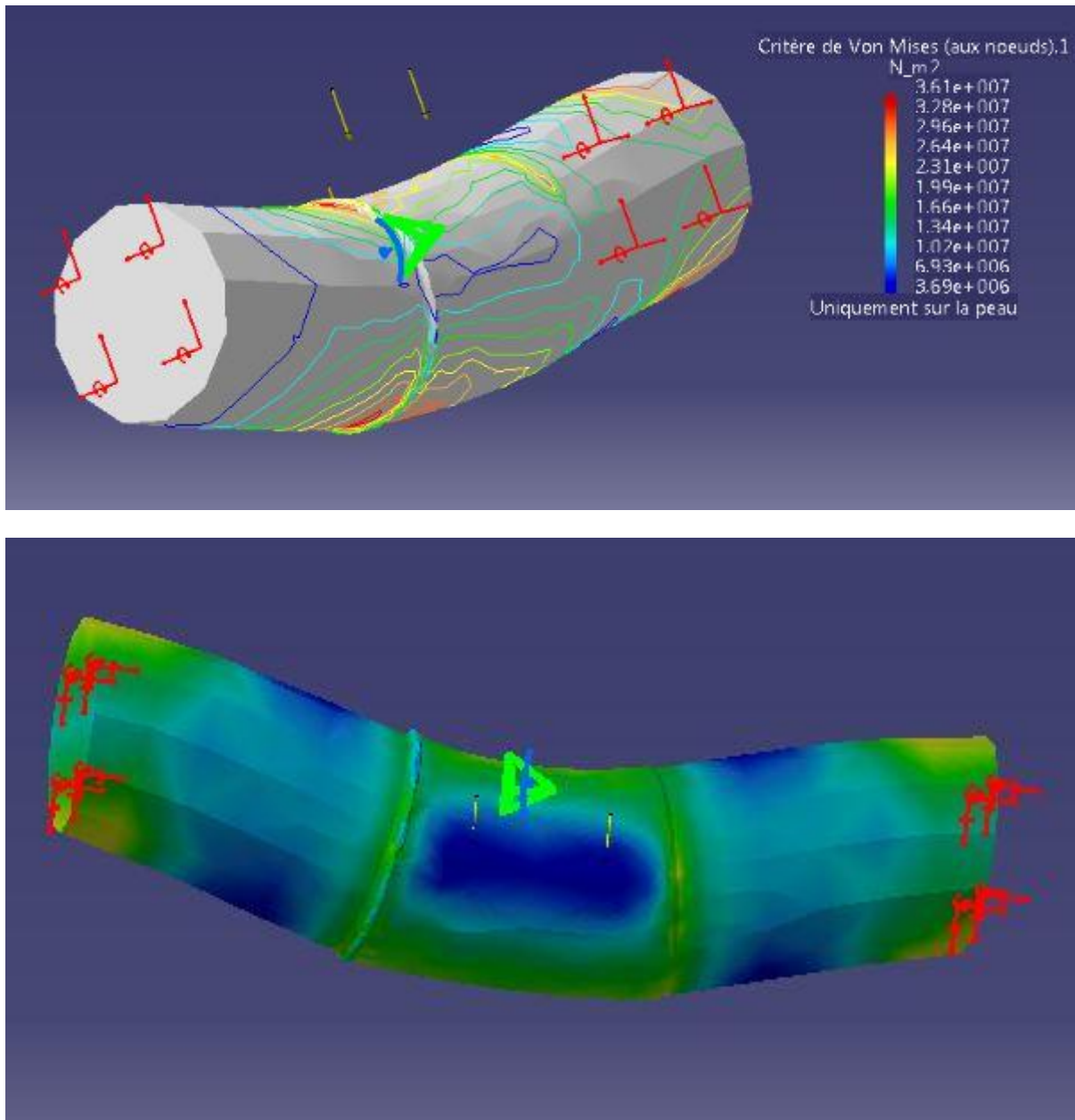


Figure 37 : Contraintes équivalentes du nouvel arbre du galet

La contrainte maximale sur l'arbre est de 36 MPa, l'arbre résiste en statique, et résiste par définition à la fatigue.

Ainsi, nous avons pu diminuer la criticité de la défaillance de l'arbre du galet en agissant sur son diamètre, on considère alors que l'arbre possède une bonne tenue face à la rupture statique ou dynamique. Toutefois, il faudrait vérifier l'état de l'arbre par un contrôle non destructif, afin d'éliminer tout risque de propagation brusque de fissure.

Le contrôle non destructif se focalisera sur le voisinage des concentrateurs de contraintes, on utilisera deux type de contrôles : Le ressuage et l'ultra-son. Le ressuage permettra de déceler les fissures débouchantes, l'ultra-son permettra de détecter les fissures à l'intérieur de l'arbre du galet.

b- Conclusion :

L'étude de l'arbre de galet abouti à deux solutions : le changement de section de l'arbre du galet, et l'installation du système MKM pour le contrôle de la flexion de l'arbre.

Les modes de défaillances voient leur criticité diminuer en conséquence de ces actions, la rupture de l'arbre du galet devient moins fréquente et sa détectabilité a augmentée par le contrôle continu et le CND dans le cas nécessaire, de même pour la flexion de l'arbre du galet qui est dès lors contrôlé en continue.

Le système MKM permet en même temps de contrôler la présence d'un effet vilebrequin par la mesure de la flexion des arbres des galets, ainsi diminuer la criticité du mode de défaillance de l'effet vilebrequin lequel est désormais détectable.

5.2. Etude de l'ovalisation des viroles

5.2.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons traiter le contrôle de l'ovalisation des viroles tout en évoquant les problèmes de glissement, ces deux modes de défaillances sont liés.

L'ovalisation de la virole est la différence entre le diamètre maximal et minimal de la virole sous bandage, par rapport au diamètre du bandage, elle est définie comme suit : $\omega(\%) = \frac{Dh - (Dv - S)}{Ds} 100$

5.2.2. Causes de l'ovalisation

L'ovalisation peut être quantifiée par la différence entre le diamètre maximal et minimal de la virole du four sous le bandage. Celle-ci se produit principalement au voisinage du bandage, car le poids des briques réfractaires agit sur la partie supérieure de la virole, laquelle est appuyée par le bandage du côté inférieur, la virole subit donc une compression qui tend à rendre sa forme elliptique.

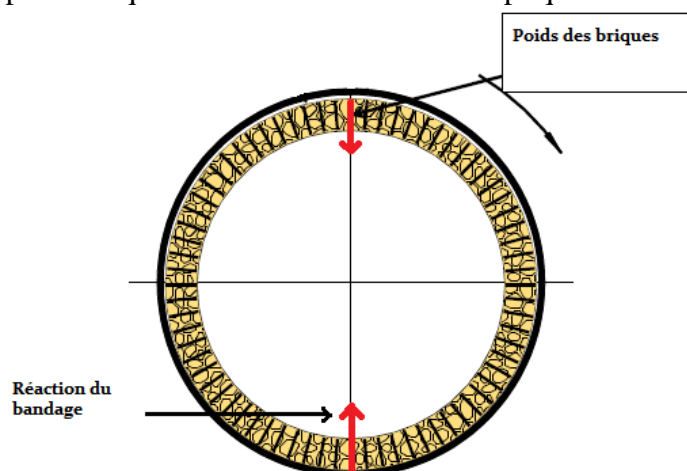


Figure 38 : Causes de l'ovalisation des viroles

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

La différence de diamètre entre virole et bandage joue un rôle essentiel dans l'ovalisation de la virole, un jeu nul ne permettra pas d'ovalisation, mais présentera un risque fort probable de frettage.

Le jeu fonctionnel est donc une cause d'ovalisation, celui-ci est quantifié par le glissement entre bandage et virole dont les valeurs admissibles seront citées par la suite.

5.2.3. Conséquences de l'ovalisation des viroles

L'ovalisation se répercute en premier lieu sur la durée de vie des briques réfractaires, ceux-ci sont exposés à des sollicitations de compression cycliques, favorisant ainsi la formation et la propagation des fissures.

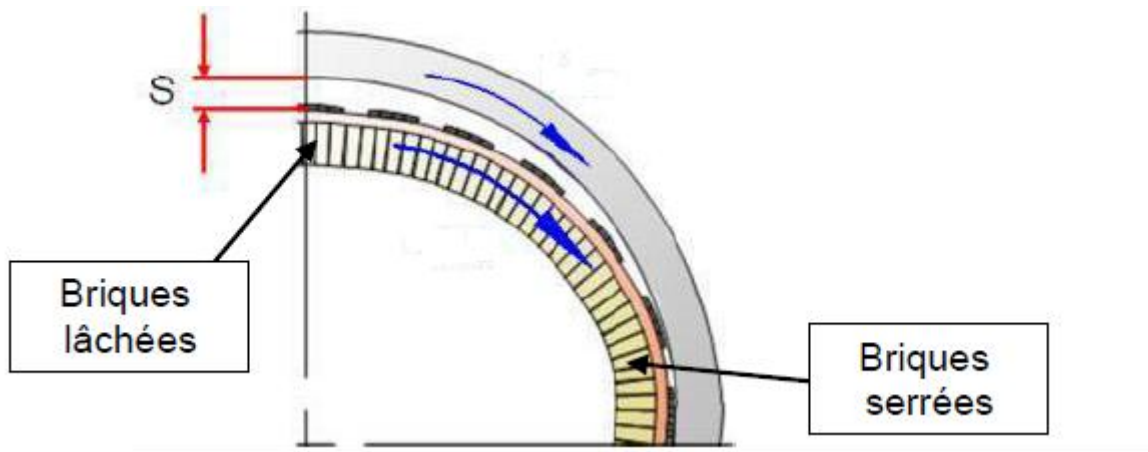


Figure 39 : Conséquences de l'ovalisation des viroles

En plus de ces sollicitations, les briques peuvent avoir un mouvement relatif pendant la rotation, causant donc un frottement entre briques, lequel dégrade fortement la durée de vie des briques.

- ⇒ Les briques sont construites en matière céramique, leur fragilité favorise la formation et la propagation de fissures.
- ⇒ Une deuxième conséquence est la formation de fissures longitudinale au voisinage du bandage, sur les blocs de fixations soudés sur la virole qui présentent une concentration de contrainte.
- ⇒ Le risque de fissuration est d'autant plus important que l'ovalité est importante, la température de la virole est élevée (diminue alors la résistance de la virole), la rigidité des blocs soudée est élevée (une différence de rigidité implique des contraintes supplémentaires sur la virole du four).
- ⇒ La fissuration a un effet néfaste sur la durée de vie des briques. Elles subissent un pincement au niveau de la fissuration, engendrant ainsi un fort mouvement relatif qui se traduit par l'usure rapide des briques.

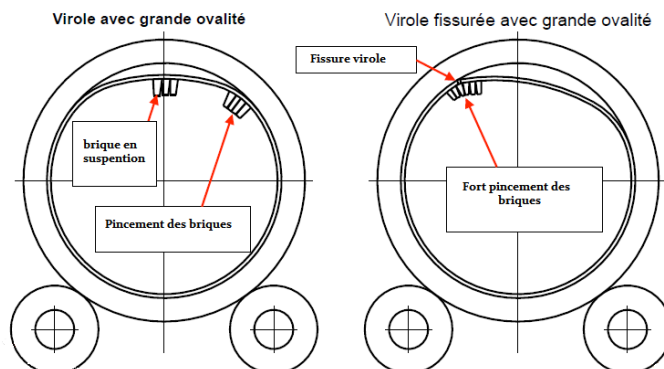


Figure 40 : Conséquences d'une grande ovalisation

5.2.4. Contrôle et procédure

La maîtrise de l'ovalisation s'étale sur deux actions fondamentales : la prévention et la correction.

5.2.4.1 Aspect théorique [6]

L'ovalisation se répercute sur la qualité des réfractaires, sa maîtrise est donc nécessaire pour assurer une durée de vie élevée des briques.

- ✓ Pour ce faire, on contrôle le jeu entre le bandage et la virole, mais aussi le glissement du bandage sur la virole. Le jeu et l'ovalisation sont proportionnels, on souhaite avoir un minimum d'ovalisation, donc garder un jeu minimal, mais, un autre paramètre entre en jeu, c'est le frottement. En cas de jeu faible, le phénomène de frottement pourrait survenir, et causer la déformation permanente de la virole, il faut donc régler la valeur du jeu entre un jeu minimal qui minimise le risque de frottement, et un jeu maximal qui cause une ovalisation admissible.
- ✓ Dans le cas du bandage flottant, lorsque le jeu devient excessif entre bandage et virole, on intercale des plaques supports de compensation, le jeu donc diminue et l'ovalisation s'atténue. Or, l'ovalisation à chaud est différente de celle à froid, des valeurs expérimentales ont été relevées par Shelltest en fonction du diamètre de la virole.

Valeurs admises pour l'ovalisation de la virole				
Diamètre du four D (m)	3	4	5	6
Ovalisation (%)	0.3 à 0.4	0.4 à 0.5	0.4 à 0.6	0.5 à 0.7

Tableau 6 : Valeurs admises de l'ovalisation des viroles [6]

Pour déterminer la valeur des plaques de compensation, il faut déterminer la valeur du glissement (U) entre bandage et virole. Celle-ci est évaluée après une observation répétée, afin d'avoir une valeur crédible.

L'épaisseur des plaques est donnée par la formule [6] :
$$p = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{min}}{\pi} - j \right)$$

Avec : p(mm) : épaisseur des plaques

U_{min} (mm) : déplacement relatif minimal

j(mm) : jeu effectif résiduel à chaud : valeur du jeu après mise en place des plaques

En général, les valeurs admises de j sont de l'ordre j=3mm pour D=4m, et j=5mm pour D=6m

La valeur de (U) est de 15mm/tr pour un four de diamètre 5m.

U est donnée par la formule : $U = \pi D_L - \pi D_S = \pi C = \pi * Jeu$

Le contrôle de U se fait par le système MKM qui relève la vitesse de rotation de la virole du four ainsi que celle du bandage, la différence des deux valeurs donne la valeur du glissement.

5.2.4.2. Aspect pratique et mode opératoire

5.2.4.2.1. Prévention d'ovalisation

On se penche sur le contrôle du glissement du bandage et virole. La mise en place de capteurs magnétiques sur la virole du four et sur le bandage glissant a permis de déduire la valeur de vitesse relative par la différence des deux valeurs reçues des capteurs.

Le suivie continu du glissement permet d'améliorer la détectabilité de l'ovalisation de la virole, la valeur recommandée du mouvement relatif devrait être de 10 à 15 mm/tour.

Le mouvement relatif ne devrait jamais dépasser 30 mm/tour. Dans le cas échéant, une intervention est nécessaire, on intercale les plaquettes de compensation que l'on calcul selon la formule citée précédemment : $p = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{min}}{\pi} - j \right)$

La mesure de l'ovalisation et du glissement se fera à travers des capteurs magnétiques, qu'on détaillera dans la suite :

✓ Le capteur d'ovalisation-Ovality sensor :

Le capteur d'ovalisation est un moyen de mesure utilisé dans les fours rotatifs et qui mesure la variation de la rondeur / courbure dans la virole du four durant le fonctionnement. Cette déformation élastique est appelée ovalisation et se trouve essentiellement au-dessous du bandage. Cette mesure donne une information sur la charge appliquée sur les briques réfractaires/ la virole du four et permet d'identifier les mesures à prendre pour augmenter la durée de vie des composants du four.

Le capteur d'ovalisation est petit et simple dans son utilisation.

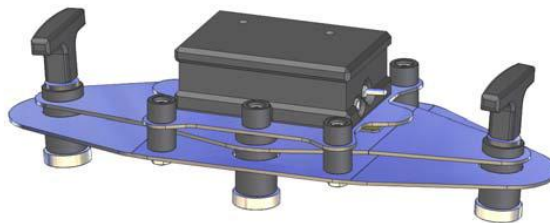


Figure 41 : Capteur de l'ovalisation

5.2.4.2.2. Principe de mesure :

Le capteur d'ovalisation consiste sur la déviation de la plaque dont il sera attaché par des aimants sur la virole du four, près du bandage. A cause de la forte connexion magnétique, la déviation dans la plaque suivra celle dans la virole du four. Cette déviation est transformée en un signal électrique et amplifiée avant de l'envoyer à l'ordinateur via connexion Bluetooth.

Le logiciel TomTom-Tools Measurement Studio reçoit, enregistre et traite les valeurs du capteur d'ovalisation. Pendant la mesure, les valeurs sont affichées et calculées directement.

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

⇒ Avantages :

- Mesure durant le fonctionnement du four ;
- Haute précision ;
- Petit poids (1.5kg) ;
- Mesure et affiche directement les résultats sur l'ordinateur ;



Figure 42 : Les composants du système de suivi d'ovalisation

⇒ Composants :

1. Capteur d'ovalisation,
2. Chargeur batterie avec différents adaptateurs (100...240VAC),
3. Adaptateur Bluetooth USB,
4. Mallette de transport (Dimensions: 33.9 x 29.5 x 15.2 cm)
5. Logiciel (TomTom-Tools Measurement Studio)
6. Manuel

5.2.4.2.3. Démarrage de l'outil:

✓ Connexion du capteur avec l'ordinateur :

Après l'installation du logiciel, allumez le capteur d'ovalisation (LED2: vert). Quand le Measurement Studio démarre il cherche automatiquement les appareils connus.

Cliquer sur l'appareil connecté (dans ce cas : capteur d'ovalisation) et une fenêtre s'affiche. Cliquer ensuite sur le bouton "connect". Une fois connecté, il s'affiche dans la liste des appareils.

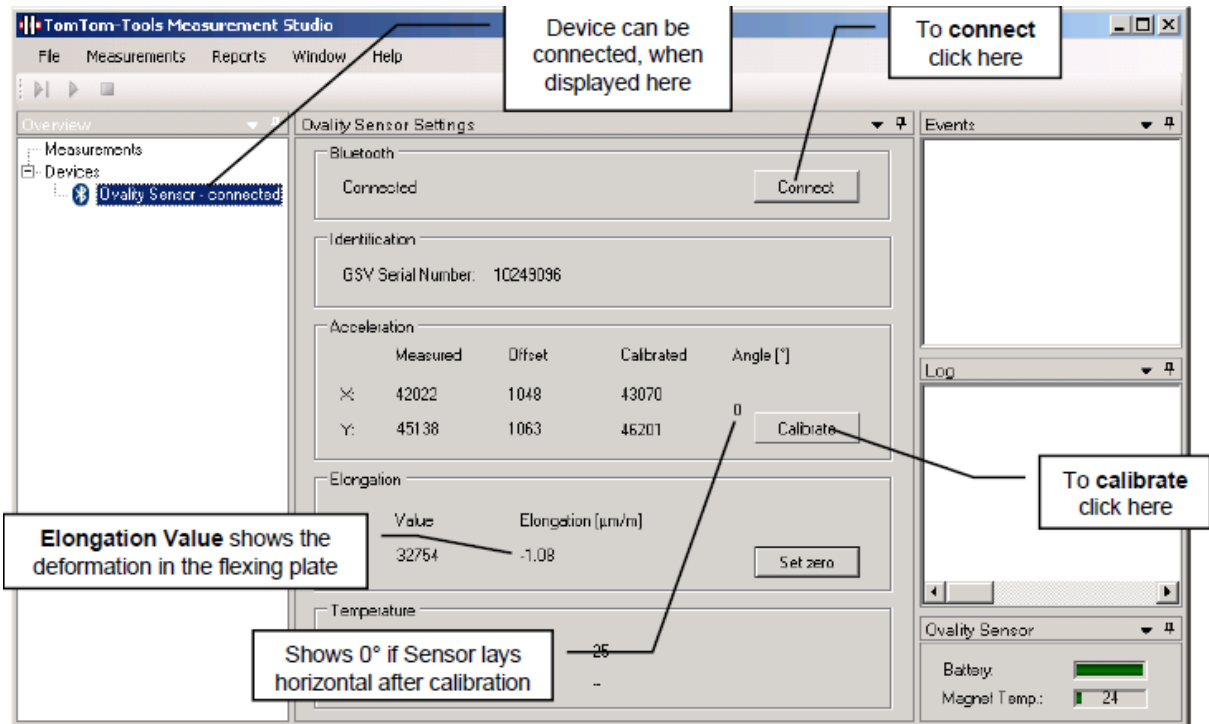


Figure 43 : Prise de mesures d'ovalisation

5.2.4.2.4. Calibrage du capteur :

- ⇒ Quand le capteur d'ovalisation est connecté, il transmet directement les valeurs de son orientation et de sa déviation à l'ordinateur.
- ⇒ Il faut tout d'abord calibrer l'orientation du capteur.
- ⇒ Posez le capteur dans une surface horizontale pour le calibrer horizontalement. (Ex : une table, sol)
- ⇒ Cliquez sur "next" et mettez le capteur dans une surface verticale (Ex : mur) pour le calibrer verticalement.
- ⇒ Cette calibration sera enregistrée sur l'ordinateur pour les prochaines utilisations du capteur. Il est recommandé de re-calibrer le capteur s'il n'est pas utilisé pour une longue durée.

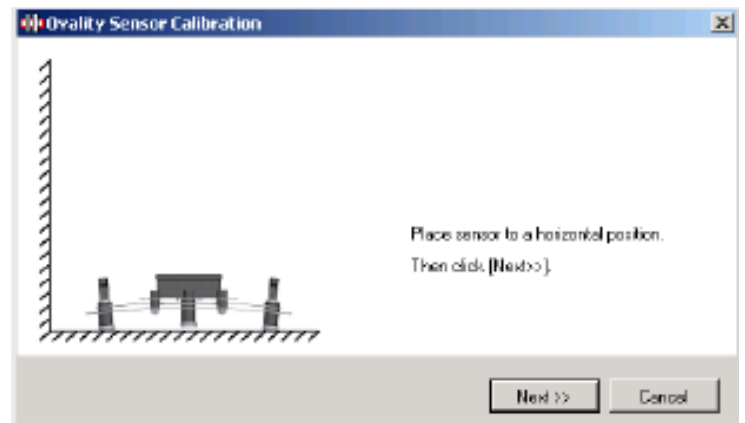


Figure 44 : Calibrage horizontal

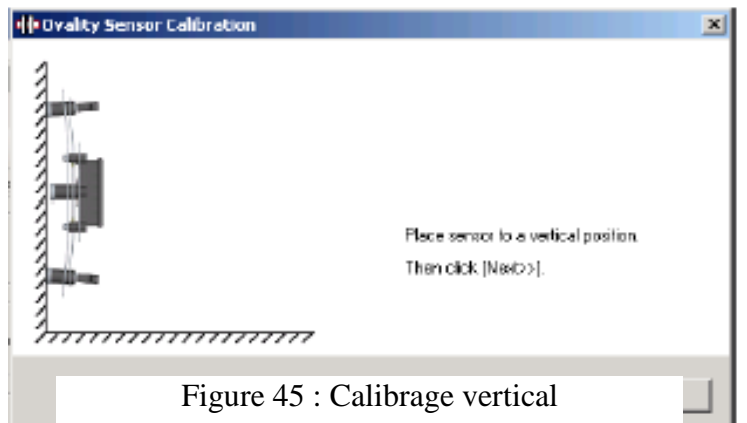


Figure 45 : Calibrage vertical

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

5.2.4.2.5 Mesure:

⇒ Fenêtre de mesure:

- Pour commencer une nouvelle mesure cliquer sur “Measurement / New / Ovality”.

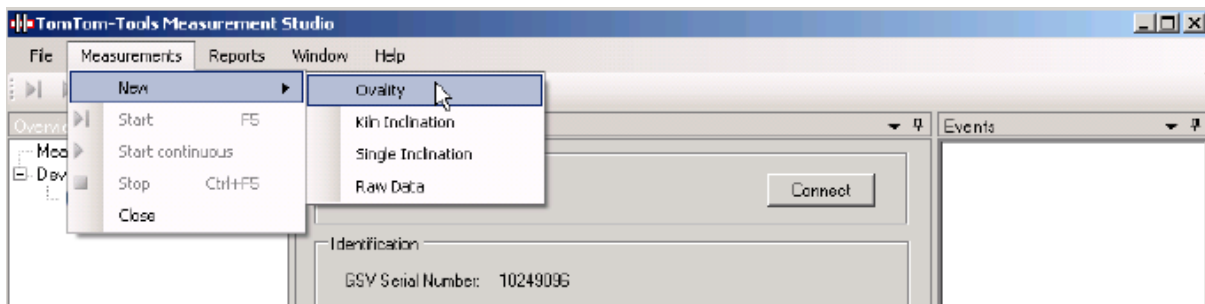


Figure 46 : Choix du type de mesure

- Le premier bandage sera affiché par défaut. Cliquer sur “Add Pier” pour ajouter d’autres bandages.
- Entrer les informations nécessaires pour la mesure dans “Settings Window”.

NB : Le sens de mesure peut être changé en cliquant sur “uphill or downhill”

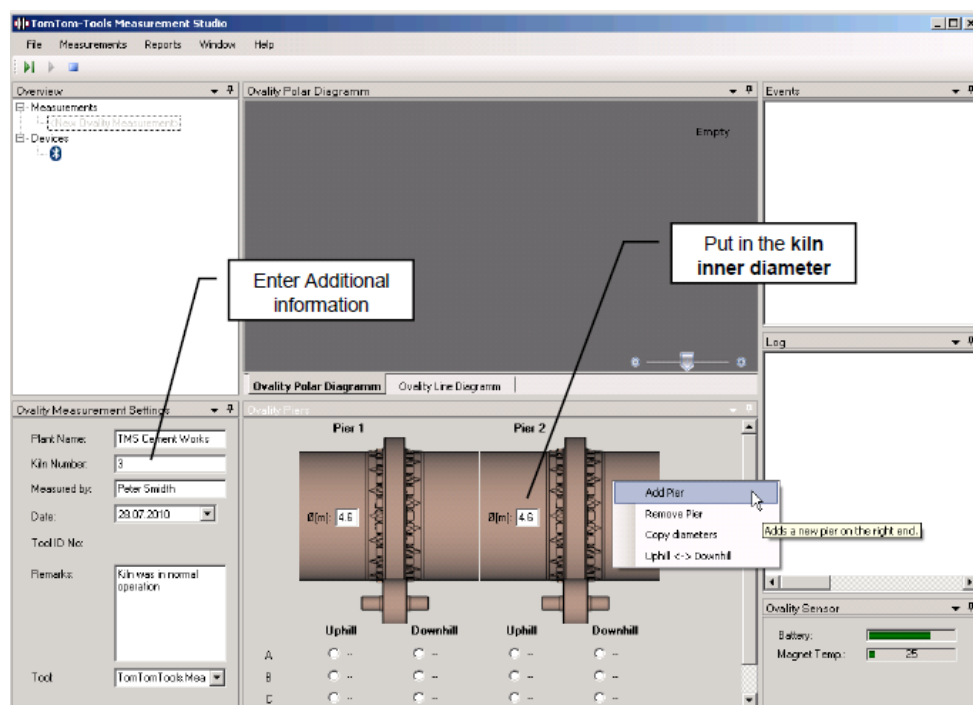


Figure 47 : Les informations de la mesure et du four

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

⇒ Emplacement de l'outil :

Il est préférable de marquer les position des mesure (A,B,C éloigner 120° chacun) dans les deux régions du bandage. Normalement A est la position zéro ou la référence qui doit être la même pour tous les mesures.

NB : Il faut positionner le capteur entre 1m à 1.5m du bandage pour avoir des erreurs négligeables.

- Pour commencer les mesures, sélectionner la position de mesure dans le four et cliquer sur **start button** or **F5**.

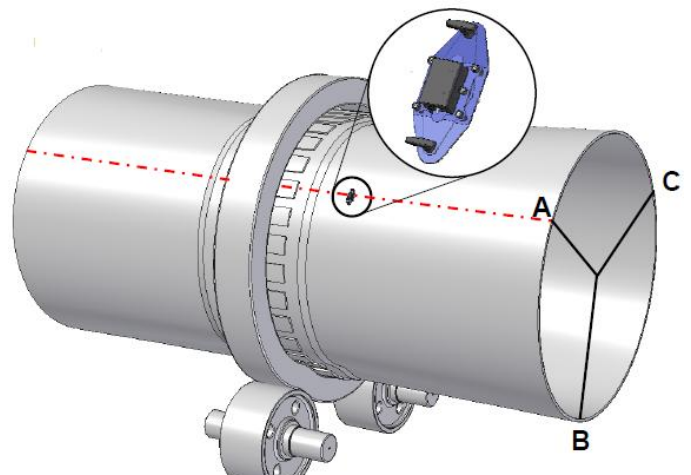


Figure 48 : Emplacement de l'outil

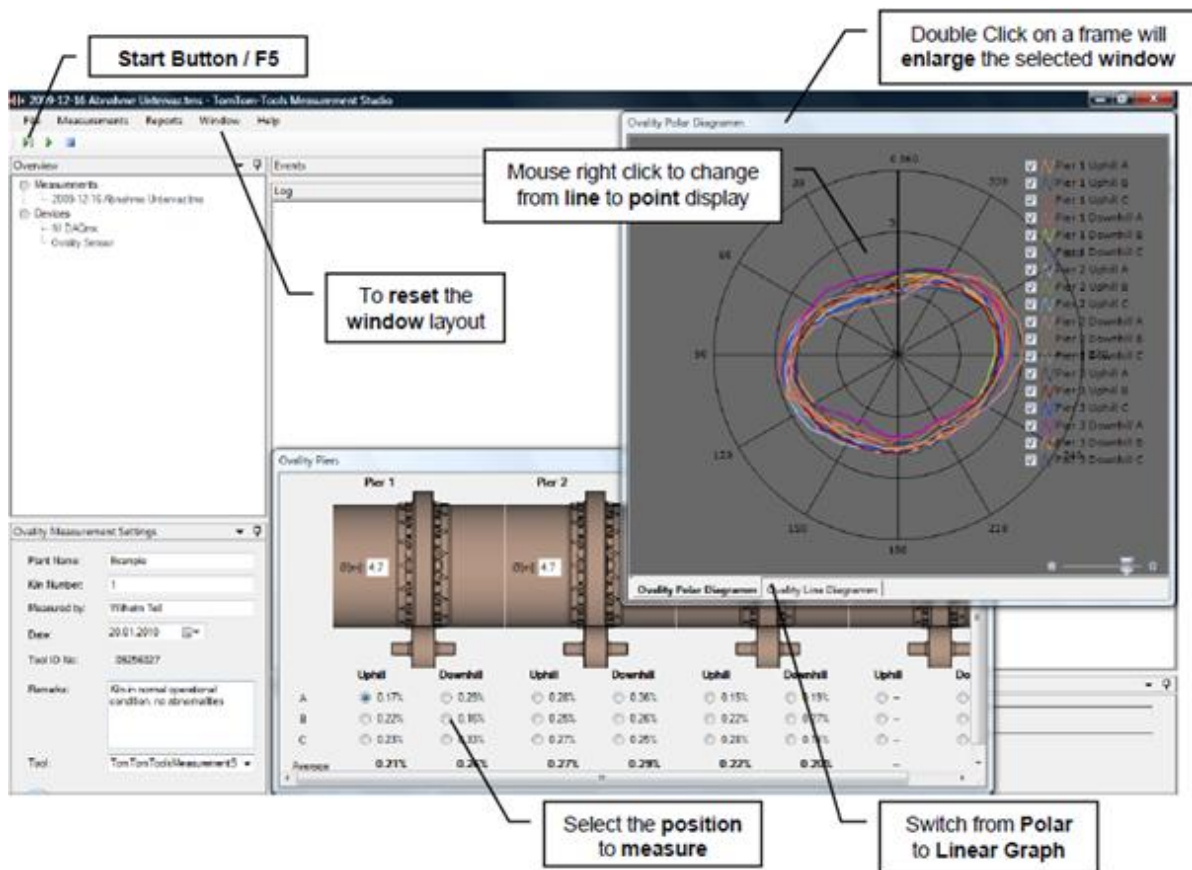


Figure 49 : Collecte des résultats

- Enlever l'outil une fois les mesures sont terminées, il ne faut pas laisser le capteur attaché au four chaud, il risque de l'endommager.

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

5.2.4.2.6. Résultats :

Si la valeur fait partie de cette marge ou en dessous, aucune action corrective n'est nécessaire (aucun calage du bandage).

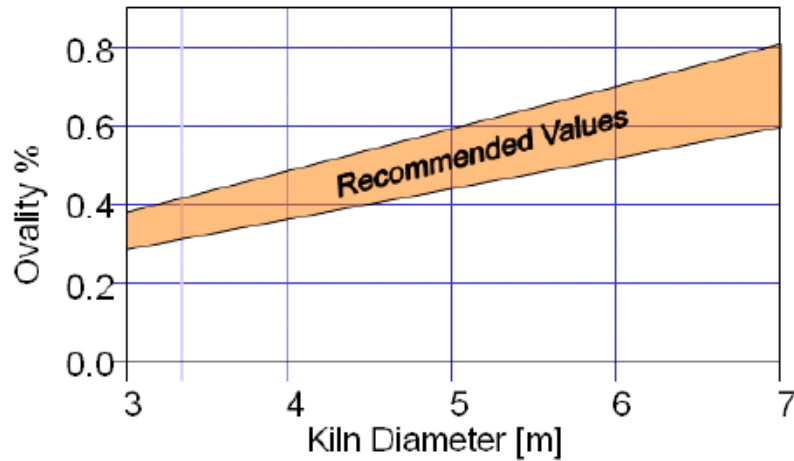


Figure 50 : Valeurs admises d'ovalisation

5.2.4. Analyse de mesures de l'ovalisation

Les mesures prises par le capteur d'ovalisation donnent les résultats suivants :

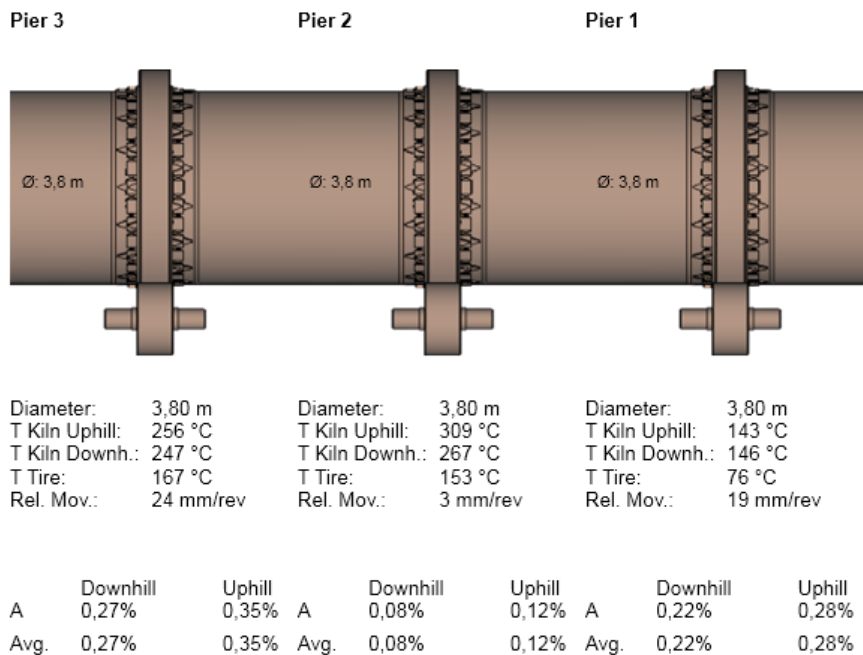


Figure 51 : Résultats des mesures

Remarque : Normalement il faut prendre les mesures sur trois positions (A, B, C) sur chaque partie des stations, mais en raison du manque du temps on a pris seulement les valeurs d'une seule position (A).

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

Le four de l'usine est de 3.8m de diamètre, donc la marge d'ovalisation acceptée est entre 0.34% et 0.46%.

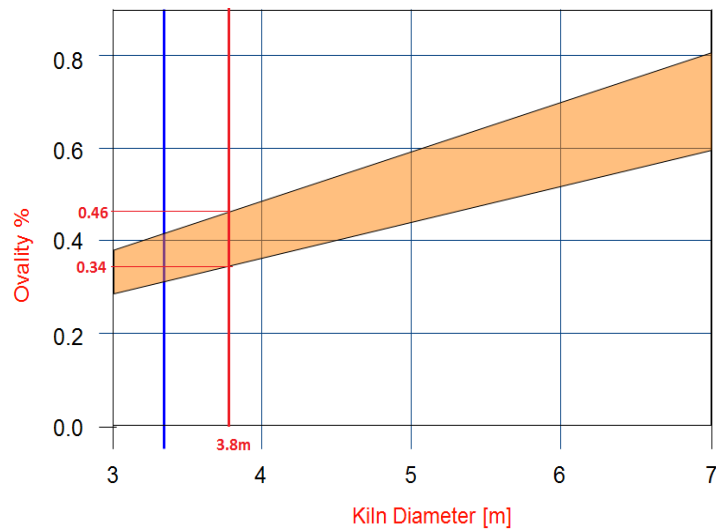
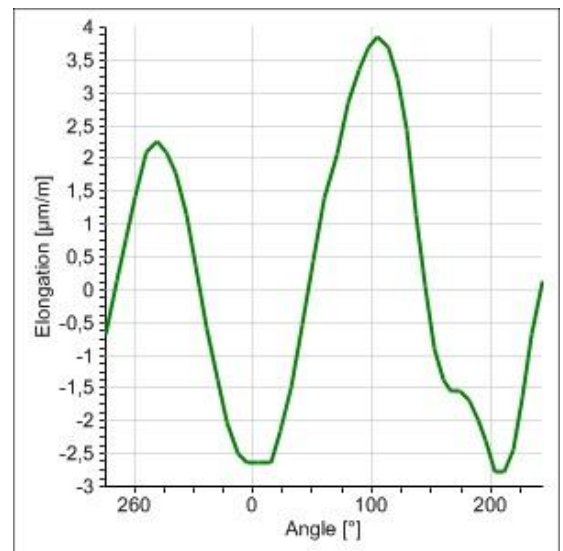
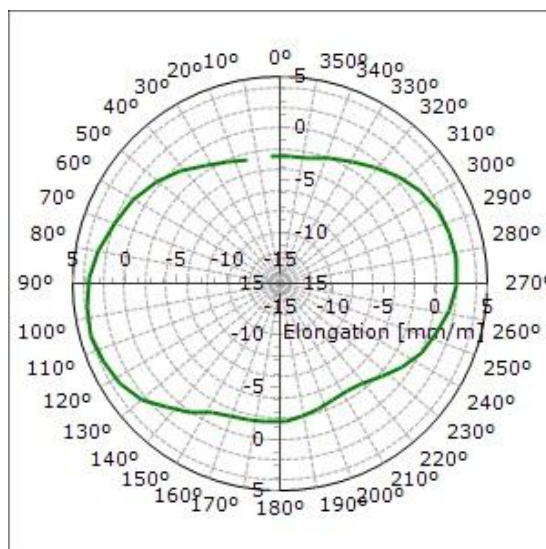


Figure 52 : Limite d'ovalité de notre four

Et la valeur recommandée du mouvement relatif est de 15 mm/rev et ne devrait jamais dépasser 30mm/tour.

Représentation détaillée des résultats :

✓ Station 3 :



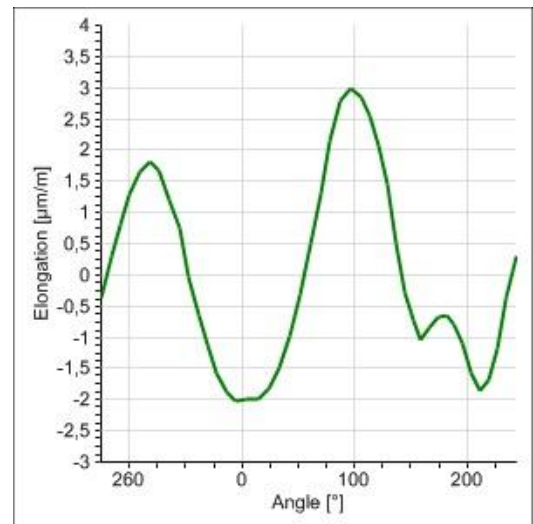
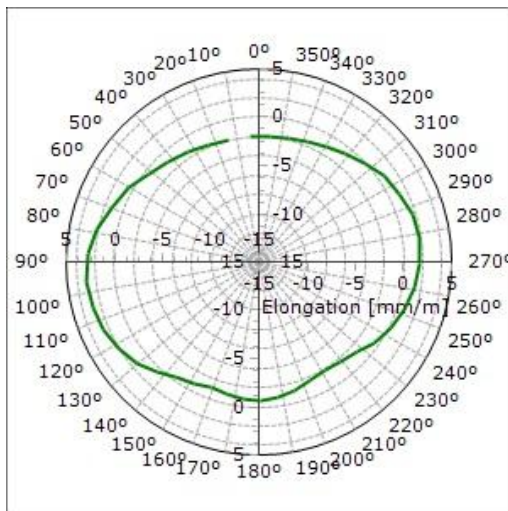
- A: 0,35%
- B: --
- C: --

Avg.: 0,35%

Figure 53 : Mesures de la station 3 avant bandage

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

- La valeur de l'ovalisation avant le bandage 1 est 0,35% et se trouve dans la marge recommandée. Donc le fonctionnement est normal dans cette région.



■	A:	0,27%	
■	B:	--	
■	C:	--	Avg.: 0,27%

- La valeur de l'ovalisation est inférieure à la valeur minimale recommandée.

Interprétation 1 :

La virole du four est serrée sur le bandage 1 ce qui augmente l'usure des briques et diminue leur durée de vie. En plus, il y'a un risque de déformation plastique de la virole sous le bandage 1, et nécessiterait le changement de virole sous bandage.

La température avant le bandage est 256°C et 247°C après le bandage, la différence de température n'est pas élevée, donc le colmatage est plutôt symétrique.

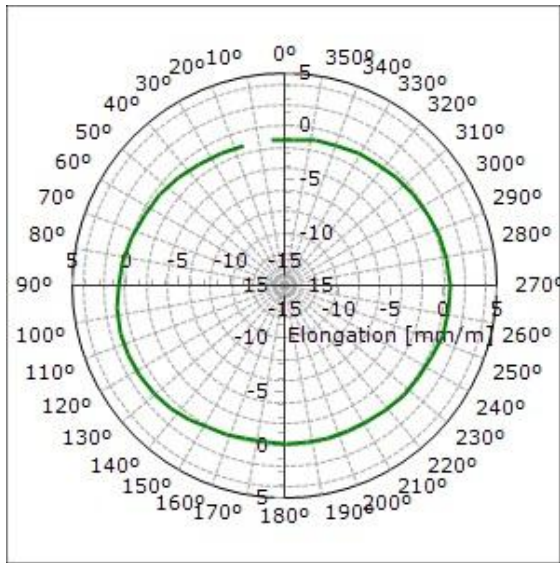
Le glissement sous le bandage est normal donc la lubrification est efficace.

Recommandation 1 :

Le changement de virole n'est pas nécessaire à l'instant, un suivi régulier est recommandé pour déterminer le rapport $\frac{\Delta\delta}{\Delta t}$ qui représente l'évolution de l'ovalité par rapport au temps, il sera recommandé d'augmenter la fréquence des mesures lorsque $\frac{\Delta\delta}{\Delta t}$ augmente d'une mesure à une autre.

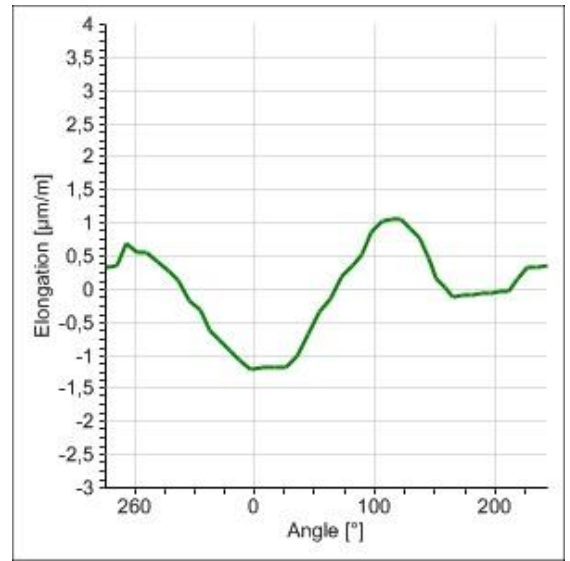
Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

✓ Station 2 :

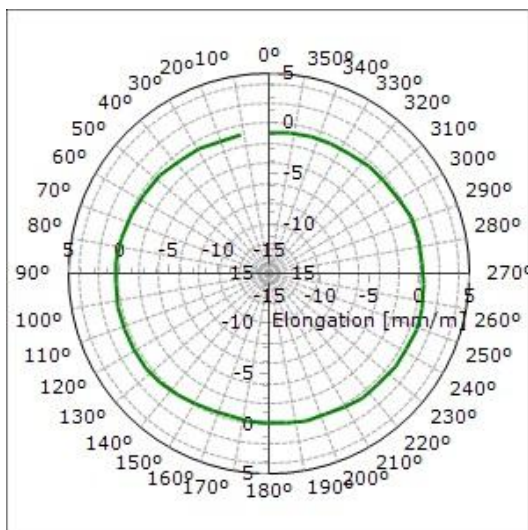


■ A: 0,12%
 ■ B: --
 ■ C: --

Avg.: 0,12%



➤ La valeur de l'ovalisation mesurée avant bandage 2 est très inférieure à la limite minimale recommandée.



■ A: 0,08%
 ■ B: --
 ■ C: --

Avg.: 0,08

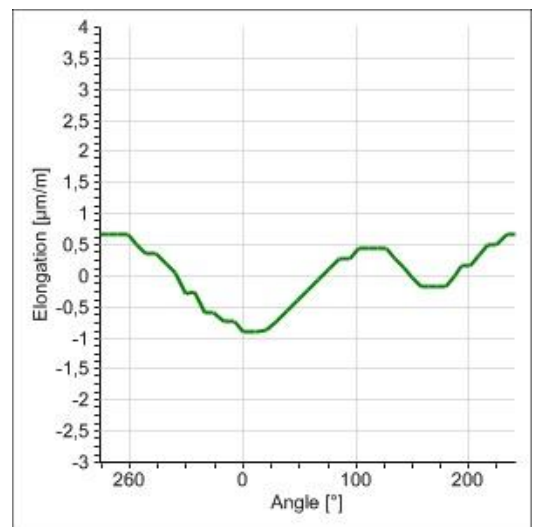


Figure 56 : Mesure de la station 2 après bandage 2

➤ La valeur de l'ovalisation mesurée après bandage 2 est très inférieure à la limite minimale recommandée.

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

Interprétation2 :

Le mouvement relatif entre la virole et le bandage 2 est très petit **3 mm/rev** ce qui indique que la virole est très serrée sur le bandage, un grand risque de déformation permanente de la virole est présent ainsi qu'une diminution de la durée de vie des briques.

Un arrêt du four a permis effectivement de remarquer l'usure des briques sous bandages, lesquelles ont perdu de l'épaisseur, celle-ci diminue ainsi la charge sur la virole du four et cause une diminution d'ovalisation.

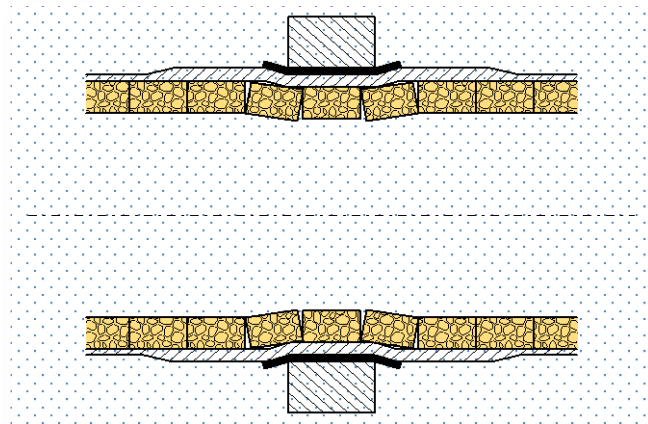


Figure 57 : Illustration du frettage de virole

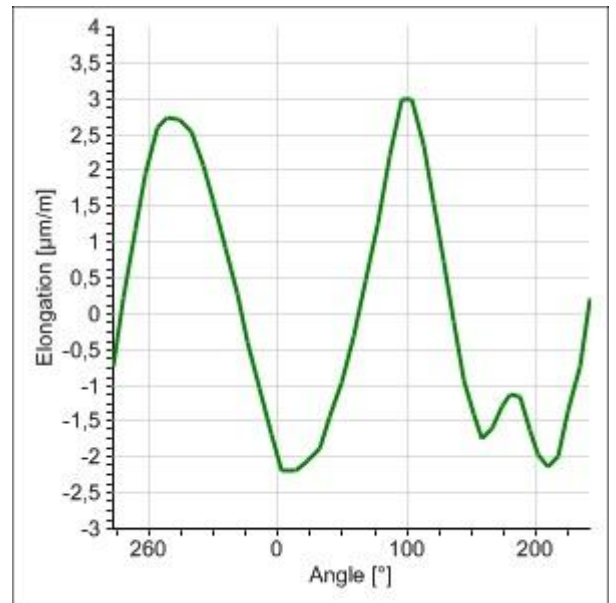
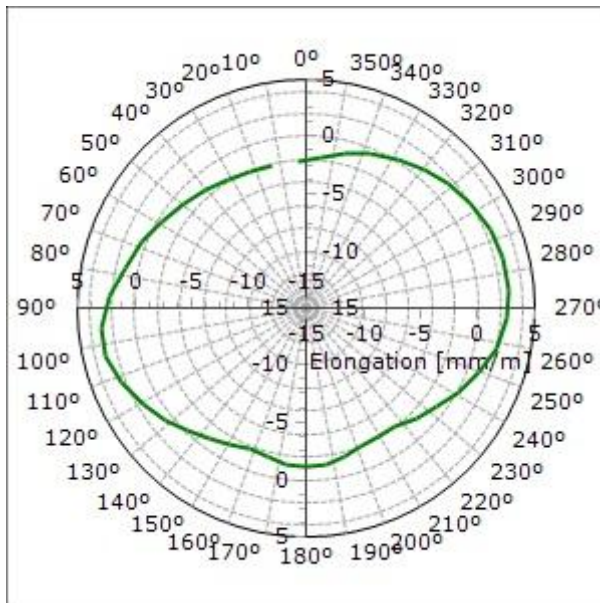
Recommandation 2 :

On recommande d'augmenter la fréquence de suivi de l'évolution de l'ovalité, tracer la courbe de l'évolution et l'extrapoler afin d'obtenir la date éventuelle de déformation permanente de la virole.

On recommande aussi d'augmenter la fréquence de lubrification des cales sous bandages, ceci permettra de diminuer le frottement et d'éviter le frettage de virole/bandage, et prolonger la durée de vie de la virole sous bandage.

Il faudrait suivre l'évolution de la température de la virole dans la zone de station 2, une température proche de la limite pourrait causer une déformation permanente de la virole sous bandage.

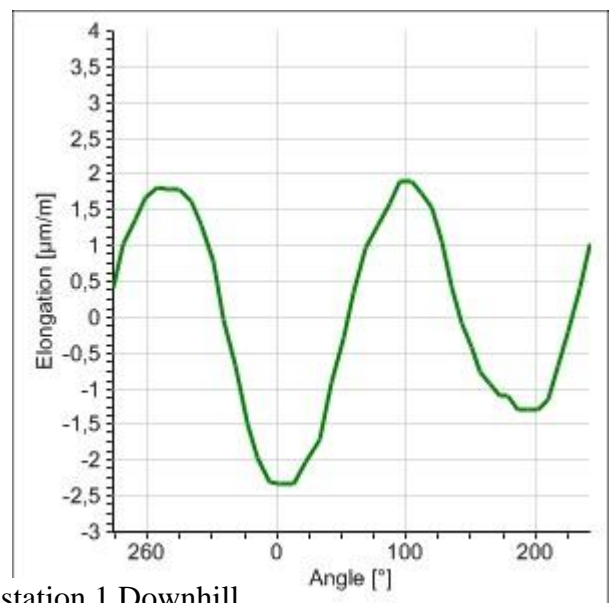
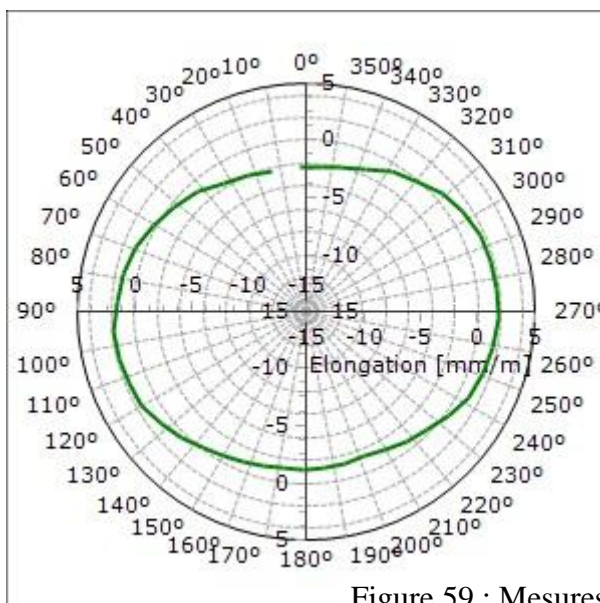
✓ **Station 1 :**



■ A: 0,28%
■ B: --
■ C: --
 Avg.: 0,28%

Figure 58 : Mesure de la station 1 avant bandage 1

- La valeur de l'ovalisation mesurée avant le bandage 1 est 0.28% légèrement inférieure à la valeur minimale recommandée.



■ A: 0,22%
■ B: --
■ C: --
 Avg.: 0,22%

Figure 59 : Mesures de la station 1 Downhill

Figure 60 : Mesure de la station 1 après bandage 1

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

- La valeur de l'ovalisation mesurée après le bandage 1 est 0.22% légèrement inférieure à la valeur minimale recommandée.

Interprétation 2 :

La température de la virole est faible, 143°C et 146°C de part et d'autre du bandage, ceci s'explique par un colmatage sur les parois internes du four, mais, l'ovalisation n'est pas liée à cette baisse de température.

La virole a subi une dilatation thermique, le jeu entre la virole et le bandage s'est affaibli, ce qui a dû causer la diminution de l'ovalisation.

Recommandation 2 :

L'ovalisation est plus faible que la valeur recommandée, mais le glissement est correcte, on devra suivre régulièrement l'évolution de l'ovalisation et le glissement, et augmenter la fréquence de mesures lorsque le glissement devient inférieur à 15mm/rev, ou lorsque l'évolution devient élevée.

De même, si la température de la virole du four dépasse sa valeur normale (400°C), des mesures d'ovalité doivent être prises par la suite pour quantifier l'impact de sa dilatation et éviter toute déformation permanente ou frettage.

5.2.5. Conclusion :

L'ovalisation de notre four change d'une station à une autre, dans la station 3 l'ovalisation n'est pas critique, elle est plus prononcée dans la station 1 mais ne perturbera pas la marche normale du four, le cas de la station 2 est le plus critique et nécessite un suivi stricte de l'ovalisation, glissement et température afin d'éviter un arrêt non programmé obligeant le changement de virole et briques sous bandage.

En définitive, nous avons pu accroître la détectabilité de trois modes de défaillance : l'ovalisation des viroles par un contrôle régulier, le contrôle du glissement (positif et négatif) en continue par un système MKM (Partie 3.3.2.3 du contrôle de flexion de l'arbre du galet station 3).

5.3. Joint amont/aval

5.3.1. Introduction

Le joint amont/aval empêche l'entrée d'air faux dans le four ce qui minimise l'énergie de chauffage et augmente la qualité de cuisson.

Il existe plusieurs types de joint d'entrée/sortie de four selon la technologie utilisée :

- Joint à segments serrés par ressort
- Joint pneumatique
- Joint à lamelles



Figure 61 : Joint amont/aval

Le four de l'usine utilise les joints pneumatiques en raison des avantages suivants :

- la pression constante sur les éléments d'usure (cerces) réglable par la pression d'air - donc air faux réduit .
- Pas de réajustement (manuel) du joint ce qui signifie des routines réduites d'entretien.
- Effet d'étanchéité amélioré

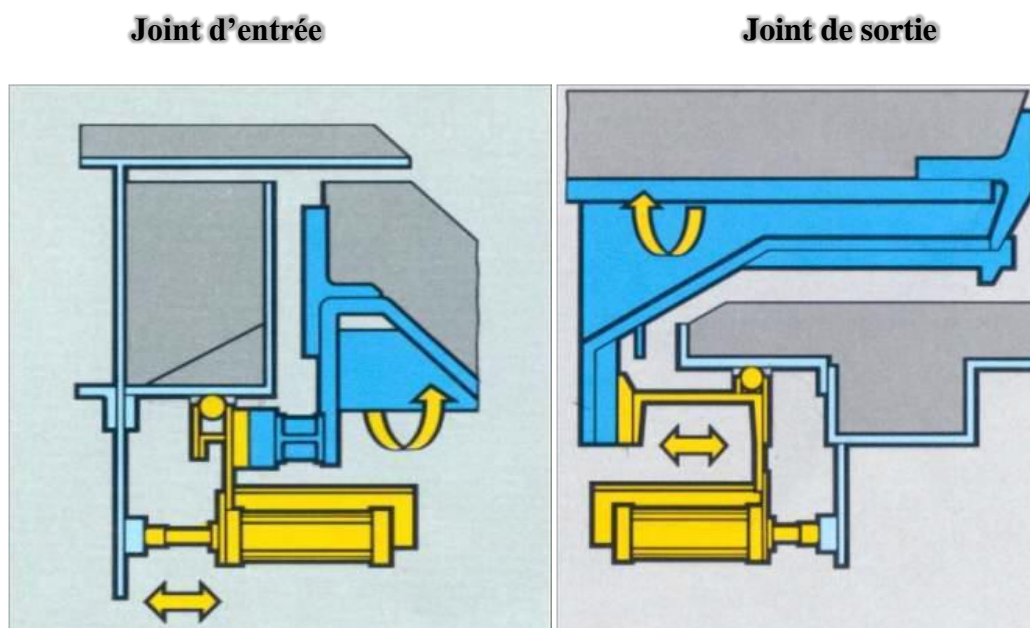


Figure 62 : Schéma du joint amont/aval

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

- ✚ Le contact entre le joint et le four se fait à travers deux parties de douze segments d'usure soudés l'une sur le four et l'autre sur le joint.
- ✚ A cause de la haute température et le frottement, ces deux parties s'usent et cause la chute des segments.
- ✚ Les cerces subissent des déformations à cause de l'énergie absorbée due aux contraintes à haute température.
- ✚ On a opté à améliorer le matériau des segments d'usure pour résoudre ce problème.

5.3.2. Choix de matériau Joint amont :

Le matériau choisi doit répondre aux exigences suivantes :

- Fonctionnement en haute température $>900^{\circ}\text{C}$
- Forte résistance mécanique
- Forte ténacité
- Faible coefficient de frottement
- Résistance au choc thermique élevée
- Faible dilatation thermique

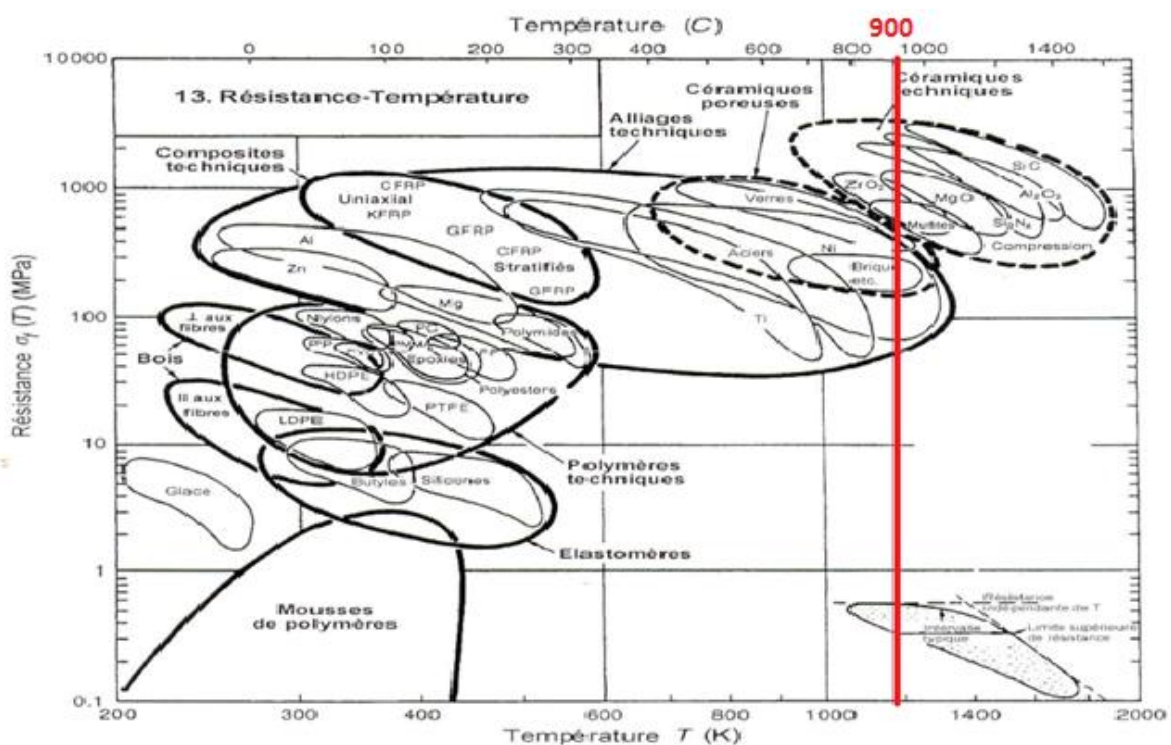


Figure 63 : Critère de résistance et température

- ⇒ D'après le diagramme [4] de la résistance mécanique en fonction de la température, seuls les aciers et les céramiques peuvent résister à des températures supérieures à 900°C .
- ⇒ A cause de la déformation des cerces, le matériau doit avoir une grande ténacité pour absorber une grande énergie avant la rupture.

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

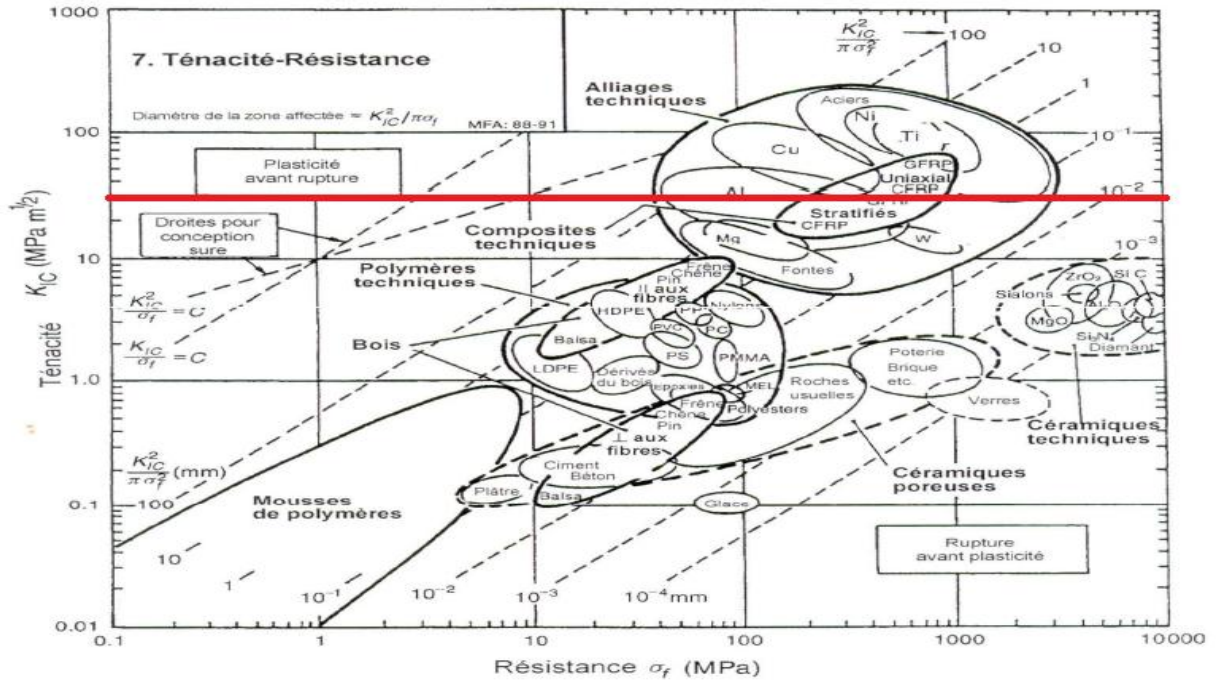


Figure 64 : Critère de ténacité et résistance

A partir du diagramme [4] de la ténacité en fonction de la résistance, seul l'acier qui peut satisfaire les exigences demandées à cause de la faible ténacité des céramiques (matériaux fragiles).

5.3.3. Choix de l'acier :

⇒ [Acier BÖH LER W302 :](#)

Norme : X40CrMoV5-1

Composition chimique :

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.39	1.10	0.40	5.20	1.40	0.95

Tableau 7 : Composition chimique de l'acier BÖH LER W302

Propriétés :

Acier de travail à chaud avec très bonne résistance mécanique aux températures élevées, excellente résistance à l'usure à chaud ainsi qu'une très bonne ténacité et résistance à la fissuration.

⇒ [Acier BÖH LER W403 :](#)

Norme : X37CrMoV5-1

Composition chimique :

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.37	0.20	0.30	5.00	1.30	0.50

Tableau 8 : Composition chimique de l'acier BÖH LER W403

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

Propriétés :

Acier de travail à chaud avec une excellente ténacité, très bonne résistance à chaud, usure minimal à chaud.

- ⇒ Ces aciers sont de moyens teneurs en Carbone, or d'après le diagramme d'usure en fonction de la dureté, la constante d'usure K_a des aciers moyen est comprise entre $4 \cdot 10^{-14}$ et $2 \cdot 10^{-13}$. Ce qui justifie la bonne résistance à l'usure de ces aciers.

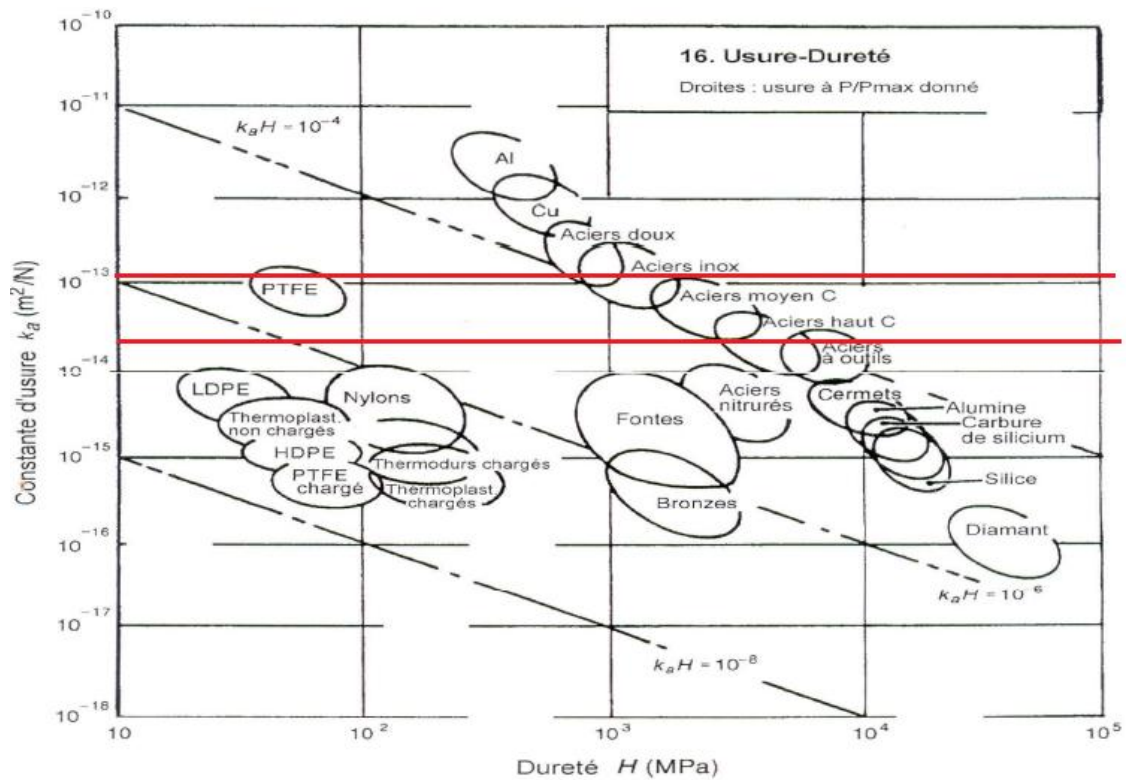


Figure 65 : Diagramme de la constante d'usure K_a en fonction de la dureté H

✓ Comparaison des deux aciers :

Nuance BÖHLER	Résistance mécanique à chaud	Ténacité à chaud	Résistance à l'usure à chaud
BÖHLER W403 VMR			
BÖHLER W302			

Tableau 9 : Comparaison des deux aciers choisis

⇒ Conclusion :

Suite aux exigences demandées pour le fonctionnement, on a choisi l'acier BÖHLER W403 comme matériau des cerces.

5.3.4. Choix de matériau pour joint aval :

Le matériau choisi [15] doit répondre aux exigences suivantes :

- Fonctionnement en haute température $>1050^{\circ}\text{C}$
- Forte résistance mécanique
- Forte ténacité
- Faible coefficient de frottement
- Résistance au choc thermique élevée
- Faible dilatation thermique

On a opté à choisir comme matériau des cerces **l'alliage de molybdène** pour ces propriétés suivantes :

- Température de service au-dessus de 1060°C
- Résistance élevée à l'usure
- Faible coefficient de frottement
- Résistance mécanique élevée à hautes températures.

✓ Composition chimique :

0,5 % de titane, 0,08 % de zirconium, 0,04 % C et le reste étant du molybdène.

⇒ **Conclusion :** L'alliage de molybdène est un matériau très adéquat aux exigences demandées.

5.4. Déformation des viroles :

5.4.1. Introduction :

Les viroles du four subissent des déformations qui ont pour cause en général les contraintes thermiques élevées tel que les points chauds, ces déformations présentent un effet néfaste sur la durée de vie des briques réfractaires, et donnent à la virole une forme de vilebrequin qui cause une surcharge des galets et éventuellement la rupture de leurs arbres.

Pour remédier à la criticité de ce problème, nous allons augmenter sa détectabilité en mettant en place un système de contrôle par laser, lequel fournira des données sur la forme réelle de la virole, pour enfin conclure quant à la gravité de la déformation et la nécessité de remplacement des viroles.

5.4.2. Le mode opératoire

Kiln Shell Laser est un outil de mesure qui permet de connaître la déformation dans le four, les galets ou autre forme cylindrique en faible rotation pendant son fonctionnement.

⇒ L'outil peut mesurer la déformation dans une seule section ou bien plusieurs sections pour avoir la déformation complète dans le four.

La virole du four est exposée à des hautes températures ce qui entraîne des déformations.



Figure 66 : L'outil laser

⇒ Pour mesurer la forme (courbature et excentricité) de la virole on utilise Kiln Shell Laser pendant la rotation du four et qui mesure continuellement sa distance à la virole. La déformation de la virole est la variation de cette distance et sera visualisée sur l'ordinateur qui est connecté par Bluetooth avec le laser.

⇒ Plusieurs mesures peuvent être combinées pour visualiser la déformation complète du four et en 3D. A cause de la réduction de la durée de vie des briques réfractaires causées par la déformation, le logiciel aide à donner des indications sur les viroles qui doivent être changées.

5.4.2.1 Principe de mesure :

Le principe de mesure de la distance du capteur laser est basé sur une étude optique. Le laser se reflète à son contact avec la virole du four. Un capteur optique sensible détecte le laser reflété par la virole.

Pour mesurer la forme (courbature et excentricité) de la virole, le 'Kiln Shell Laser' est placé près du four rotatif (entre 4 et 20m) et mesure continuellement la distance 'a' à la surface de la virole. La déformation est le changement de cette distance et sera enregistré par l'ordinateur, connecté par Bluetooth avec le capteur. Après chaque mesure, un graphe montrant la déformation de la surface sera affiché. Plusieurs mesures peuvent être combinées pour donner un graphe 3D de la déformation du four.

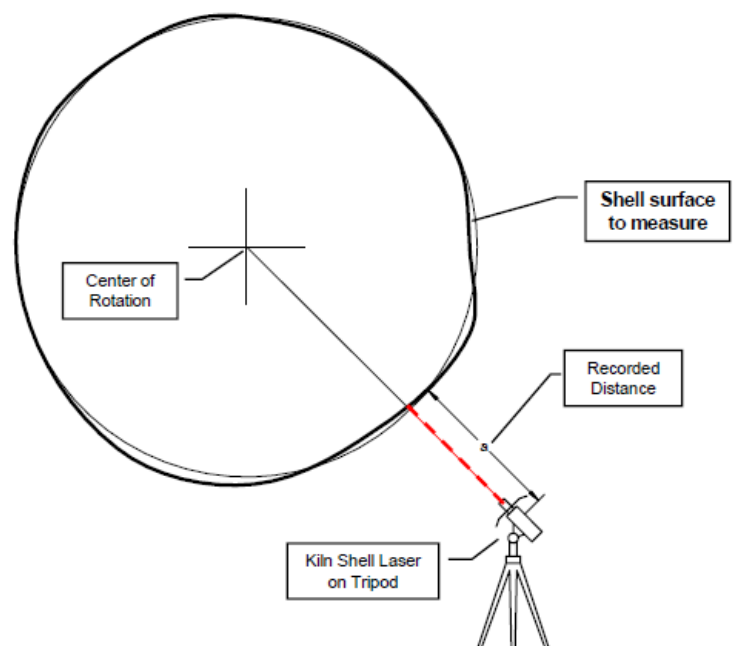


Figure 67 : Positionnement de l'outil laser

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

Le ‘Kiln Shell Laser’ prend 10 mesures par seconde (10Hz). La mesure est complète après deux rotations du four. Pour des applications spéciales, la fréquence peut arriver à 50Hz.

5.4.2.2. Démarrage de l’outil:

5.4.2.2.1. Connexion du capteur avec l’ordinateur :

- ⇒ Après l’installation du logiciel, allumez le capteur ‘Kiln Shell Laser’ (LED2: vert). Quand le Measurement Studio démarre il cherche automatiquement les appareils connus.
- ⇒ Cliquer sur l’appareil connecté (dans ce cas : ‘Kiln Shell Laser’) et une fenêtre s’affiche. Cliquer ensuite sur le bouton “connect”. Une fois connecté, il s’affiche dans la liste des appareils.

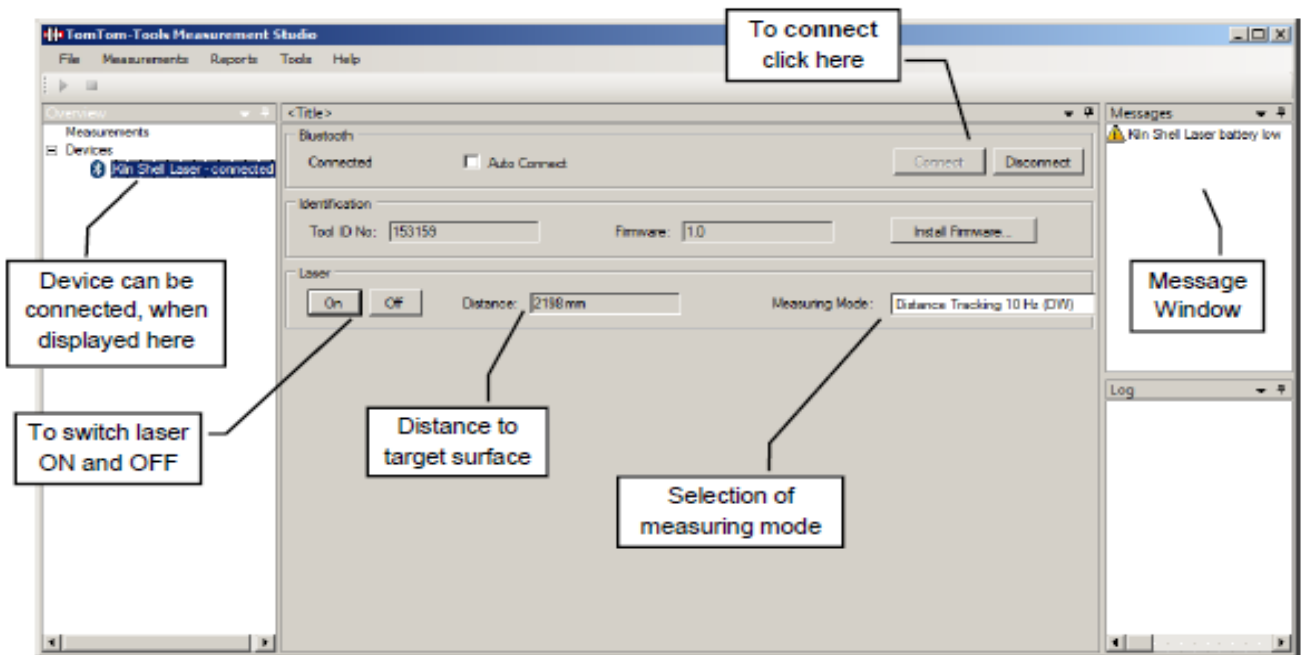


Figure 68 : Connexion du capteur

5.4.2.3. Mesure:

5.4.2.3.1. La fenêtre de mesure:

Pour commencer une nouvelle mesure cliquer sur “Measurement / New / Laser/Shell Runout”.

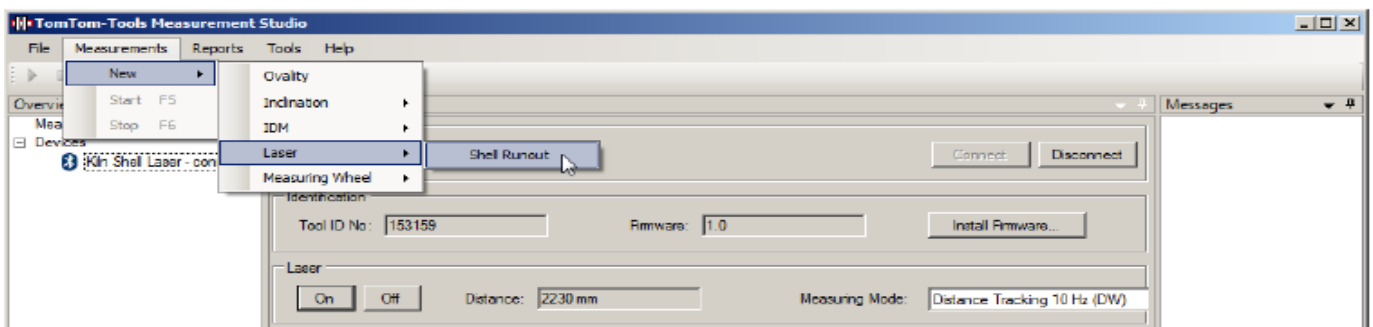


Figure 69 : Choix de la mesure

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

- La première position sera affichée par défaut. Cliquer sur “Add” pour ajouter d’autres positions.
- Entrer les informations nécessaires pour la mesure dans “Settings Window”.
- Spécifier si le ‘0m’ est la position de l’entrée ou bien la sortie de la matière.

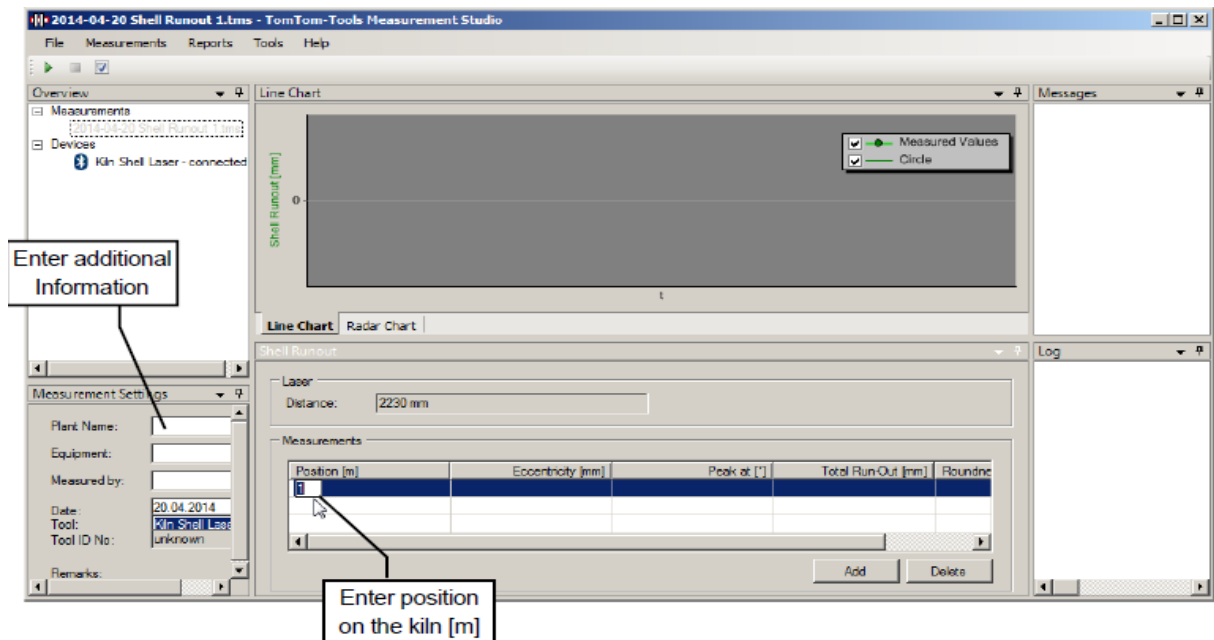


Figure 70 : Informations de la mesure et de la section de mesure

5.4.2.3.2. Emplacement de l’outil :

Pour avoir des mesures exactes, le laser doit passer par l’axe du four et perpendiculaire sur celui-ci.

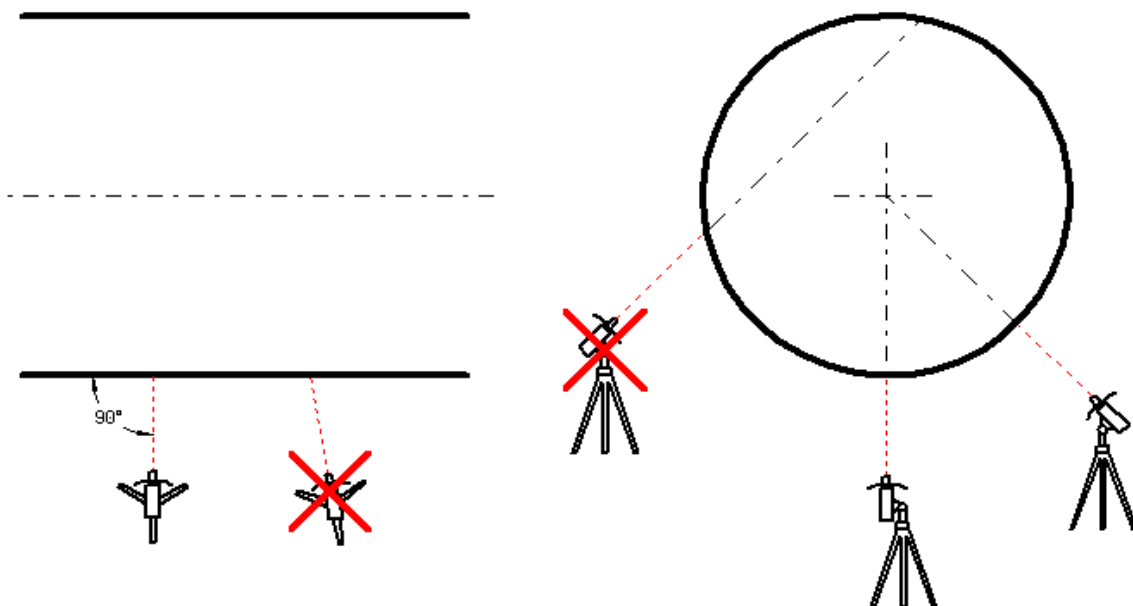


Figure 71 : Emplacement optimal du capteur

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

5.4.2.3.3. Prise des mesures :

- Pour commencer les mesures, sélectionner la position de mesure dans le four et cliquer sur **start button** or **F5**.
- Quand la mesure commence, les valeurs vont apparaitre sur l'écran de l'ordinateur. (Points verts).
- Pour placer correctement le point mesuré dans le graphe, le logiciel a besoin d'une référence lors de la rotation du four. Généralement, le trou d'homme sera pris comme référence. C'est recommandé d'utiliser la même référence pour toutes les mesures.
- A chaque fois que le laser passe par cette référence, cliquer sur le **bouton [F9]** pour indiquer la rotation du four. Une droite jaune sera affichée sur le graphe indiquant cette référence. Après 2..3 rotations du four, cliqué sur le **bouton Stop** ou **[F6]**.

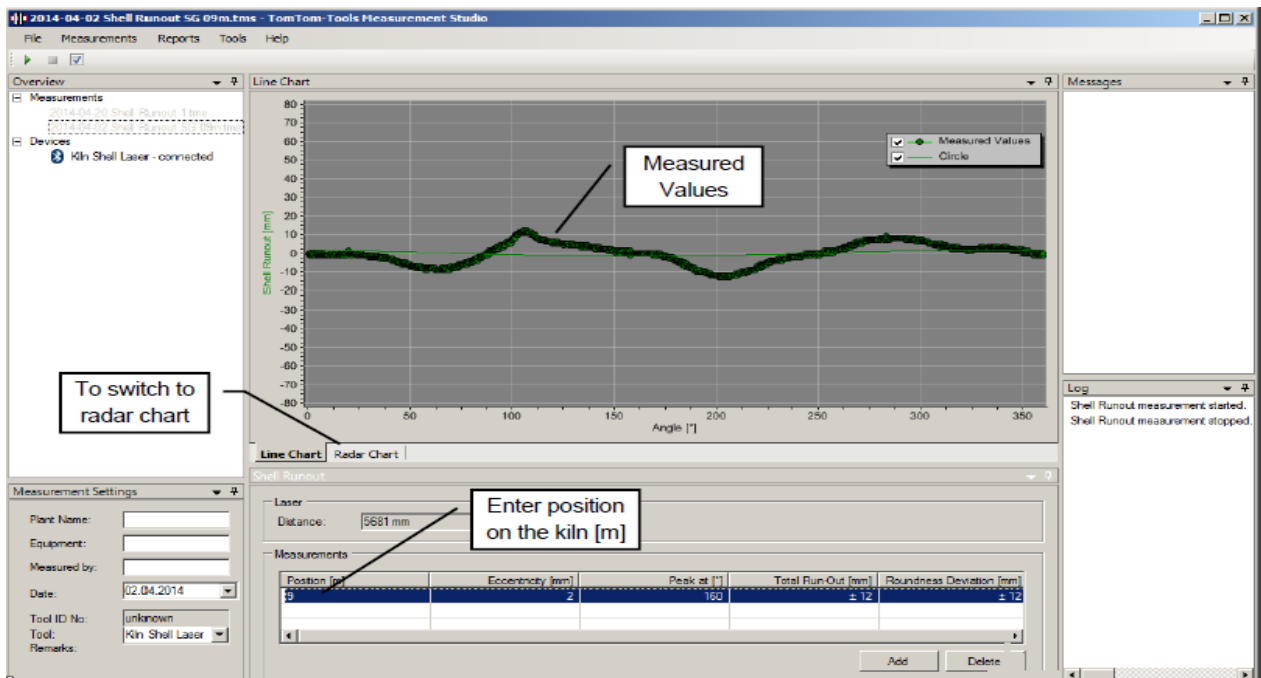


Figure 72 : Collecte des mesures

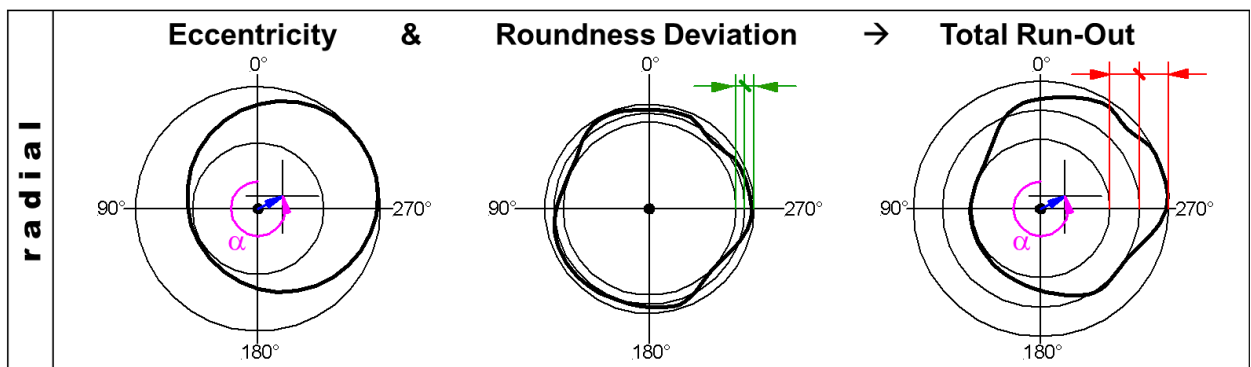


Figure 73 : Les paramètres de mesure

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

- **Eccentricity(excentricité):** c'est la distance entre le centre de la rotation et le centre de la denture.
- **“Peak at”:** indique l'angle ou l'excentricité maximale est détectée.
- **Roundness Deviation(circulativité):** montre la deviation maximale du cercle ideal.
- **Total Run-Out:** c'est la combinaison de l'excentricité avec la circularité.

5.4.2.3.4. Afficher les résultats

Après la collecte des mesures le résultat s'affiche comme ci-dessous :

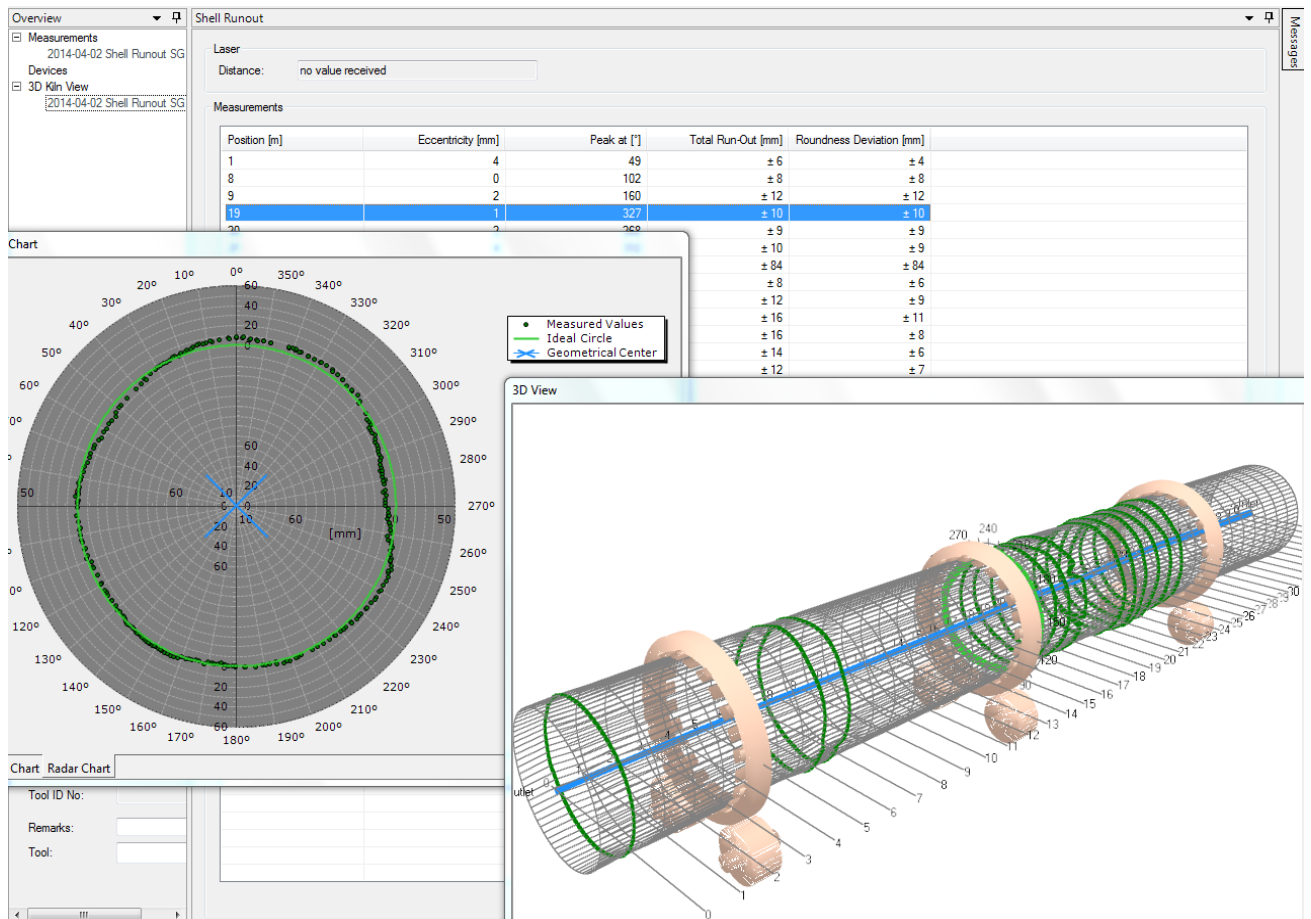


Figure 74 : Affichage des mesures

5.4.3. Analyse des mesures

L'utilisation de l'outil Kiln Shell Laser nous a permis de relever des mesures concernant 4 paramètres : L'excentricité, l'angle de pique et la circularité des sections des viroles.

La criticité de la déformation est liée à sa brutalité, nous utiliserons le critère suivant pour juger de l'état de la virole :

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

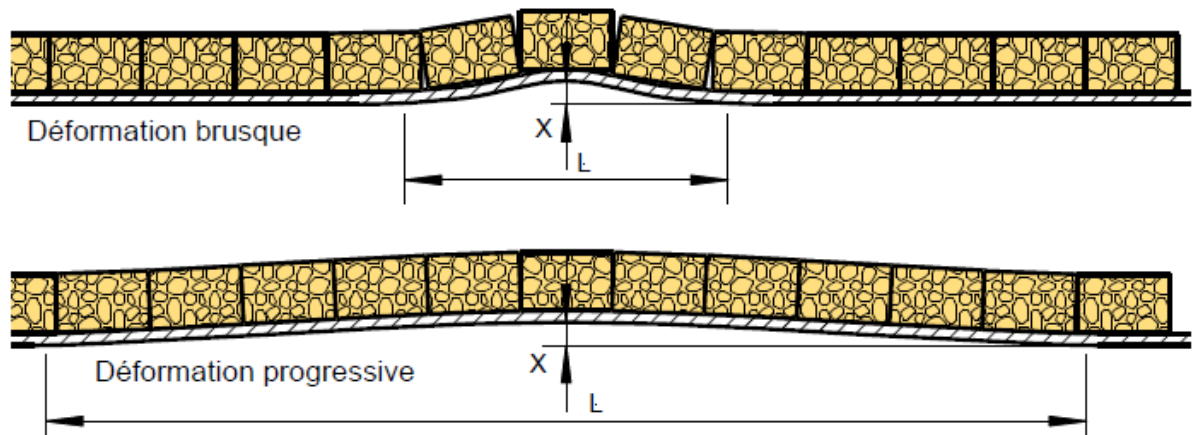


Figure 75 : Pique de déformation

Nous allons comparer l'amplitude de déformation et la longueur de déformation :

- ❖ Lorsque $X < L/300$: La déformation n'est pas critique
- ❖ Lorsque $L/300 < X < L/100$: La virole nécessite un suivi
- ❖ Lorsque $L/100 < X$: Un remplacement de virole est nécessaire

Nous avons effectué 18 mesures sur 63 mètres (Voir ANNEXE), et nous avons pu représenter les déformations de notre four en 3D :

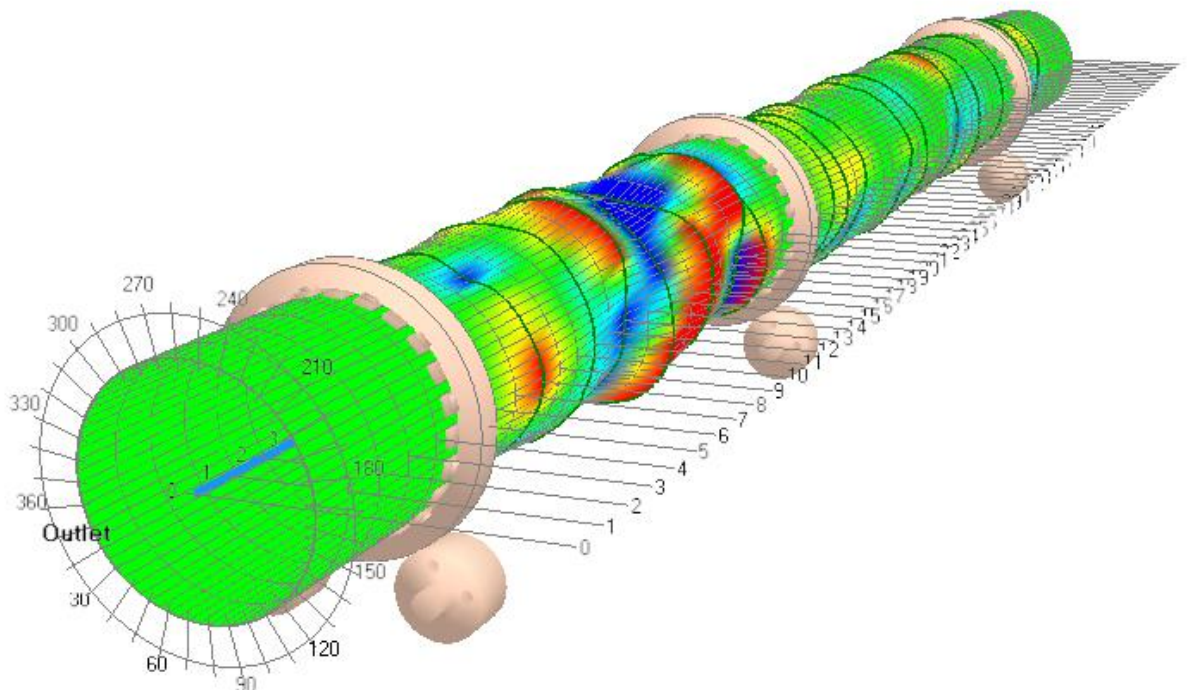


Figure 76 : Représentation 3D des déformations du four

- ⇒ On remarque que les déformations sont concentrées entre la station 2 et la station 3 du four, les déformations entre la station 1 et 2 sont moins prononcées. En effet, l'existence de plusieurs points chauds entre la station 2 et 3 a influencé la forme de la virole.

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

Nous allons calculer pour chaque section la valeur de l'amplitude maximale X et la longueur minimale L tel que X/L soit maximal.

Positions (m)	Excentricité	Pique	Circularité	Déformation totale(mm)	X(mm)	Angle de def.(°)	L/300(mm)	L/100	Criticité	déformation max
8	1	340	14	14	10	37	4,08988821	12,2696646	2	1,50182006
11	1	298	12	12	7	45	4,97418837	14,9225651	2	6,90882533
13	5	291	16	18	20	82	9,06407658	27,1922297	2	3,55042299
15	5	191	27	30	34	78	8,62192651	25,8657795	3	31,4478072
17	5	330	25	28	25	90	9,94837674	29,8451302	2	3,76575951
20	2	253	18	18	20	85	9,39568914	28,1870674	2	70,9545257
21	3	294	15	16	18	75	8,29031395	24,8709418	2	2,37361622
27	6	125	6	9	8	75	8,29031395	24,8709418	1	2,16605165
28	8	141	10	12	14	88	9,7273017	29,1819051	2	7,97493499
30	9	147	11	16	19	115	12,7118147	38,1354442	2	9,82241696
35	9	148	9	14	18	140	15,4752527	46,4257581	2	8,77158012
37	7	164	6	10	8	100	11,0537519	33,1612558	1	4,12453874
42	5	225	9	10	8	70	7,73762635	23,2128791	2	4,46362677
45	3	217	7	8	8	70	7,73762635	23,2128791	2	4,46362677
49	5	325	3	7	8	100	11,0537519	33,1612558	1	4,12453874
52	9	349	9	12	6	50	5,52687597	16,5806279	2	6,18680811
54	10	329	8	14	9	60	6,63225116	19,8967535	2	5,23351014
56	9	348	8	15	9	60	6,63225116	19,8967535	2	5,23351014

Tableau 10 : Les déformations mesurées et les piques calculés

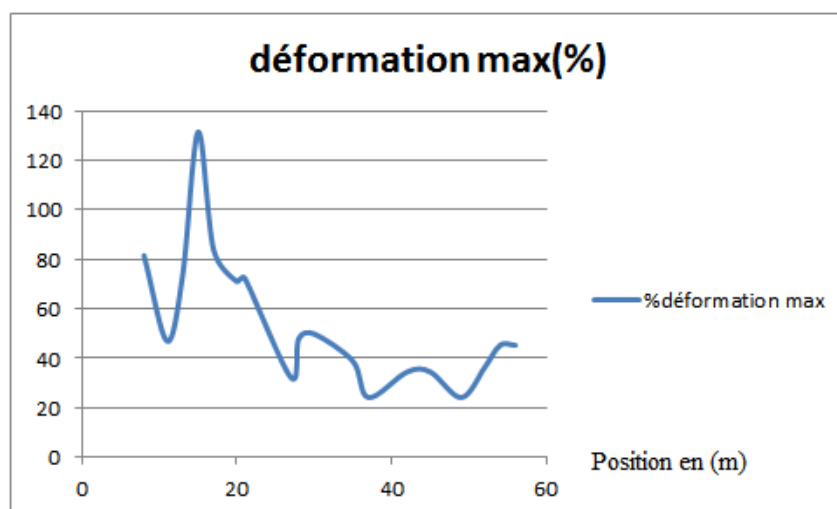


Figure 77 : Pourcentage d'avancement de déformation maximale selon l'axe du four

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

Interprétation :

Les piques de déformations sont plus fréquentes vers la sortie du four, puisque la température de sortie du four est élevée par rapport à celle de l'entrée, elle atteint 1450°C dans la zone de clinkérisation (entre le palier 2 et 3). La déformation totale n'est pas distribuée de la même manière, elle est plus ou moins homogène sur la longueur du four, avec une augmentation entre les sections de 13mètres et 20mètres, cette déformation est due à la distribution non homogène de température qui provient du colmatage de matière sur les parois internes du four.

Recommandation :

La virole de la section 15mètres doit être remplacée, elle présente une grande déformation totale et une déformation brusque très importante, sinon, l'impact sur la dégradation des briques dans cette zone sera élevé, et leur mise en place devient difficile. Cette déformation est probablement la cause du vilebrequin qui aurait causé la rupture de l'arbre du galet.

Les viroles dont la criticité est de 2 nécessitent un suivi régulier, en particulier les sections 8m, 13m, 17m et 20m dont le pourcentage de déformation dépasse 70% par rapport à la déformation maximale, un suivi dont la fréquence est plus importante par rapport aux autres sections de virole et augmente selon l'évolution de la déformation par rapport au temps. La collecte de plusieurs mesures permettra de tracer l'évolution des déformations et des déformations brusques par rapport au temps, et l'extrapolation de la courbe permettra de relever la date de remplacement de virole.

On recommande de diminuer la distance de mesure à partir de la section 27m jusqu'à la sortie du four, cette zone est soumise à des contraintes thermiques élevées.

La température de la virole ne doit jamais dépasser 450°C et l'arrêt du four doit être immédiat. Effectuer les mesures après chaque anomalie de ce type.

5.4.4. Conclusion

La virole du four contient beaucoup de déformation, en particulier dans la zone contenue entre la station 2 et 3, laquelle a subi plusieurs points chauds. La quasi-totalité de la virole du four nécessite un suivi strict, ce qui paraît raisonnable vu la durée de travail du four qui dépasse les 20 ans.

Les méthodes de contrôles de déformations des viroles et d'ovalisation des viroles permettent, en plus de diminuer la criticité de ces deux modes de défaillance, d'atténuer la criticité de chute des briques réfractaires dont la cause est l'ovalisation et déformation de virole.

5.5. Les plaques nose-ring

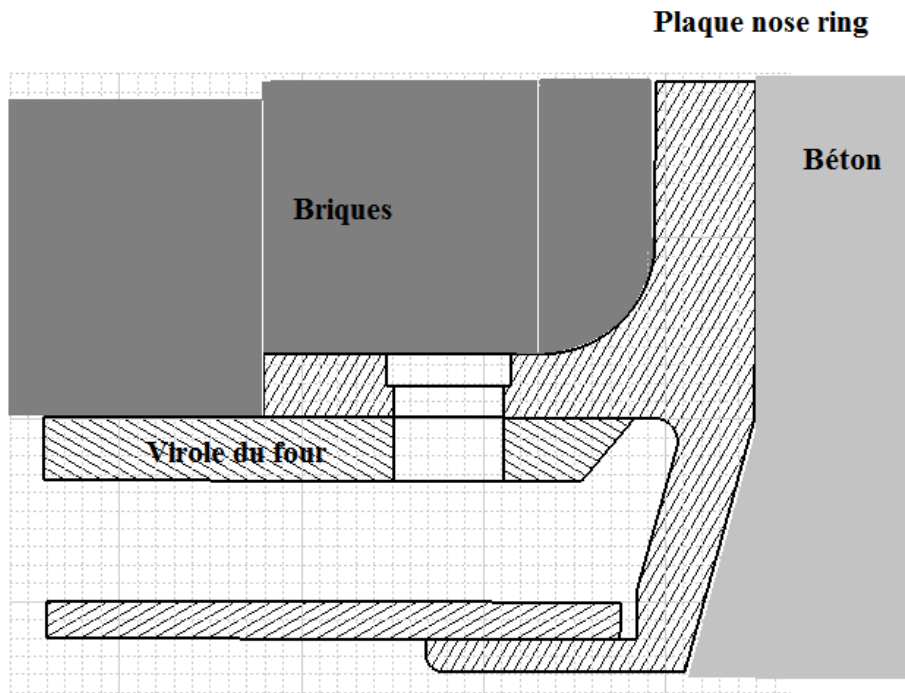


Figure 78 : Conception actuelle des plaques nose-ring

Les plaques nose ring ont pour rôle de protéger la virole et supporter la charge axiale des briques réfractaires.

L'inconvénient de la conception actuelle réside dans l'usure des plaques, ce qui diminue leur résistance et ne permet plus de supporter les briques réfractaires et de protéger la virole contre la température élevée d'environ 1100 °C.

Le béton est utilisé pour diminuer le flux de chaleur transmis à la virole du four.

La cause de l'usure des plaques est l'abrasion par les particules du clinker à haute température.

Les informations techniques dont nous disposons ne sont pas suffisantes pour mener à bien une étude de conception. Nous allons proposer des solutions et des recommandations qualitatives.

Nous allons changer la forme des plaques nose ring afin qu'on puisse les protéger contre l'usure et avoir un bon appui des briques après l'usure des plaques.

Nous proposerons un type de béton qui satisfait le compromis : une bonne tenue à l'usure et une faible transmission de chaleur.

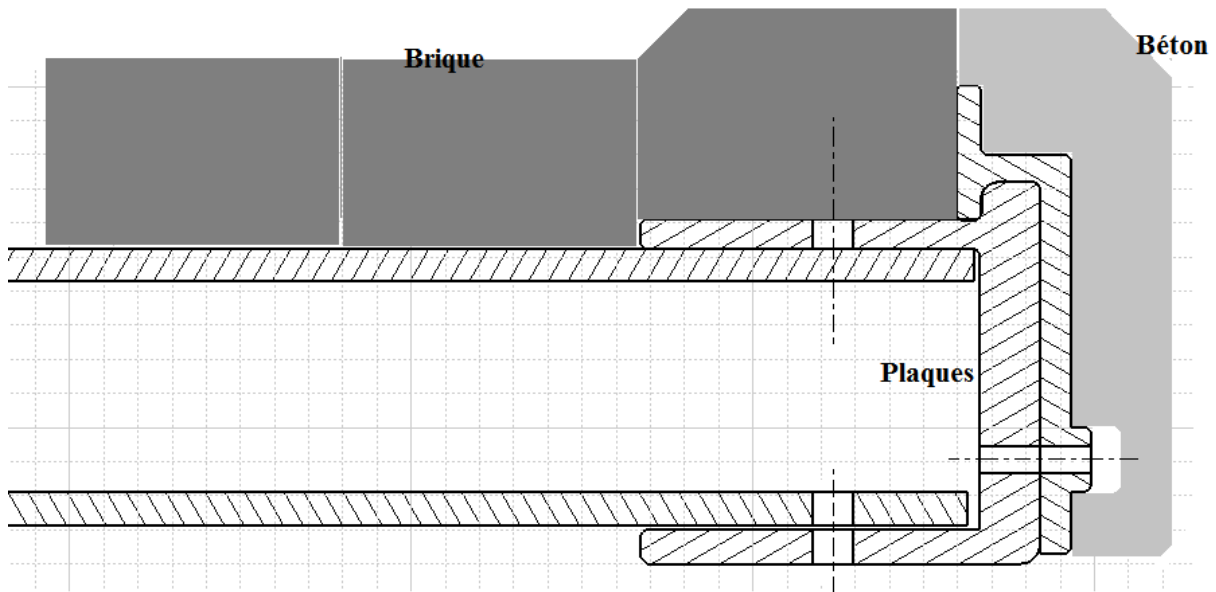


Figure 79 : Dessin de coupe de la nouvelle conception nose-ring

La nouvelle forme des plaques nose ring est plus protégée par le béton qui a une bonne tenue à l'usure, ce qui permettra d'allonger la durée de vie des plaques. L'usure de la surface des plaques nose ring ne nécessitera pas un remplacement systématique de ces derniers, car les briques sont appuyées sur le béton, lequel est solidaire aux parois des plaques nose-ring.

Pour ce genre d'utilisation on utilise le béton de composition 40% d'alumine Al_2O_3 et 60% de SiO_2 et SiC. Ceci lui procure à la fois une bonne tenue à l'usure et une faible transmission de chaleur et une bonne résistance aux chocs thermiques, toutefois, il faut appliquer des vibrations pendant le coffrage pour avoir de bonnes propriétés thermiques.

⇒ Conclusion

Le manque de donnée ne nous a pas permis de mener une étude de conception des plaques, mais, l'utilisation de la nouvelle forme peut profiter à la résistance des plaques contre l'usure et diminuer sa criticité.

5.6. Conclusion

En définitive, nous avons élaboré une analyse AMDEC afin d'identifier les éléments névralgique, il s'est avéré que la rupture répétitive des vis de la butée présente l'un des problèmes prioritaire que nous avons traité séparément.

Le problème de rupture de l'arbre du galet est un problème critique, nous avons vérifié sa tenue en statique et en fatigue pour enfin aboutir à un redimensionnement et un suivi continue de la flexion. La virole présente des risques nécessitant le suivi régulier, c'est pourquoi nous avons mis en place des outils de mesure de déformation et d'ovalisation qui nous permettront d'anticiper les pannes. En somme, l'instauration des nouvelles solutions nous a permis de minimiser la criticité des défaillances, qui sera détaillée dans le paragraphe suivant.

5.7. Résultat d'analyse AMDEC après instauration des nouvelles solutions

Élément	Mode de défaillance	Causes	Effets	Criticité	Actions	Nouvel le Criticité
Moteur électrique	Couple insuffisant	-Défauts internes. Contrôle/réglage. Charge excessive	Vitesse de rotation du four faible. Diminution de production. Risque de colmatage.	6	Suivi régulier du couple absorbé	6
Réducteur	Diminution de la viscosité d'huile	Température d'huile élevée	Inefficacité de lubrification. Usure dentures engrenage. Mauvais rendement en puissance du réducteur.	4	Contrôle régulier de la température de l'huile	4
	Usure des dentures.	Lubrification insuffisante.	Diminution du rendement en puissance	3	Analyse des huiles	3
Pignon	Usure des dentures	Lubrification défaillante. Entraxe déréglé. Désalignement denture pignon/couronne.	Résistance affaiblie des dentures. Durée de vie diminuée. Rendement en puissance diminuée. Vibration.	6	Analyse des huiles-contrôle des dentures pendant l'arrêt	6
Couronne	Usure des dentures	Lubrification défaillante. Entraxe déréglé. Désalignement denture pignon/couronne.	Résistance affaiblie des dentures. Durée de vie diminuée. Rendement en puissance diminuée. Vibration.	6	Analyse des huiles-contrôle des dentures pendant l'arrêt	6
Bandage	Fissuration	Mauvais contact bandage/galet. Usure excessif. Bandage oscillant.	Affaiblissement de résistance. Rupture du bandage.	9	CND	9
	Glissement incorrecte négatif	Augmentation de température virole. Mauvais suivi de démarrage à froid.	Déformation permanente de la virole. Dégradation des briques réfractaires.	36	suivi continu du glissement(MKM) et de	12

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

					l'ovalisation	
	Glissement incorrecte positif	Plaques compensations insuffisantes. Augmentation de température de bandage.	Ovalisation de la virole. détérioration brique. point chaud virole	36	suivi continu du glissement (MKM) et de l'ovalisation	12
	Bandage oscillant	Cylindricité intérieure du bandage incorrecte. Jeu excessif bandage/virole.	Pression surfacique excessive. Usure de surface. Fissuration bandage et galet.	9	Contrôle IDM (tire runout)-contrôle du jeu	3
	Usure des plaques de compensation	Frottement de glissement.	Augmentation du jeu.	6	Contôle des plaques pendant l'arrêt du four	6
	Rupture des blocs de poussée	Fissuration. Oscillation du bandage.	Détachement du bandage.	6	Contrôle CND pendant l'arrêt du four	6
	Usure des cerces du bandage	Oscillation du bandage.	Oscillation plus importante.	6	Contrôle des cerces pendant l'arrêt du four	6
Galet	Propagation rapide des fissures	Fatigue-effet Vilebrequin. Flexion rotative. Charge excessive	Résistance affaiblie-rupture-diminution de la durée de vie	32	Vérification RDM de l'arbre du galet-contrôle de déformation de la virole (Kiln shell laser)	4
	Flexion excessive	Charge élevée. Effet vilebrequin. Bandage oscillant	Risque de rupture élevée. Fissuration	27	Contrôle de la déformat	9

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

					ion du four	
	Température élevée au palier	Température virole élevée. Refroidissement inefficace. Lubrification insuffisante. Frottement axial/radial	Dégradation du coussinet. Microsoudure ou soudure entre coussinet et l'arbre.	8	Suivi régulier de la température des paliers des galets	8
	Inclinaison axe galet/axe bandage	Mauvais réglage. Oscillation du bandage	Surcharge au niveau de la surface de contact galet/bandage	6	Contrôle IDM (tire runout)	2
	Cylindricité	Usure non homogène	Usure des surfaces de contact galet/bandage à cause de la charge surfacique excessive	6	Contrôle de l'usure par méthode du fil du plomb	6
	Ecaillage de la surface du galet	Dépassement de la durée de vie.	Risque d'endommagement du bandage	4	Contrôle par méthode du fil de plomb	4
Pression d'Hertz excessive		Risque d'endommagement du bandage	4	4		
Joint amont	Etanchéité insuffisante	Usure des cerces.	Entrée de l'air faux dans le four.	32	Suivi régulier de la pression des vérins-changement de matériau des cerces	8
		Cordon d'étanchéité.	Entrée de l'air faux dans le four.	12		12
		Problème dans le vérin.	Ouverture du joint.	8		8
		Pression insuffisante. Problème de circuit d'air comprimé.	Entrée de l'air faux dans le four.	2		2
Joint aval	Etanchéité insuffisante	Usure des cerces.	Entrée de l'air faux dans le four	32	Suivi régulier de la pression	8
		Cordon d'étanchéité.	Entrée de l'air faux dans le four.	12		12

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

		Problème dans le vérin.	Ouverture du joint.	8	des vérins-changement de matériaux des cerces	8
		Pression insuffisante. Problème de circuit d'air comprimé.	Entrée de l'air faux dans le four.	2		2
Virole	Déformation	Tâche rouge. Flexion du four. Température non uniforme. Chute des briques. Croûtage	Fissure galet-flexion arbre galet-charge excessive sur galet-chute/fissuration des briques. Faux rond sur la couronne.	36	Contrôle de la déformation du four (Kiln shell laser) - suivi régulier de la température de la virole-vérification de l'absence du croûtage	12
	Ovalisation	Jeu relatif excessif	Domage des briques. Fissuration longitudinale. Endommagement virole.	24	Contrôle de l'ovalisation (ovality sensor)	8
	Fissuration circulaire	Endommagement de la soudure de transition entre deux épaisseurs différentes de la virole. Mauvais alignement de l'axe du four. Température élevée virole. Corrosion. variation brusque d'épaisseur. Mauvaise qualité soudure.	Risque de rupture de la virole. Fuite de matière à très haute température.	12	CND pendant l'arrêt du four	12
	Fissuration longitudinale	Soudure des blocs de fixation du bandage.	Fissuration et diminution de la durée de vie des briques	8	CND pendant	8

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

		Grande ovalisation. Charge excessive sur le bandage. Température élevée de la virole			l'arrêt du four-contrôle d'ovalisation-suivi régulier de la température de la virole	
	Déviaton de l'axe	Mauvais réglage de position galet. Déformation plastique	Problème de descente du four.	6	Contrôle de l'alignement du four	6
	Effet vilebrequin	Point chaud. Vilebrequin de température.	Flexion importante de l'arbre du galet. Risque de rupture du galet.	24	Suivi régulier de la température de la virole du four-suivi continu de la flexion de l'arbre du galet(MKM)	8
Les briques	Usure des briques	Ovalisation. déformation de la virole. choc thermique.	Apparition de points chauds. chute des briques.	12	Contrôle régulier de l'ovalisation- de la déformation de la virole-contrôle des briques pendant l'arrêt du four	6
	Chute des briques		Apparition de points chauds. Effet vilebrequin	32		16
Butée hydraulique	Rupture des vis	Surpression. Surcharge du four. Désalignement de l'axe du four.	Perte de maintien en position de la butée. Risque de retour brusque du four.	48	Changement du diamètre des vis	12

Chapitre 5 : Analyse des défaillances critiques

		Fatigue des vis.				
	Supression	Charge du four élevée.	Risque de rupture des vis à long terme.	6	suivi de la pression de la pompe	6
	Chute de pression de descente	Pressostat défaillant.	Temps d'attente supplémentaire en fin de course.	3	suivi de la pression de la pompe	3
	Blocage en descente	Alignement du four incorrect.	Usure des bandages et galets à long terme.	6	Contrôle de l'alignement du four	6
Plaques nose-ring	Usure des plaques	Abrasion à haute température à cause du flux de clinker.	Perte du maintien des briques réfractaires	32	Changement de conception des plaques nose-ring	12

Tableau 11 : Résultat de l'analyse AMDEC

Chapitre 6

Chapitre 6 : Etude technico-économique

Dans ce chapitre, nous étudierons les coûts des solutions proposées, le gain prévu en comparaison aux anciennes solutions et le temps de retour sur investissement.

6.1. Introduction

L'étude technico-économique est basée sur l'évaluation des coûts de maintenance avant l'implantation des solutions proposées, puis leur comparaison aux coûts de maintenance après l'instauration des solutions, tout en calculant le temps de retour sur investissement estimé pour budgets investis.

Le coût de la maintenance [8] C_m se décompose en coût direct et indirect :

$$C_m = C_d + C_i$$

- Le coût direct C_d est celui des pièces de rechanges, de la main d'œuvre, des contrats de la maintenance et coûts des matières consommables.
- Le coût indirect de la maintenance C_i est lié aux coûts générés suite aux arrêts de production.

6.2. La butée hydraulique :

✓ Avant amélioration :

Le coût direct : Les vis M12x35 qualité 10.9 coûtent environ 10Dh l'unité. On le néglige devant le coût indirect. L'usine possède une grue pour déplacer la butée hydraulique.

Le coût indirect : La rupture des vis de la butée hydraulique arrive trois fois par an et implique un arrêt du four de 2h. Donc un arrêt de la production. L'usine produit environ 180 t/h du ciment et le gain est de 200 Dhs/t du ciment.

Donc le coût de la maintenance annuel de la butée hydraulique est :

$$C_d = 3 * 2 * 200 * 180 = 216000 \text{ Dhs}$$

✓ Après amélioration :

Le coût direct : Les vis M15x35 qualité 10.9 coutent environ 20 Dh l'unité, négligeable devant le coût indirect. Le coût estimé d'usinage des taraudages de la butée, en sous-traitance, est de 10000Dhs (le coût inclue l'usinage de la butée hydraulique principale et celle de rechange).

Le coût indirect : La modification va être réalisée lors du prochain arrêt programmé du four, ce qui ne va pas influencer la production.

Temps estimé de retour sur investissement : $Tr = 10000 * 12 / 216000 = 0.55 \text{ Mois}$

Donc $Tr = 17 \text{ jours}$.

6.3. Le galet:

✓ Avant amélioration :

La rupture du galet implique des dommages économiques énormes. En effet, la rupture du galet dans une station peut entraîner la rupture de la virole de cette station, on estime une probabilité de 10% pour cet événement. Aussi, il y'a un grand risque du colmatage de la matière à l'intérieur du four, car la rotation du four devient impossible et celle-ci ne peut être évacuée, ce qui impliquera un changement des briques affectées après l'installation du galet et nécessitera 5 jours supplémentaires d'arrêt de production. Notons que le quart des briques installées seront affectées au cas du colmatage.

Le changement de la virole nécessite 15 jours d'arrêt de production.

Les coûts estimés sont :

- Changement de la virole avec une probabilité de 10% : $1\,500\,000 \times 0.1 = 150\,000$ Dhs
- 20 jours d'arrêt de production (dont 15 jours avec une probabilité de 10%) :
 $5 \times 24 \times 180 \times 200 + 0.1 \times 20 \times 24 \times 180 \times 200 = 6\,048\,000$ Dhs
- Changement des briques : $315 \times 60 \times 250 / 4 = 1\,180\,000$ Dhs
- Changement de galet : 1 000 000 Dhs

Donc le coût total de la maintenance est de : **8 978 000 Dhs.**

Avec une fréquence estimée d'une fois tous les trois ans.

Des coûts supplémentaires relatifs au temps d'approvisionnement pour une défaillance imprévisible peuvent s'additionner, mais, nous ne disposons pas des informations nécessaires pour le calcul.

✓ Après amélioration :

Le changement du diamètre de l'arbre du galet et les outils de suivi (MKM, Kiln Shell Laser) vont diminuer la probabilité de la rupture de l'arbre du galet. Et le changement du galet va être réalisé lors d'un arrêt programmé du four pour ne pas influencer la production.

Les coûts estimés sont :

- Deux galets pour la station 3 (dont le coût est supérieur à celui de l'ancienne conception) :
 $2 \times 1\,200\,000 = 2\,400\,000$ Dhs
- Les outils de suivi : 800 000 Dhs

Donc le coût total de l'investissement est de : **3 200 000 Dhs.**

⇒ Temps estimé de retour sur investissement avec un taux d'inflation de 5%:

$$Tr = (3\,200\,000 \times 12 + 3\,360\,000 \times 12 + 3\,528\,000 \times 12) / 8\,978\,000 = 14 \text{ Mois}$$

6.4. L'ovalisation et déformation des viroles :

✓ Avant amélioration :

Le glissement négatif excessif donne lieu au fretage entre la virole et le bandage, et la déformation causée généralement par la température excessive, impliquent un changement de la virole. Le changement de la virole nécessite 15 jours d'arrêt de production.

Les coûts estimés sont :

- Changement de la virole : 1 500 000 Dhs
- 15 jours d'arrêt de production : $15 \times 24 \times 180 \times 200 = 12\,960\,000$ Dhs

Donc le coût total de la défaillance est de : 13 960 000 Dhs

✓ Après amélioration :

Le capteur d'ovalisation, le capteur laser de déformation et le système MKM permettent de suivre et programmer le changement de la virole pendant un arrêt programmé n'influençant pas la production.

Les coûts estimés sont :

- Achat des outils de suivi (MKM, capteur ovalisation et capteur laser) : 800 000 Dhs
- Changement de la virole : 1 500 000 Dhs

Donc le coût total de la maintenance après l'achat des outils est : 1 500 000 Dhs.

Nous avons pu éliminer les coûts d'arrêt de production, sachant que la fréquence de la défaillance est estimée à une fois tous les quatre ans.

⇒ le temps de retour sur investissement avec un taux d'inflation de 5% sera :

$$Tr = (800\,000 \times 12 + 840\,000 \times 12 + 882\,000 \times 12 + 926\,100 \times 12) / (13\,960\,000 - 1\,500\,000)$$

Donc $Tr = 3.5$ Mois

6.5. Conclusion

L'étude technico-économique montre que les budgets dépensés pour implanter les nouvelles solutions seront rapidement amortis pour des temps de retour sur investissement inférieurs à 14 mois.

- ✚ L'implémentation des solutions étudiés dans ce chapitre permettra à l'entreprise de réaliser des bénéfices annuels de :

$$B = 216\,000 \times 3 + 8\,978\,000 / 3 + (13\,960\,000 - 1\,500\,000) / 4 = 6\,750\,000 \text{ DH}$$

- ✚ Le temps de retour sur investissement global est :

$$Tr = (800\,000 + 10\,000 + 3\,200\,000) \times 12 / 6\,750\,000 \rightarrow Tr = 8 \text{ Mois}$$

Conclusion générale

En guise de conclusion, ce sujet nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine de cimenterie, notamment, les fours rotatifs de cimenterie.

Ainsi, nous avons pu appliquer nos diverses connaissances pédagogiques en mettant en œuvre nos compétences d'analyse et relationnelles dans l'étude des problématiques de maintenance, d'étude et de conception.

Nous avons été impliqués dans la maintenance du four et l'implantation de nouvelles techniques de suivi conditionnel, et nous avons proposé de nouvelles conceptions basées sur nos études, lesquelles ont permis d'atteindre les buts fixés par notre stage de fin d'étude.

L'analyse AMDEC nous a permis de relever les problèmes critiques afin de diminuer leur criticité. Nous avons traité les 12 problèmes critiques à savoir :

-La butée hydraulique : le changement de conception (diamètre des vis plus grand) a permis de minimiser la probabilité de rupture des vis, ainsi, de performer la fiabilité de la butée.

-L'arbre de galet : Nous avons pu diminuer la probabilité de défaillance en augmentant le diamètre de l'arbre.

-Système MKM : l'implantation de ce système a influencé la détectabilité de la flexion de l'arbre du galet, la détectabilité de l'effet vilebrequin et celle du glissement du bandage, ainsi, la criticité de ces problèmes a nettement diminuée.

-Le contrôle d'ovalité : Ce contrôle a permis de déceler les problèmes dans la virole sous bandage, et permettra de détecter les problèmes éventuels qui pourront survenir.

-Le contrôle de déformation : celui-ci a permis de connaître la forme réelle de notre four, et permettra de détecter les déformations que subira la virole du four.

-Les joints du four : nous avons cherché le meilleur type de matériaux qui permettra de résister aux contraintes du four. Ceci procure une meilleure durée de vie aux joints.

-Les plaques nose-ring : Nous avons mené une étude qualitative qui augmentera la durée de vie des plaques et résisteront mieux à l'usure.

-La chute et usure des briques : nous avons diminué sa criticité, mais une étude d'ordre process pourrait offrir des solutions efficace à ce problème.

L'étude technico-économique a montré que le temps de retour sur investissement des solutions proposé est favorable à leur implantation.

Bibliographie

Livres et documents :

- [1] : BAT_Majal_31_Version_Française, 20p, 2010
- [2] : Documentation Holcim
- [3] : Cours théorie des mécanismes
- [4] : Des matériaux
- [5] : Formulaire de mécanique, Chapitre 6 boulonnerie et vis, Y. Xiong, 488P, 2002.
- [6] : Techniques de l'ingénieur, Robert BASTIER ,Alexandre BOCAN ,Bernard GILBERT et Alain REGNAULT, 12p
- [7] : Cours de maintenance, AMDEC
- [8] : Cours de maintenance, la fonction maintenance

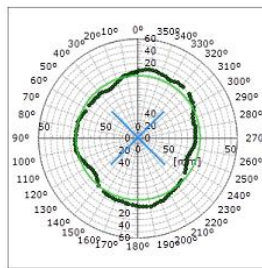
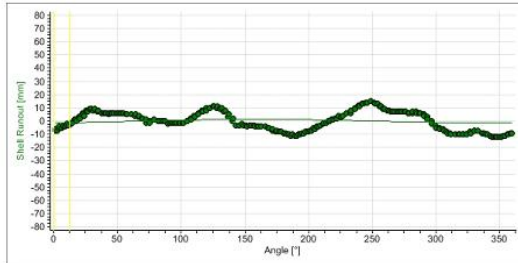
Webographie :

- [9] : Présentation 69p, <http://fr.slideshare.net/pradeepdeepi/reffailue-nosering-pradeep-kumar>
- [10] ; https://campus.mines-paristech.fr/pluginfile.php/11280/mod_resource/content/1/res/Vademecum_calcul_entailles_2011-06-23-1.pdf (concentration vis)
- [11] : www.holcim.fr/securite
- [12] : www.holcim.nl/securitechezholcim
- [13] : www.bohler.com/Joint%20amont-aval/Bohler%20-%20Division%20de%20Bohler-Uddeholm%20France%20-%20Aciers%20pour%20travail%20à%20chaud.html
- [14] : www.tdi.fr/fr/vis-tete-hexagonale-classe-109-entierement-filetee/9763-vis-tete-hexagonale-entierement-filetee-din-933-m12-x-175-x-35mm-cl109.html
- [15] : <http://www.plansee.com/fr/Materiaux-Molybdene-402.htm>
- [16] : http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9taux_r%C3%A9fractaires
- [17] : <http://www.evariste.org/100tc/1996/f089.html>

Liste des annexes :

ANNEXE [1]

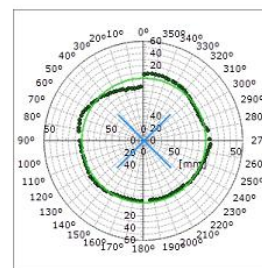
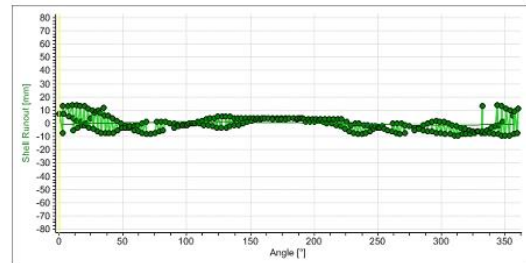
Position: 8,00m



Measurement

Position from Outlet: 8,0 m
Eccentricity: 1 mm
Peak at: 340°
Total Run-Out: ± 14mm
Roundness Deviation: ± 14 mm

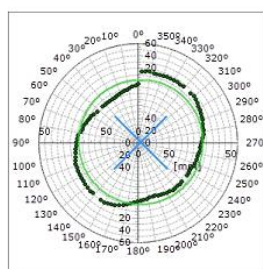
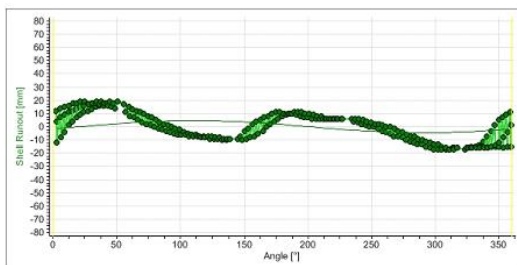
Position: 11,00m



Measurement

Position from Outlet: 11,0 m
Eccentricity: 1 mm
Peak at: 298°
Total Run-Out: ± 12mm
Roundness Deviation: ± 12 mm

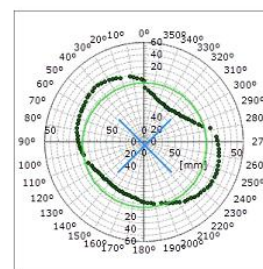
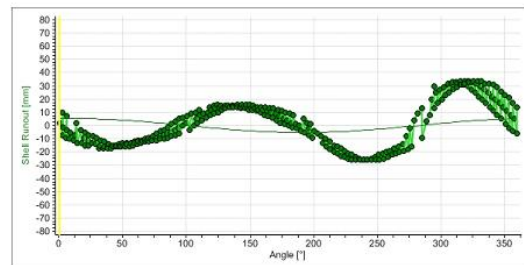
Position: 13,00m



Measurement

Position from Outlet: 13,0 m
Eccentricity: 5 mm
Peak at: 291°
Total Run-Out: ± 18mm
Roundness Deviation: ± 16 mm

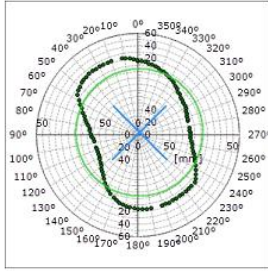
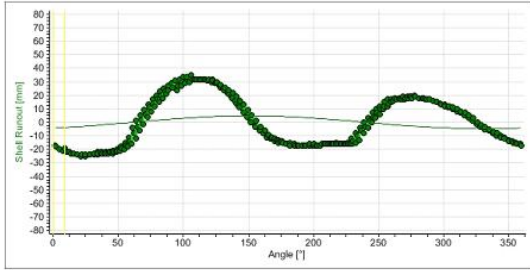
Position: 15,00m



Measurement

Position from Outlet: 15,0 m
Eccentricity: 5 mm
Peak at: 191°
Total Run-Out: ± 30mm
Roundness Deviation: ± 27 mm

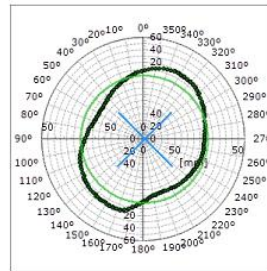
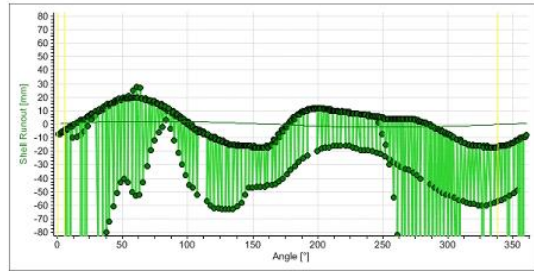
Position: 17,00m



Measurement

Position from Outlet: 17,0 m
 Eccentricity: 5 mm
 Peak at: 330°
 Total Run-Out: ± 23mm
 Roundness Deviation: ± 25 mm

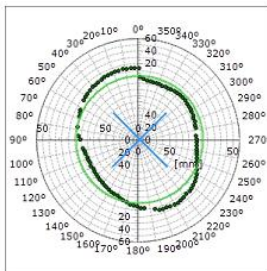
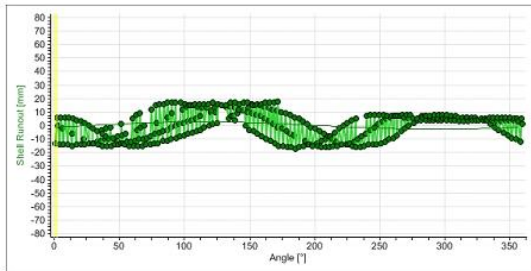
Position: 20,00m



Measurement

Position from Outlet: 20,0 m
 Eccentricity: 2 mm
 Peak at: 253°
 Total Run-Out: ± 18mm
 Roundness Deviation: ± 18 mm

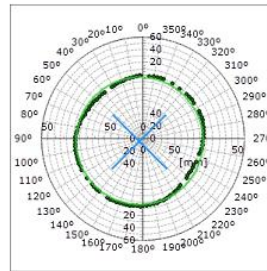
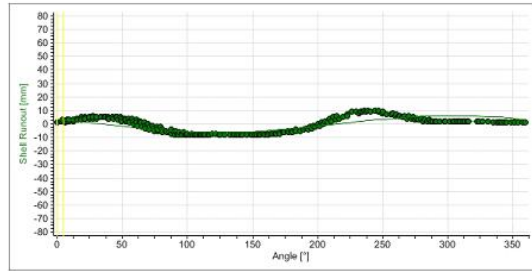
Position: 21,00m



Measurement

Position from Outlet: 21,0 m
 Eccentricity: 3 mm
 Peak at: 294°
 Total Run-Out: ± 16mm
 Roundness Deviation: ± 15 mm

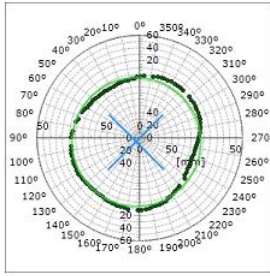
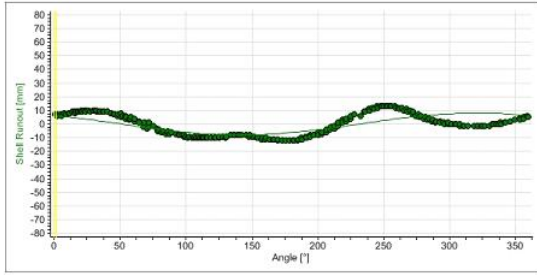
Position: 27,00m



Measurement

Position from Outlet: 27,0 m
 Eccentricity: 0 mm
 Peak at: 125°
 Total Run-Out: ± 9mm
 Roundness Deviation: ± 6 mm

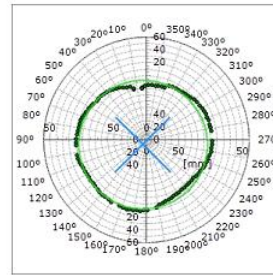
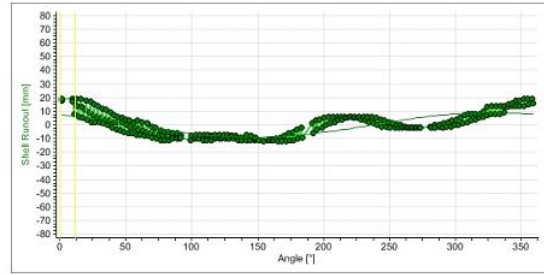
Position: 28,00m



Measurement

Position from Outlet: 28,0 m
 Eccentricity: 8 mm
 Peak at: 141°
 Total Run-Out: ± 12mm
 Roundness Deviation: ± 10 mm

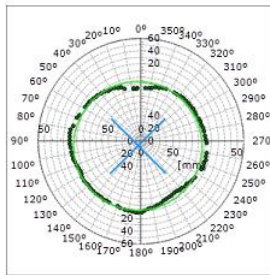
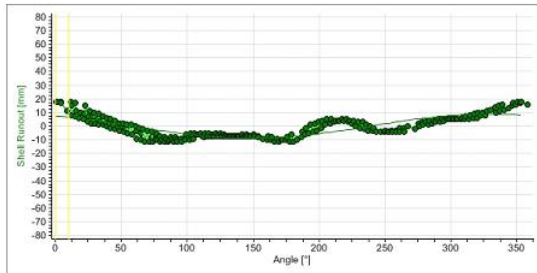
Position: 30,00m



Measurement

Position from Outlet: 30,0 m
 Eccentricity: 9 mm
 Peak at: 147°
 Total Run-Out: ± 16mm
 Roundness Deviation: ± 11 mm

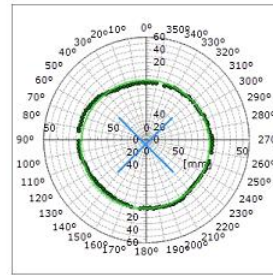
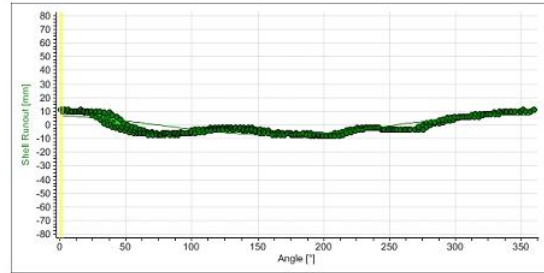
Position: 35,00m



Measurement

Position from Outlet: 35,0 m
 Eccentricity: 9 mm
 Peak at: 148°
 Total Run-Out: ± 14mm
 Roundness Deviation: ± 9 mm

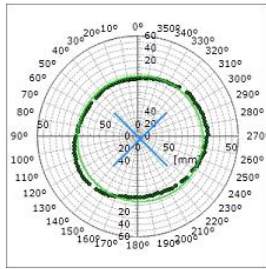
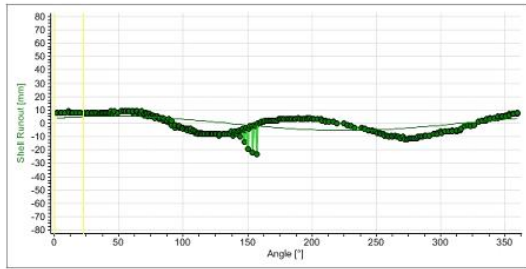
Position: 37,00m



Measurement

Position from Outlet: 37,0 m
 Eccentricity: 7 mm
 Peak at: 164°
 Total Run-Out: ± 10mm
 Roundness Deviation: ± 6 mm

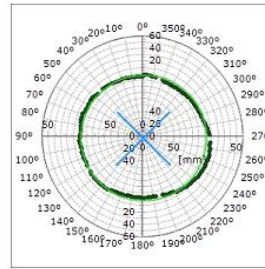
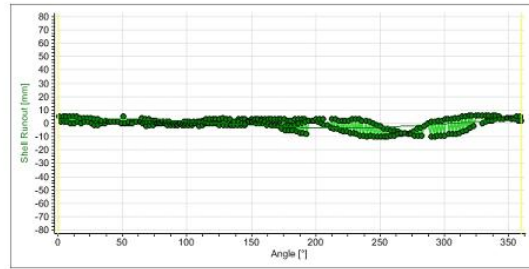
Position: 42,00m



Measurement

Position from Outlet: 42,0 m
Eccentricity: 5 mm
Peak at: 225°
Total Run-Out: ± 10mm
Roundness Deviation: ± 9 mm

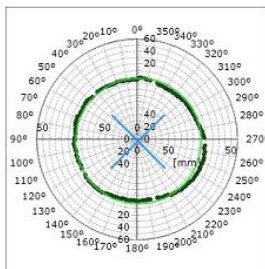
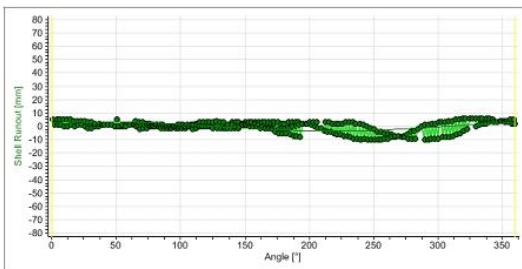
Position: 45,00m



Measurement

Position from Outlet: 45,0 m
Eccentricity: 3 mm
Peak at: 217°
Total Run-Out: ± 8mm
Roundness Deviation: ± 7 mm

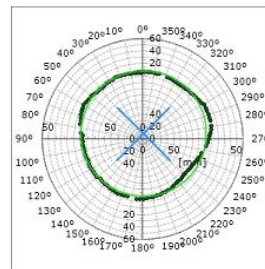
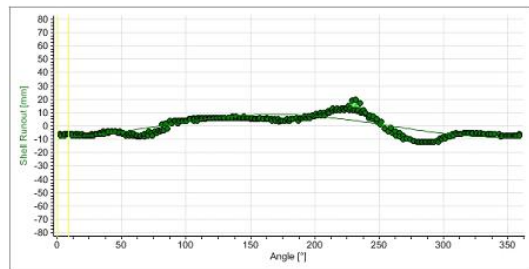
Position: 45,00m



Measurement

Position from Outlet: 45,0 m
Eccentricity: 3 mm
Peak at: 217°
Total Run-Out: ± 8mm
Roundness Deviation: ± 7 mm

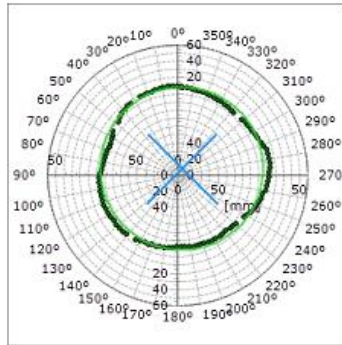
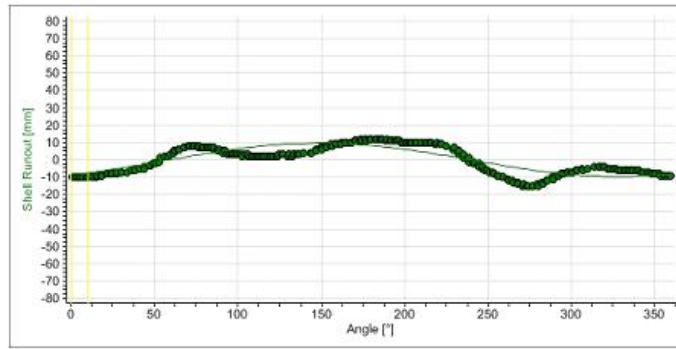
Position: 52,00m



Measurement

Position from Outlet: 52,0 m
Eccentricity: 9 mm
Peak at: 349°
Total Run-Out: ± 12mm
Roundness Deviation: ± 9 mm

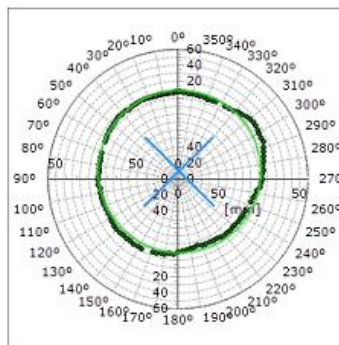
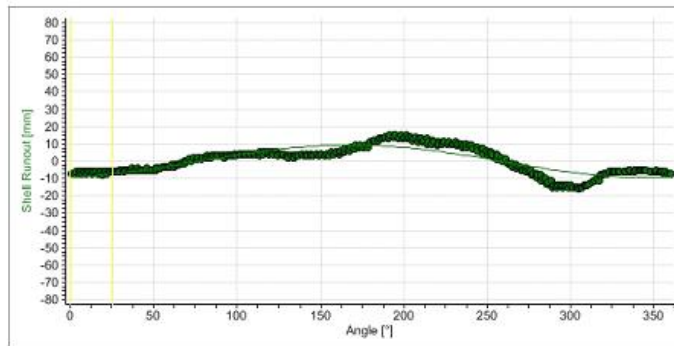
Position: 54,00m



Measurement

Position from Outlet: 54,0 m
Eccentricity: 10 mm
Peak at: 329°
Total Run-Out: ± 14mm
Roundness Deviation: ± 8 mm

Position: 56,00m



Measurement

Position from Outlet: 56,0 m
Eccentricity: 9 mm
Peak at: 348°
Total Run-Out: ± 15mm
Roundness Deviation: ± 8 mm

ANNEXE [5]

3.1.1 Introduction

3.1.1.1. Généralités

La maîtrise de la fonction maintenance est devenue une réponse déterminante pour la performance de l'entreprise. En effet, la qualité des produits, la disponibilité optimale des équipements, ainsi que la maîtrise des procédés de production sont aujourd'hui une nécessité incontournable et le seront encore plus pour faire face à la compétitivité internationale.

Bien organisée, elle est un facteur important de qualité, de sécurité, de respect des délais et de productivité, donc de compétitivité d'une entreprise évoluée. C'est souvent « par défaut » que preuve est faite : le coût des conséquences d'une panne majeure, joue un rôle moteur dans la prise de conscience qu'on ne peut pas faire l'économie d'une maintenance efficace.

La maintenance conditionnelle a pour but d'éviter la perte de production causée par les pannes imprévues, que sont en générale très coûteuses. Or, les méthodes traditionnelles de la maintenance se contentent d'exploiter les machines et ses composants jusqu'à rupture, ou d'effectuer la maintenance à intervalles fixes, ce qui ne peut être aujourd'hui toléré pour la maintenance des équipements stratégiques.

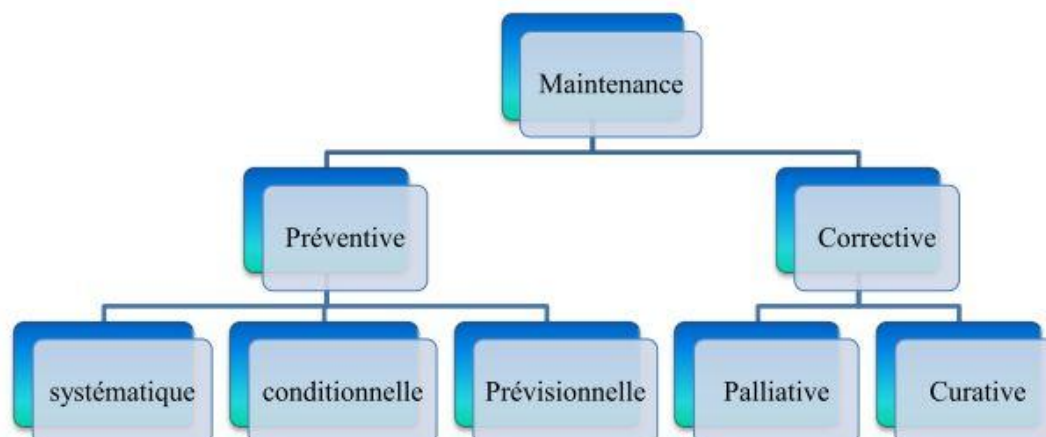
La maintenance est :

- L'ensemble de tout ce qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement. [LAROUSSE]
- « L'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management ». Ainsi la maintenance est l'ensemble des opérations permettant de maintenir ou de rétablir un système ou un appareil dans un état donné afin d'accomplir une fonction précise. [l'Association Française de Normalisation (AFNOR X 60-010-1994)]

Pour avoir une bonne production, il est nécessaire de respecter quatre points :

- Approvisionner en matières premières.
- Transformer la matière première en produit fini.
- Assurer la qualité.
- Maintenir l'outil de production en état de marche.

3.1.1.2. Classification des types d'entretiens



3.1.1.2.1. La maintenance corrective

Selon AFNOR, c'est la maintenance effectuée après défaillance. C'est une maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise .

Pour remettre en fonctionnement la machine ou le matériel détérioré, il existe deux types de méthodes :

- La réparation : remise en état de fonctionnement conforme aux conditions données.
- Le dépannage : remise en état provisoire qui sera obligatoirement suivi d'une réparation.

On peut dire aussi que le premier type est à caractère définitif, ce qui caractérise la maintenance curative et que le deuxième type est à caractère provisoire, ce qui caractérise la maintenance palliative.

3.1.1.2.2. La maintenance préventive

Selon AFNOR, c'est une maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien service rendu.

- **Systematique** : c'est une maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.
- **Conditionnelle**: c'est une maintenance préventive basée sur une surveillance continue ou discrète, du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. C'est la forme de maintenance vers laquelle on doit tendre.
- **Prévisionnelle**: c'est une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

La maintenance préventive permet de :

- Optimiser la gestion des ressources humaines et des matérielles
- Prolonger la durée de vie du matériel
- Augmenter la sécurité du personnel et le bon fonctionnement du matériel.
- Contribuer à l'amélioration de la productivité de l'entreprise : cette contribution est basée sur la planification des heures de réparation et la réduction du nombre d'arrêts imprévus de production, ce qui permet une optimisation de la productivité de l'entreprise.

- Coût de réparation moins cher : les interventions curatives, coûtent plus chères que celles programmées, pour plusieurs raisons :
 - Les moyens logistiques engagés pour les réparations en urgence sont importants et surestimés.
 - Les pièces trop usées causent d'autres endommagements ce qui aggrave la situation.
 - Optimiser les stocks de production : la maintenance conditionnelle, fait confiance pour réduire le stock tampon réservé pour l'utilisation dans le cas d'une panne imprévue.
 - Limitation des pièces de rechange

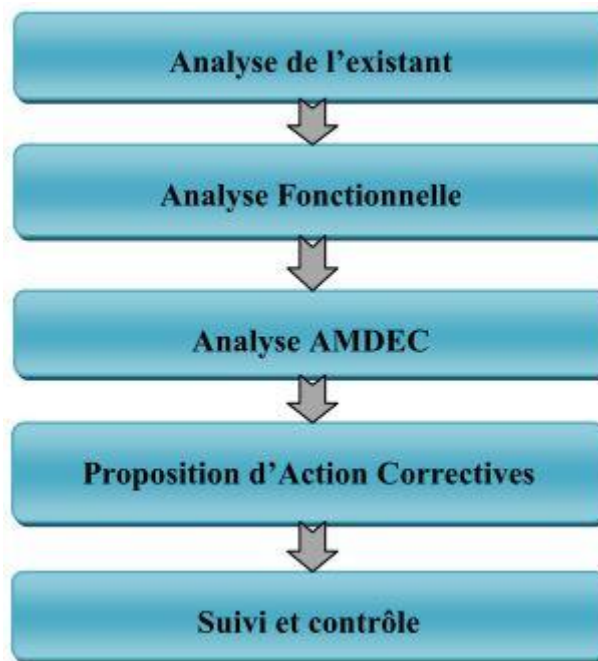
3.1.2. Analyse AMDEC [7]

L'analyse AMDEC proprement dite consiste à identifier les dysfonctionnements potentiels ou déjà constatés du système, à mettre en évidence les points critiques et à proposer des actions correctives.

L'évaluation qualitative des défaillances doit être menée avec les membres de l'équipe de maintenance pour permettre d'identifier les modes, causes, effets et détections relatifs à chaque élément des équipements. Après la réalisation de cette étude la proposition d'une politique de maintenance devient évidente.

✓ Méthodologie AMDEC

L'AMDEC est une démarche très structurée, avec ses étapes et ses acteurs. Sa conduite se déroule généralement en cinq phases, à savoir l'initialisation de l'étude, l'analyse fonctionnelle, l'analyse AMDEC, la proposition d'actions correctives et le suivi et contrôle.



3.1.2.1. Initialisation de l'Etude

L'initialisation de « l'AMDEC » est une étape préliminaire à ne pas négliger. Durant cette phase, il sera procédé à :

- ✓ La définition du système étudié ;
- ✓ Evaluation de la criticité des équipements ;

- ✓ La préparation et la mise au point des supports de l'étude : Les supports de l'étude constituent le dossier « AMDEC ». Celui-ci est constitué en général :
 - Du cahier des charges ;
 - Des plans (mécanique, électrique, hydraulique, pneumatique, etc.) ;
 - Du dossier maintenance (historique, arbre défaillance) ;
 - De la feuille de synthèse ;
 - Des grilles de cotation de la criticité ;
 - Du tableau de saisie « AMDEC » ;

3.1.2.2. Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle constitue une étape indispensable car il est nécessaire de bien connaître les fonctions du système pour en analyser ensuite les risques de dysfonctionnement.

Ses buts sont :

- De fournir une description de chaque moyen de production, d'établir une liste de toutes les fonctions et interfaces avec d'autres équipements et le milieu environnant qui leur sont directement rattachés.
- De permettre l'identification de toutes les défaillances fonctionnelles potentielles (en incluant les défaillances des interfaces de sortie)

Analyse fonctionnelle externe

Cette analyse permet de faire s'exprimer le groupe sur les fonctions qui lient des milieux extérieurs du système

Analyse fonctionnelle interne

Permet de représenter les sous-ensembles et éléments nécessaires pour que les fonctions définies soient remplies.

3.1.2.3. Analyse « AMDEC »

L'analyse AMDEC proprement dite consiste à identifier les dysfonctionnements potentiels ou déjà constatés du système, à mettre en évidence les points critiques et à proposer des actions correctives pour y remédier.

Le tableau AMDEC est le support de travail de cette étape. Il doit être rempli au fur et à mesure des travaux par l'animateur du groupe de travail.

✓ **Détermination des critères qualitatifs**

Chaque défaillance d'un système peut être déterminée à l'aide de quatre critères qualitatifs, à savoir le mode, la cause, l'effet et la détection de la défaillance. Il convient d'abord de rappeler ce qu'est une défaillance. Une défaillance est la cessation de l'aptitude d'un élément à accomplir une fonction requise. [la norme AFNOR X 60-500]

- **Mode de défaillance** : Un mode de défaillance est la manière dont le système peut s'arrêter de fonctionner ou fonctionner anormalement.

- **Cause de défaillance** : Le groupe recherche et décrit les événements susceptibles de conduire au mode de défaillance. Une cause de défaillance est l'anomalie initiale pouvant conduire à la défaillance, par l'intermédiaire du mode de défaillance.
- **Effet de la défaillance** : Pour chaque élément et pour chaque mode de défaillance, le groupe décrit les conséquences subies par l'utilisateur.
- **Détection** : Une cause (et/ou un mode) de défaillance étant supposée apparue, le groupe analyse et dresse la liste de tout ce qui empêche cette cause (et/ou mode) d'arriver à l'utilisateur.
- ✓ **Analyse quantitative**

Le chiffrage des risques est basé sur la chaîne d'événements conduisant à la perception d'une défaillance par l'utilisateur du système. Pour notre étude, nous avons adopté les grilles de cotation représentés dans l'annexe1.

Indice de Fréquence « F » :

Il représente le risque que la cause potentielle de défaillance survienne et qu'elle entraîne le mode potentiel de défaillance considéré. De ce fait, la notion de fréquence est relative à une combinaison cause mode. Finalement, la fréquence s'exprime par le nombre de défaillances de l'élément sur une période donnée.

Indice de Gravité « G » :

Il se réfère à la gravité (ou sévérité) de l'effet de chaque défaillance, tel que ressenti par l'utilisateur. Ainsi, la notion de gravité est directement liée à l'effet de la défaillance. Par ailleurs, la gravité peut s'exprimer sous les divers aspects suivants :

- Dégradation matérielle du moyen de production ;
- Taux de disponibilité de la machine ou de la ligne (durée d'arrêt) ;
- Non-conformité du produit fabriqué ;
- Coût de la maintenance ;
- Sécurité des opérateurs ;
- Répercussion sur l'environnement ;

Indice de Non Détection « D » :

Il représente la probabilité que la cause (et/ou le mode) de défaillance supposée apparue atteigne l'utilisateur. La probabilité de non détection dépend d'une part de l'existence d'une anomalie observable de manière suffisamment précoce et d'autre part des moyens de détection mis en œuvre (ou envisagés) au moment de l'étude.