



Université Sidi Mohammed Ben Abdallah

Faculté des Sciences et Techniques

-Fès-



PROJET DE FIN D'ETUDE

Présenté en vue de l'obtention du titre :

INGENIEUR D'ETAT

Par :

JIHAD EL FARKANI

Département :

Génie mécanique

Option : Conception mécanique et Innovation

Sujet :

Détermination des causes de la rupture du tirant du broyeur cru

Membres de Jury :

Pr. J.ABOUCHITA (FSTF)

Pr. A. ELBIYAALI (FSTF)

Pr. A. TOUACHE (FSTF)

Encadré par :

Mr. A. TOUACHE (FSTF)

Mr. R. AZIZ (CIMAT)

Année universitaire 2013-2014

Dédicace

A mes chers parents

Les mots me manquent pour exprimer toute la reconnaissance, la fierté et le profond amour que je vous porte pour les sacrifices, et les prières que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et ma réussite. Que Dieu tout puissant vous garde et vous procure santé, bonheur et longue vie pour que vous demeuriez le flambeau illuminant mon chemin.

A mes frères, mes sœurs, leurs conjoints et mes adorables neveux, et à toute ma famille

Pour votre soutien pendant toutes ces longues années d'études. Que vous trouveriez dans ce travail, le témoignage d'un amour éternel.

À mes chers ami(e)s

Pour tous les magnifiques instants que nous avons vécus ensemble

A tous ceux qui me sont chers.

Je dédie mon travail...

JIHAD

Remerciement

Nous tenons à travers ce mémoire à exprimer nos sincères remerciements à toute l'équipe pédagogique de la FSTF et les intervenants professionnels responsables de la filière Conception Mécanique et Innovation pour nous avoir assuré une bonne formation.

Nous exprimons notre profonde gratitude ainsi que toute notre reconnaissance à notre encadrant de la FST, le professeur **M. TOUACHE ABDELHAMID** qui nous a fait bénéficier de ses conseils appréciables, sa disponibilité, son aide et pour l'intérêt manifeste qu'il a porté à ce projet.

Nous formulons nos sincères remerciements et notre respect à notre parrain industriel **M. AZIZ RACHID** qui n'a épargné aucun moyen pour nous aider et soutenir, et aussi pour sa disponibilité, ses conseils précieux et ses directives pertinentes.

Nos remerciements s'adressent, également, à tout le personnel du bureau des méthodes et particulièrement à **M. KARROUMI CHAHID** pour sa disponibilité, son aide, ses explications ainsi que pour ses qualités humaines et morales que nous avons toujours appréciées.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres de jury qui se sont libérés de leurs obligations pour assister à la soutenance et juger notre travail.

Enfin, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail, nous disons merci du fond du cœur.

Résumé

Le présent rapport décrit le travail réalisé dans le cadre du projet de fin d'études que nous avons effectué au sein de l'entreprise CIMAT-Beni Mellal. Notre stage s'est déroulé au niveau du service maintenance précisément au niveau de l'atelier broyage cru.

Le 30/10/2013, le tirant du broyeur cru qui transmettent l'effort de broyage, est cassé en plein fonctionnement, après cet incident CIMAT a décidé de chercher les causes racines de ce problème. C'est dans ce cadre que le présent PFE a été lancé.

Notre but est de faire une analyse détaillée de la rupture du tirant afin de déterminer les causes principales de la défaillance.

Afin de mener à bien cette mission, nous avons jugé utile de commencer par une étude de fonctionnement du broyeur et de ses différentes composantes pour pouvoir entamer, par la suite, l'analyse de la rupture.

A la lumière de cette étude, divers axes sont décelés englobant une inspection approfondie des différents éléments intervenant dans la défaillance du tirant afin de déterminer l'origine exacte de la rupture.

Finalement, nous avons proposé des solutions pour remédier à ce problème.

Abstract

This report describes the work done in the project graduation we have done in CIMAT Company.

Our goal is to make a detailed analysis of a rupture of a tie mill raw RM 511 26-435 to determine the main causes of this failure.

To carry out this mission, we found it useful to begin with a study of the operation of the mill and its various components in order to start later, the analysis of the fracture.

In the light of this study, various lines are detected including a thorough inspection of the different elements involved in the failure of the tie to determine the exact cause of the rupture.

Finally, we proposed solutions to solve this problem.

Nomenclature

C	Carbone
Cr	Chrome
S	Soufre
Mn	Manganèse
P	Phosphore
Si	Silicium
F	Force hydraulique
P_r	Pression du vérin hydraulique
S_p	Section du piston
S₁	Section du tirant de diamètre 150 mm
S₀	Section du tirant de diamètre 130 mm
σ_{max}	Contrainte maximale de traction
σ_D	Limite d'endurance
σ_i	L'amplitude de la contrainte
N_i	Durée de vie
R_m	Contrainte maximale avant rupture
R_e	Limite d'élasticité
E	Module de Young
ν	Coefficients de Poisson
ρ	La masse volumique
F_f	Force de flexion
σ_f	Contrainte de flexion
K_{tf}	Coefficient d'entaille relatif aux sollicitations de flexion
K_t	Coefficient d'entaille relatif aux sollicitations de traction
g	Constante de gravité
P_g	Poids du train de galets
m	La masse du train de galets
M_f	Moment de flexion
σ_e	Contrainte équivalente de Von Mises
Δσ_θ	Contrainte thermique
α	Coefficient de dilatation thermique
σ_{comp}	Contrainte de compression
σ_{cr}	Contrainte critique du flambement
s	Coefficient de sécurité
r	Rayon de giration
I	Moment d'inertie
I_p	Indice de performance

Liste des figures

Figure 1: Organigramme de l'usine	4
Figure 2: Composition du ciment	5
Figure 3:Extraction et transport de la matière première	6
Figure 4: Concassage	6
Figure 5: Atelier cuisson	9
Figure 6 : Stockage clinker	10
Figure 7: Broyage ciment	11
Figure 8:Robot CARICAMAT et Ensacheuse rotative	11
Figure 9: Diagramme Gantt du projet de fin d'étude	12
Figure 10: Le broyeur vertical à galets	15
Figure 11: Principe de broyage	16
Figure 12: Train de galet du broyeur cru	17
Figure 13 : Le plateau de broyage	18
Figure 14: Les tirants du broyeur cru	18
Figure 15: Les éléments constituant du tirant	19
Figure 16: L'anneau de buses	20
Figure 17: Groupe de commande	21
Figure 18: Centrale hydraulique pompe pour vérins fixes et pour vérins de travail	22
Figure 19: Vérin de travail et vérin fixe	22
Figure 20: Position des vérins	23
Figure 21:Anneau de retenue	23
Figure 22: La plaque d'étanchéité	23
Figure 23: Le tirant cassé	25
Figure 24: Observations macroscopiques du faciès de rupture	25
Figure 25:modélisation de la force hydraulique appliquée sur le tirant	26
Figure 26: Approximation de la courbe S-N pour les aciers	28
Figure 27: Apparence schématique de ruptures de pièces soumises à des contraintes de fatigue	30
Figure 28: Les zones du faciès de rupture	30
Figure 29: Diagramme PARETO	33
Figure 30: Appareil de mesure de la dureté	34
Figure 31: Les points de mesures de la dureté	34

Figure 32: Modélisation 3D du tirant sous SOLIDWORKS	35
Figure 33: Déplacement imposé sur le côté inférieur du tirant	36
Figure 34: Le chargement sur le côté supérieur du tirant	36
Figure35: Maillage généré par le logiciel de calcul	37
Figure 36: Contrainte de Von Mises	38
Figure 37: Déplacement résultant	38
Figure38: Diagramme d'ISHIKAWA	43
Figure39: Diagramme PARETO	44
Figure 40: plaque d'étanchéité et articulation du tirant	45
Figure 41:représentation graphique de l'effort tranchant et du moment fléchissant	47
Figure 42: contrainte de Von mises sur le tirant dans le cas 1	48
Figure 43: Modélisation des forces générées lors de l'inclinaison du vérin	49
Figure 44: contrainte de Von Mises dans le cas 2	50
Figure 45:historique du niveau de la couche de matière	51
Figure 46: gabarits de mesure de l'usure	52
Figure 47: Surface d'appui initiale sans usure	53
Figure 48: Surface d'appui entre les galets usés et la piste usée	52
Figure 49:relevé des variations des vibrations	55
Figure 50:exemple d'une pièce forgée	56
Figure 51:Influence du taux de corroyage sur différentes propriétés mécaniques	57
Figure 52: Effet de la peau de forge sur la limite d'endurance des aciers, d'après [Hankins et Bcker 36]	58
Figure 53 : Formation de sous grains	59
Figure 54: Coalescence de sous joints adjacents	59
Figure 55: Processus de recristallisation	59
Figure 56: Evolution du seuil de propagation en fonction de la taille de grain, d'après [Pippan]	61
Figure 57: Courbes de Wöhler obtenues sur acier inoxydable pour différentes tailles de grain [Di Schino 03]	62
Figure 58: Représentation schématique de l'influence d'une orientation de microstructure de type lamellaire sur la propagation d'une fissure en traction-compression.	62
Figure 59: Évolution de la limite d'endurance en torsion alternée pour deux aciers à bas carbone possédant des taux en manganèse différents (J5 : 1,17% de Mn, D : 0,88% de Mn) [22]	63
Figure 60: Représentation schématique de l'effet d'une orientation de microstructure de type lamellaire sur la propagation d'une fissure en torsion	63
Figure 61: Évolution de la limite d'endurance en fonction de l'orientation du fibrage, lorsque le comportement en fatigue est piloté par les défauts pour un chargement de traction-compression.	64
Figure 62: diagramme d'Ashbey	73
Figure 63: Appareille à balayage optique	74
Figure 64: Section d'un bandage en Xwin	79

Figure 65: Diagramme d'endurance ou courbe de Whöler -----	88
Figure66 : Détermination de Kt pour un arbre avec épaulement -----	92
Figure 67: Le profil d'usure des paires des galets -----	93
Figure 68 : Usure du galet 1.1 -----	93
Figure 69: Usure du galet 1.2 -----	93
Figure 70: Usure du galet 2.1 -----	94
Figure 71: Usure du galet 2.2 -----	94
Figure 72: Profil de l'usure de la piste -----	94
Figure 73: Usure de la piste intérieure -----	95
Figure 74: Usure de la piste extérieure -----	95
Figure 75: Principe du contrôle par ultrasons -----	96
Figure 76: Principe du contrôle par contact -----	97
Figure 77: Principe du contrôle par immersion -----	97
Figure 78: Principe du contrôle par magnétoscopie -----	101
Figure 79: Principe du contrôle par ressuage -----	104

Liste des tableaux

Tableau 1 : Fiche d'identité de l'entreprise d'accueil	3
Tableau 2: Pourcentage des ajouts selon le type de ciment	10
Tableau 3: Les éléments constituant du tirant	20
Tableau 4: Travaux d'entretien effectué sur le tirant	20
Tableau 5: Les éléments du groupe de commande	22
Tableau 6 : Composition chimique de l'acier 42CD4	25
Tableau 7 : Historique des pannes du broyeur cru	32
Tableau 8: Mesure de la dureté du tirant	34
Tableau 9: Evolution de la production du broyeur durant trois années	35
Tableau 10: Caractéristiques mécaniques de l'acier 42CrMo4	36
Tableau 11: Informations sur le maillage	37
Tableau 12: Informations sur la contrainte	38
Tableau 13 : Déplacement du tirant	38
Tableau 14 : Bilan des essais de fatigue en traction-compression	64
Tableau 15: Effet de la géométrie des défauts sur la tenue en fatigue	66
Tableau 16: les méthodes utilisées dans les CND	77
Tableau 17: Comparaison des caractéristiques mécanique du 42CrMo4 et 36NiCrMo16	78
Tableau 18: Composition chimique de l'acier 36NiCrMo16	79

Liste des équations

Équation 1: La force hydraulique	26
Équation 2: La contrainte maximale	27
Équation 3: La contrainte nominale	27
Équation 4: Coefficient de concentration de contrainte de traction	27
Équation 5: La durée de vie	28
Équation 6: Contrainte de flexion	46
Équation 7: Moment fléchissant	47
Équation 8: Coefficient de concentration de contrainte de flexion	47
Équation 9 : Contrainte équivalente de Von Mises	47
Équation 10: Contrainte thermique	53
Équation 11: Contrainte critique du flambement	54
Équation 12: Indice de performance	72

Table des matières

Chapitre I : Contexte général du projet-----3

I.	Présentation de l'entreprise-----	3
I.1	Fiche d'identité -----	3
I.2	Organigramme de l'usine-----	4
I.3	Gamme de produit-----	4
I.4	Procédés de fabrication du ciment -----	5
I.4.1	Exploitation de carrière -----	5
I.4.2	Pré-homogénéisation -----	6
I.4.3	Dosage-----	7
I.4.4	Broyage cru-----	7
I.4.5	Homogénéisation -----	7
I.4.6	Atelier cuisson -----	8
I.4.7	Refroidissement-----	9
I.4.8	Broyage charbon-----	9
I.4.9	Stockage du clinker-----	9
I.4.10	Broyage ciment-----	10
I.4.11	Ensachage et expédition-----	11
II.	Cadre du projet -----	12
II.1	Objectif du projet -----	12
II.2	Planification du projet -----	12
III.	Conclusion-----	13

Chapitre II : Description du broyeur cru-----15

I.	Principe de fonctionnement du broyeur cru-----	15
I.1	Les galets du broyeur vertical-----	17
I.2	Le plateau de broyage-----	17
I.3	Les tirants-----	18
I.3.1	Les travaux effectués sur les tirants -----	20
I.4	L'anneau de buses -----	20
I.5	Groupe de commande-----	21
I.6	Hydraulique broyeur vertical -----	22
I.6.1	Description et fonctionnement-----	22

I.7	Anneau de retenue-----	23
I.8	Plaque d'étanchéité-----	23
II.	Conclusion-----	23

Chapitre III : Analyse de la rupture-----25

I.	Enquête préliminaire-----	25
I.1	Nature de l'avarie-----	25
I.2	Matériau utilisé-----	25
I.2.1	Composition chimique en %-----	25
I.2.2	Propriétés-----	25
I.2.3	Domaines d'application-----	26
I.3	La gamme de fabrication-----	26
I.4	Conditions d'utilisation prévues-----	26
I.4.1	Sollicitations appliquées-----	26
I.4.2	Ambiance du travail du tirant-----	29
I.5	Analyse morphologique-----	29
II.	Etude complémentaire-----	31
II.1	Historique de la maintenance du broyeur-----	31
II.2	Mesure de la dureté-----	34
II.3	Heures de marches et production du broyeur cru-----	35
II.4	Etude éléments finis sur le tirant-----	35
II.4.1	Modélisation géométrique de la pièce-----	35
II.4.2	Propriétés du matériau-----	36
II.4.3	Déplacements imposés-----	36
II.4.4	Application du chargement-----	36
II.4.5	Création d'un maillage-----	37
II.4.6	Résultats de l'étude-----	37
III.	Conclusion-----	38

Chapitre IV : Détermination des causes de la rupture-----41

I.	Introduction-----	41
I.1	Outils utilisés-----	41
I.2	Recherche des causes de la rupture-----	42
I.2.1	Brainstorming-----	42
I.2.2	Diagramme Ishikawa-----	43
II.	Problèmes liés à la machine-----	45

II.1	Sollicitations externes	45
II.2	Coincement du tirant	45
II.3	L'épaisseur de la couche de matière	50
II.4	L'usure des galets et de la piste	52
II.5	Vérification de l'effet de la température	53
II.6	La tenue au flambement	54
II.7	vibrations	55
III.	Problèmes liés au matériau	55
III.1	Spécificités des pièces forgées	56
III.1.1	La notion de fibrage	56
III.1.2	Influence du corroyage sur les propriétés mécaniques	56
III.1.3	La peau de forge ou l'intégrité de surface des pièces forgées	57
III.1.4	Influence des traitements thermiques	58
III.1.5	Les contraintes résiduelles	59
III.2	Prise en compte de l'anisotropie induite par le forgeage dans le comportement en fatigue	60
III.2.1	Anisotropie en fatigue due à la texture	60
III.2.2	Anisotropie en fatigue due à la présence de défauts allongés	63
III.3	Bilan	67
III.4	Effet de l'usinage sur le comportement en fatigue	68
III.4.1	Défauts de la surface usinée	68
III.4.2	Facteurs influant le comportement en fatigue des pièces usinées	69
III.5	Vérification du choix de matériau	71
III.5.1	Cahier des charges	71
III.5.2	Indice de performance	71
III.5.3	Classement des matériaux	72
III.5.4	Application	72
III.5.5	Analyse microscopique	73
IV.	Conclusion	74

Chapitre V : Solutions proposées-----77

I.	Les contrôles non destructifs	77
I.1	Les méthodes utilisées	77
II.	Recommandations	78
III.	Amélioration du matériau du tirant	78
IV.	Amélioration du matériau des galets et la table	79
IV.1	Le Xwin	79

IV.2	Les bénéfices de la qualité Xwin -----	79
IV.3	Les bandages Duocast Xwin -----	80
V.	Estimation des coûts -----	80
V.1	Contrôles par ultrasons -----	80
V.2	Le ressuage -----	80
V.3	Le matériau Xwin -----	80

Annexes-----81

Introduction générale

Un grand nombre d'accidents catastrophiques dans l'industrie, a pour origine la fissuration et la rupture de pièces mécaniques. L'une des principales causes d'amorçage de fissuration est la fatigue des matériaux et des structures. Celle-ci peut survenir sur toute structure soumise à des chargements variables. Telle que l'expérience montre que la répétition de cycles d'effort modifie et dégrade les propriétés des matériaux et peut conduire, à terme, à la rupture de pièces.

La fissuration par fatigue se propage lentement, généralement par un très léger incrément de taille de la fissure pour chaque cycle de charge-décharge et cela avec peu ou pas de déformations plastiques. Les fissures peuvent alors grandir jusqu'à entraîner la ruine du composant, de l'élément ou de la structure considérée par rupture brutale ou ruine plastique.

Les ruptures peuvent apparaître après un nombre très élevé de cycles de sollicitations sans aucun signe extérieur de dommage, alors même que la structure travaille dans le domaine élastique : on parle dans ce cas de fatigue à grand nombre de cycles. En régime plastique, la fatigue apparaît plus rapidement ; on la qualifie alors de fatigue à faible nombre de cycles.

C'est dans ce sens que s'inscrit notre projet de fin d'études qui comporte une analyse détaillée de la rupture d'un tirant du broyeur cru.

Ce rapport est axé sur cinq grandes parties. La première partie donne un panorama général sur le contexte du projet en présentant l'organisme d'accueil et en définissant le périmètre du projet.

La deuxième partie est consacrée à la description de fonctionnement du broyeur cru et de ses différents composants, avant de présenter dans la troisième partie l'analyse de la rupture qui nous a permis de définir les différents éléments intervenant dans la défaillance.

La quatrième partie consiste en une analyse détaillée de ces éléments et de leur influence sur l'état du tirant afin de déterminer l'origine exacte de la rupture. Quant au dernier chapitre, il présente les solutions proposées et l'estimation des coûts de chaque solution.

Chapitre I : Contexte général du projet

Dans ce chapitre, nous présenterons le contexte général du projet qui sera décliné en deux parties : la première présentera la société d'accueil, et la seconde décrira le contexte et l'objectif attendu du projet ainsi que la planification du projet.

I. Présentation de l'entreprise

L'entreprise Ciments de l'Atlas CIMAT est une filiale cimentière nationale du groupe ADDOHA chargée de l'approvisionnement des entités industrielles et des clients en général en ciment et elle existe dans deux sites :

- Le site de Ben Ahmed : situé à 95 km au sud de Casablanca. Le choix de cette zone n'est pas fait arbitrairement, mais la disponibilité de la matière première dans cette zone et sa proximité du réseau Kenitra –El-Jadida qui représente un client potentiel pour CIMAT, ces deux facteurs principaux étaient derrière le choix de ce site ;
- Le site de Béni Mellal : il se situe 35 km au nord de Béni Mellal, comme il est installé dans la région de Tadla-AZILAL il sert de fournisseur potentiel en ciment pour les régions de Marrakech-Tensift et Meknès-Tafilalt.

D'un point de vue construction et caractéristiques techniques les deux usines se ressemblent :

- Constructeur : POLYSIUS SA ;
- Capacité de Production Clinker : 3600 tonnes/jour ;
- Capacité de Production Ciment : 1'600'000 tonnes/an ;
- Atelier d'ensachage et expédition complètement automatisé : Chargement sac par CARICAMAT et Palettisation.

D'autre part, le montant d'investissement qui a été alloué à la construction des deux cimenteries est de 5 milliards MAD.

I.1 Fiche d'identité

Tableau 1 : Fiche d'identité de l'entreprise d'accueil

Raison sociale	CIMAT
Activité	Fabrication et vente du ciment
Statut juridique	Société anonyme
Date de création	2008
Capacité de production	1.6 millions tonnes par an
Adresse	Commune Ighram Laalam Dir Ksiba- BP1005-Béni Mellal
Téléphone	+212 5 23 42 95 85 /+212 5 23 42 95 76

I.2 Organigramme de l'usine

CIMAT a opté pour une structuration bien organisée pour une meilleure collaboration entre les différents départements. La structure principale est présentée comme suite :

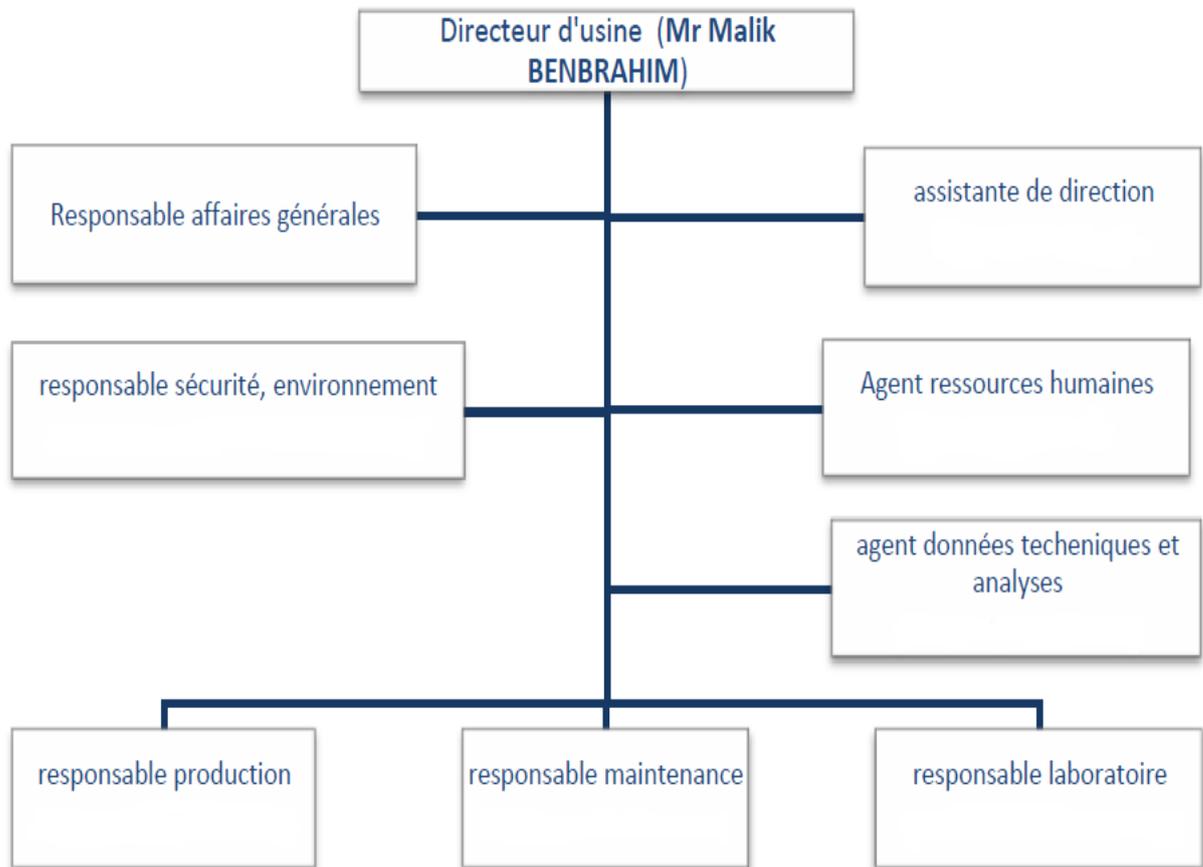


Figure 1: Organigramme de l'usine

I.3 Gamme de produit

CIMAT Beni Mellal dispose d'une large gamme de ciments conformes aux normes marocaines et adaptés aux différentes catégories d'application, à savoir : CPJ35, CPJ45, CPJ55 et les ciments spéciaux. La différence entre ces produits réside dans les pourcentages d'ajouts des différents additifs, qui affectent la résistance, ainsi que dans leurs champs d'utilisation :

- **Le CPJ 35**, faible en clinker, adapté uniquement aux applications ne nécessitant pas des résistances élevées tel que la maçonnerie et le béton courant ;
- **Le CPJ 45** convient aux ouvrages en béton armé fortement sollicité en milieux agressifs tels que l'eau de mer ou l'eau saumâtre ;

- Le **CPJ55** est dédié aux ouvrages en béton armé fortement sollicité, préfabrication en béton manufacturé, coulis d'injection et aux travaux exigeant un décoffrage rapide et de hautes résistances initiales.

I.4 Procédés de fabrication du ciment

Le ciment est un lien hydraulique constitué d'une poudre minérale, d'aspect grisâtre, obtenue par broyage et cuisson à 1450 °C d'un mélange de calcaire et d'argile. Le produit de la cuisson, appelé clinker, forme une combinaison de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique.

Le ciment résulte du broyage de clinker et de sulfate de calcium ajouté généralement sous forme de gypse. Il forme avec l'eau une pâte plastique faisant prise et durcissant progressivement, même à l'abri de l'air, notamment sous l'eau.

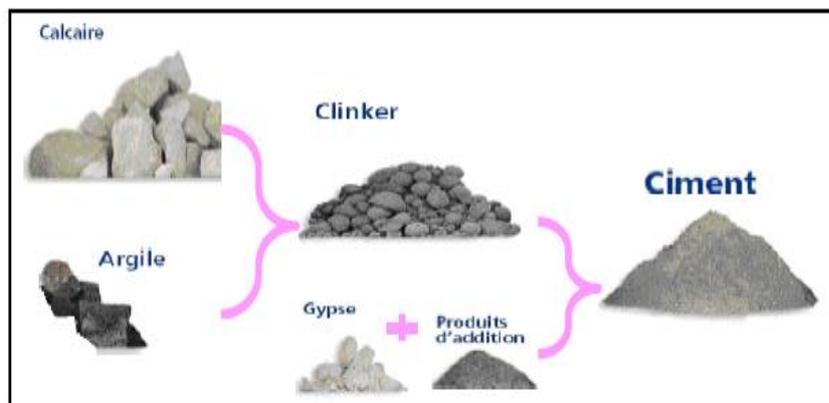


Figure 2: Composition du ciment

Les constituants anhydres, présents sous forme de cristaux polygonaux assez réguliers et homogènes, se combinent à l'eau et se décomposent. En s'hydratant, ils recristallisent, prenant des formes très variées : aiguilles, bâtonnet, prismes, divers... Ces cristaux adhèrent aux adjuvants granuleux du béton : sable, gravier, cailloux...c'est l'hydratation qui constitue le ciment.

I.4.1 Exploitation de carrière

La première étape dans la fabrication du ciment consiste en l'extraction du calcaire et de l'argile dans la carrière. L'excavation du calcaire se fait par abattage à l'explosif ou à ripage au bulldozer en fonction de la nature du matériau.

CIMAT dispose d'une carrière qui présente des réserves estimées à plus de 50 ans, située à 2.7 Km de l'usine.

Une fois la roche disposée en tas, il faut la charger dans des dumpers au moyen de chargeuses ou de pelles, et la transporter vers le concasseur.



Figure 3:Extraction et transport de la matière première

La deuxième étape de fabrication du ciment se passe également au niveau de la carrière. Elle consiste à la fragmentation de la roche. Ainsi, la granulométrie des matériaux extraits de la carrière est très variable. Pour faciliter le mélange dans les proportions fixées par le laboratoire et le broyage, il faut réduire la granulométrie pour obtenir un produit inférieur à 10 cm environ. La fragmentation se fait donc en deux étapes selon le matériel utilisé.

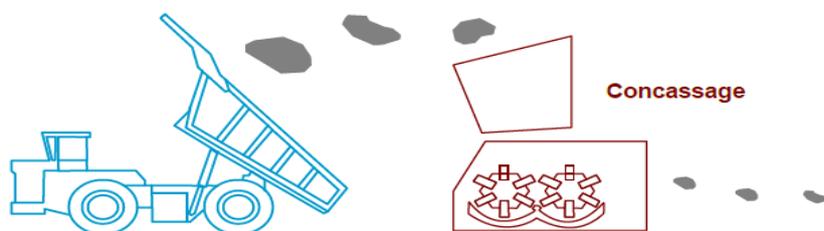


Figure 4: Concassage

I.4.2 Pré-homogénéisation

Les matériaux venant de la carrière après concassage présente une composition hétérogène. Pour remédier à ce problème, il faut passer par la phase de pré homogénéisation.

Cette opération s'effectue dans de vastes hangars où le cru est rationnellement analysé et mélangé. Elle a pour but de former un tas pré-mélangé sous forme de couches superposées des matières selon une composition chimique bien déterminée. Le hall de pré homogénéisation comprend deux tas, l'un en constitution et l'autre en consommation.

Le mécanisme de formation et de reprise du tas s'appuie sur deux organes principaux qui sont :

- Le Stacker : installation de mise en tas des matières premières ou combustibles ;
- Le gratteur : grâce à ses godets, il assure la reprise de la matière vers le broyeur cru.

Après cette opération, le tout-venant est transporté, via des convoyeurs, jusqu'à la station d'échantillonnage, afin d'établir un contrôle de qualité. Cette dernière a pour objectif de déposer les matières conformément à une composition chimique donnée. Cette composition est définie selon un certain nombre de seuils à respecter, qui déterminent les

paramètres de contrôle à prendre en considération. Ainsi, l'échantillonnage se fait chaque deux heures.

I.4.3 Dosage

Les matières premières composant le clinker ont une composition chimique déterminée. Le laboratoire de contrôle de l'usine définit la composition optimale de chaque constituant. Il fixe alors les proportions de correction afin de s'approcher de la composition recherchée. La correction se fait donc par les quatre trémies de dosage :

- Doseur du mélange calcaire + schiste ;
- Doseur de calcaire riche dont la fonction permet la correction de la matière provenant du mélange quand son titre en CaCO_3 est faible ;
- Doseur de sable dont la fonction permet la correction d'un manque de Silice SiO_2 ;
- Doseur de cendre pyrrhotine : sa fonction est la correction de la matière provenant de la pré-homo quand sa teneur en fer est faible.

La matière dosée est acheminée vers le broyeur du cru.

I.4.4 Broyage cru

Les matières premières pré homogénéisées doivent être finement broyées pour être chimiquement plus réactives au cours de leur cuisson dans le four, elles passent donc dans des doseurs alimentant un broyeur sécheur.

La fonction du séchage est nécessaire car le broyage ne peut s'effectuer que dans la mesure où la matière ne s'agglomère pas sous l'effet conjugué de son humidité et du compactage produit par les outils de broyage.

A la fin du broyage, la matière est dirigée vers un séparateur qui sélectionne les particules selon leur grosseur.

La farine produite par le broyeur est transportée par des élévateurs vers des silos d'homogénéisation où elle va être stockée. Le processus d'homogénéisation assure la régularité chimique et granulométrique de la matière.

Cette opération se fait par un système de supprimeur et de vannes. Elle a pour rôle le soufflage de l'air par secteurs à l'intérieur du silo pour rendre la farine plus fluide et homogène.

I.4.5 Homogénéisation

Avant de procéder à la cuisson, une ultime étape de préparation va être conférer à la matière crue, il s'agit de l'homogénéisation en continu. Un grand silo reçoit de la farine produite par le broyeur, celle-ci est déversée par le haut et distribuée par un

réseau de transfert en pattes d'araignée sur le périphérique du silo jusqu'au deux tiers de sa hauteur. La farine passe ensuite, par le fond du silo, dans une chambre de mélange où se passe une homogénéisation instantanée par air choc.

Les silos sont équipés de supprimeurs qui soufflent de l'air actif, ce dernier assure une bonne homogénéisation de la farine à l'aide des aéro-glissières. Traversant un doseur, la farine arrive aux cyclones de pré calcination.

I.4.6 Atelier cuisson

➤ Echangeur à cyclone

L'échangeur pré chauffeur se compose d'une série de cyclones, disposés verticalement sur quatre étages ; huit cyclones, quatre par colonne ces cyclones sont reliés entre eux par des gaines de matière et des gaines de gaz.

La matière s'introduit dans la partie supérieure, mise en suspension dans les gaz chauds, arrivant du four. Elle gravite d'étage en étage, et arrive partiellement décarbonatée au dernier étage sous une température d'environ 845°C.

➤ Pré-calcination

C'est un procédé récent utilisé souvent dans la voie sèche, destiné à accroître la décarbonatation de la farine avant la cuisson, elle s'effectue dans le pré-calcinateur placé entre le préchauffeur et le four.

➤ Clinkerisation

A la sortie du préchauffeur la farine arrive dans le four rotatif où s'effectue l'étape la plus importante de sa transformation.

Le processus de la cuisson est comme suit :

A l'entrée du four la carbonatation de la farine se poursuit et s'achève. Au fur et à mesure que la farine avance sous l'effet rotatif, et grâce à l'inclinaison du four, sa température augmente, ce qui permet la formation des minéraux du clinker à partir de 1250°C environ, le franchissement de la clinkerisation se fait dans la zone la plus chaude du four entre 1450°C et 1500°C.

Entre la zone de clinkerisation et la sortie du four, le clinker subit un pré refroidissement.

C'est la zone de trempe. L'atelier cuisson présente sur la figure suivant :

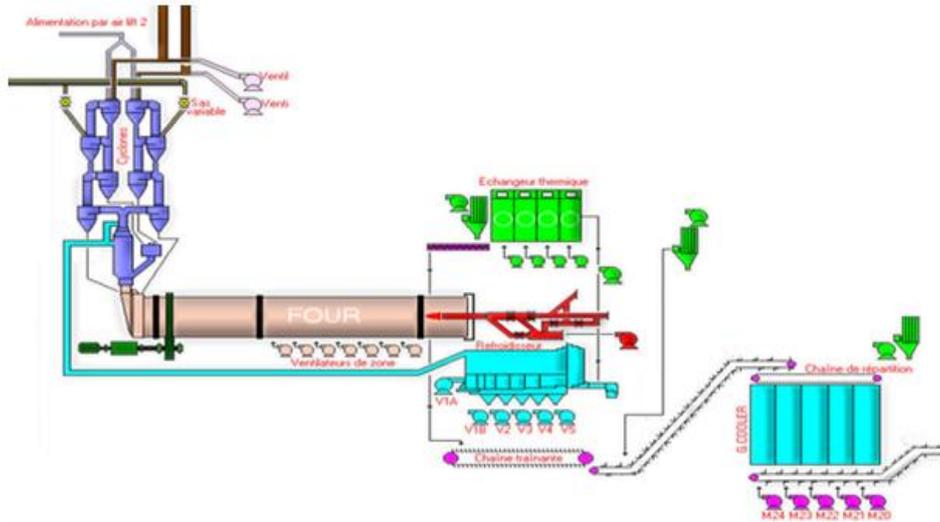


Figure 5: Atelier cuisson

I.4.7 Refroidissement

Une fois que le clinker sort du four à une température très élevée, deux opérations doivent être effectuées :

- Elle s'agit d'une première opération de nature économique qui consiste à récupérer la chaleur après refroidissement par soufflage d'air et la renvoyer à la tour échangeur pour abaisser la température de 1450°C à 100°C ;
- Une seconde opération est d'ordre mécanique, qui consiste à transporter le clinker vers le stockage clinker.

Après refroidissement le clinker se présente sous forme de nodules gris foncés.

I.4.8 Broyage charbon

L'énergie utilisée par le four est une énergie calorifique. Elle se base sur le charbon comme combustible.

L'usine reçoit le charbon ou le coke brut par des camions. Il est ensuite déchargé dans une aire de stockage pour être repris par des chargeuses dans une trémie d'alimentation de coke brut. Après, la trémie alimente le broyeur à boulets.

I.4.9 Stockage du clinker

Le stockage du clinker se fait dans un Park de stockage comme le montre la figure suivant :

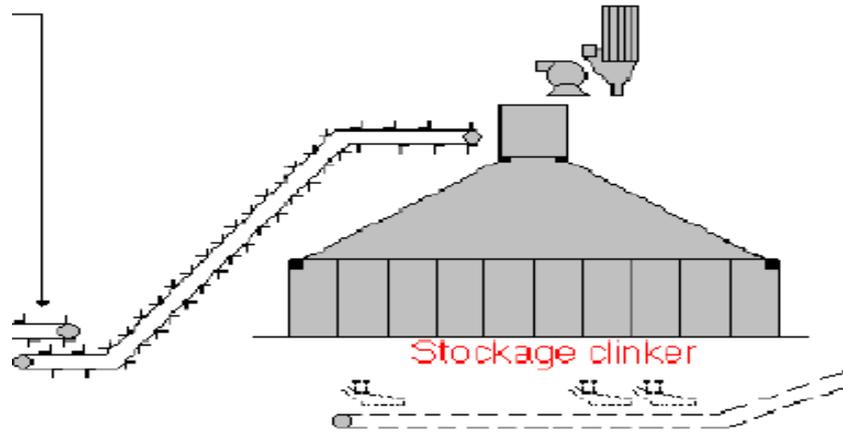


Figure 6: Stockage clinker

I.4.10 Broyage ciment

Après son refroidissement, le clinker est broyé très finement avec les adjuvants éventuels, dans des broyeurs à boulets rotatifs. La chaleur à l'intérieur du broyeur est d'environ 100 à 110°C. L'atelier de broyage du ciment de CIMAT comprend deux broyeurs alimentés chacun par 4 trémies munies des doseurs. Ces trémies comprennent chacun un type d'ajout, dont le débit dépend du pourcentage déterminant les caractéristiques physico-chimiques voulues du ciment. Ces ajouts ont pour rôle de :

- Diminuer le pourcentage du clinker ;
- Diminuer le coût de fabrication tout en gardant les caractéristiques requises ;
- Donner une bonne coloration au ciment.

Les pourcentages des ajouts en fonction du type de ciment voulu :

	CLINKER	CALCAIRE	GYPSE
CPJ35	62%	32%	6%
CPJ45	80%	14%	6%
CPG55	89%	5%	6%

Tableau 2: Pourcentage des ajouts selon le type de ciment

Le ciment broyé est véhiculé par l'aéroglossière vers l'élévateur à godets qui l'achemine au séparateur dynamique. A ce niveau est faite la séparation granulométrique du ciment suivant la finesse. Le produit grossier est recyclé dans le broyeur, tandis que les fines (produit fini) sont envoyées dans des silos de stockage en béton armé avant d'être ensachées et expédiées.

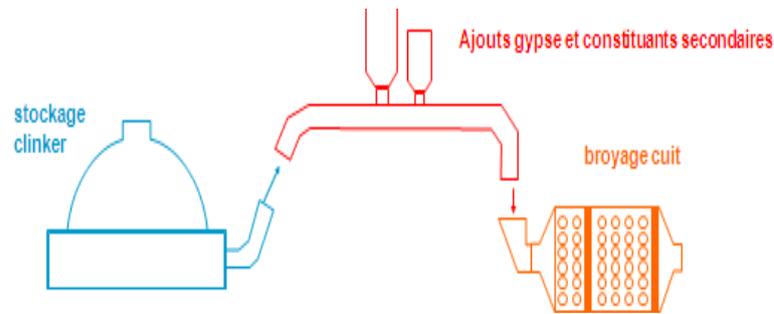


Figure 7: Broyage ciment

I.4.11 Ensachage et expédition

Le ciment prêt à l'emploi est transféré vers des silos de stockage du ciment. Suivant la demande du client, le ciment est livré soit en vrac soit en sacs.

- Livraison en vrac : les véhicules à citerne sont placés sur un pont bascule sous une tête de chargement télescopique est adaptée à l'ouverture de la citerne et un système de commande contrôle le chargement. Il existe un poste de livraison en vrac ;
- Livraison en sac : des sacs de poids net égale à 50 Kg sont mis vides dans des ensacheuses permettant leur remplissage par le ciment. Les sacs du ciment sont dirigés par la suite pour une étape de chargement dans les camions à l'aide d'un robot (CARICAMAT) formé d'une tête de chargement équipée de ventouses (une par sac) qui transfère sur la plateforme du camion les couches de sacs préparées.

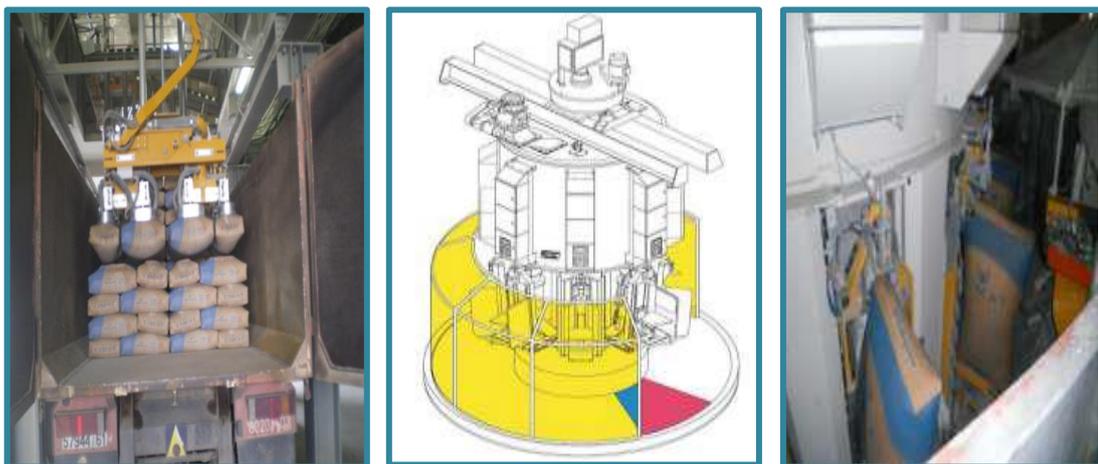


Figure 8: Robot CARICAMAT et Ensacheuse rotative

II. Cadre du projet

II.1 Objectif du projet

Les objectifs escomptés pour ce projet sont :

- Analyse de la rupture du tirant fixe coté élévateur ;
- Détermination des sources de la rupture ;
- Analyse des causes de la rupture ;
- Détermination de la nature des sollicitations sous lesquelles le tirant est cassé;
- Interprétations ;
- Simulation numérique ;
- Propositions des remèdes.

II.2 Planification du projet

Le projet a été réalisé en plusieurs étapes, une partie du travail était consacré à la documentation et à la recherche, une autre à la prise en connaissance du projet pour se familiariser avec son environnement. Ensuite attaquer le cœur du projet pour bien déterminer les causes de la rupture du tirant.

Ci-dessous le diagramme de GANTT représentant la planification initiale de déroulement du projet.

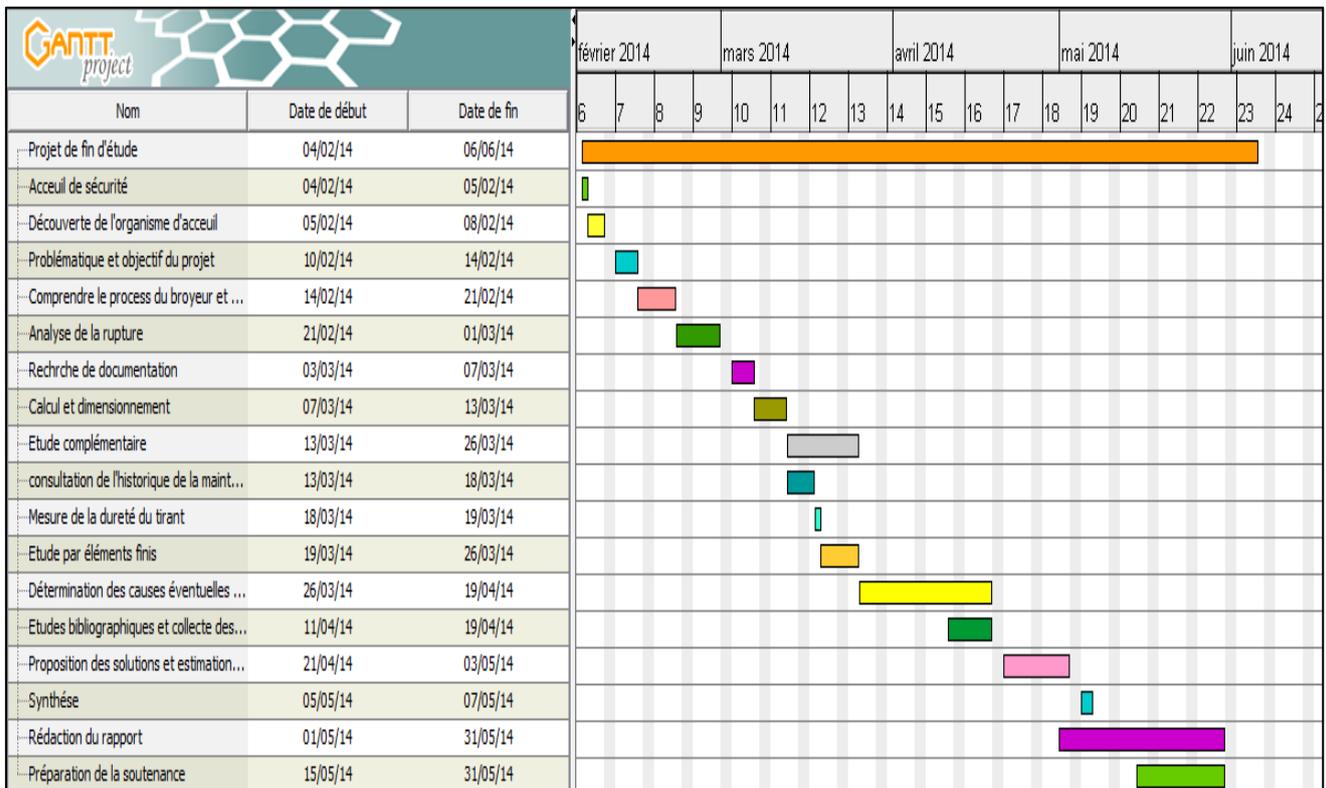


Figure 9: Diagramme Gantt du projet de fin d'étude

III. Conclusion

Après avoir présenté l'organisme d'accueil, les différentes étapes nécessaires à la production du ciment et le cadre du projet, on va décrire dans le chapitre suivant, le fonctionnement du broyeur étudié.

Chapitre II : Description du broyeur cru

L'objectif du présent chapitre est de décrire le fonctionnement du broyeur cru, en mettant l'accent sur ses différentes composantes.

I. Principe de fonctionnement du broyeur cru

Le broyeur cru RM 511 26-435 est un broyeur vertical à galets intégrant les trois opérations suivantes dans une unité :

- Le broyage ;
- Le séchage ;
- La séparation.

Il fonctionne suivant le processus ci-dessous :

La matière à broyer est introduite dans le broyeur par un sas et une goulotte d'alimentation et tombe au centre de la table de broyage en rotation. Sous l'effet de la force centrifuge, elle est entraînée sous les galets. La matière broyée est refoulée vers l'extérieur de la table par débordement. Elle est ensuite séchée par les gaz chauds sortant de l'anneau de buses, puis entraînée par les gaz suivant leur vitesse, en totalité ou partiellement vers le séparateur à haut rendement.

La partie non emportée par le flux gazeux, est recyclée en externe par un élévateur à godets vers le séparateur ou la goulotte d'alimentation.

L'effort nécessaire au broyage de la matière est généré par un système hydraulique qui permet un réglage en continu de la pression, en vue d'adapter l'effort de broyage à l'état d'exploitation du broyeur. Deux vérins hydrauliques par train de galets garantissent une introduction de force identique dans les galets par l'intermédiaire de tirants, en conservant une mobilité maximale.

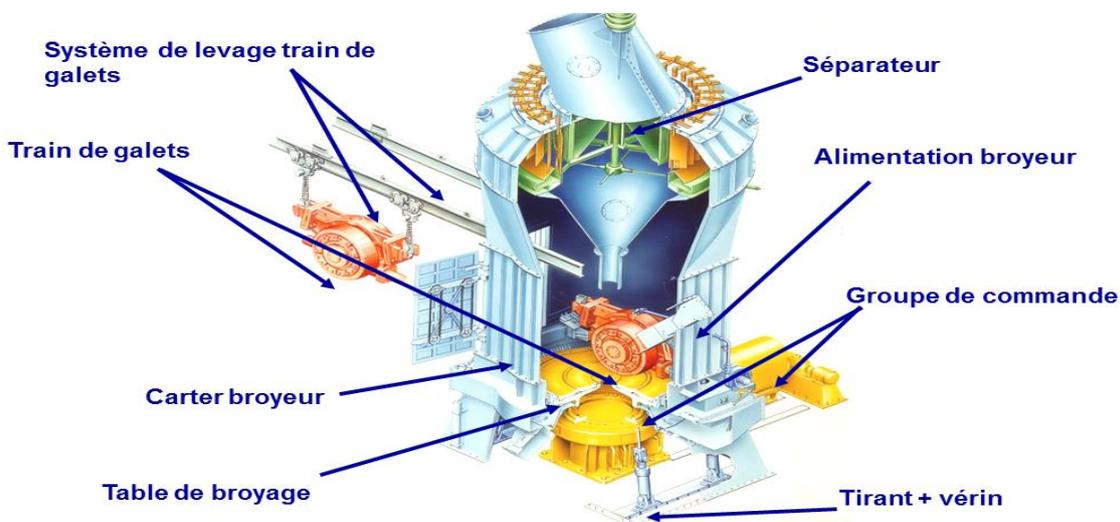


Figure 10: Le broyeur vertical à galets

➤ **Principe de Broyage**

Dans le broyeur à galets de POLYSIUS deux trains de galets tournent sur la table motrice. Le principe de la double paire de galets se traduit par une faible vitesse relative entre les galets et la table, permettant de limiter le glissement de la matière entre les galets et la table et de minimiser l'usure.

Le type de guidage des galets est une simple application des forces de broyage dans le système confèrent aux trains de galets une mobilité dans les trois plans, ce qui permet un mouvement vertical et un pivotement autour de l'axe de guidage.

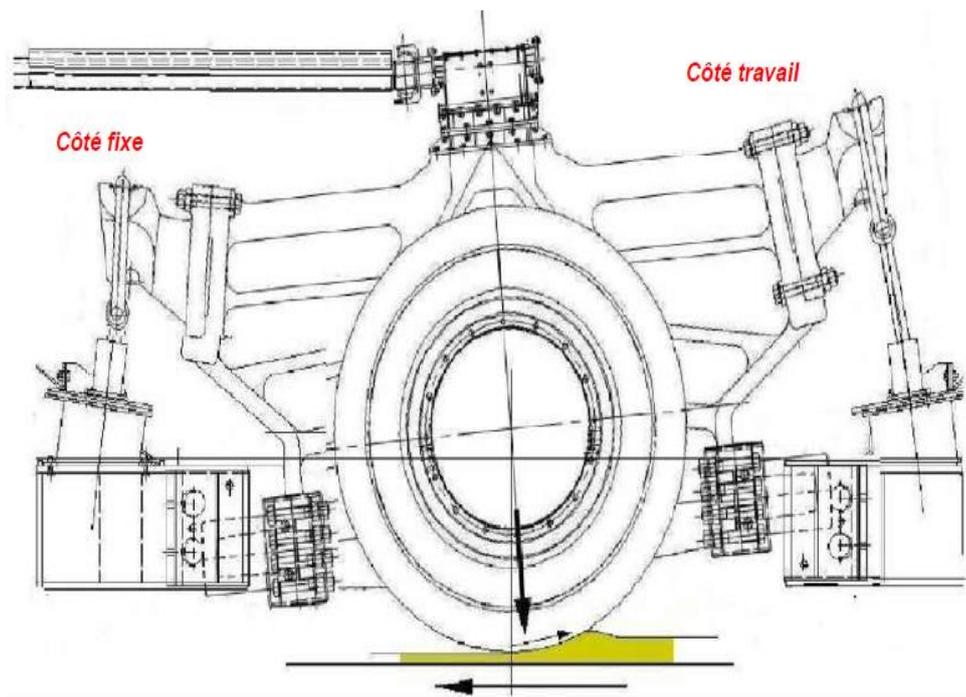


Figure 11: Principe de broyage

Si le galet intérieur est soulevé par le passage d'un gros morceau, le galet extérieur appuie plus fortement sur la couche de matière. Ainsi chaque galet renforce l'action de l'autre galet de la paire. De cette interaction résulte une efficacité de broyage supérieure.

Les composants principaux du broyeur a galets sont:

- La table et ses blindages avec double piste de broyage ;
- Deux trains de galets verticaux libres de s'incliner légèrement autour de leur axe horizontal ;
- Le carter ;
- L'anneau de buses réglable ;
- Le groupe de commande ;
- Le séparateur à haut rendement ;
- Le système hydraulique ;

- Le système d'extraction et la recirculation externe ;
- Le sas d'alimentation et la goulotte.

I.1 Les galets du broyeur vertical

Le train de galets se compose de deux galets rotatifs, indépendants l'un de l'autre. L'étanchéité du roulement est assurée par le joint d'arbre radial. A travers le porte-galets, de l'air d'étanchéité passe aux galets pour empêcher la pénétration de poussières dans les roulements. Les bandages en acier anti-usure sont fixés sur le corps de galet au moyen de bagues de serrage et de boulons filetés.

Le dispositif de lubrification situé à l'extérieur assure l'alimentation en huile des joints pour arbre tournant, à travers la tuyauterie d'air d'étanchéité. Des réservoirs situés à un endroit facilement accessible à l'extérieur du broyeur, au-dessus du point le plus haut du porte-galets (max. 1,1 m) contiennent les réserves d'huile.

La pression statique engendrée ainsi est suffisante pour assurer l'alimentation en huile.

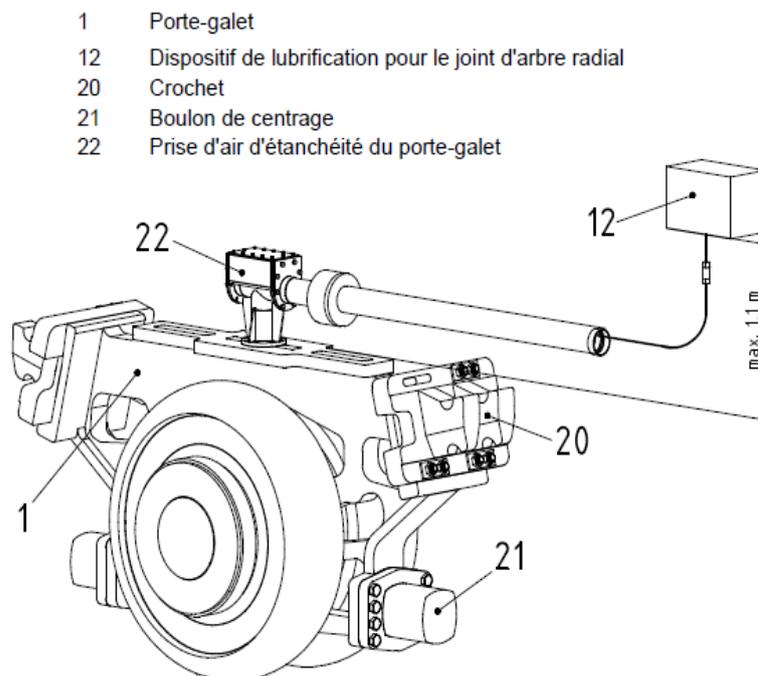


Figure 12: Train de galet du broyeur cru

I.2 Le plateau de broyage

Le plateau de broyage est monté directement sur la bride de sortie du réducteur. Une isolation thermique protège le plateau de broyage contre une charge thermique résultant des gaz chauds. La matière à broyer tombe au centre du plateau de broyage en rotation, et sous l'effet de la force centrifuge, elle est entraînée sous les galets. La hauteur du lit de matière peut être ajustée par l'anneau de retenue supplémentaire servant de rehaussement.

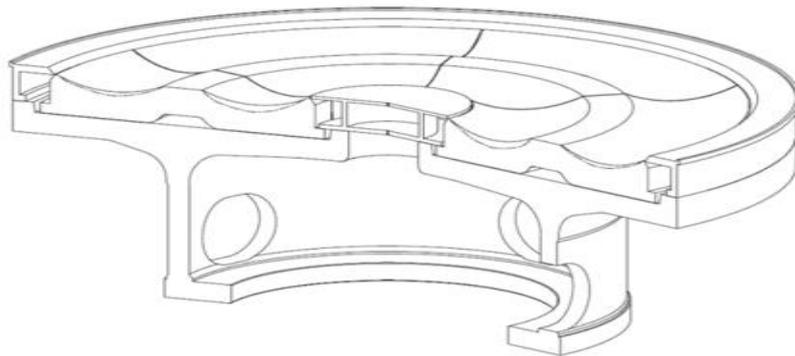


Figure 13: Le plateau de broyage

I.3 Les tirants

Les tirants transmettent l'effort de broyage des vérins aux trains de galets. Le détecteur de l'équipement de mesure ultrasonique de l'épaisseur du lit de matière est fixé sur les tirants à l'extérieur du broyeur.

La position des tiges des vérins hydrauliques renseigne clairement sur la hauteur du lit de matière.

Une protection anti-usure spéciale est prévue dans la zone où les tirants passent à travers le carter.

Les tirants comprennent pour l'essentiel les éléments suivants :

- Les manilles ;
- Les éclisses d'assemblage ;
- Les supports de tirant ;
- Les dispositifs de contrôle de la hauteur du lit de matière.

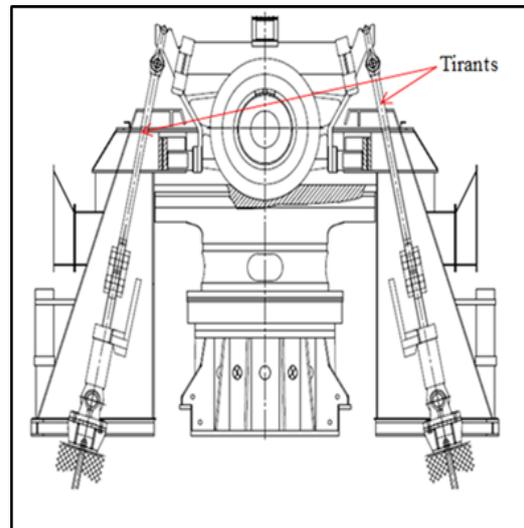
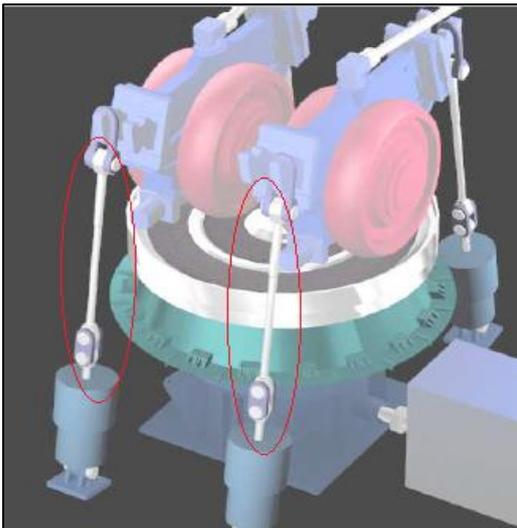


Figure 14: Les tirants du broyeur cru

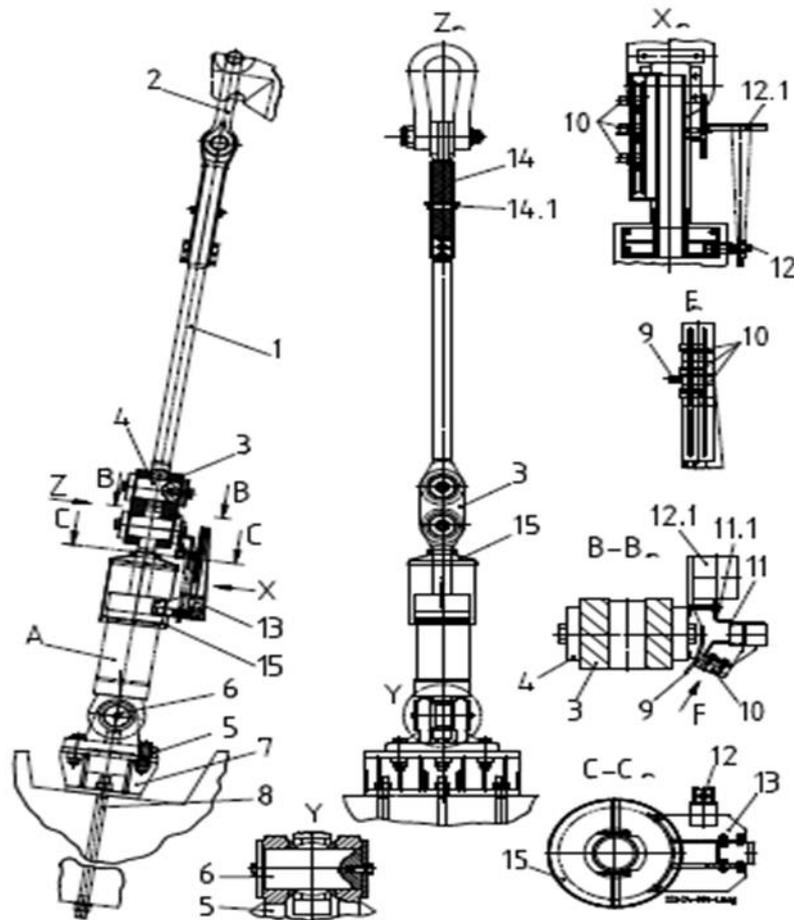


Figure 15: Les éléments constitutifs du tirant

Rep.	Désignation
	Tirants, complets
1	Tirant
2	Manille
3	Eclisses d'assemblage
4	Boulon
5	Support de tirant
6	Boulon
7	Ancrage du tirant
8	Goujon
9	Transmetteur de position
10	Détecteur de proximité
11	Echelle de graduation
11.1	Aiguille

12	Capteur de l'équipement de mesure par ultrasons
13	Support (des dispositifs de contrôle)
14	Tube de protection
14.1	Douille
15	Recouvrement des vérins hydrauliques
A	Vérin hydraulique

Tableau 3: Les éléments constituant du tirant

I.3.1 Les travaux effectués sur les tirants

Travaux à réaliser	Fréquence	Remarques
Resserrage des raccords vissés au couple de serrage prescrit, voir tableau - des boulons (4 et 6) - des supports de tirant (5) avec le cadre de base	Une fois par semestre	A la première mise en service et après chaque réparation
Réajustement des détecteurs de proximité (10)	Au besoin	
Réajustement (nouvelle initialisation) de l'équipement de mesure de la hauteur du lit de matière	Au besoin	Voir les instructions de service séparées

Tableau 4: Travaux d'entretien effectué sur le tirant

I.4 L'anneau de buses

L'anneau de buse est la zone du broyeur à galets où la section est la plus réduite. Elle est située entre la table de broyage et le casing. Le flux gazeux y transite à vitesse élevée ce qui entraîne la matière de la table et la transporte en haut vers le séparateur. La vitesse des gaz est comprise dans la plage 20 à 40 m/s.

L'anneau de buse est réglable de l'extérieur à l'aide de tiroirs permettant d'ajuster la section de passage, et donc le débit de matière passant à travers aux conditions requises.

La vitesse des gaz dans l'anneau de buses est un paramètre décisif pour le procédé de broyage.

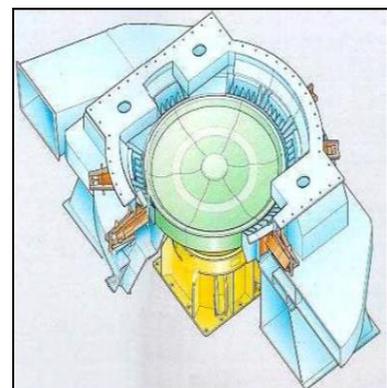


Figure 16: L'anneau de buses

I.5 Groupe de commande

Le groupe de commande du broyeur cru se compose de :

Commande de virage

- Moteur +réducteur de virage ;
- Système de crabotage.

Fonction :

- Étaler la matière ;
- Mise en pression de démarrage du système hydraulique.

Commande principale

- Moteur principal + réducteur planétaire ;
- Système de dé-crabotage.

Fonction :

- Broyer la matière ;
- Mise en pression de fonctionnement du système hydraulique (environ 115 bars).

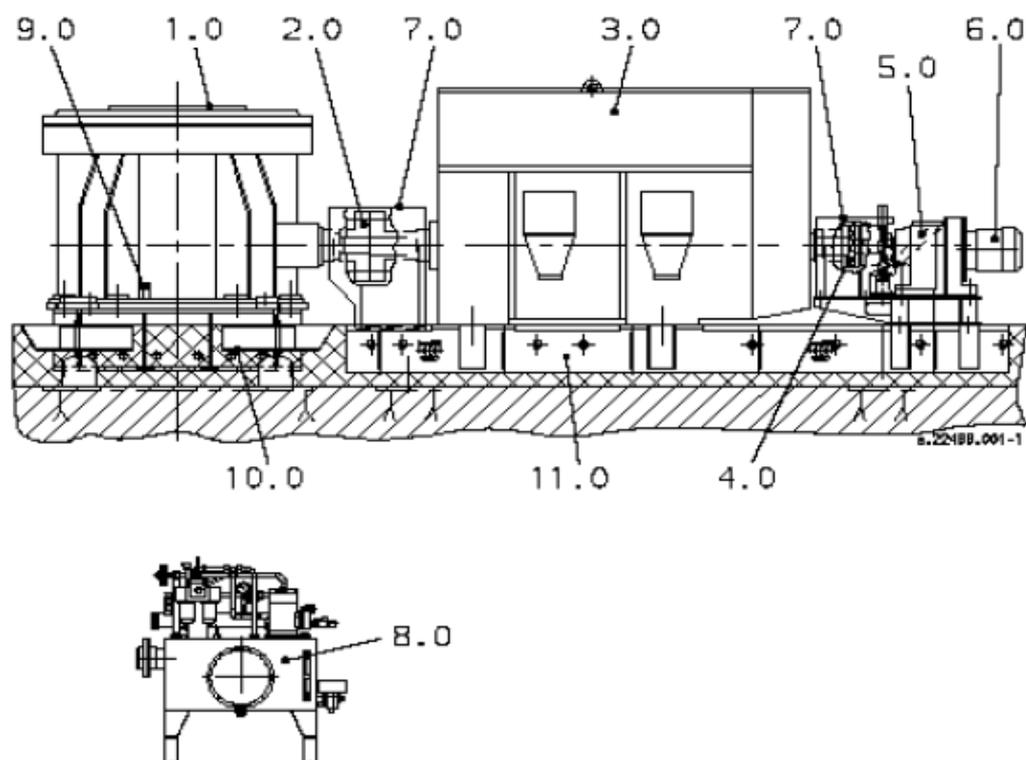


Figure 17: Groupe de commande

Rep.	Désignation
1	Réducteur principal
2	Accouplement
3	Moteur principal

4	Accouplement auto débrayable
5	Réducteur auxiliaire
6	Moteur auxiliaire
7	Dispositif de protection
8	Centrale lubrification
9	Contrôle de vibration
10	Châssis réducteur
11	Châssis pour moteur principal

Tableau 5: Les éléments du groupe de commande

I.6 Hydraulique broyeur vertical

I.6.1 Description et fonctionnement

L'effort nécessaire au broyage de la matière est généré par un système hydraulique.

Deux vérins hydrauliques par train de galets garantissent une application de force identique dans les galets.

Le système hydraulique permet un réglage en continu de la pression, en vue d'adapter l'effort de broyage à l'état d'exploitation du broyeur.

Pour démarrer le broyeur, les efforts sur les galets sont réduits par diminution de la pression hydraulique, ce qui permet d'abaisser le couple de démarrage. Chaque vérin hydraulique est relié à un accumulateur à piston qui amortit les à-coups du broyage.



Figure 19: Vérin de travail et vérin fixe



Figure 18: Centrale hydraulique pompe pour vérins fixes et pour vérins de travail

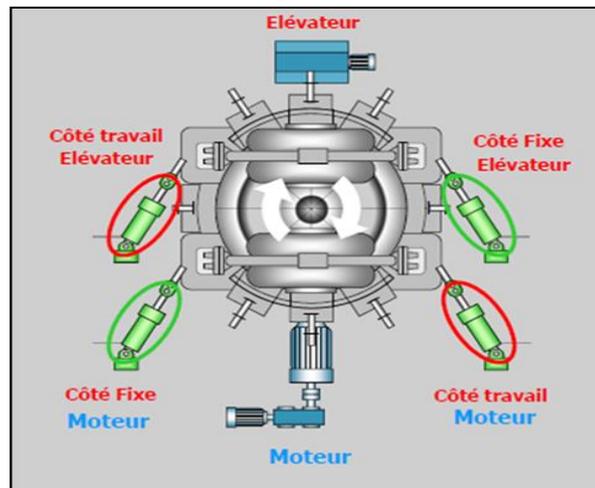


Figure 20: Position des vérins

I.7 Anneau de retenue

La hauteur de l'anneau de retenue fixe la hauteur de couche sur la table. L'anneau est ajustable suivant les vibrations et la consommation électrique.

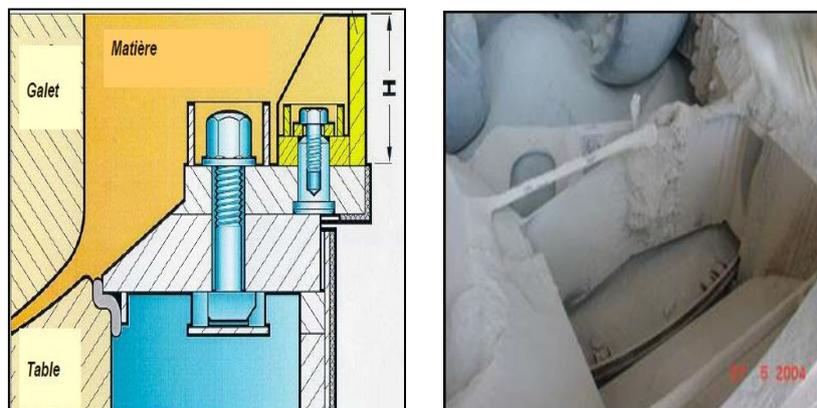


Figure 21: Anneau de retenue

I.8 Plaque d'étanchéité

Elle assure l'étanchéité au passage des tirants



Figure 22: La plaque d'étanchéité

II. Conclusion

En connaissant le fonctionnement du broyeur et de ses différents composants, nous allons pouvoir entamer, par la suite, l'analyse de la rupture.

Chapitre III : Analyse de la rupture

Dans le présent chapitre nous allons commencer par la détermination de la nature de l'avarie, le matériau utilisé dans la fabrication du tirant ainsi que le procédé de fabrication. Nous enchaînerons sur la détermination des conditions d'utilisation prévues telles que les sollicitations appliquées sur le tirant et l'ambiance du travail. Nous finirons par une étude complémentaire et une étude par élément finis.

I. Enquête préliminaire

I.1 Nature de l'avarie

Le tirant fixe coté élévateur du broyeur cru RM 511 26-435 a connu une rupture au niveau de l'épaulement le 30/10/2014 sachant qu'il a travaillé 11139,5 heures après son implantation.

L'observation macroscopique de ce tirant montre que le faciès est typique d'une rupture par fatigue (Annexe 1).



Figure 23: Le tirant cassé

Figure 24: Observations macroscopiques du faciès de rupture

I.2 Matériau utilisé

Le matériau utilisé dans la fabrication des tirants du broyeur cru est l'acier **42CD4** ou **42 Cr Mo** selon les normes AFNOR et DIN respectivement.

I.2.1 Composition chimique en %

C	Cr	Mo	S	Mn	P	Si
0.38-0.45	0.95-1.2	0.15-0.30	<0.035	0.6-0.9	<0.035	0.4 Maxi

Tableau 6 : Composition chimique de l'acier 42CD4

I.2.2 Propriétés

- Acier de construction faiblement allié au chrome molybdène pour trempe et revenu;
- Bonne trempabilité à l'huile, bonne résistance aux surcharges à l'état traité.

I.2.3 Domaines d'application

- Acier très employé en mécanique, pour des pièces de moyennes à fortes sections : arbres, essieux ;
- Crémaillères, vilebrequins, bielles, engrenages ;
- Cet acier est parfois utilisé pour des pièces trempées superficiellement.

I.3 La gamme de fabrication

Les tirants du broyeur vertical sont obtenus par forgeage. Afin d'améliorer leurs dureté, les tirants ont subi une trempe et revenu.

I.4 Conditions d'utilisation prévues

I.4.1 Sollicitations appliquées

Le tirant est soumis à une force hydraulique F générée par le vérin hydraulique produisant une contrainte de traction-compression.

La figure ci-dessous présente une modélisation simple du train de galets ainsi que la force hydraulique F appliquée sur le tirant.

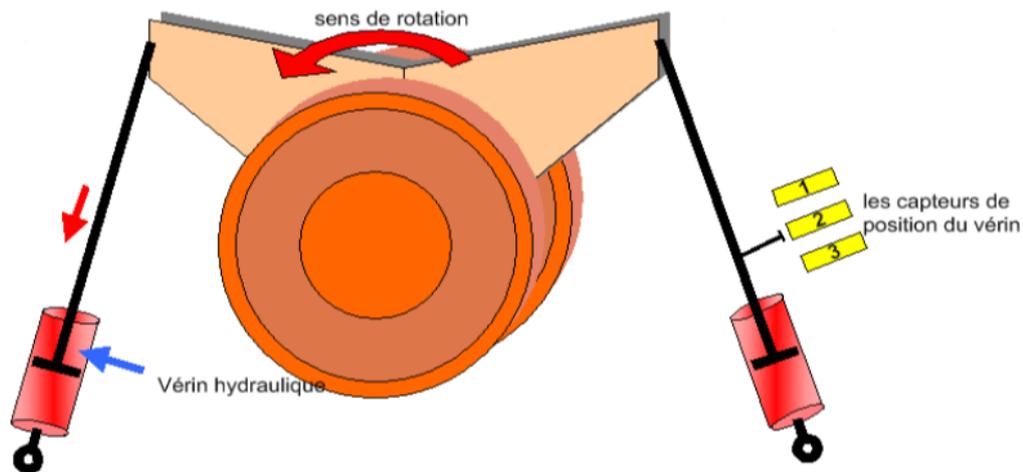


Figure 25:modélisation de la force hydraulique appliquée sur le tirant

Calcul de la force hydraulique F appliquée par le vérin sur le tirant :

On a :
$$F = P_r \cdot S_p$$

Équation 1: La force hydraulique

Avec :
$$P_r = 115 \text{ bar} = 115 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad \text{et} \quad S_p = \frac{\pi d^2}{4} = 138\,544.23 \text{ mm}^2$$

P_r : pression du vérin hydraulique.

S_p : Section du piston.

Application numérique:

$$F=1\ 600\ 000\ \text{N}$$

Calcul de la contrainte maximale générée par la force hydraulique F dans les conditions de fonctionnement normale :

On a un changement de section alors la relation $\sigma = \frac{F}{S}$ n'est pas valable



Alors la contrainte maximale se calcule par la relation suivante :

$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma_{\text{nom}}$$

Équation 2: La contrainte maximale

Avec :

σ_{nom} : la contrainte dans la section la plus faible, celle de diamètre $d_0=130$ mm.

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{F}{S_0}$$

Équation 3: La contrainte nominale

S_0 : la surface la plus faible du tirant.

$$S_0 = \frac{\pi d^2}{4} = 13\ 273.22\ \text{mm}^2$$

$$\sigma_{\text{nom}} = 120.54\ \text{MPa}$$

Détermination du facteur de concentration des contraintes :

Graphiquement : (voir Annexe 3)

On obtient $K_t=1.29$

Analytiquement :

On a:

$$K_t = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{0.88K_p}\right)^2 + \left(\frac{1}{0.843k_q}\right)^2}} + 1$$

Équation 4: Coefficient de concentration de contrainte de traction

Avec
$$k_p = \sqrt{\frac{t/r}{1-d/D} + 1} - 1 \quad \text{et} \quad k_q = \sqrt{t/r}$$

on obtient ainsi $K_p=0.59$, $K_q=0,5$ et $K_t=1.32$

D'où $\sigma_{\max} = 159.11 \text{ MPa}$

Calcul de la durée de vie du tirant dans le cas du fonctionnement normale :

Dans le cas, où la courbe S-N est non disponible, on utilise l'approximation graphique suivante pour trouver le nombre de cycles, connaissant σ_D (limite d'endurance).

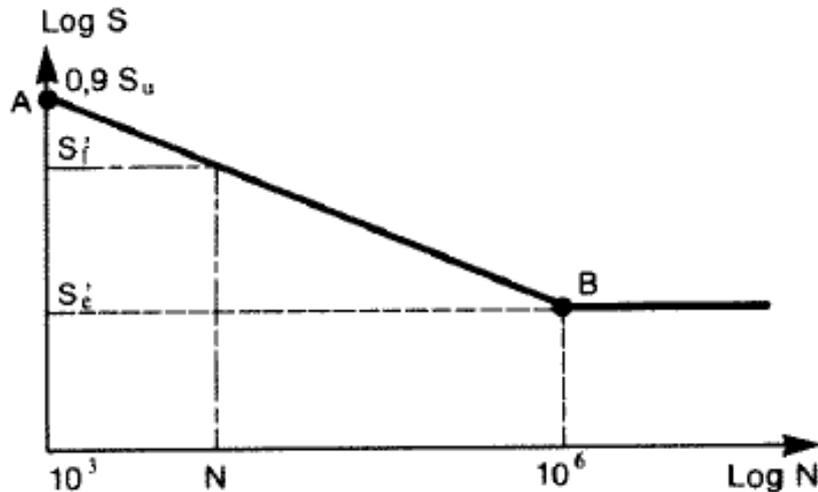


Figure 26: Approximation de la courbe S-N pour les aciers

Donc la durée de vie se calcule par la relation suivante :

$$N_i = 1000 \left(\frac{\sigma_i}{0.9 R_m} \right)^{\frac{3}{\log\left(\frac{\sigma_D}{0.9 R_m}\right)}}$$

Équation 5: La durée de vie

Avec :

σ_i : L'amplitude de la contrainte appliquée sur le tirant.

σ_D : La limite d'endurance.

Application numérique

➤ **La limite d'endurance σ_D**

Pour les aciers qui ont une résistance mécanique inférieure à 2000 MPa ($R_m < 2000 \text{ Mpa}$)

La limite d'endurance se calcule par la relation suivante :

$\sigma_D = 0.37R_m + 77$ Alors $\sigma_D = 354.5 \text{ MPa}$

➤ **L'amplitude de la contrainte σ_i**

On a $\sigma_i = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ et $\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$

Or $\sigma_{\min} = 2\sigma_m - \sigma_{\max}$

Avec $\sigma_m = 120.54 \text{ MPa}$ et $\sigma_{\max} = 159.11 \text{ Mpa}$

Donc $\sigma_i = 38.5 \text{ MPa}$

On obtient $N_i = 21.10^{15} \text{ Cycles}$

Pour évaluer le nombre des cycles de travail des tirants, on a accédé aux données de la salle de contrôle, cette salle permet de visualiser les différents paramètres de fonctionnement des unités de l'usine.

Donc le nombre de cycles estimé est de 1 cycle/2 min.

$$N_i = 42.10^{15} \text{ min} = 7.10^{14} \text{ heures}$$

Alors on remarque que le tirant possède une durée de vie infinie dans les conditions de fonctionnement normale.

I.4.2 Ambiance du travail du tirant

La partie supérieure du tirant qui est à l'intérieur du broyeur cru subit une température égale à 100 °C et la partie inférieure qui est à l'extérieur subit une température égale à 65°C.

I.5 Analyse morphologique

L'aspect de la rupture est caractéristique d'une fissuration progressive sous contrainte de flexion répétée avec effet d'entaille nul (voir figure 27). On distingue une zone relativement lisse, avec lignes d'arrêt de forme elliptique. Ces lignes permettent de localiser l'amorce elle se situe au niveau de l'épaule du tirant ainsi une zone à grains plus accidentée de rupture brutale, cette dernière se produit en fin de propagation, lorsque la partie restante de la pièce est devenu d'aire insuffisante pour supporter la charge maximale appliquée.

	EFFET D'ENTAILLE NUL		EFFET D'ENTAILLE MODÉRÉ		EFFET D'ENTAILLE INTENSE	
	SURCHARGE MODÉRÉE	SURCHARGE ÉLEVÉE	SURCHARGE MODÉRÉE	SURCHARGE ÉLEVÉE	SURCHARGE MODÉRÉE	SURCHARGE ÉLEVÉE
FLEXION PLANE RÉPÉTÉE (unilatérale)						
FLEXION PLANE ALTERNÉE (bilatérale)						
FLEXION ROTATIVE						

Figure 27: Apparence schématique de ruptures de pièces soumises à des contraintes de fatigue

Le faciès de rupture comporte diverses zones:

- Une zone d'amorce (I), visible dans la partie supérieure ;
- Une zone de propagation (II) présentant des lignes d'arrêt caractéristiques d'une rupture sous contrainte de flexion plane répétée ;
- Une zone (III) ne présentant pas de lignes ;
- Une zone (IV) d'aspect granuleux correspond à la rupture finale.



Figure 28: Les zones du faciès de rupture

II. Etude complémentaire

II.1 Historique de la maintenance du broyeur

Pour connaître la fréquence des pannes du tirant, on a consulté l'historique de la maintenance du broyeur cru (Annexe 2).

	Date	Anomalie
1	Janvier 2013	Intervention Galet cru 1 480,00
2		Chute pression air de barrage (Détachement manchette)
3		Défaut pompe TA1-12 (Débit eau nul)
4		Intervention mécanique sur circuit lubrification galet
5		Déclanchement de ventilateur tirage cru
6	Février 2013	Changement accouplement
7		Vibration broyeur cru
8		Coincement du tirant fixe coté élévateur
9		Flexion visible du tirant fixe coté élévateur avec présence de bruit
10		Bruit de coincement au niveau de la rotule du tirant fixe coté élévateur
11	Mars 2013	Arrêt programmé
12		Bruit de frottement au niveau de la plaque d'étanchéité du tirant fixe coté élévateur
13		Coincement du tirant fixe coté élévateur
14	Avril 2013	Erreur de position volet 2 voies 1 1,11
15		Etat de marche du tirant fixe coté élévateur est anormal+ Bruit anormal
16	Mai 2013	Chute de pression vérin FE
17	Juin 2013	Coincement volet 2 voies
18		Défaut débit lubrification galet

19		Vibration palier 2 coté vireur
20	Juillet 2013	Chute de pression hydraulique 3 6,82 bc
21		Problème sur l'hydraulique Broyeur cru
22		Contrôleur de rotation du sas alimentation du broyeur
23		Changement bavette
24		Déclenchement moteur principal
25	Aout 2013	Chute de pression d'air de barrage
26		Déclenchement P15 : arrêt pompe d'injection d'eau broyeur cru
27	Septembre 2013	Changement roulement séparateur
28		Coincement volet 2 voies
29		Défaut contrôle rotation sas alimentation
30		Chute de pression d'air de barrage
31	Octobre 2013	Contrôleur de rotation sas alim
32		Déclenchement pompe d'injection d'eau
33		Rupture tirant vérin fixe coté élévateur
34	Novembre 2013	Coincement du tirant (désalignement entre le tirant et le vérin)
35		Déclenchement du SAS alimentation BC par contrôle rotation
36	Décembre 2013	Chute tension P15 et chute pression hydraulique
37		Coincement volet 2 voies
38		Chute de pression sur vérin 2 0,91

Tableau 7 : Historique des pannes du broyeur cru

Diagramme Pareto

Pour classier les pannes les plus fréquentes nous utilisons le diagramme PARETO

Anomalie	Fréquence	%	Cumule %
Problèmes du tirant fixe coté élévateur	8	22.22	22.22
Chute de pression	7	19.44	41.66
Problèmes du volet 2 voies	4	11.11	52.77
Contrôleur de rotation sas d'alimentation	4	11.11	63.88
Défauts des pompes	3	8.33	72.21
Défauts des galets	3	8.33	80.60
vibration	2	5.55	86.09
Déclanchement de ventilateur tirage cru	1	2.77	88.86
Changement d'accouplement	1	2.77	91.63
Changement bavette	1	2.77	94.4
Déclenchement moteur principal	1	2.77	97.17
Changement roulement séparateur	1	2.77	100
Total	36		

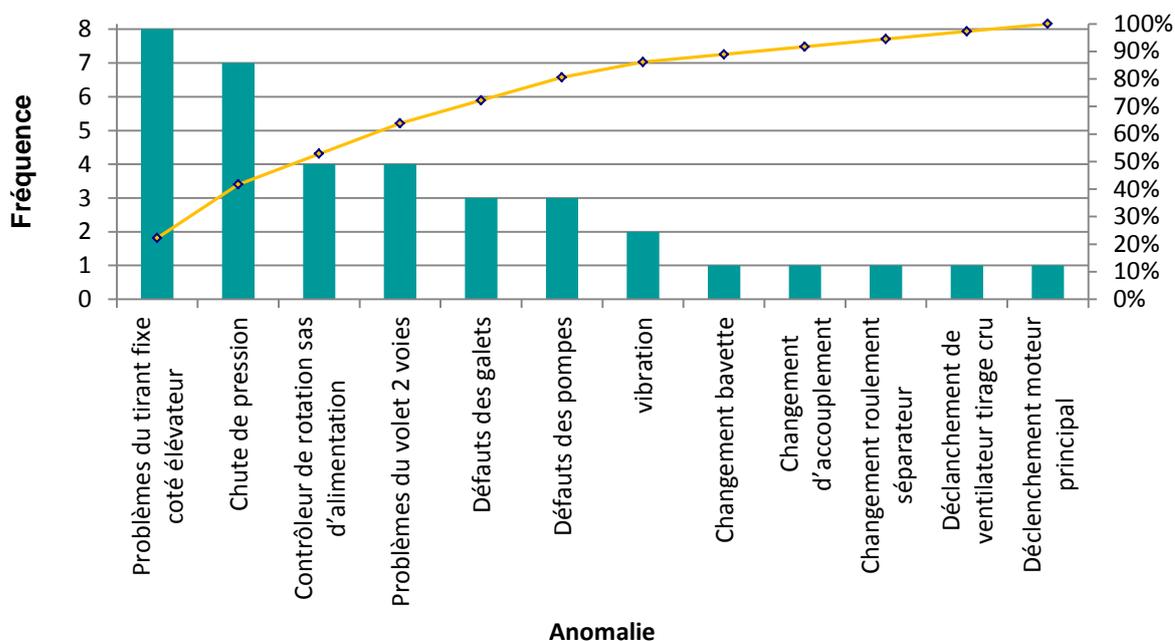


Figure 29: Diagramme PARETO

D'après l'étude de l'historique de la maintenance du broyeur, il s'est avéré qu'il existe des problèmes au niveau du tirant qui réside dans les coincements répétés et malgré la répétition de ces problèmes il nous apparaît qu'il y a un manque des entretiens préventifs sur le tirant.

II.2 Mesure de la dureté

Nous avons mesuré la dureté du tirant dans différents points afin d'évaluer si les conditions de travail de celui-ci ont diminué son dureté.



Figure 30: Appareil de mesure de la dureté

Point	1	2	3	4	5	6	7
Dureté HB	162	160	196	209	219	215	240

Tableau 8: Mesure de la dureté du tirant



Figure 31: Les points de mesures de la dureté

Les examens de dureté montrent que le matériau a une dureté moyenne de 200.14 HB, on remarque qu'il y a une différence entre la valeur donnée par le fournisseur et celle donnée

par les mesures, mais on peut dire que les conditions de travail du tirant ont diminué la dureté du matériau.

II.3 Heures de marches et production du broyeur cru

Année	Production t/h	Heures de marche (h)
2011	47084.86	272.65
2012	1488854.64	5452.38
2013	1833913.97	6710.95

Tableau 9: Evolution de la production du broyeur durant trois années

On remarque que les heures de marche et la production du broyeur cru ont augmenté entre les trois années.

II.4 Etude éléments finis sur le tirant

L'objectif de cette partie est l'analyse du comportement du tirant par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel de calcul SOLIDWORKS SIMULATION.

La mise en œuvre d'un problème d'analyse par la méthode des éléments finis nécessite la réalisation des tâches suivantes :

- Modélisation géométrique de la pièce ;
- Définition des propriétés mécaniques et physiques du matériau ;
- Création d'un maillage (discrétisation de la géométrie) ;
- Mise en place des conditions frontière (déplacements imposés) ;
- Application du chargement ;
- Exécution de la solution ;
- Analyse des résultats.

II.4.1 Modélisation géométrique de la pièce

Nous avons modélisé le tirant sous un logiciel de modélisation 3D SOLIDWORKS



Figure 32: Modélisation 3D du tirant sous SOLIDWORKS

II.4.2 Propriétés du matériau

Rm (Mpa)	Re(Mpa)	Dureté(HB)	E(Gpa)	v	G(Gpa)	ρ (kg/m3)
750/1300	500/900	240	210	0.28	79	7800

Tableau 10: Caractéristiques mécaniques de l'acier 42CrMo4

Rm : contrainte maximale avant rupture ;

Re : limite d'élasticité ;

E : module de Young ;

v : coefficient de poisson ;

G : module de cisaillement ;

ρ : masse volumique.

II.4.3 Déplacements imposés

Le côté inférieur du tirant est fixe alors il est modélisé par une liaison d'encastrement.

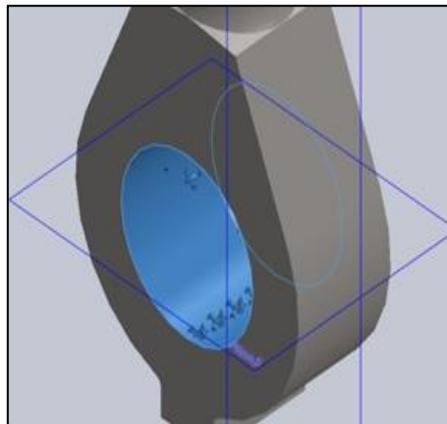


Figure 33: Déplacement imposé sur le côté inférieur du tirant

II.4.4 Application du chargement

Le côté supérieur du tirant est soumis à une force de compression générée par le vérin hydraulique égale à 1 600 000 N.

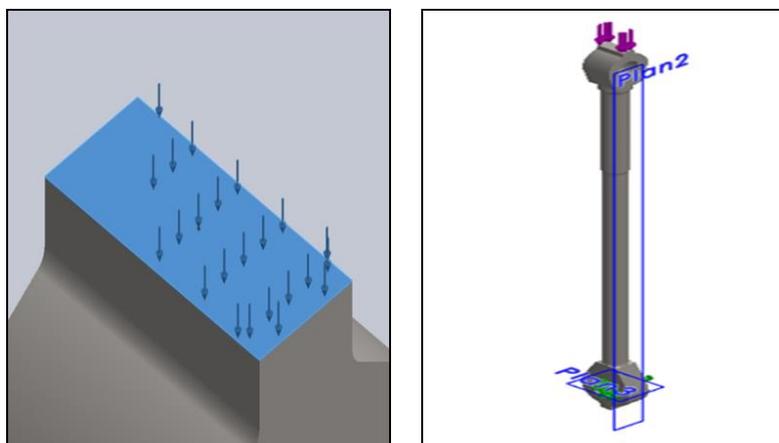


Figure 34: Le chargement sur le côté supérieur du tirant

II.4.5 Création d'un maillage

Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés fins et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs.

Lorsqu'on maille un modèle, le logiciel génère un réseau mixte d'éléments volumiques, coque, ressort et de contact à partir de la géométrie créée. Le programme crée automatiquement les maillages suivants :

- Maillage volumique ;
- Maillage coque.

Dans notre cas d'étude le maillage crée par le logiciel est un **maillage volumique**.

II.4.5.1 Informations sur le maillage

Type de maillage	Taille d'élément (mm)	Tolérance (mm)	Nombre totale de nœuds	Nombre total d'éléments
volumique	72.9974	3.64987	3718	1916

Tableau 11: Informations sur le maillage

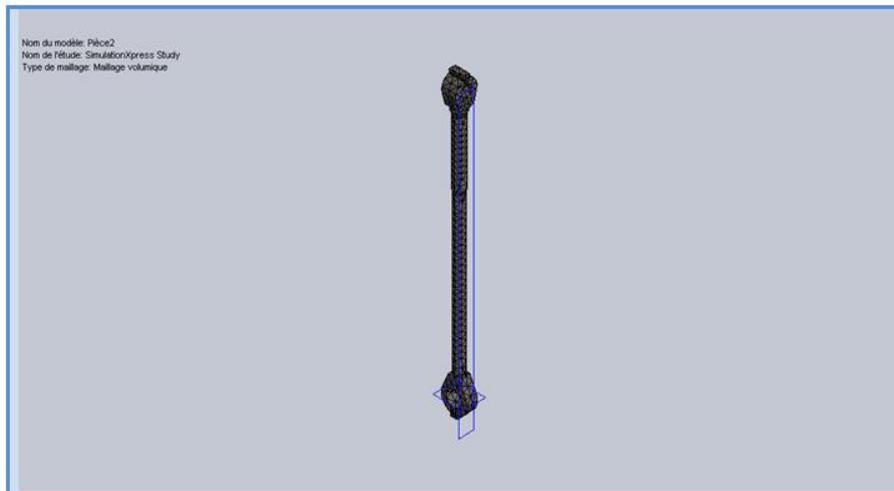


Figure35: Maillage généré par le logiciel de calcul

II.4.6 Résultats de l'étude

II.4.6.1 Contrainte

Nom	Type	Min (N /m2)	Max (N /m2)
Contrainte	Contrainte de Von	23851.2	3.51499e+008
	Mises	Nœud: 392	Nœud: 1235

Tableau 12: Informations sur la contrainte

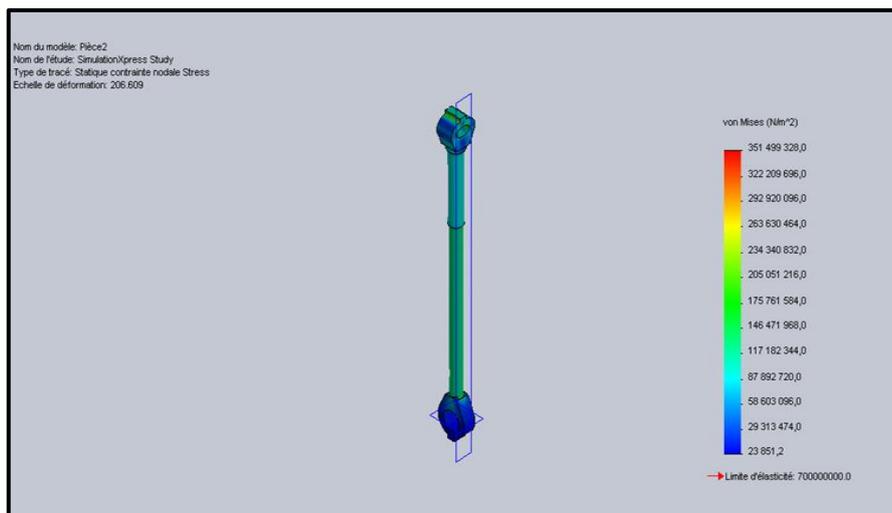


Figure 36: Contrainte de Von Mises

II.4.6.2 Déplacement

Nom	Déplacement	Min	Max
Déplacement	Déplacement résultant	0 mm Nœud : 48	1.82162 mm Nœud: 432

Tableau 13 : Déplacement du tirant

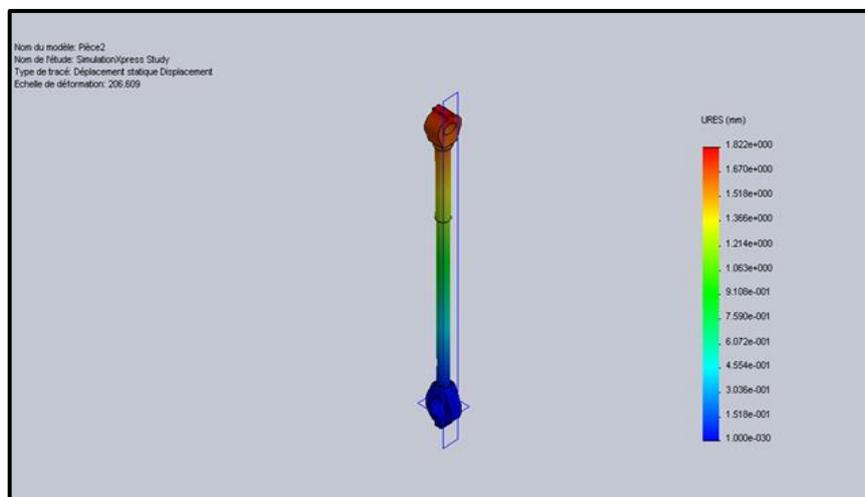


Figure 37: Déplacement résultant

III. Conclusion

L'observation macroscopique a montré que le faciès de rupture est typique à une rupture brutale par fatigue sous contrainte de flexion répétée sachant que dans les conditions de fonctionnement normal le tirant doit subir seulement une contrainte de traction-compression.

L'étude de l'historique de la maintenance du broyeur cru nous a permis de remarquer que les coincements répétés du tirant, le manque des contrôles préventifs et d'interventions lors de la déclaration des anomalies et l'augmentation des heures de marches du broyeur et le débit avec lequel il travail, peuvent être des facteurs qui favorisent la rupture du tirant.

L'étude par éléments finis a montré qu'il n'y a pas une concentration de contrainte au niveau de l'épaulement du tirant dans le cas du fonctionnement normal.

Nous allons faire, dans le chapitre suivant, une analyse détaillée des facteurs qui agissent sur le tirant afin de déterminer les causes probables de la rupture.

Chapitre IV : Détermination des causes de la rupture

L'objectif de cette phase est de déterminer et analyser les causes susceptibles de provoquer la rupture.

I. Introduction

Cette recherche et les remèdes qui en découleront constituent un fondement essentiel du sujet traité, et la base sur laquelle seront fondées toutes les actions amélioratrices à entreprendre.

A cette étape du développement du sujet, la mission est de focaliser l'intérêt sur les différentes causes soupçonnées, puis sélectionner par la suite celles potentiellement importantes.

I.1 Outils utilisés

On a adopté une démarche reposant sur quelques outils de résolution des problèmes elle s'articule sur les deux outils suivants :

- Brainstorming ;
- Ishikawa.

Le brainstorming est une technique de génération d'idées qui stimule la réflexion créative lors de la recherche de solutions pour un problème donné. Il s'agit d'une méthode qui favorise la réflexion créative et qui a pour objectif de générer rapidement un grand nombre d'idées. Cette technique s'applique aussi bien pour des sessions individuelles que collectives. Le brainstorming classique associe, connecte et combine différentes idées isolées pour en générer de nouvelles. Une session de brainstorming se tient généralement en groupe avec un animateur.

Diagramme Ishikawa est un mode de visualisation des causes potentielles pouvant provoquer un effet que l'on cherche à comprendre. Cette méthode a été reprise au Japon lors de la mise en place des cercles de qualité d'où le nom ISHIKAWA. On l'appelle parfois le diagramme des 5M pour des analyses de processus.

La construction de ce diagramme passe par plusieurs phases : on identifie 5 familles de champs d'investigations (parfois ce diagramme est aussi appelé champ des 5M)

- **Machine** : c'est un équipement ou un sous-ensemble d'un équipement ;
- **Main d'œuvre** : c'est le personnel ;
- **Matière** : c'est tout ce qui est consommable ;
- **Méthode** : c'est tout ce qui est lié au processus de production et de la maintenance ;

- **Milieu** : c'est l'environnement.

Il permet :

- Identification de l'**effet considéré** ;
- Recensement de toutes **les causes possibles** ;
- Regroupement par **famille des causes** ;
- Hiérarchisation des causes ;
- Dessin du diagramme.

I.2 Recherche des causes de la rupture

I.2.1 Brainstorming

Nous avons fait un brainstorming avec l'ensemble de personnel de bureau des méthodes ELMUSTAPHA BOURAZOUK responsable bureau des méthodes, CHAHID KARROUMI visiteur mécanique, BADR BAHIJ agent préventif, BADER EDDINE SBAI préparateur mécanique et d'autres agents de la maintenance préventive afin de recenser les causes principales.

Une fois effectué, il en ressort les éléments suivants :

- Jeu de guidage des galets;
- Vibration ;
- Trop de matière à broyer ;
- Blocage de l'articulation du tirant ;
- Démontage de l'anneau de retenue ;
- Mauvais alignement du tirant ;
- Présence des corps étrangers dans le broyeur ;
- Usure de la piste et des galets ;
- Coincement de la plaque d'étanchéité ;
- Température élevée ;
- Fatigue du matériau ;
- Coincement de la rotule du vérin ;
- Usure de la manille et du crochet ;
- Mauvais choix du matériau ;
- Défauts de fabrication ;
- Manque de contrôles sur les tirants ;
- Microfissures préexistantes ;
- Qualité de la matière à broyer ;

- Mauvaise conduite du broyeur ;
- Plan de maintenance non respecté ;
- Sollicitations efforts externes ;
- Quantité d'eau d'injection ¹;
- Surcharge de pression ;
- Glissements des galets sur la piste.

I.2.2 Diagramme Ishikawa

Nous avons classifié l'ensemble des idées qui semblent intéressantes générées lors du brainstorming par la méthode des 5 M.

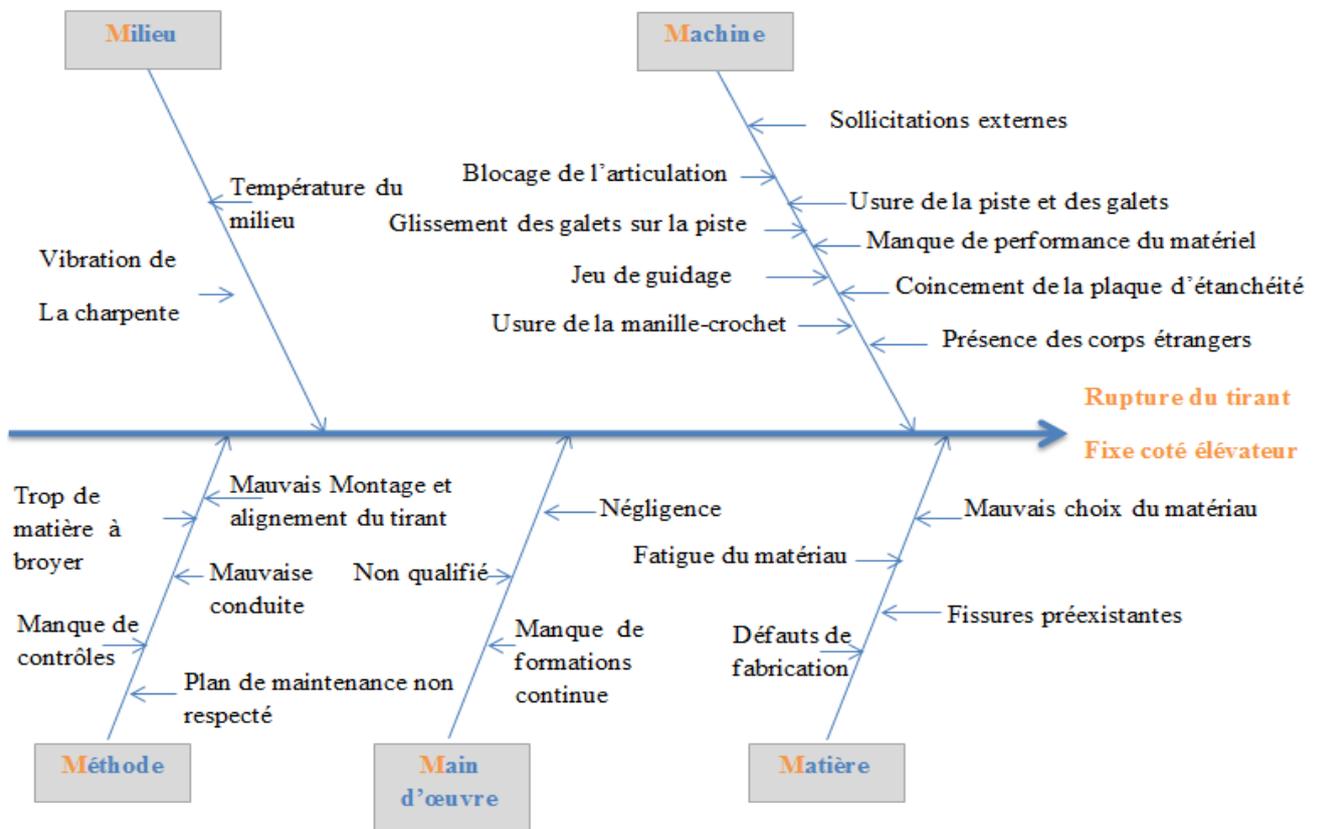


Figure38: Diagramme d'ISHIKAWA

L'utilisation de la méthode des 5M nous a permis de balayer les causes possibles, l'étape suivante consiste à détailler les causes probables du problème, pour ce faire nous allons utiliser le diagramme PARETO.

Causes	classement	%	Cumule %
Sollicitations externes	10	20	20
Blocage de l'articulation du tirant	9	17.5	37.5

¹ Eau d'injection : l'eau est injectée dans le broyeur afin de faciliter le broyage de la matière et diminuer les vibrations au sein du broyeur lors du broyage

Coincement de la plaque d'étanchéité	8	15.5	53
Niveau de la matière	7	12.5	65.5
L'usure	6	10	75.5
Défauts de fabrication	5	9	84.5
Mauvais montage du tirant	4	6	90.5
Jeu de guidage des galets	3	4	94.5
Présence des corps étrangers	2	3	97.5
Usure manille-crochet	1	2.5	100

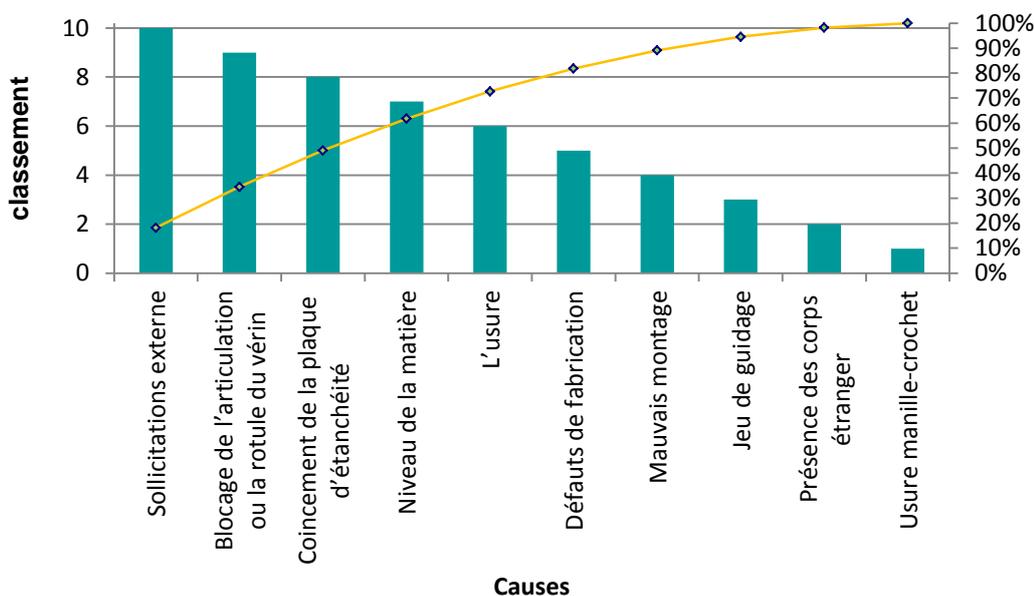


Figure39: Diagramme PARETO

D'après le diagramme PARETO on peut constater que les causes probables de la rupture peuvent être :

- Sollicitations externes ;
- Blocage de l'articulation du tirant ;
- Coincement de la plaque d'étanchéité ;
- Niveau de la matière à broyer ;
- L'usure des galets et de la piste ;
- Défauts de fabrication.

Nous devons vérifier la validité de ces hypothèses soupçonnés d'être à la base de ce problème, tout en effectuant une étude détaillée sur les différentes composantes, c'est l'objectif de la partie suivante.

On peut conclure que tous les soupçons convergent vers deux grandes causes éventuelles :

- Problèmes liés à la machine (blocage, coincement, usure, ...) ;
- Problèmes liés au matériau (fatigue, mauvais choix, fissures préexistantes, ...).

II. Problèmes liés à la machine

II.1 Sollicitations externes

L'analyse de la rupture effectuée dans le chapitre précédent montre qu'il existe des sollicitations parasites de flexion.

II.2 Coincement du tirant

A partir de l'historique des pannes du broyeur cru nous remarquons qu'il y avait plusieurs coincements du tirant au niveau de son articulation et de la plaque d'étanchéité qui ont entraîné un état de marche anormal de ce dernier ainsi qu'une flexion visible accompagnée d'un bruit de coincement.

Pour régler le problème du blocage de la plaque d'étanchéité due au colmatage de la matière sur ses côtés inférieurs, l'équipe de la maintenance a installé une conduite de nettoyage, mais l'état de marche du tirant reste anormal.

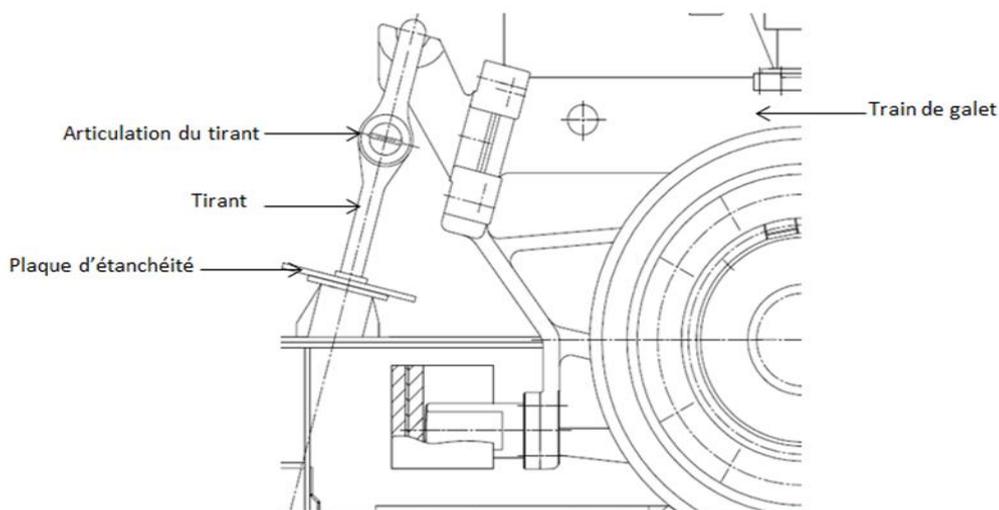


Figure 40: plaque d'étanchéité et articulation du tirant

Nous supposons que s'il y a un blocage au niveau de l'articulation du tirant deux cas peuvent être envisagés :

- L'application d'un effort radial par le poids du train de galets sur la partie supérieure du tirant;

- L'application d'une composante radiale de la force hydraulique, due à l'inclinaison du vérin produite par le coincement de l'articulation, sur la partie inférieure du tirant.

Cas 1 :

Dans le cas du coincement de l'articulation du tirant, un effort sera appliqué par le poids du train de galets sur celui-ci générant une contrainte de flexion.

On donne une estimation de cette force par $F_f = 0.6 * \text{Poids du train de galets}$.

La contrainte de flexion se calcule par la relation suivante:

$$\sigma_f = K_{tf} \frac{32 M_f}{\pi d^3}$$

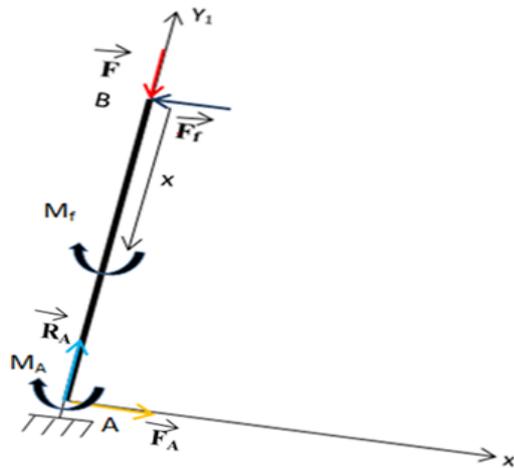
Équation 6: Contrainte de flexion

Avec K_{tf} : coefficient d'entaille relatif aux sollicitations de flexion.

M_f : moment de flexion.

Le moment fléchissant :

Nous modélisons le tirant par sa ligne moyenne



Détermination des réactions :

$$\sum F = 0 \Rightarrow -F_f + F_A = 0 \quad \text{et} \quad -F + R_A = 0$$

Or $F_f = 0.6 * P$ et $P = m.g$ et $F = 1\,600\,000 \text{ N}$

m : la masse du train de galets égale à $75\,000 \text{ Kg}$

g : constant de gravité.

P : poids du train de galets

Application numérique :

$P = 750\,000 \text{ N}$ et $F_f = 450\,000 \text{ N}$ Alors $F_A = 450\,000 \text{ N}$ et $R_A = 1\,600\,000 \text{ N}$

Effort tranchant :

$$T = F_f = 450\,000 \text{ N}$$

Moment fléchissant :

$$M_f(F_f) = F_f \cdot x$$

Équation 7: Moment fléchissant

Le moment est maximal pour $x=L$

L : la longueur du tirant.

$$M_{f\max} = F_f \cdot L = 1521 \text{ KN.m}$$

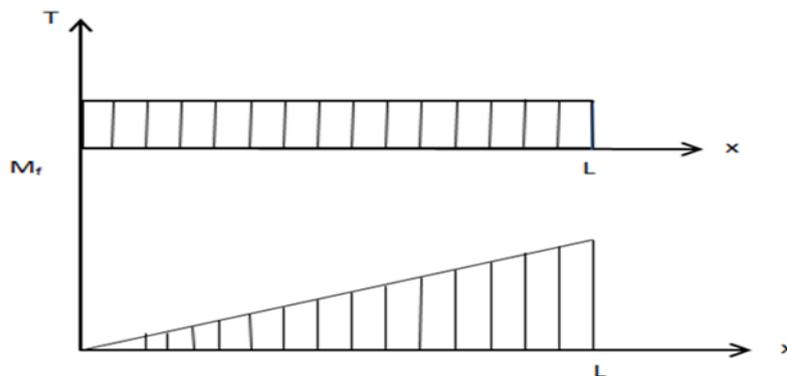


Figure 41:représentation graphique de l'effort tranchant et du moment fléchissant

Calcul du facteur de concentration de contrainte de flexion

$$K_{tf} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{0.54K_p}\right)^2 + \left(\frac{1}{0.843K_q}\right)^2}} + 1$$

Équation 8: Coefficient de concentration de contrainte de flexion

Avec $K_p = 0.59$ et $K_q = 0,5$ (calculés dans le chapitre précédent)

On obtient **$K_{tf} = 1.25$**

Calcul de la contrainte équivalente

Critère de Von Mises :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_{tx} + \sigma_{fx})^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Équation 9 : Contrainte équivalente de Von Mises

Dans notre cas le moment de torsion est nul alors la contrainte de torsion est nul

$$M_t = 0 \Rightarrow \tau_{xy} = 0$$

Alors
$$\sigma_{eq} = K_{tf} \frac{32M_f}{\pi d^3} + K_{tt} \frac{F}{S_0} \quad \text{AN: } \sigma_{eq} = \mathbf{8973.84 \text{ MPa}}$$

La durée de vie :

D'après l'équation 5 on obtient $N_i = \mathbf{0.342 \text{ cycles}}$

$N_i = \mathbf{0.68 \text{ minutes}}$

La valeur de la durée de vie calculée justifie la rupture brutale du tirant.

Pour mettre en évidence la conformité de cette hypothèse, nous allons vérifier s'il existe une concentration de contraintes, au niveau de l'épaule, qui seront générée par l'application de poids du train de galets sur le tirant.

La figure ci-dessous montre qu'il n'y a pas de concentrations de contraintes au niveau de la zone où la rupture s'est produite.

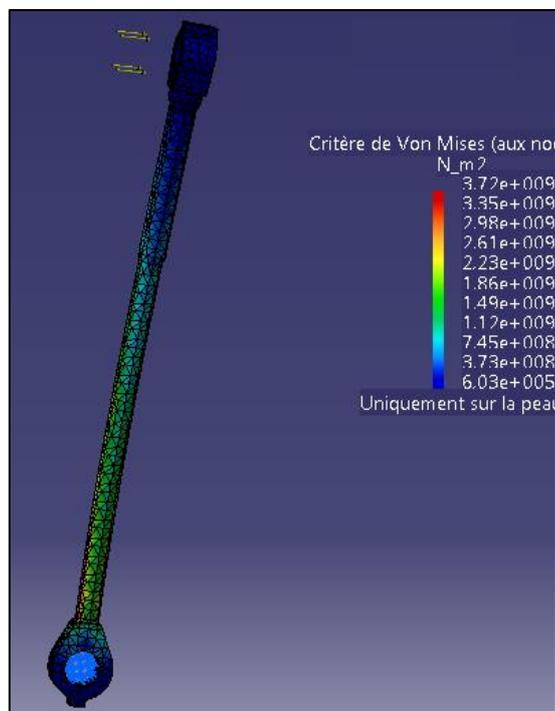


Figure 42: contrainte de Von mises sur le tirant dans le cas 1

Alors le premier cas de calcul n'est pas convenable avec notre cas d'étude.

Cas 2 :

Dans ce cas d'étude nous supposons que le coincement de l'articulation entraîne une rotation du vérin par un angle β égale à 11.1° comme l'illustre la figure suivante.

Alors dans ce cas la force hydraulique se divise en deux composantes radiale et axiale.

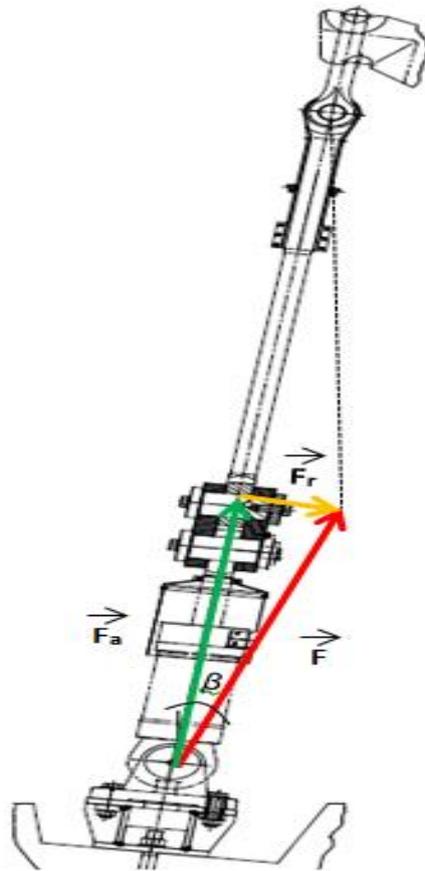


Figure 43: Modélisation des forces générées lors de l'inclinaison du vérin

Calcul de la valeur de la force radiale

On a $F_r = F \sin \beta$ on obtient $F_r = 308 \text{ KN}$

D'après l'équation 6 située dans le cas précédent, la valeur de la contrainte de flexion générée par la force radiale est égale à : 4360.7 Mpa, on remarque que cette valeur est importante par rapport à la résistance élastique du tirant.

En suivant la démarche effectuée dans le premier cas on obtient :

$$\sigma_{eq} = 4520.7 \text{ MPa}$$

$$N_i = 80.76 \text{ minutes}$$

De même la valeur de durée de vie justifie la rupture brutale du tirant.

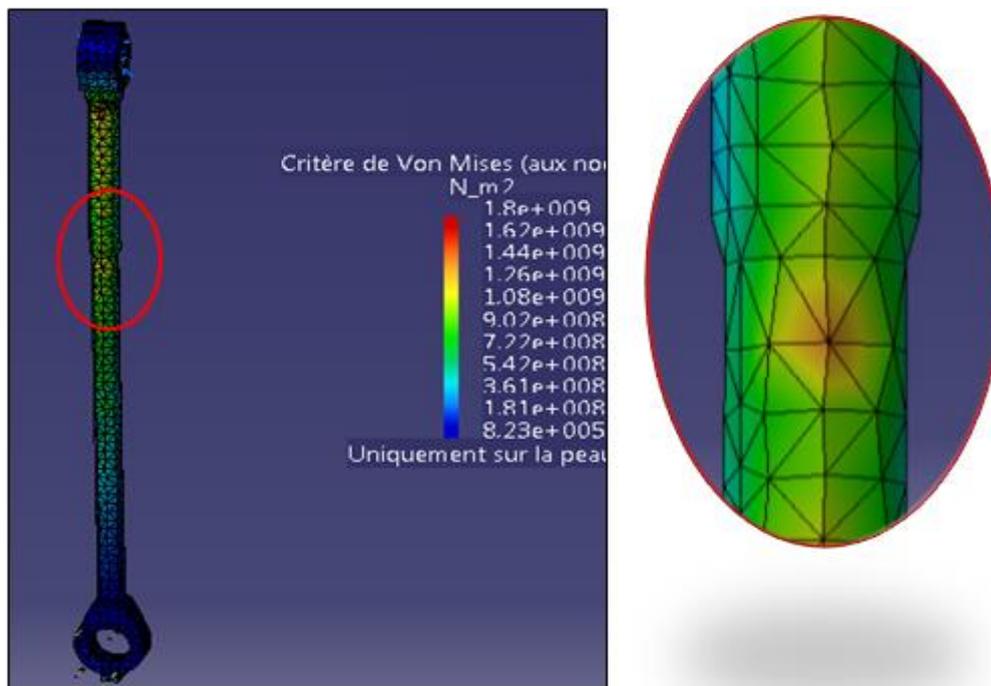


Figure 44: contrainte de Von Mises dans le cas 2

La figure ci-dessus montre que la force radiale génère une concentration de contrainte au niveau de la zone où la rupture s'est produite.

On constate que le deuxième cas est convenable avec notre cas d'étude, alors nous admettons que la surcharge de la contrainte de flexion qui a provoqué la rupture du tirant est produite par la composante radiale de la force hydraulique qui est générée lors de l'inclinaison du vérin.

II.3 L'épaisseur de la couche de matière

L'épaisseur de la couche de la matière est réglée par l'anneau retenu qui est placé sur le bord extérieur de la table de broyage. Cette épaisseur est contrôlée en fonction de plusieurs paramètres comme :

- La stabilité de la matière pendant le broyage ;
- La matière ;
- Le niveau des vibrations.

L'épaisseur de la couche de matière est mesurée par un dispositif à ultrason qui sert à relever la distance entre la paire des galets et le plateau de broyage.

Dans le cas où cette épaisseur diminue ou devienne trop importante le fonctionnement du broyeur cru peut être perturbé.

Suite aux exigences de l'équipe de la maintenance l'anneau retenu a été démonté, qui a pour but de fixer la matière sur la table, alors le démontage de ce dernier peut mener à un

niveau insuffisant de la couche de matière et par suite un glissement des galets sur la table de broyage.

Ainsi qu'un niveau important de la matière à broyer peut engendrer des problèmes sur le fonctionnement du broyeur.

La vérification de l'historique du niveau de la matière nous a permis de constater que dans le jour de l'incident le 30/10/2013 à 01h : 00 avant la rupture du tirant le niveau de la matière a devenu trop important et égale à 72.34 mm sachant qu'il ne dépasse pas 30 mm dans le cas de fonctionnement normal. Ainsi qu'à cet instant le broyeur cru a été encore en marche d'après les valeurs des pressions des vérins et de la puissance du moteur électrique.

A 2h :00 le niveau de la couche de matière a augmenté jusqu'une valeur très élevée égale à 298.48 mm, la pression du vérin mobile élévateur a chuté à 65.27 par contre la valeur de pression du vérin fixe élévateur montre qu'il est encore en marche ce qui justifie que le tirant à cette instant n'est pas encore cassé et le broyeur cru est encore en marche malgré la diminution de la puissance du moteur électrique et les pressions des vérins. À 3 h:00 la rupture du tirant fixe élévateur a provoqué l'arrêt du broyeur cru.

Broyeur Cru	DEBIT		HAUTEUR LIT		VIBRAT	INTEST & PUISS		VITESSE		TEMPERATURES			PRESSIONS										
	Date	Aliment	Injecteur d'eau	Coté Elev		Coté Moteur	Vibratio	Broyeur	Elevateu recircul	Ventil tirage BR	Ventil tirage final	Séparat	Sortie BR	Entrée Filtre T1	Entrée Filtre T2	Entrée BR	DeltaP BR	Entrée Filtre	DeltaP filtre	DeltaP Cyclone	Vérin fixe coté elev	Vérin mobile elev	Vérin fix mot
	l/h	l/h	mm	mm	mm/s	Kw	A	tr/min	tr/min	tr/min	°C	°C	°C	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	bar	bar	bar	bar
	289.89	6998.56	-7.32	-4.74	0.60	2375.15	53.23	919.99	662.02	55.00	83.41	137.68	137.48	-6.21	71.49	-13.99	9.05	18.25	107.55	114.87	110.35	120.11	
29-10-2013 01:00	289.80	6797.82	-7.11	-5.42	0.60	2402.93	53.64	919.99	656.77	54.99	83.35	134.67	134.45	-6.31	71.11	-13.97	8.89	18.25	109.27	116.97	109.88	119.73	
29-10-2013 02:00	289.98	6784.71	-11.64	-3.84	0.60	2387.54	52.86	920.01	655.68	55.65	83.24	133.93	133.71	-6.26	71.14	-14.00	8.83	18.23	108.46	115.59	110.05	118.85	
29-10-2013 03:00	290.00	6780.10	-7.40	-3.51	0.60	2394.97	53.01	920.00	658.72	56.00	82.46	134.13	133.89	-6.27	70.96	-13.97	9.02	18.34	107.90	115.22	110.41	118.12	
29-10-2013 04:00	289.93	6802.09	-7.25	-1.44	0.58	2401.38	52.76	919.99	659.46	56.00	82.04	135.53	135.31	-6.22	71.63	-13.98	9.04	18.05	107.39	114.22	110.41	118.07	
29-10-2013 05:00	290.23	6804.11	-9.42	-0.53	0.57	2427.23	53.17	920.01	648.65	56.00	81.86	133.04	132.85	-6.23	72.02	-14.03	8.73	17.80	107.71	115.15	110.04	118.57	
29-10-2013 06:00	293.55	6796.97	-3.93	1.29	0.57	2485.08	52.47	919.96	655.78	56.00	78.66	133.30	133.08	-6.28	73.21	-13.96	9.02	17.53	107.59	115.53	109.74	118.43	
29-10-2013 07:00	296.23	6790.28	-6.52	1.03	0.56	2486.34	53.29	920.01	653.42	56.06	75.63	135.18	134.96	-6.36	74.43	-14.00	8.97	17.42	107.34	115.03	110.11	118.59	
29-10-2013 08:00	299.98	6553.08	-12.37	-4.00	0.63	2584.03	53.59	919.98	648.01	56.50	78.58	135.48	135.27	-6.21	74.64	-13.98	8.77	17.11	109.93	117.34	109.68	118.50	
29-10-2013 09:00	299.91	6490.23	-14.05	-4.25	0.65	2498.18	52.82	919.99	651.29	56.50	80.13	137.36	137.13	-6.19	74.29	-14.01	8.81	17.21	110.06	117.48	109.77	119.04	
29-10-2013 10:00	299.74	6506.38	-15.44	-7.73	0.66	2587.59	53.20	920.03	670.44	55.99	80.29	142.99	142.74	-6.18	73.95	-13.98	9.35	17.38	110.71	117.72	109.99	119.07	
29-10-2013 11:00	299.91	6509.03	-15.24	-6.73	0.62	2545.82	53.23	919.99	667.21	56.00	79.16	139.82	139.58	-6.28	73.87	-14.00	9.22	17.49	111.30	118.75	109.62	118.35	
29-10-2013 12:00	299.86	6481.71	-15.41	-7.35	0.64	2569.20	53.52	920.02	656.88	56.00	79.67	140.58	140.34	-6.24	74.43	-14.05	8.84	17.07	109.78	116.78	109.73	119.04	
29-10-2013 13:00	299.97	6470.72	-14.72	-9.15	0.66	2528.21	52.79	919.96	656.30	55.99	81.04	140.94	140.72	-6.20	73.99	-14.04	8.80	17.16	109.71	116.90	109.88	118.60	
29-10-2013 14:00	299.87	6465.93	-17.33	-9.47	0.64	2541.19	52.77	920.00	654.68	56.00	82.09	139.88	139.64	-6.16	73.79	-13.96	8.70	17.29	109.73	116.48	109.97	119.44	
29-10-2013 15:00	300.20	6461.66	-16.03	-11.28	0.63	2523.90	53.58	919.99	651.90	56.00	81.28	141.45	141.17	-6.19	73.00	-14.02	8.64	17.94	109.96	116.88	110.12	119.56	
29-10-2013 16:00	295.67	5702.25	-17.39	-10.98	0.66	2518.90	53.17	833.41	636.17	56.00	83.75	143.48	143.10	-5.77	65.41	-13.99	8.36	15.96	104.31	110.02	104.97	114.26	
29-10-2013 17:00		0.01	47.05	34.60					292.89	697.88	56.00	109.74	193.55	193.21	-5.23	9.06	-13.97	9.74	3.46	65.59	39.47	64.59	66.37
29-10-2013 18:00		0.03	43.95	30.62					47.87	733.71	26.13	76.53	194.92	194.94	-0.46	0.45	-14.01	10.57	0.35	65.19	0.39	63.58	64.79
29-10-2013 19:00		0.01	45.16	32.46					0.00	727.63	0.00	75.03	194.76	194.89	-0.49	0.24	-14.03	10.46	0.36	64.99	0.37	62.58	63.90
29-10-2013 20:00		0.01	46.93	34.41					0.00	717.32	0.00	69.38	194.69	194.84	-0.48	0.21	-13.99	10.26	0.33	64.68	0.31	61.70	62.94
29-10-2013 21:00		0.00	48.35	36.73					0.00	721.38	0.00	63.78	194.74	194.87	-0.50	0.15	-14.01	10.27	0.31	65.25	34.37	63.09	64.43
29-10-2013 22:00	284.31	5305.48	0.73	5.04	0.66	2263.32	52.77	725.51	695.43	42.08	79.75	145.27	145.38	-5.58	54.45	-14.14	9.77	14.75	98.28	102.82	98.37	106.33	
29-10-2013 23:00	295.07	6360.34	-14.49	-3.66	0.68	2494.08	53.39	919.99	658.76	54.96	84.47	135.56	135.38	-6.00	72.28	-14.00	9.00	17.76	109.28	116.44	109.75	119.43	
30-10-2013 00:00	294.98	6332.51	-12.23	-0.60	0.63	2527.53	52.50	920.00	663.94	55.00	81.34	134.36	134.18	-6.19	72.30	-13.99	9.29	17.83	109.07	116.33	109.86	118.34	
30-10-2013 01:00	295.04	6326.31	-72.34	1.34	0.58	2354.46	54.51	920.00	655.18	54.00	81.04	130.98	130.82	-6.06	73.30	-14.04	9.04	17.54	108.56	104.78	109.69	117.81	
30-10-2013 02:00	232.61	3556.32	298.48	34.29	0.51	1943.97	59.65	579.29	660.65	47.73	87.08	159.33	158.87	-5.48	40.73	-13.93	9.21	12.35	88.34	65.27	88.27	93.58	
30-10-2013 03:00		0.03	297.34	54.88					121.31	698.92	14.00	60.59	188.86	188.38	-3.91	4.60	-14.03	9.90	1.91	65.75	63.64	64.37	65.15
30-10-2013 04:00		0.06	295.22	55.17					54.12	668.86	2.57	57.14	194.16	193.68	-0.96	1.64	-14.00	9.17	0.91	65.87	62.06	63.56	65.30
30-10-2013 05:00		0.04	294.96	56.33					0.00	664.25	0.00	45.26	193.84	193.41	0.00	0.00	-13.98	9.04	0.00	65.93	60.83	62.75	65.62

Figure 45: historique du niveau de la couche de matière

On déduit que l'élévation de l'épaisseur de la couche de matière avant l'heure de la rupture du tirant a troublé le fonctionnement du broyeur (diminution de certains paramètres), alors elle peut être l'un des facteurs qui favorisent la rupture du tirant.

II.4 L'usure des galets et de la piste

L'usure des galets et de la piste est mesurée par un gabarit contenant 9 points de contrôle. Ceci est illustré sur les figures ci-dessous.



Figure 46: gabarits de mesure de l'usure

Ces mesures montrent que l'usure par abrasion augmente de plus en plus à cause du contact permanent avec la poussière causée par le broyage du cru.

L'usure de la piste et des galets peut avoir un effet néfaste sur le fonctionnement du broyeur cru (Annexe 3).

La figure ci-dessous montre le profil d'usure relevé en 09/10/2013. On remarque que la surface d'appui entre les galets et la piste peut générer un glissement ainsi qu'une inclinaison des trains de galets par rapport à la piste ce qui peut produire des sollicitations parasites sur le tirant.

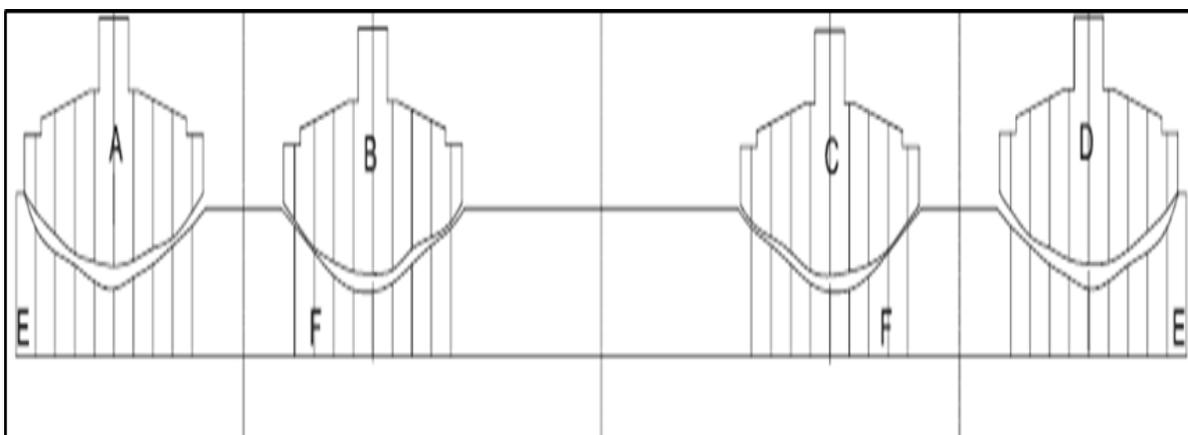


Figure 47: Surface d'appui entre les galets usés et la piste usée

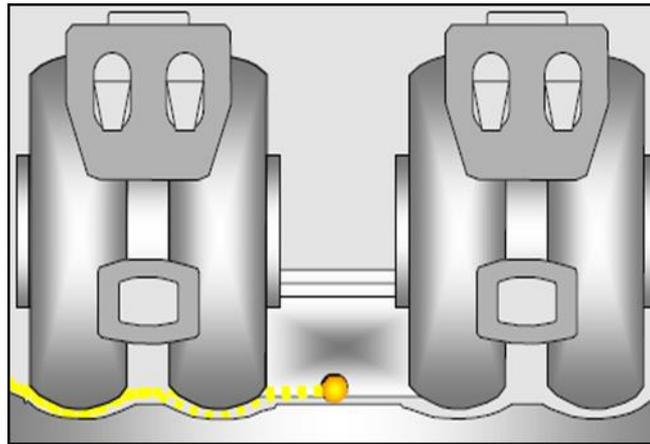


Figure 48: Surface d'appui initiale sans usure

II.5 Vérification de l'effet de la température

Calcul de la contrainte thermique induite par une variation de température:

La partie supérieure du tirant qui est à l'extérieur du broyeur est soumise à des variations de température plus ou moins brusques, lors des arrêts programmés pour la maintenance du broyeur. L'ouverture des portes du broyeur à des températures moyennement grandes entraîne des variations dimensionnelles du matériau. Par conséquent, lorsque le matériau n'est pas libre de se dilater ou de se contracter, il se trouve soumis à des contraintes thermiques. Ces contraintes sont dues aux gradients de déformation qui se développent dans le matériau.

La dilatation thermique du tirant subit une restriction au niveau de la couche externe à cause de l'eau froide injectée, ce qui provoque des contraintes de compression à la surface, et de traction au cœur du matériau.

D'après la loi de HOOKE généralisée, l'amplitude $\Delta\sigma_{\theta}$ de cette contrainte est :

$$\Delta\sigma_{\theta} = \frac{E \alpha \Delta\theta}{1 - \nu}$$

Équation 10: Contrainte thermique

E : module de Young.

α : coefficient de dilatation thermique.

ν : coefficient de poisson.

$\Delta\theta$: variation de la température.

Application numérique :

$E= 210 \text{ GPa}$; $\alpha= 14,6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; $\nu=0.28$

Pour la variation de température $\Delta\theta$:

On a la température régnant au sein du broyeur lorsqu'il est en marche est d'environ : 100 °C et la température de l'eau injectée est d'environ 20°C d'où un écart de température de : 80 °C.

On obtient ainsi :

$$\Delta\sigma_\theta=340.66 \text{ Mpa}$$

On constate que la contrainte thermique est assez importante alors elle peut accélérer les phénomènes de fatigue.

II.6 La tenue au flambement

Pour le calcul de vérification de pièce soumise à flambement, il faudra comparer la contrainte existante dans le matériau (contrainte de compression), avec la contrainte admissible au flambement de ce matériau. Celle-ci étant définie par :

$$\sigma_{\text{adm}} = \frac{\sigma_{\text{cr}}}{s} \geq \sigma_{\text{comp}}$$

Or la contrainte critique du flambement se calcule par la relation suivante :

$$\sigma_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}$$

Équation 11: Contrainte critique du flambement

s : coefficient de sécurité

L: longueur du tirant

r : rayon de giration $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$

I : moment d'inertie

A : aire de la section

Application numérique :

$$I=28 \cdot 10^6 \text{ mm}^4; \quad A=13 \, 273 \text{ mm}^2; \quad r= 46 \text{ mm}; \quad s=3$$

On obtient $\sigma_{\text{cr}} = 783.44 \text{ MPa}$

Et $\sigma_{\text{adm}} = 249.8 \text{ MPa} \geq \sigma_{\text{comp}} = 159.11 \text{ MPa}$

La valeur de la contrainte admissible du flambement est supérieure à celle de la contrainte de compression appliquée sur le tirant, alors le tirant ne subit pas un flambement.

II.7 vibrations

Les vibrations au niveau du broyeur sont mesurées par un capteur de vibrations de type 643A01 placé sur les paliers du moteur.

Le niveau de vibrations est suivi par les opérateurs de la salle de contrôle, qui arrêtent le broyeur dans le cas de fortes vibrations.

La figure suivante montre la valeur minimale et maximale des vibrations prise à partir des relevés de vibrations par le logiciel KM Knowledge Manager dans le cas d'une marche normale du broyeur durant la période Septembre-Octobre.

Broyeur Cru	DEBIT		HAUTEUR LIT		VIBRAT	INTE PU
Date	Aliment.	Injectior d'eau	Coté Elev	Coté Moteur	Vibratio	Broyeur
	t/h	l/h	mm	mm	mm/s	Kw
31-10-2013 10:00	300.22	6433.38	-40.29	-4.86	0.69	2569.13
31-10-2013 11:00	299.93	6428.24	-41.09	-6.37	0.69	2557.40
31-10-2013 12:00	300.20	6414.55	-42.59	-10.23	0.73	2564.54
31-10-2013 13:00	299.95	6406.82	-38.76	-8.86	0.70	2639.53
31-10-2013 14:00	299.07	6399.48	-43.17	-11.57	0.71	2568.84
31-10-2013 15:00	290.13	6387.97	-49.22	-14.84	0.74	2465.95
31-10-2013 16:00	290.25	6383.20	-44.40	-11.78	0.67	2524.51
31-10-2013 17:00	290.31	6601.55	-37.26	-5.52	0.59	2632.75
31-10-2013 18:00	290.53	6596.86	-37.38	-3.93	0.63	2652.15
31-10-2013 19:00	289.95	6588.53	-32.36	-2.22	0.62	2607.26
31-10-2013 20:00	291.56	6581.01	-34.06	-5.14	0.64	2566.51
31-10-2013 21:00	292.09	6572.16	-28.13	0.67	0.57	2678.17
31-10-2013 22:00	289.92	6566.44	-31.78	-0.68	0.64	2671.02
31-10-2013 23:00	290.05	6558.56	-31.04	-1.60	0.65	2597.78
Min	22.63	0.00	406.01	-27.60	0.48	1594.73
Max	301.64	7344.69	49915.4	58.69	0.94	2738.28

Figure 49:relevé des variations des vibrations

Nous remarquons que la valeur maximale des vibrations est faible et ne dépasse pas 1mm/s.

Donc les vibrations au sein du broyeur cru ne peuvent pas causer la défaillance du tirant.

III. Problèmes liés au matériau

Le but de cette partie est de traiter les problèmes qui peuvent être liés au matériau (l'existence des microfissures, le mauvais choix du matériau, problèmes lié au procédé de fabrication,...) et qui favorisent la défaillance du tirant.

Pour ce faire nous allons effectuer une étude bibliographique du **comportement en fatigue des pièces forgées**.

III.1 Spécificités des pièces forgées

Cette première partie a pour but de présenter de manière générale les principaux phénomènes qui surviennent lors du forgeage, et qui sont capables de modifier notablement les propriétés mécaniques finales des pièces.

III.1.1 La notion de fibrage

Le forgeage d'une pièce métallique induit un fibrage, qui conduit à des propriétés mécaniques anisotropes. Le fibrage correspond à une orientation privilégiée des grains ou des inclusions dans un métal ayant subi une opération de corroyage (forgeage, laminage...).

Le terme fibrage est utilisé par analogie avec des matériaux qui présentent réellement cette caractéristique tels que le bois ou encore certains composites. Dans le cas des métaux il fait référence à l'orientation globale que prend la structure métallurgique en fonction du sens d'écoulement du matériau durant sa déformation.

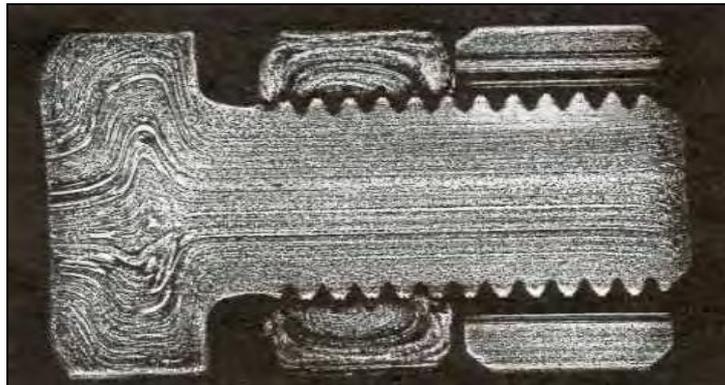


Figure 50: exemple d'une pièce forgée

III.1.2 Influence du corroyage sur les propriétés mécaniques

D'une manière générale, le corroyage (dont le fibrage est l'une des conséquences visibles) a plusieurs effets :

- Amélioration de la compacité du matériau en éliminant des défauts ;
- Structure plus fine et plus homogène ;
- Anisotropie de certaines caractéristiques mécaniques.

Parmi les caractéristiques mécaniques, la résistance à la traction n'est en fait quasiment pas sensible au corroyage. Quant à la limite élastique, elle dépend du taux de corroyage mais peu du sens de corroyage (Figure 51).

En revanche, la résilience², la striction³ et dans une moindre mesure l'allongement à rupture, dépendent du taux de corroyage et du sens de corroyage.

Dans le sens long, ces propriétés s'améliorent nettement jusqu'à un corroyage de l'ordre de 5, ensuite l'amélioration devient beaucoup plus faible.

Dans le sens travers, pour un corroyage de 2 à 5, on observe des améliorations des propriétés. Par contre, à des corroyages supérieurs, ces propriétés peuvent se dégrader et devenir moins bonnes que celles du matériau non corroyé.

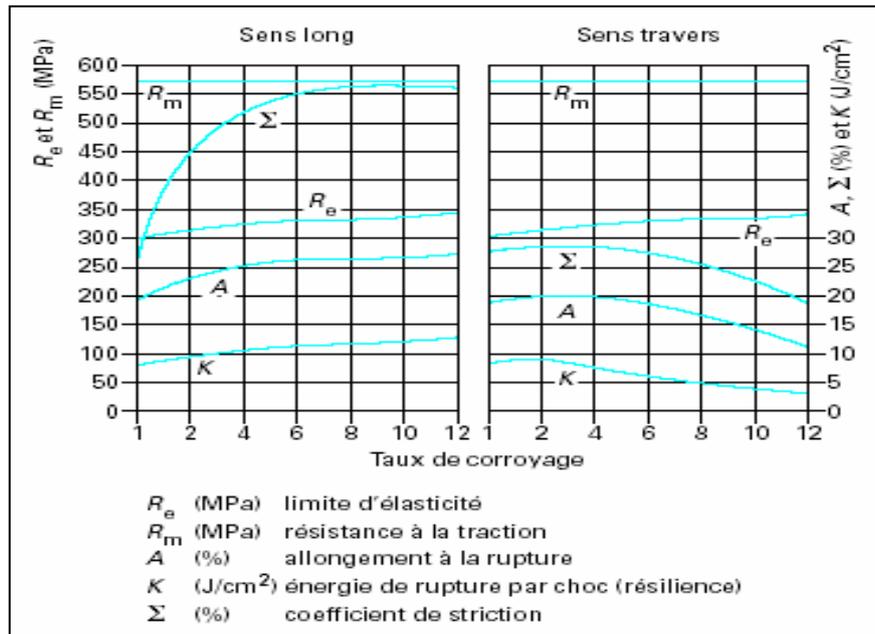


Figure 51: Influence du taux de corroyage sur différentes propriétés mécaniques

III.1.3 La peau de forge ou l'intégrité de surface des pièces forgées

La peau de forge est le terme couramment employé pour désigner la couche superficielle qui a été déformée plastiquement par action mécanique lors de l'opération de forgeage. Cette couche de quelques dixièmes de millimètre peut être définie par des caractéristiques différentes du reste de la pièce en termes de dureté, contraintes résiduelles, défauts de surface, contenu inclusionnaire ou encore microstructure.

Depuis très longtemps l'influence de l'état de surface et plus précisément de la peau de forge sur la limite d'endurance est connue. La Figure 52, issue d'une étude de Hankins et Becker 1936, montre l'évolution de la limite d'endurance en fonction de la résistance à la traction pour une pièce brute de forge par rapport à une pièce forgée et polie. Des résultats d'essais de fatigue réalisés par Jachmich sur des bielles suivent également cette tendance

² La résilience traduit la résistance au choc et se mesure avec l'énergie nécessaire pour casser une éprouvette préalablement entaillée

³ La striction : La striction est l'apparition d'une diminution localisée de la section.

[23]. Pour ces bielles, la valeur moyenne du rapport de la limite d'endurance sur la résistance mécanique pour des nuances de matériaux similaires se situe aux alentours de 0,3 pour des pièces forgées, alors que sur des éprouvettes usinées polies ce rapport se situe entre 0,4 et 0,5.

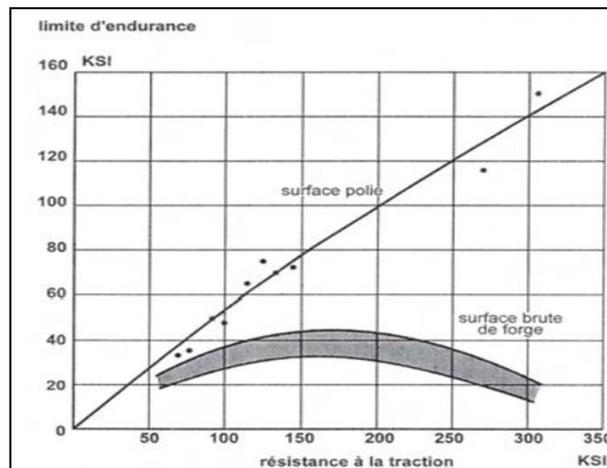


Figure 52: Effet de la peau de forge sur la limite d'endurance des aciers, d'après [Hankins et Bcker 36]

Les hétérogénéités de surface générées par l'opération de forgeage semblent donc faire chuter considérablement la limite d'endurance.

III.1.4 Influence des traitements thermiques

Les pièces forgées subissent souvent des recuits de régénération entre les différentes passes de déformation.

L'écrouissage qui s'opère au cours de la déformation, correspond à une augmentation de la densité de dislocations. Le recuit, selon sa température et son temps de maintien va permettre de réorganiser les dislocations ou de diminuer leur densité.

A basse température, vers 500°C pour les aciers au carbone, le recuit conduit à la phase de restauration, au cours de laquelle la densité de dislocations diminue (Figure 53) et les sous grains adjacents coalescent (Figure 54).

Aux températures supérieures, le recuit peut conduire à une phase de recristallisation. La structure écrouie va alors être remplacée par une nouvelle structure composée de nouveaux grains, plus gros (Figure 55).

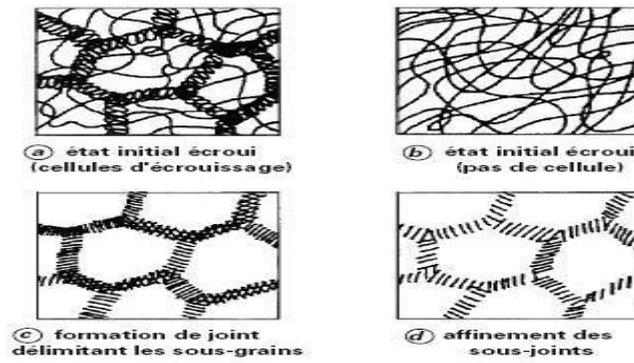


Figure 53 : Formation de sous grains

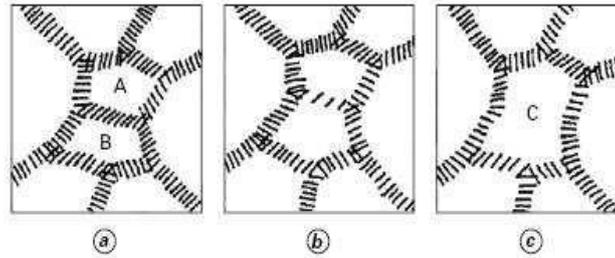


Figure 54: Coalescence de sous joints adjacents

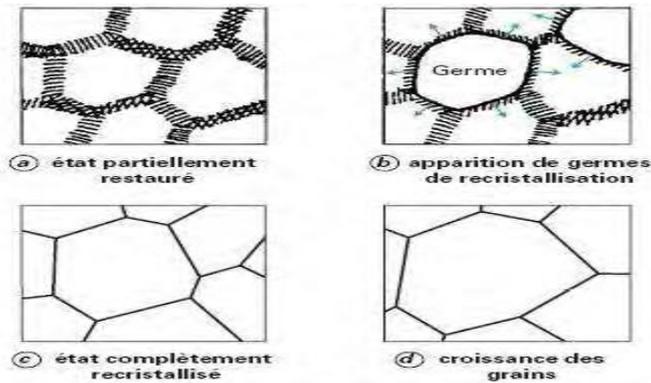


Figure 55: Processus de recristallisation

III.1.5 Les contraintes résiduelles

On peut définir les contraintes résiduelles comme étant une distribution spatiale de contraintes auto équilibrées dans un corps soumis à aucune contrainte extérieure (au repos).

Les origines des contraintes résiduelles sont diverses, mais elles peuvent être divisées en trois catégories : mécaniques, thermiques et métallurgiques. Souvent ces trois facteurs se combinent.

Dans le cas du forgeage, des contraintes résiduelles sont dues en grande partie aux hétérogénéités de la déformation plastique. Une trempe induira aussi des contraintes résiduelles du fait du gradient thermique généré lors de celle-ci, plus éventuellement des

changements de volume accompagnant les changements de phase et de la plasticité de transformation.

Enfin, les opérations de finition (telles que l'usinage) modifient les contraintes résiduelles en surface.

III.2 Prise en compte de l'anisotropie induite par le forgeage dans le comportement en fatigue

Cette partie est consacrée à l'analyse et la compréhension des mécanismes responsables du comportement anisotrope en fatigue des aciers forgés.

III.2.1 Anisotropie en fatigue due à la texture

Les propriétés des matériaux dépendent de trois catégories de paramètres de structure

- Structure cristalline idéale (disposition des atomes dans le réseau cristallin) ;
- Composition et arrangement des phases (taille, forme et arrangement des différentes phases) ;
- Orientation et arrangement des cristallites (taille, forme, orientation des grains) ;

Dans cette partie nous étudierons les trois points cités ci-dessus.

III.2.1.1 Effet de la structure cristalline sur le comportement en fatigue

Les résultats obtenus des études faites par Yakushiji et al. [29] montrent que l'orientation cristalline a un effet sur l'amorçage des fissures et plus précisément sur le nombre et l'orientation des bandes de glissement en pointe de fissure.

Shimizu et Torii [28] observent que pour un matériau étudié la vitesse de propagation est plus élevée pour une orientation de fibrage à 0° qu'à 90°. ils montrent que ce comportement anisotrope est lié à l'orientation cristallographique générée lors de l'opération de corroyage. La présence d'une orientation cristallographique préférentielle conditionne dans ce cas la formation plus ou moins facile de bande de glissement et confère donc au matériau un comportement anisotrope vis-à-vis du seuil de propagation de fissures.

III.2.1.2 Effet de la morphologie des grains sur le comportement en fatigue

De nombreux travaux réalisés sur des aciers inoxydables ou bas carbone ont permis de montrer que le seuil de propagation de fissure ΔK_{th} diminue avec la taille de grain [18] [20][25][26][27].

L'effet bénéfique de l'augmentation de la taille des grains sur le seuil de propagation est liée à une augmentation des effets de fermeture en pointe de fissure et dépend directement

du rapport de charge appliqué (Figure 56). Cette influence de la taille de grain sur l'intensité des effets de fermeture intervient au travers de la rugosité des surfaces produites, mais aussi par une action sur la limite d'élasticité si celle-ci obéit à une loi de type Hall-Petch.

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

Où σ_0 et k sont des paramètres matériaux.

Dans ce cas une augmentation de la taille des grains (d) entraîne une réduction de la limite d'élasticité (σ_y) qui augmente les effets de fermeture et ainsi la valeur du seuil de propagation de fissure.

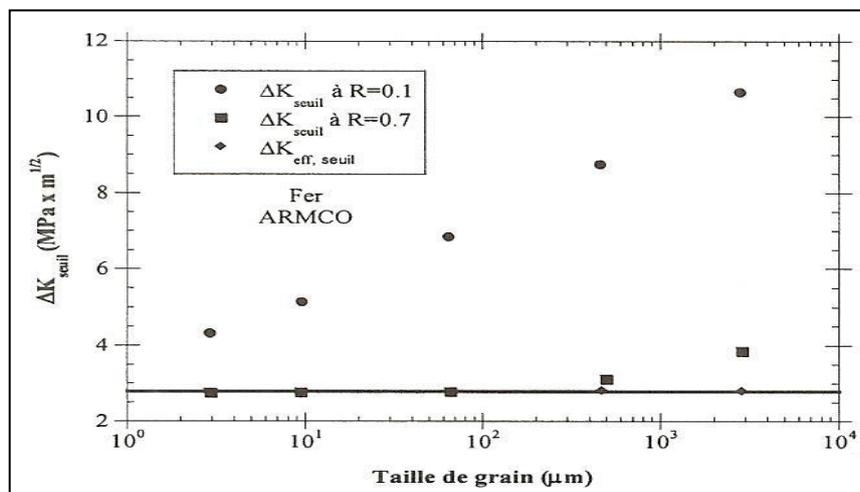


Figure 56: Evolution du seuil de propagation en fonction de la taille de grain, d'après [Pippan]

Les résultats des essais faites par Shimizu et Torii [28] ont montré que les fissures se propagent plus vite dans l'acier possédant la plus petite taille de grain.

Pour un matériau possédant des grains de grande taille, la propagation de type intragranulaire est difficile car il est nécessaire pour la fissure de franchir les joints de grain pour se propager. En revanche, lorsque les grains sont de plus petites tailles la fissure se propage le long des joints de grains et n'a donc pas besoin de les traverser pour progresser, sa vitesse de propagation est de ce fait plus élevée.

Di Schino [19] a étudié l'effet de la taille des grains d'un acier inoxydable sur la limite d'endurance. La figure 57 montre que la limite d'endurance augmente lorsque la taille de grain chute.

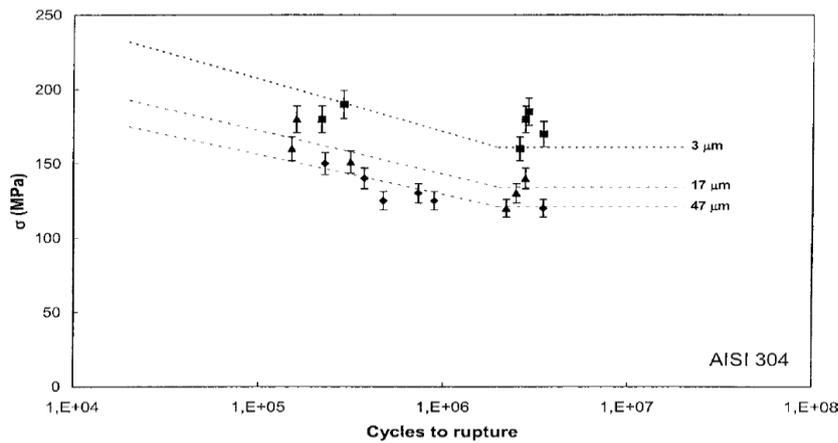


Figure 57: Courbes de Wöhler obtenues sur acier inoxydable pour différentes tailles de grain

III.2.1.3 Effet de la morphologie des différentes phases sur le comportement en fatigue

Des investigations menées par des auteurs montrent que l'interface martensite-ferrite génère une barrière microstructurale pour la propagation de fissure faisant chuter la limite d'endurance en traction-compression lorsque le fibrage est orienté à 45° (figure 58).

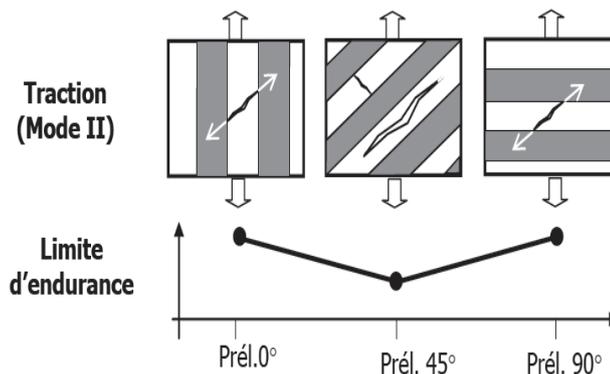
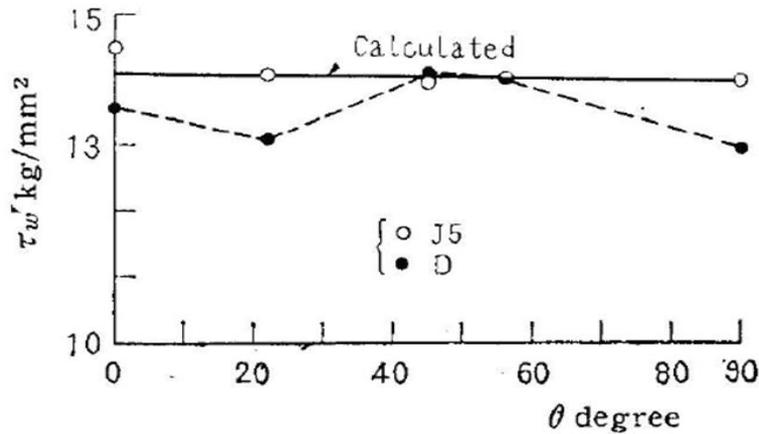


Figure 58: Représentation schématique de l'influence d'une orientation de microstructure de type lamellaire sur la propagation d'une fissure en traction-compression.

Les observations des essais de fatigue et fissuration montrent l'apparition en surface de bandes de glissement dans la phase ferritique, dans le plan de cisaillement maximal (en torsion 0° et 90°). Les frontières entre chacune des phases apparaissent à faibles nombres de cycles comme des barrières microstructurales ralentissant la propagation de la fissure.

Isibasi [22] a effectué des essais de fatigue en torsion alternée et flexion rotative sur deux aciers à bas carbone ayant une structure anisotrope et possédant des contenus inclusionnaire différents. En torsion, il observe une augmentation de la limite d'endurance à 45° pour l'acier dont le taux inclusionnaire est le plus faible (noté D sur la figure 59) alors que pour l'acier, dont le taux inclusionnaire est le plus élevé, celle-ci reste constante. Sur les faciès de rupture du matériau ayant le taux inclusionnaire le plus élevé, il observe

que l'amorçage en torsion est localisé là où l'orientation du fibrage est perpendiculaire à la surface de l'éprouvette. En flexion rotative, et ce pour les deux nuances étudiées, l'auteur constate une diminution continue de la limite d'endurance en fonction de l'angle de fibrage (entre 0° et 90°).



(a) Reversed torsion

Figure 59: Évolution de la limite d'endurance en torsion alternée pour deux aciers à bas carbone possédant des taux en manganèse différents (J5 : 1,17% de Mn, D : 0,88% de Mn) [22]

Ce sont les barrières microstructurales qui sont responsables de l'anisotropie du comportement en fatigue, il est possible de schématiser l'effet de la microstructure sur la tenue en fatigue pour une sollicitation de torsion. On voit ainsi sur le schéma figure 60 que pour un fibrage orienté à 45°, la limite d'endurance doit être la plus élevée.

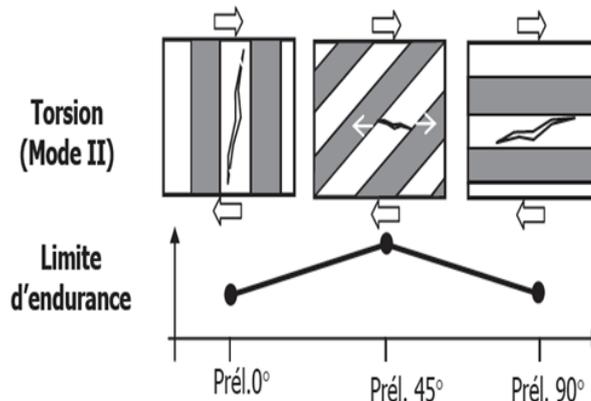


Figure 60: Représentation schématique de l'effet d'une orientation de microstructure de type lamellaire sur la propagation d'une fissure en torsion

III.2.2 Anisotropie en fatigue due à la présence de défauts allongés

L'ajout d'éléments d'addition a de nombreux aspects bénéfiques, il permet d'améliorer certaines caractéristiques mécaniques. L'ajout de soufre et de manganèse forment des inclusions de sulfure de manganèse est par exemple couramment employé pour les nuances

d'aciers destinées à l'usinage ou au forgeage car il améliore l'usinabilité et la déformabilité.

L'inconvénient de ces éléments d'addition réside dans le fait qu'ils génèrent des inclusions non métalliques nocives pour les propriétés de fatigue. On parle alors d'hétérogénéités ou de défauts qui constituent des sites privilégiés pour l'amorçage de fissures en fatigue. Dans ce cas, la nature, la géométrie, l'orientation et la répartition spatiale de ces hétérogénéités ont un effet sur la limite d'endurance. Pour les pièces forgées ou laminées, certains défauts présents dans le matériau ont été allongés lors de l'opération de déformation plastique et vont conférer au matériau un comportement anisotrope en fatigue.

III.2.2.1 Tendances générale

Pour l'ensemble des études réalisées sous un chargement de traction-compression la conclusion est identique : la limite d'endurance chute lorsque l'orientation du fibrage passe de 0° à 90° et est donc minimale lorsque le défaut est perpendiculaire à la contrainte appliquée (Tableau 14 et Figure 61).

Matériau	Rm (MPa)	N cycles	σ_{0° (MPa)	σ_{90° (MPa)	HV30
Z200CrMo12		10^9	600	500	720
35CrMo4		10^9	854	769	580
42CrMo4	1500	10^9	740	500	467
42CrMo4 LS	1570	10^7	585	338	450
42CrMo4 HS	1560	10^7	481	245	450
42CrMo4	1200	10^7	515	329	
50CrMo4 LS	1500	10^7	524	484	450
50CrMo4 HS	1500	10^7	488	259	450

Tableau 14 : Bilan des essais de fatigue en traction-compression

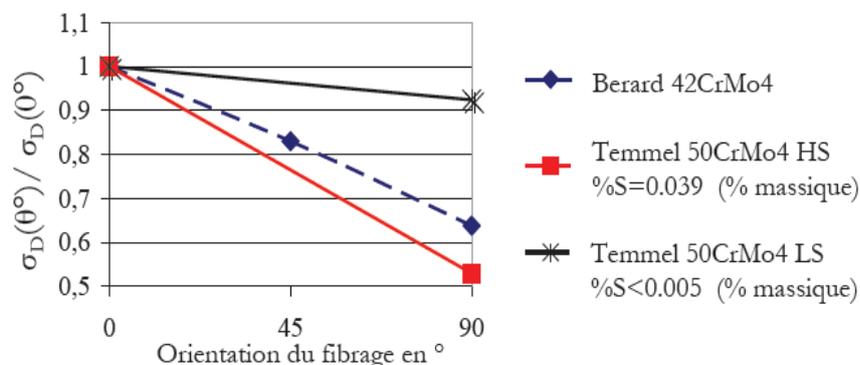


Figure 61: Évolution de la limite d'endurance en fonction de l'orientation du fibrage, lorsque le comportement en fatigue est piloté par les défauts pour un chargement de traction-compression.

Kage et Nisitani [24] ont remarqué que pour des essais de traction-compression, le type de mécanisme dépend de l'orientation du fibrage. Lorsque les inclusions sont perpendiculaires à la contrainte appliquée, l'amorçage a lieu au niveau des inclusions alors que lorsque celles-ci sont parallèles à la contrainte appliquée l'amorçage apparaît au niveau de bandes de glissement au sein de la structure cristalline. Ils ont observé qu'à la fois l'amorçage et la rupture finale (propagation) apparaissent à des niveaux de charge plus faibles lorsque les inclusions sont perpendiculaires à la charge appliquée.

Par ailleurs pour un chargement de torsion, leurs résultats montrent qu'il n'y a pas d'anisotropie de tenue en fatigue que ce soit à faible ou grand nombre de cycles.

III.2.2.2 Effet de la teneur et de la répartition des inclusions

Une augmentation du contenu inclusionnaire entraîne une anisotropie en fatigue plus marquée.

Les observations des faciès de rupture réalisées par Temmel sur l'acier 42CrMo4 montrent que plus de la moitié des éprouvettes contenant un faible taux de sulfure présentent un amorçage localisé en surface sans présence d'inclusions. En revanche, pour l'acier 42CrMo4 contenant un taux inclusionnaire élevé la majorité des amorçages a lieu à partir d'inclusions.

Les résultats de Temmel montrent également que les dispersions associées aux limites d'endurance sont plus élevées pour les matériaux possédant un faible taux inclusionnaire. Cette dispersion est encore moins importante lorsque les inclusions sont orientées perpendiculairement à l'axe de la contrainte appliquée.

III.2.2.3 Effet de la géométrie des inclusions

Les concentrations de déformation et de contrainte autour des inclusions dépendent essentiellement de leur forme et de leur orientation relative par rapport à la direction du chargement extérieur appliqué.

La géométrie des défauts peut influencer sur les conditions d'amorçage.

En torsion, quelle que soit l'orientation du fibrage, l'amorçage est toujours localisé au niveau des inclusions.

En flexion rotative, pour les matériaux contenant des inclusions cylindriques, seules les éprouvettes ayant une orientation de fibrage à 90° possèdent un amorçage localisé au niveau des inclusions localisé. L'anisotropie plus marquée en flexion rotative semble donc être liée à un changement de mécanisme en fonction de l'orientation du fibrage.

Orientation du fibrage	Matériau avec inclusions aplaties		Matériau avec inclusions cylindriques	
	Torsion (MPa)	Flexion Rotative (MPa)	Torsion (MPa)	Flexion Rotative (MPa)
0°	108	186	132	210
45°	103	181	127	186
90°	103	166	117	162

Tableau 15: Effet de la géométrie des défauts sur la tenue en fatigue

III.2.2.4 Effet de la nature de la matrice et de l'inclusion sur le comportement en fatigue

La nature de la matrice influe sur la sensibilité d'un matériau à la présence de défauts. Plus récemment, Cyril et Al ont étudié l'effet de la dureté de la matrice (40 et 50 HRC) et du taux inclusionnaire sur la tenue en fatigue d'un acier **42CrMo4** [17]. Ils ont déduit que: l'anisotropie est plus marquée pour les aciers ayant la dureté la plus élevée et l'augmentation du contenu inclusionnaire s'accompagne d'une diminution de la limite d'endurance.

L'effet d'une famille d'inclusions donnée sur le comportement en fatigue dépend donc de la nature de la matrice. Pour une même géométrie et une même taille de particule, plus la matrice de l'acier est dure, plus l'effet nocif sera marqué. L'influence des inclusions dépend de la capacité d'adaptation plastique de la matrice, de ses possibilités de supporter des contraintes sans formation de défauts microstructuraux dangereux.

L'interface inclusion/matrice joue également un très grand rôle car la décohésion inclusion/matrice est l'un des modes d'amorçage de cavités les plus fréquents. Hosseini et al ont réalisé des essais de traction monotone Temmel sur l'acier **42CrMo4** afin d'observer le comportement des inclusions [21]. L'auteur conclut que la décohésion au niveau de l'interface inclusion/matrice apparaît à des niveaux de contrainte différents selon l'orientation des inclusions par rapport à la charge appliquée. Dans le sens longitudinal, cette décohésion apparaît pour une contrainte correspondant à 90% de la résistance mécanique alors que dans le sens perpendiculaire seulement 20% suffisent. Dans ce dernier cas nous nous situons, bien évidemment, à des niveaux de charge très inférieurs à la limite d'endurance.

III.2.2.5 Effet du nombre de cycles

Bayraktar et al [16] ont effectué des essais de fatigue sur un acier **42CrMo4** et ont montré que la limite de fatigue à 10^5 cycles semble peu dépendre de la direction considérée alors que la limite d'endurance (à très grand nombre de cycles) est quant à elle, très anisotrope.

III.3 Bilan

D'après cette étude bibliographique nous constatons que le procédé de fabrication influence le comportement en fatigue des matériaux tel que :

- Le forgeage modifie notablement les propriétés mécaniques finales du matériau, tel que les pièces forgées présentent un fibrage qui leur confère des propriétés mécanique anisotrope ;
- L'anisotropie induite a un influence sur le comportement en fatigue du matériau tel que la vitesse de propagation de la fissure est plus élevée pour une orientation de 0° qu'à 90° , ainsi que pour un chargement de traction-compression la limite d'endurance diminue lorsque l'orientation passe du 0° à 90° (pour l'acier **42CrMo4** $\sigma_D(0^\circ)=740$ MPa , $\sigma_D(90^\circ)=500$ MPa) ;
- Les pièces forgées présentent une surface susceptible de posséder certains défauts.
- L'ajout de soufre et de manganèse forme des inclusions non métalliques de sulfure de manganèse nocives pour les propriétés de fatigue ;
- L'orientation des inclusions joue un rôle important dans l'amorçage et la rupture finale, par exemple lorsque les inclusions sont perpendiculaires à la charge appliquée l'amorçage et la rupture finale apparaissent à un niveau de charge plus faible ;
- Des essais réalisés sur l'acier **42CrMo4** montrent que plus de la moitié des éprouvettes contenant un faible taux de sulfure présentent un amorçage sans présence d'inclusions ;
- En traction-compression, lorsque les inclusions pilotent le comportement en fatigue, la limite d'endurance chute continûment pour des orientations de fibrage allant de 0° et 90° . L'anisotropie de la tenue en fatigue semble moins marquée pour des chargements de torsion que pour ceux de traction-compression ;
- Du point de vue des mécanismes, lorsque le fibrage est orienté à 0° l'amorçage en traction compression est bien souvent localisé au niveau de la matrice et non au niveau d'inclusions. En tout état de cause, la taille, la géométrie, la teneur et la nature des inclusions sont des paramètres influents sur la limite d'endurance ;
- L'anisotropie est plus marquée pour les aciers ayant la dureté la plus élevée et l'augmentation du contenu inclusionnaire s'accompagne d'une diminution de la limite d'endurance. Plus la matrice de l'acier est dure, plus l'effet nocif sera marqué.

III.4 Effet de l'usinage sur le comportement en fatigue

L'observation macroscopique du tirant montre que sa surface n'est pas lisse et qu'il existe des traces laissées par l'outil au contact de la pièce pendant l'opération de finition par usinage.

La coupe donne lieu à bon nombre de phénomènes:

- Les déformations élastiques et plastiques du matériau travaillé ;
- L'apparition dans certaines conditions, d'une «arête rapportée», dépôt naissant sur l'arête tranchante de l'outil ;
- Les effets dynamiques qui se manifestent par des vibrations du système mécanique (machine-outil / outil / pièce) de frottements entre le copeau et la face de dégagement ainsi qu'au contact entre facette d'usure sur plan de dépouille et pièce usinée ;

L'existence de ces phénomènes justifie l'affirmation que les traces (défauts micro-géométriques) laissées par l'outil coupant lors de son passage sur la surface qu'il engendre différeront du tout au tout de celles que l'on aurait pu attendre en limitant l'analyse à la seule action des parties tranchantes de l'outil.

Les principales altérations dans la couche superficielle concernent :

- La texture de la surface (rugosité et défauts de la surface);
- Le changement de la dureté superficielle (micro dureté);
- La distribution des contraintes résiduelles;
- La déformation plastique;
- Les transformations de phase.

Les causes principales de ces altérations sont:

- Les hautes températures ainsi que les grands gradients de température ;
- La déformation plastique ;
- Les réactions chimiques et l'absorption chimique dans la nouvelle surface.

III.4.1 Défauts de la surface usinée

III.4.1.1 Écailles

La formation des écailles est généralement attribuée à la présence d'une arête rapportée instable. Lors de la croissance d'une arête rapportée instable une fissure se forme dans la zone secondaire et une autre sous le bec de l'outil. Cette dernière se propage sous la surface dans la zone primaire de déformations.

III.4.1.2 Cavités

La formation des cavités est liée à un arrachement de matière consécutif à la propagation de fissures en dessous du niveau de la surface dans la région du bec de l'outil, en présence d'une arête rapportée. Les cavités sont moins bien définies et souvent plus grandes lors de la formation de l'arête rapportée.

III.4.1.3 Micro-stries

Les défauts de petites tailles sont principalement dus aux interactions entre l'arête de coupe et la surface. Le labourage de la surface par des aspérités sur l'arête de coupe forme des stries bien définies. Les stries moins définies sont provoquées par des micros arêtes de coupe rapportées.

III.4.1.4 Microfissures

Les microfissures sont produites lorsque le matériau subit des déformations sévères et causent des concentrations de micro-contraintes qui conduisent à des fractures locales.

En conclusion les écailles, les cavités et les microfissures sont dues à la formation d'un copeau discontinu ou d'une arête rapportée.

III.4.2 Facteurs influant le comportement en fatigue des pièces usinées

III.4.2.1 Influence de la rugosité

La rugosité est qualifiée par son grand effet sur les propriétés fonctionnelles, telles que la résistance à la fatigue, frottement et l'usure.

Des essais ont montré qu'à partir d'une certaine valeur de rugosité on pourrait obtenir des réductions anormalement élevées de la limite d'endurance. Il convient d'éliminer les rugosités de grande importance dans les pièces sollicitées.

Il est toutefois admissible que les rugosités obtenues par rectification sont plus faibles que celles obtenues par tournage (1,3 à 1,8 μm), alors que l'endurance des pièces tournées à une température supérieure à 300° C est plus grande que dans le cas de rectification douce, dans ce cas c'est le procédé d'usinage qui porte la grande influence par rapport à la rugosité. Cette constatation permet de conclure qu'il est plus correct de ne pas séparer l'influence de la rugosité sur la tenue en fatigue des autres facteurs tels que les contraintes résiduelles, la géométrie de l'outil et l'existence des concentrateurs de contrainte telles que les écailles, les cavités et surtout les microfissures.

III.4.2.2 Influence des contraintes résiduelles sur la tenue en fatigue

Les contraintes résiduelles sont bénéfiques, si elles sont de compression, et néfastes si elles sont de traction, particulièrement dans les matériaux durs.

L'influence des contraintes résiduelles peut dépendre du type de sollicitation. En effet, pour les surfaces grenillées, on trouve un effet positif en flexion alternée, alors qu'aucun effet n'est relevé pour des longues durées de vie en traction compression, dans ce cas, les fissures s'amorcent sous la surface.

III.4.2.3 Influence de l'écrouissage sur la tenue en fatigue

En plus de l'effet de la topographie de la surface et des contraintes résiduelles cité ci-dessus, l'écrouissage est aussi considéré dans l'influence sur les propriétés fonctionnelles des pièces usinées. Cependant dans l'absence des contraintes résiduelles, grandes rugosités ou microfissures, le durcissement de la surface est considéré comme un processus renforçant la surface. Le travail mené par Ovseenko [35] montre que l'écrouissage a un effet notable sur les propriétés de fatigue en flexion et de contact et indique une amélioration de la tenue en fatigue avec l'augmentation de la micro dureté de la surface usinée.

III.4.2.4 Influence de la lubrification durant l'usinage

La lubrification de l'arête de coupe permet d'améliorer l'état de surface, surtout à faible vitesse, en évitant la formation d'une arête rapportée. D'autre part, le mode d'usinage influe notamment sur la température superficielle de la pièce, ce qui affecte l'état de surface. Dans le cas du travail à sec les températures à la surface usinée sont très élevées, et de ce fait peuvent provoquer des effets indésirables à la surface (durcissement ou adoucissement structural) selon la température atteinte.

Conclusion :

- Les surfaces usinées subissent plusieurs changements et altérations, qui peuvent être préjudiciables ou nuisibles au comportement fonctionnel des pièces mécaniques ;
- Les contraintes résiduelles de compression sont généralement avantageuses au comportement en fatigue des pièces usinées. Ces contraintes ferment les microfissures, par conséquent elles les empêchent de se propager. Dans l'autre côté les contraintes résiduelles de traction sont désavantageuses pour la tenue en fatigue ;

- Il est évident que les méthodes d'usinage induisent une variété de changements et altérations qui déterminent le comportement en fatigue des pièces usinées. Parmi ces altérations, on peut citer les microfissures ;
- Le comportement en fatigue est sensible aux caractéristiques de la surface et de la couche superficielle.

III.5 Vérification du choix de matériau

Dans cette partie nous allons vérifier le choix du matériau de tirant en se basant sur la procédure de choix de base.

Afin d'optimiser le choix des matériaux pour une application industrielle donnée, la procédure de sélection doit être rationalisée, de manière à être aussi objective que possible. Avant toute chose, il est nécessaire de décomposer l'objet que l'on souhaite construire en composants élémentaires, sur lesquels on puisse définir des fonctions principales et des sollicitations dominantes.

III.5.1 Cahier des charges

L'analyse du besoin à satisfaire (fonction du composant) permet alors de dresser un cahier des charges, identifiant les requêtes :

- Fonction (de l'objet) : A quoi sert-il ? Quelle contrainte lui impose-t-on ?
Ex. : supporter une charge en compression sans rompre, être étiré sans dépasser une certaine déformation élastique, supporter une différence de température sans trop transmettre de chaleur, ...
- Objectif (du concepteur) : Que faut-il optimiser ?
Ex. : minimiser le prix, maximiser le transfert thermique, minimiser la masse, ...
- Paramètres fixes : quels paramètres sont imposés (géométrie, fonction) ?
- Paramètres ajustable : quel paramètre (unique) peut-on faire varier ?
- Paramètres du matériau : quelles propriétés du matériau sont mises en jeu ?

III.5.2 Indice de performance

Après l'établissement du cahier de charge l'étape suivante consiste à déterminer l'indice de performance, une combinaison de propriétés, qui caractérise la performance d'un matériau pour une application donnée.

III.5.3 Classement des matériaux

Une façon commode de présenter une vision synthétique des propriétés des matériaux est le tracé de « cartes de propriétés ». Il s'agit de diagrammes logarithmiques, qui représentent une propriété quantitative sur chaque axe. Les différents types de matériaux y sont représentés par des bulles, dont la taille traduit la dispersion des propriétés d'un ensemble de matériaux.

III.5.4 Application

- **La fonction de l'objet** : Pas d'endommagement en fatigue

La contrainte de fatigue exige que $\sigma_f \leq \sigma_D$

$$\text{Or } \sigma_f = K_{tf} \frac{32 M_f}{\pi d^3} \leq \sigma_D \quad (1)$$

- **L'objectif de conception** : minimiser la masse

$$m = \rho \pi \frac{d^2}{4} L \quad (2)$$

m : la masse du tirant

ρ : la masse volumique

r : rayon du tirant

- **Les paramètres fixes** : la longueur L ;
- **Les paramètres ajustables** : le diamètre d ;
- **Les paramètres du matériau** : ρ , R_m , σ_D , R_e .

En utilisant l'équation (1) pour éliminer d dans l'équation (2)

$$d = \left(\frac{32 K_{tf} M_f}{\pi \sigma_D} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Alors on obtient:

$$m = \left(\frac{\rho}{\sigma_D^{\frac{2}{3}}} \right) \left(\frac{\pi^{\frac{1}{3}}}{4} \right) (32 \cdot K_{tf} \cdot M_f)^{\frac{2}{3}}$$

Alors l'indice de performance est :

$$I_p = \frac{\sigma_D^{\frac{2}{3}}}{\rho}$$

Équation 12: Indice de performance

Le logiciel d'aide CES nous a permis de tracer la carte de sélection des matériaux (diagramme d'Ashbey), à partir de bases de données génériques.

Le tracé de lignes équipervormantes sur cette carte permet alors de classer les matériaux par rapport à un indice de performance donné.

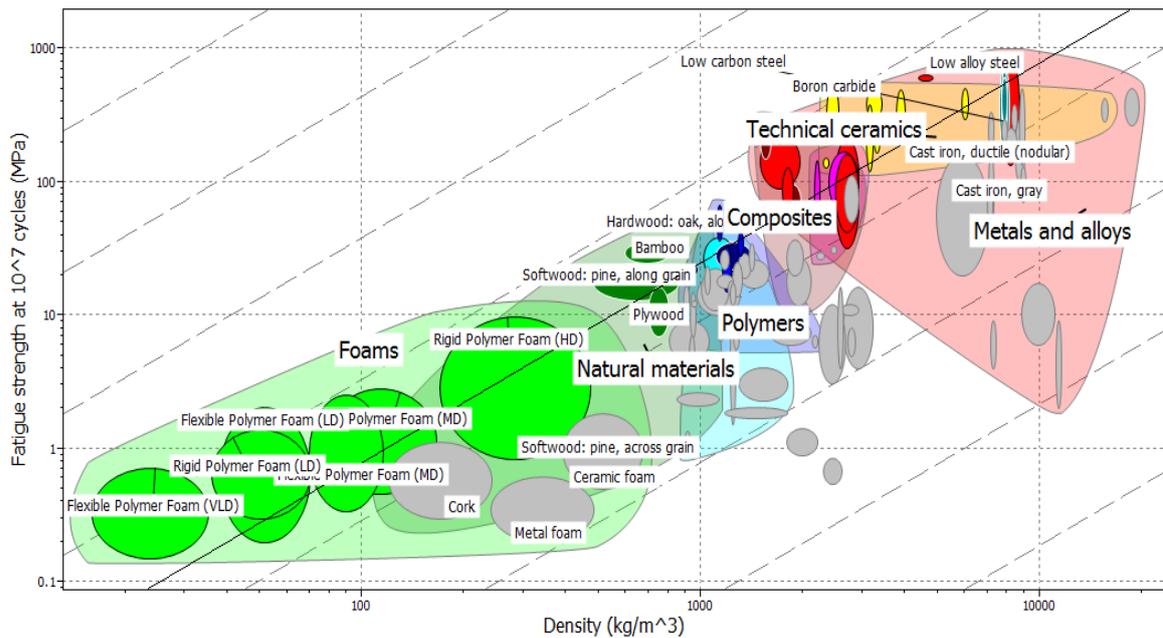


Figure 62: diagramme d'Ashbey

La figure ci-dessus donne le diagramme approprié au problème, celui de la limite d'endurance σ_D en fonction de la densité ρ . La droite directrice pour l'indice calculé I_p a une pente de $\frac{3}{2}$; on la place de façon à ce que seul un petit groupe de matériaux se trouvent au-dessus. Ce sont les matériaux qui possèdent les plus grandes valeurs de cet indice et qui constituent donc le meilleur choix.

On trouve que les aciers faiblement alliés sont parmi les matériaux possédant une grande valeur du facteur de performance ce qui justifie que le choix du matériau de tirant est bien effectué.

III.5.5 Analyse microscopique

Afin de savoir s'il y a des fissures préexistantes sur le tirant nous avons fait une analyse microscopique par une appareil à balayage optique sur un échantillon du tirant à la FST de Beni Mellal, mais malheureusement les résultats obtenues ont été illisibles sur l'écran d'affichage de l'appareil comme elle montre la figure ci-dessous.



Figure 63: Appareille à balayage optique

Nous avons essayé une autre fois pour faire la même analyse en envoyant l'échantillon du tirant à l'école nationale des arts et métiers (ENSAM) et nous attendons encore les résultats.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que tous les causes susceptibles d'entraîner la rupture du tirant convergent vers des causes liés à la machine et au matériau.

L'analyse de la rupture a montré qu'il existe des sollicitations parasites de flexion qui peuvent être générées par un glissement des galets par rapport à la table du broyage (inclinaison des galets à cause de l'usure) et des coincements répétés du tirant. Aussi que l'élévation de l'épaisseur de la couche de matière peut favoriser la rupture.

La contrainte thermique est assez importante alors elle peut accélérer les phénomènes de fatigue. Ainsi que la valeur de la contrainte admissible du flambement est supérieure à celle de la contrainte de compression appliquée sur le tirant, alors il ne subit pas un flambement.

La valeur maximale des vibrations est faible et ne dépasse pas 1mm/s donc les vibrations au sein du broyeur cru ne peuvent pas provoquer la défaillance du tirant.

Nous avons fait une étude bibliographique sur les spécificités des pièces forgées et leurs comportements en fatigue afin de recenser les problèmes qui peuvent être liés au matériau.

Nous avons constaté que le procédé de fabrication du tirant (le forgeage) génère des hétérogénéités, des défauts de surface et l'anisotropie de certaines propriétés mécaniques

ce qui influence le comportement en fatigue du matériau tel que la diminution de la limite d'endurance, l'augmentation de la vitesse de propagation des fissures, l'apparition de la rupture finale à un niveau de charge plus faible lorsque les inclusions sont perpendiculaires à la charges appliquée.

L'ajout des éléments d'addition génèrent des inclusions non métalliques nocives pour les propriétés de fatigue par exemple l'ajout de soufre et de manganèse forment des inclusions de sulfure de manganèse. De plus des essais réalisés sur l'acier **42CrMo4** montrent que plus de la moitié des éprouvettes contenant un faible taux de sulfure présentent un amorçage sans présence d'inclusions.

L'opération de finition du tirant par usinage peut avoir des effets nuisibles au comportement en fatigue tel que la génération des défauts de la surface, le changement de la dureté superficielle, la distribution des contraintes résiduelles et la déformation plastique.

La vérification du choix de matériau a montré que le choix du matériau de tirant est bien effectué.

Chapitre V : Solutions proposées

Ce chapitre aborde les solutions proposées afin d'éviter la défaillance des tirants du broyeur, ainsi que l'estimation des coûts de chaque solution.

I. Les contrôles non destructifs

Pour détecter les fissures avant leur amorçage et anticiper toute défaillance susceptible de nuire à la production, les tirants du broyeur vertical nécessitent des contrôles programmés. On a choisi les contrôles par moyen de Contrôle Non Destructif.

En effet le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui consistent à mettre en œuvre des méthodes d'investigation pour détecter, positionner, identifier, dimensionner les défauts dans les pièces sans les dégrader et formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées.

I.1 Les méthodes utilisées

Méthode surfacique	D	C	MET	COM	Méthode volumique	D	C	MET	COM
Visuel, caméra	X		X	X	Radiographie	X		X	X
Ressuage	X		X		Ultrasons	X	X	X	X
Magnétoscopie	X		X		Ondes guidées	X		X	X
ACFM	X		X		Impédance, résonance, Tap-test	X		X	X
Courants de Foucault	X	X	X		Méthode globale	D	C	MET	COM
Thermographie infrarouge	X		X	X	Emission acoustique	X		X	X
Bruit ferromagnétique		X	X		D = Défectologie , C = Caractérisation MET = Métallique, COM = Composite				

Tableau 16: les méthodes utilisées dans les CND

Pour le cas de la rupture étudiée, on a choisi d'étudier les contrôles suivants pour pouvoir choisir la solution convenable du côté technique et économique :

- **Contrôles par ultrasons** : car ils permettent un examen volumique de la pièce et une haute sensibilité de détection des défauts (annexe 5) ;
- **Magnétoscopie** : car même s'il est un contrôle surfacique, il permet de détecter les problèmes sous-jacents (annexe 6) ;
- **Ressuage** : car il permet de détecter des défauts débouchant en surface de matériaux non poreux comme : les fissures, les tapures de trempes, les replis,... (annexe 7) ;

- **Contrôle par émission acoustique** car elle permet la détection et l'analyse des signaux permettant d'obtenir des informations inédites sur les anomalies du champ de contraintes, liée à la présence de défauts (annexe 4) ;

II. Recommandations

- A cause d'une mauvaise conduite du broyeur cru, l'épaisseur de la couche de matière peut causer la défaillance de certains composants du broyeur. Alors un contrôle continu de la couche de matière est nécessaire pour assurer un bon fonctionnement du broyeur et ses composants ;
- Il faut effectuer un retournement périodique des trains de galets afin d'équilibrer l'usure et l'inclinaison des trains de galets;
- Réduire la charge de production et respecter le débit donné par le fournisseur ;
- Régler la position des crochets quand le train de galets n'est plus vertical ;
- Contrôle continu de la fixation des tirants ;
- Faire des interventions lorsque l'état de marche des tirants est anormal.

III. Amélioration du matériau du tirant

Nous proposons de changer le matériau du tirant par un autre acier qui possède un faible taux de sulfure et de Manganèse pour éviter la formation des inclusions de sulfure de manganèse qui sont nocives pour les propriétés de fatigue et qui a une bonne résistance à la fatigue et aux efforts dynamiques alternés. C'est pour cela nous avons choisi l'acier faiblement allié **36NiCrMo16**, car il possède des caractéristique mécaniques plus élevées que celle du 42CrMo4 et il a une bonne résistance à la fatigue, au choc et aux efforts dynamiques alternés, et il est utilisé pour les pièces fortement sollicités (organes de transmission, arbres...).

Le tableau ci-dessous montre une comparaison entre les propriétés mécanique du 42CrMo4 et celles du 36NiCrMo.

Matériaux	Rm (Mpa)	Re (Mpa)
42CrMo4	750/1300	500/900
36NiCrMo16	1000/1750	800/1250

Tableau 17: Comparaison des caractéristiques mécanique du 42CrMo4 et 36NiCrMo16

Parmi les avantages du 36NiCrMo16 qu'il contient un faible taux de sulfure et ne contient pas du manganèse.

C	Si	Ni	Cr	Mo	P	S
0,32	0,10-0,40	3,60-4,10	1,60-2,00	0,25-0,45	< 0,030	< 0,020

Tableau 18: Composition chimique de l'acier 36NiCrMo16

IV. Amélioration du matériau des galets et la table

Des recommandations concernant l'équilibrage de l'usure, ou bien l'éliminer sont nécessaires pour éviter le problème de l'inclinaison du train de galets, qui peut influencer sur le tirant en générant des contraintes parasites sur ce dernier, due à l'usure de la table et des galets nous proposons d'améliorer le matériau composant le bandage du galet et de la table par un autre possède un niveau de résistance à l'usure.

IV.1 Le Xwin

Le Xwin est un composite à matrice métallique dans lequel un alliage de Chrome est renforcé avec les particules en céramique également distribuées selon une conception spéciale de nid d'abeilles. Il permet l'augmentation de la durée de vie de la table et des bandages de 2 à 4 fois selon l'exploitation, et permet aussi d'éviter de 1 à 3 arrêts programmés.

IV.2 Les bénéfices de la qualité Xwin

Cette technologie consiste à renforcer les faces actives des pièces de la céramique dans le métal.

Ce renforcement céramique noyé dans notre fonte au chrome permet d'atteindre des résistances à l'usure nettement supérieures à des qualités classiques sans toutefois altérer la résistance aux chocs de la pièce.

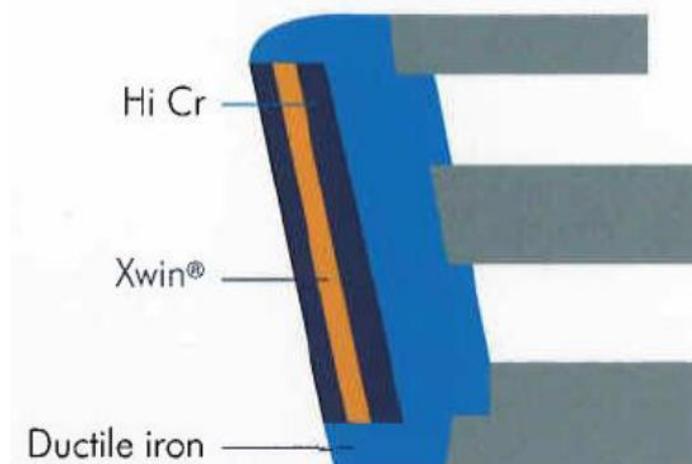


Figure 64: Section d'un bandage en Xwin

IV.3 Les bandages Duocast Xwin

Le *Duocast Xwin* garantit la résistance à l'usure et une fiabilité améliorée au niveau des bandages en associant le *Xwin* à la technologie de *duocast*. Cette technologie confère au bandage une ductilité interne supportant les efforts dus aux contraintes mécaniques et une dureté externe due à la présence du *Xwin* et de la matrice en céramique.

V. Estimation des coûts

V.1 Contrôles par ultrasons

En utilisant le contrôle non destructif par ultrasons (TUD-360 *Ultrasonic Flaw Detector*, annexe 6), qui coûte 5400 dollars, soit **43.497,69 DH**.

V.2 Le ressuage

Le contrôle par ressuage coût **560 DH**.

V.3 Le matériau Xwin

Le bandage en Xwin coûte 43.375 €, soit **486 255,4375 DH**, et pour les 4 bandages, le coût est de **1.945.021 DH**.

Donc le coût total des solutions proposées est de : **1 989 078.69 DH**.

Conclusion :

Grace à la précision des contrôles non destructifs par ultrasons dans la détection des défauts internes, on a opté pour un contrôle par l'appareil (TUD-360 *Ultrasonic Flaw Detector*) et un ressuage pour détecter les défauts externes. Ces contrôles doivent se faire obligatoirement par le fournisseur avant la livraison des tirants à l'usine afin de s'assurer de l'absence de fissures et par CIMAT au moins une fois par semestre.

Pour remédier aux problèmes surviennent du matériau tel que la formations des inclusions causée par l'ajout des additions comme le sulfure et le manganèse nous avons proposés de changer le matériau du tirant par un autre qui contient un faible taux des additions et qui possède une bonne résistance au fatigue.

L'utilisation du nouveau matériau composite Xwin sera aussi une solution efficace, qui va permettre l'équilibrage des galets mais cette solution reste supplémentaire car elle coûte cher de plus l'usure des galets et de la table n'atteint pas la valeur critique pour changer leurs bandages.

Pour éviter les problèmes provoqués par l'épaisseur de la couche de la matière on a cité quelques recommandations qui doivent être appliquées pour garantir le bon fonctionnement du broyeur.

Conclusion générale

Notre projet de fin d'études consistait à faire une analyse détaillée de la rupture du tirant fixe coté élévateur du broyeur cru RM, en vue de déterminer les causes principales de celle-ci.

En effet, nous avons effectué, dans un premier temps, une enquête préliminaire qui nous a permis de constater que la rupture du tirant est typique d'une rupture brutale par fatigue sous contrainte de flexion répétée.

D'ailleurs, à travers l'étude de l'historique de la maintenance du broyeur cru, il s'est avéré que le tirant subit plusieurs coincements au niveau de son articulation ceci peut mener à la défaillance de ce dernier.

En outre, une analyse détaillée des facteurs agissants sur le broyeur a permis de dénombrer les facteurs responsables de la rupture du tirant tels que la présence des sollicitations externes, l'usure des galets et de la piste, l'élévation de l'épaisseur de la couche de matière et la contrainte thermique que subit le tirant.

Par la suite, l'étude bibliographique du comportement en fatigue des pièces forgées nous a permis de déceler les phénomènes qui surviennent lors de l'opération du forgeage et qui sont nocives pour les propriétés de fatigue et favorisant l'amorçage de l'endommagement. (la formation des défauts de surface, des inclusions, diminution de la limite d'endurance...).

Finalement, pour garantir un bon fonctionnement des tirants de broyeur cru nous avons proposés les solutions suivantes :

- Effectuer des contrôles non destructifs par ultrasons et ressuage ;
- Changer le matériau du tirant par un autre plus résistant à la fatigue et aux fortes sollicitations ;
- Changer le bandage des galets et de la piste par le composite Xwin afin d'équilibrer l'usure.

En perspective, nous visons à changer la conception du tirant pour éviter le problème de la concentration de contraintes dans un cas de fonctionnement anormal du tirant, en effet nous proposons :

- Changer le système de guidage en rotation du tirant afin d'éviter les problèmes de coincement de l'articulation ;

- Installer des jauges de déformation pour savoir si les contraintes au sein du tirant sont supérieures ou inférieures à la limite d'élasticité de ce dernier.

Ce projet de fin d'étude nous a permis de se familiariser avec le milieu professionnel et développer les aspects techniques acquis tout long de notre formation. C'était une expérience intéressante où on a pu acquérir un ensemble de connaissance sur la rupture des matériaux et des expériences en matière de recherche et documentation.

En effet ce projet nous a permis de se familiariser avec les logiciels de simulations SOLIDWORKS SIMULATION, CATIA FEA et le logiciel CES EDUPACK.

Bibliographie

- [1] : DROUIN GILBERT, GOU MICHEL, THIRY PIERRE, VINET ROBERT, Eléments de machines, deuxième édition, Ecole polytechnique de Montréal, 1986, pp.74, 50, 51.
- [2] : MICHEL F.ASHBY, Choix des matériaux en conception mécanique, deuxième édition, Dunod, pp.264.
- [3] : M.AUBLIN, R.BONCOMPAIN, M.BOULATON, D.CARON, Systèmes mécaniques : Théorie et dimensionnement, Dunod, 1998.
- [4] : Formation CIMAT : Processus de fabrication du ciment CIMAT.
- [5] : POLYSIUS S.A.S, 1492 CIMATFA2 -Formation procédé : Broyage cru, CIMAT-Beni Mellal, 2011.
- [6] : POLYSIUS S.A.S, Formation mécanique : Broyage cru- hydraulique Broyeur vertical, CIMAT-Beni Mellal, 2011.
- [7] : POLYSIUS S.A.S, Formation mécanique : Broyage cru- Conception du Broyeur vertical, CIMAT-Beni Mellal, 2011.
- [8] : POLYSIUS, Manuel machine : Tirants pour le broyeur à galets RM, Code affaire : CIMATFA 2, Numéro d'affaire : D000333.
- [9] : A.VIEU, Fiches techniques avaries, Service métallurgie/Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM)/ Etablissement de Senlis, informations n° 60.
- [10] : P. Olivier Bouchard, N.Caillet, Y. Chastel, Vers une optimisation de la tenue à la fatigue de pièces forgées intégrant l'histoire mécanique des matériaux, Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF), 2012, pp.2, 3.
- [11] : N. CAILLET, Thèse de doctorat : Prise en compte des spécificités des pièces forgées en fatigue illimitée, l'Ecole des Mines de Paris, 2007.
- [12] : E.PESSARD, Thèse de doctorat : Comportement anisotrope en fatigue des composants mécaniques forgés, Université d'Angers, 2009.
- [13] : M.GACEB, S.BRAHMI, Etude de l'influence de l'état de surface sur la tenue à la fatigue d'un acier XC48, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes Algeria.
- [14] : A.DAIDIE, M.PAREDE, Modélisation des systèmes mécaniques, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Toulouse, 2009/2010, pp. 7.
- [15] : H.Yelle, M.Bernard, D.Therriault, Cours : Instabilité et flambement, Ecole polytechnique Montréal.

- [16] : Bayraktar, E., I.M. Garcias et C. Bathias. (2006). "Failure mechanisms of automotive metallic alloys in very high cycle fatigue range." *International Journal of Fatigue*, 1590-1602.
- [17] : Cyril, N.S., A. FAtemi et B. Cryderman. (2008). "Effects of sulfur Level and Anisotropy of Sulfide Inclusions on Tensile, Impact, and Fatigue Properties of SAE 4140 Steel." *Society of Automotive Engineers*.
- [18]: Deng, R., Yu G.et Li, H. (1987). "Effect of grain size on slow fatigue crack propagation and plastic deformation near crack tip." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 37-40.
- [19]: Di Schino, A. (2003). "Effects of grain size on the properties of a low nickel austenitic stainless steel." *Journal of Materials Science*, 4725-4733.
- [20] : Du, B., N. Li et Zhou H. (1987). "Factors influencing the effective fatigue treshold." *International Journal of Fatigue*, 43-49.
- [21]: Hosseini, S.B., C. Temmel, B. Karlsson et N.-G Ingesten. (2007). "An In-Situ Scanning Electron Microscopy Study of the Bonding between MnS Inclusions and the Matrix during Tensile Deformation of Hot-Rolled Steels." *Metals & Materials Society and ASM International*.
- [22]: Isibasi, T. (1963). "An Explanation of the Fatigue Strengths of Strength-Anisotropic Steels." *Bulletion of JSME*, 8-13.
- [23] : Jachmich, J.M. (2004). « Tenue en service des bielles: influence de la peau de forge. » *La Forge*, 16-21.
- [24] : Kage, M. et H. Nisitani. (1975). "Anisotropy of fatigue limit and of the crack propagation property of a rolled steel plate." *Bulletin of the JSME*, 1385-1394.
- [25]: Pippan, R. (1991). "Threshold and effective trshold of fatigue crack propagation in Armco iron I: The influence of grain size and cold working." *Materials Science and Engineering A*, 138(1), 15-22.
- [26]: Rosenberg, G. (2003). "Effect of grain size on the fatigue crack growth in steels at temperatures 295 and 77 K." *ISIJ International*, 1652-1657.
- [27] : Sadananda, K. et A.K. Vasudevan. (2003). "Fatigue crack growth mechanisms in steels." *International Journal of Fatigue*, 899-914.
- [28] : Shimizu, K. et T. Torii. (2002). "The Reakationship between Fatigue Properties and microstructure in Rolled Metal Film." *JSME International Journal*, 504-509.
- [29]: Yakushiji, T., M. Goto, M. Kage et S. Hashimoto. (1997) "Effects of Texture on Fatigue Crack Propagation of Low-carbon Steel." *ISIJ International*, pp.1180-1188.

Webographie :

www.techniques-ingenieur.fr

www.metaux-detail.com

ANNEXES

Annexe 1 : Notions sur le phénomène de la fatigue

I. L'endommagement par fatigue

Lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte qui varie périodiquement avec le temps, la rupture peut se produire pour une valeur de la contrainte maximale bien inférieure à la charge de rupture (R_r) et même à la limite élastique (R_e). Une telle rupture est dite de fatigue. Elle peut être définie comme étant la détérioration irréversible des propriétés des matériaux avec l'application de cycles d'efforts variables dans le temps. L'importance technologique de la fatigue est considérable, du fait que de très nombreuses pièces sont soumises en service à des sollicitations cycliques. En général la fatigue se produit sans déformation plastique d'ensemble mais avec une déformation très localisée d'abord autour des défauts, au fond d'une entaille ou en surface ensuite à l'extrémité de la fissure une fois initiée.

La nature de la fissuration est progressive, la rupture finale apparaît brutalement, raison pour laquelle l'estimation de la durée de vie d'une pièce est importante, déterminant la capacité de résistance à la fatigue des pièces appelée « endurance ».

I.1 Mécanisme de rupture par fatigue

L'endommagement par fatigue mené jusqu'à la ruine de la pièce comprend trois stades d'importance variant suivant les matériaux et le système de sollicitation ces stades sont :

- Le stade de germination ou période d'amorçage ;
- Le stade de propagation ;
- Le stade de rupture brutale.

I.2 Les grandeurs mécaniques caractéristiques de la fatigue

Trois grandeurs mécaniques sont importantes pour étudier le comportement en fatigue d'une éprouvette.

- **La durée de vie** : nombre de cycles au bout duquel l'éprouvette casse sous une contrainte de valeur moyenne imposée ;
- **La limite de fatigue** : la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'est pas constaté de rupture après un nombre considéré infini de sollicitations ;
- **La limite d'endurance** : la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il est constaté 50% de rupture après un nombre fini N (appelé censure) de sollicitations en contraintes purement alternées (c'est-à-dire avec une contrainte moyenne nulle).

I.3 Chargement dynamique

- Contrainte moyenne : $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$;
- Amplitude de la contrainte : $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$;
- Rapport contraintes : $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$.

I.4 Diagramme d'endurance

La durée de vie d'une pièce (ou d'une éprouvette) est caractérisée par le nombre de cycles à la rupture (N). La courbe de Whöler ou S-N représente la variation des contraintes dynamiques en fonction du nombre de cycles à la rupture, on porte en ordonnées les contraintes appliquées et en abscisse le logarithme décimal du nombre moyen de cycles à la rupture. Cette courbe divise le plan de coordonnées en trois domaines comme il est montré sur la figure, où le domaine de fatigue oligocyclique, sous fortes contraintes où les ruptures surviennent après un petit nombre de cycles $N \leq 10^5$ cycles, le domaine d'endurance limitée, les ruptures surviennent systématiquement après un nombre de cycles croissant avec la réduction de la contrainte $10^5 \leq N < 5 \cdot 10^6$ à 10^7 , et le domaine d'endurance illimitée sous faibles contraintes pour lesquelles la rupture ne se produit pas avant un nombre donné de cycles (10^7 , $3 \cdot 10^7$, et même 10^8 et 10^9) supérieure à la durée de vie envisagée de la pièce. Ce domaine présente un plateau qui détermine la limite d'endurance en dessous de laquelle il n'y a pas de rupture par fatigue.

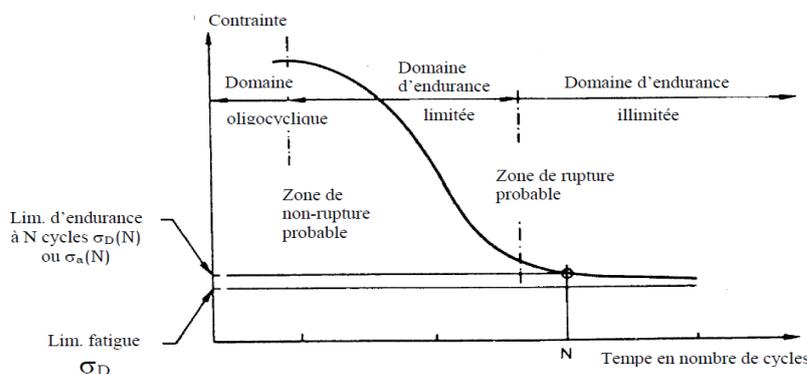


Figure 65: Diagramme d'endurance ou courbe de Whöler

I.5 Facteurs qui influencent le comportement en fatigue

I.5.1 Facteurs métallurgiques

La réalisation d'une pièce passe toujours par des opérations mécaniques et thermiques, qui agissent sur l'état métallurgique du matériau utilisé donc sur ses caractéristiques mécaniques d'utilisation. On peut ranger dans cette catégorie tous les facteurs liés à la nature du métal qui constitue la pièce (composition chimique et structure

métallographique), à son élaboration et à sa mise en forme (inclusions, défauts, fibrage), ainsi qu'aux traitements thermiques (structure métallographique et caractéristiques mécaniques subis par le matériau de la pièce).

I.5.2 Facteurs liés à l'élaboration de l'acier

Le type d'élaboration utilisé pour la fabrication de l'acier influe sur la tenue en fatigue du matériau, dans la mesure où il agit sur sa propriété inclusionnaire. Les méthodes sidérurgiques les plus fines permettent l'obtention des faibles taux d'inclusion, telles que les refusions sous vide ou sous laitier conduisent à des hautes caractéristiques de fatigue.

I.5.3 Influence des zones de Concentration de contraintes

La présence des zones de concentration de contraintes dans une pièce aura une influence sur la courbe de fatigue-endurance.

Toute entaille mécanique siège d'une concentration de contrainte exerce un effet néfaste sur les courbes d'endurance, car elle réduit le nombre de cycle requis pour amorcer une fissure principale et diminue ainsi la durée de vie totale de la pièce.

On caractérise la concentration de contrainte par un facteur dit facteur de concentration de contrainte. IL est défini comme le rapport de la contrainte maximum dans la section considérée à la contrainte nominale.

$$\text{Facteur de concentration} \quad K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0}$$

I.6 Influence de l'environnement

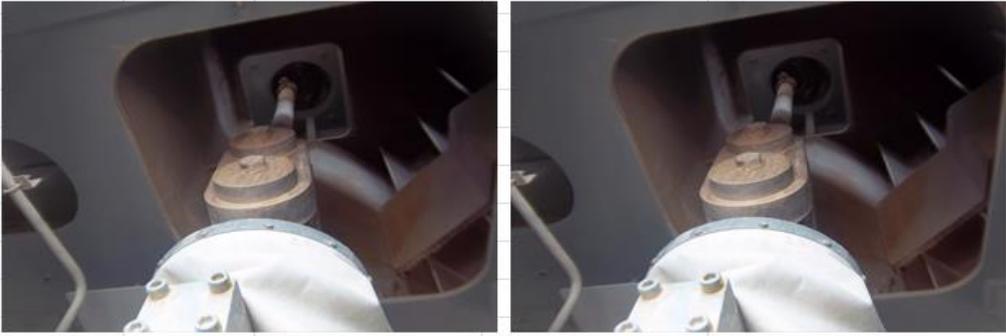
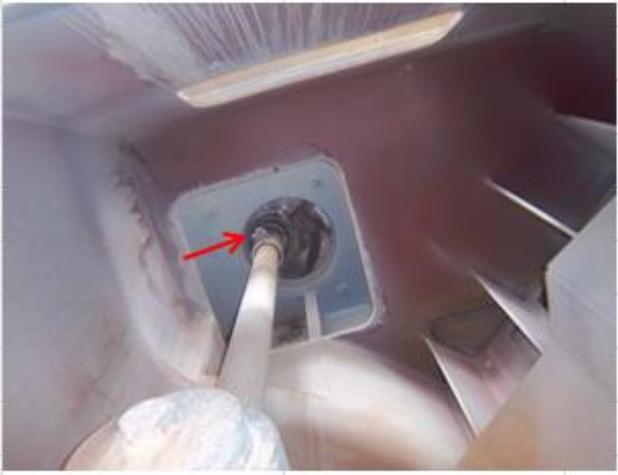
L'environnement joue également un rôle important, puisque de nombreuses pièces soumises en services à des sollicitations cycliques sont en outre souvent plongées dans des environnements plus agressifs que l'atmosphère ambiante (eau salée ; milieux alcalins ou acides dans l'industrie chimique).

Le milieu corrosif peut entraîner la formation de piqures de corrosion qui agissent comme sites privilégiés d'apparition précoce des fissures et entraîne une augmentation de la vitesse de propagation des fissures.

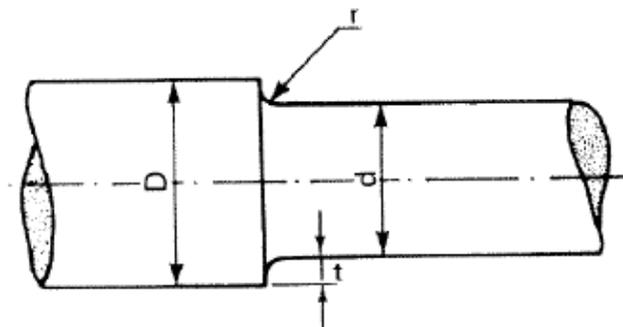
Annexe 2 : Avis d'anomalies du tirant

 USINE BENI MELLAL SERVICE MAINTENANCE BUREAU DES METHODES MAINTENANCE PREVENTIVE		AVIS D'ANOMALIE	
Date :10/04/2013	Equipement :		Fiche N°: .../12
Visiteur: KARROUMI	BROYEUR CRU		ITEM: E11.22
ORGANE	ANOMALIES CONSTATEES		
TIRANT FE	-Etat de marche de tirant fixe coté élévateur est anormale + présence bruit anormal.		
			

 USINE BENI MELLAL SERVICE MAINTENANCE BUREAU DES METHODES MAINTENANCE PREVENTIVE		AVIS D'ANOMALIE	
Date :06/03/2013	Equipement :		Fiche N°: .../12
Visiteur: KARROUMI	BROYEUR CRU		ITEM: E11.22
ORGANE	ANOMALIES CONSTATEES		
Tirant FE	-Bruit de frottement exagéré au niveau la plaque d'étanchièté du tirant FE de broyeur cru + coincement systématique de tirant.		
			

 USINE BENI MELLAL SERVICE MAINTENANCE BUREAU DES METHODES USINE BENI MELLAL MAINTENANCE PREVENTIVE		AVIS D'ANOMALIE	
Date : 04/02/2013		Equipement :	
Visiteur: KARROUMI		BROYEUR CRU	
		Fiche N°: .../12	
		ITEM: E11.22	
ORGANE	ANOMALIES CONSTATEES		
Vérin fixe coté élévateur	-Coincement sur tirant de vérin fixe coté élévateur de broyeur cru E11.22.		
			
Vérin fixe coté élévateur	-Le tirant est plus proche de caising au niveau les plaques d'étanchéité de vérin.		
			
Vérin fixe coté élévateur	-Le tirant se flèche avec présence de bruit.		
			

Annexe 3 : Détermination du facteur de concentration de contrainte
pour un arbre avec un épaulement



$D=150 \text{ mm}$; $d=130 \text{ mm}$; $r=80 \text{ mm}$; $t= 20 \text{ mm}$; $d/D=0.86$ et $r/t= 4$

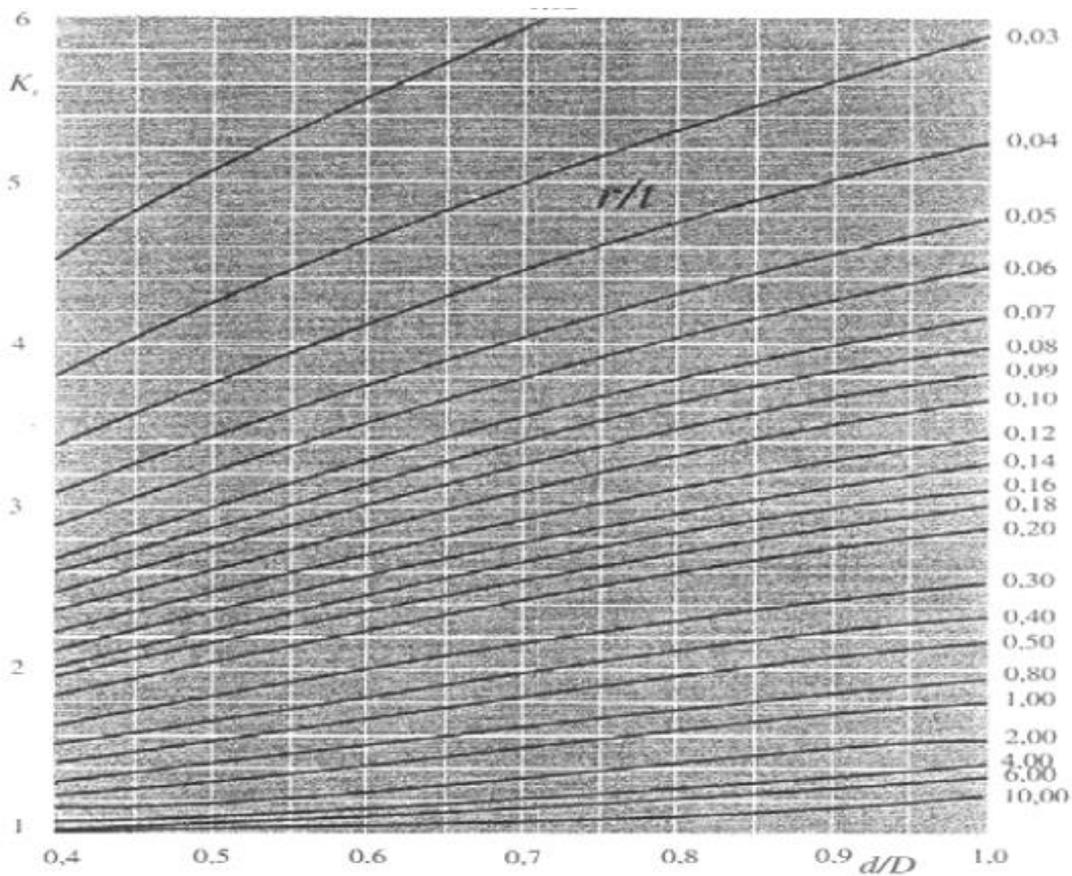


Figure66 : Détermination de K_t pour un arbre avec épaulement

Annexe 4: Usure des galets et la piste

I. Usure des galets



Figure 67: Le profil d'usure des paires des galets

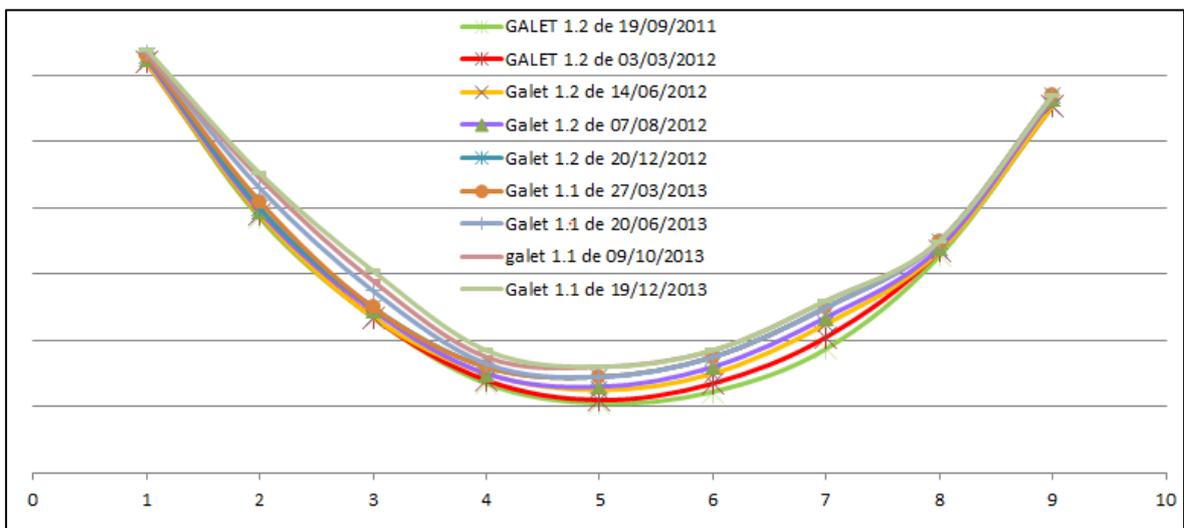


Figure 68 : Usure du galet 1.1

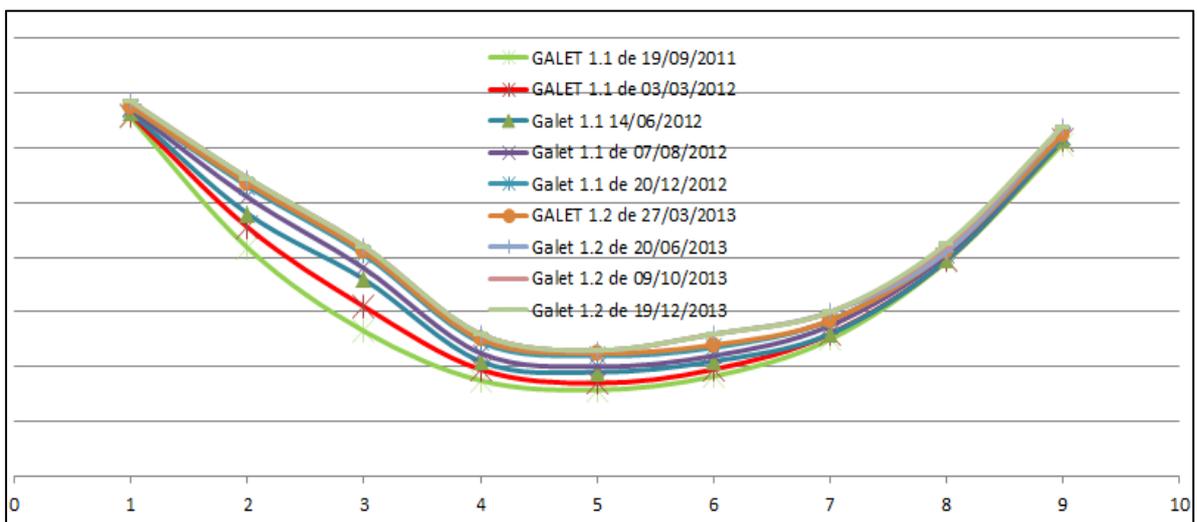


Figure 69: Usure du galet 1.2

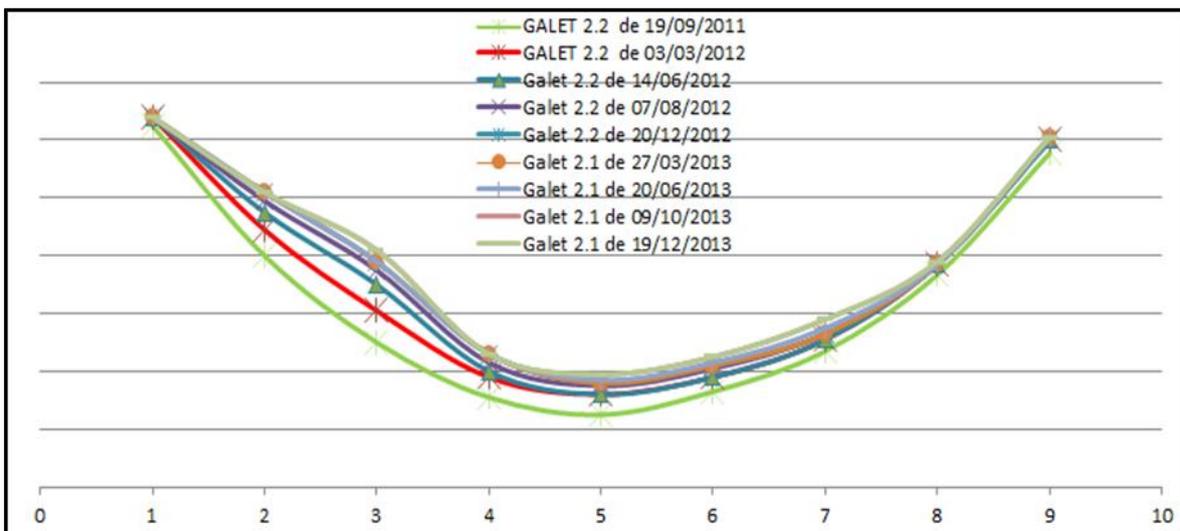


Figure 70: Usure du galet 2.1

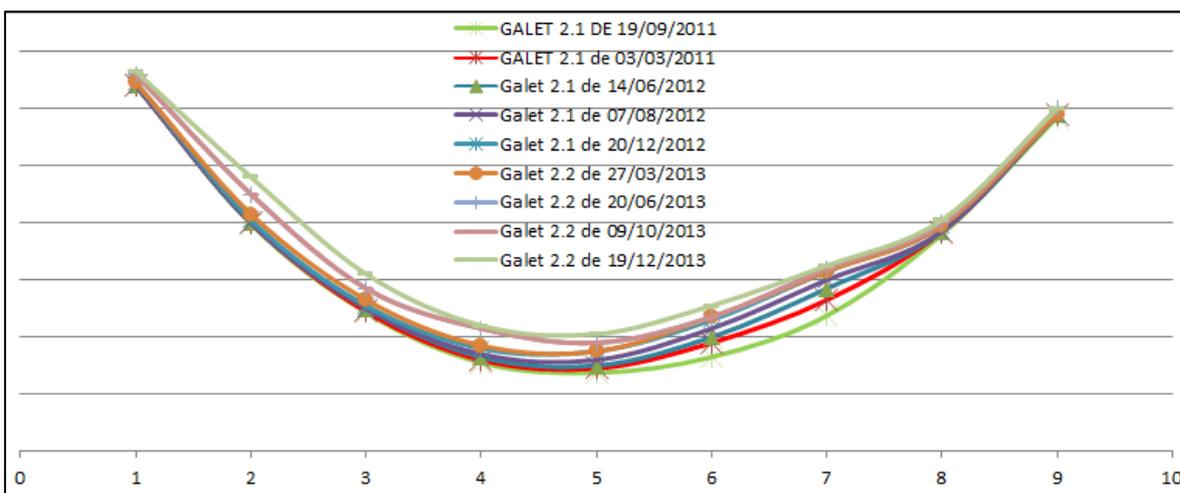


Figure 71: Usure du galet 2.2

II. Usure de la piste

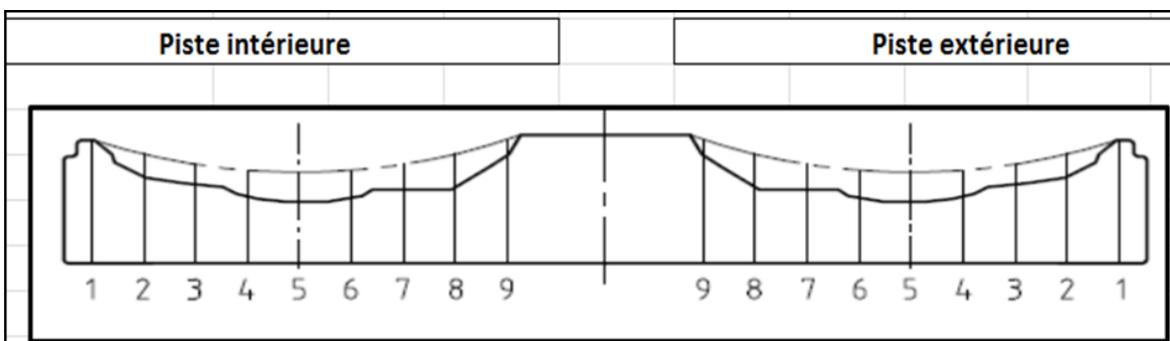


Figure 72: Profil de l'usure de la piste

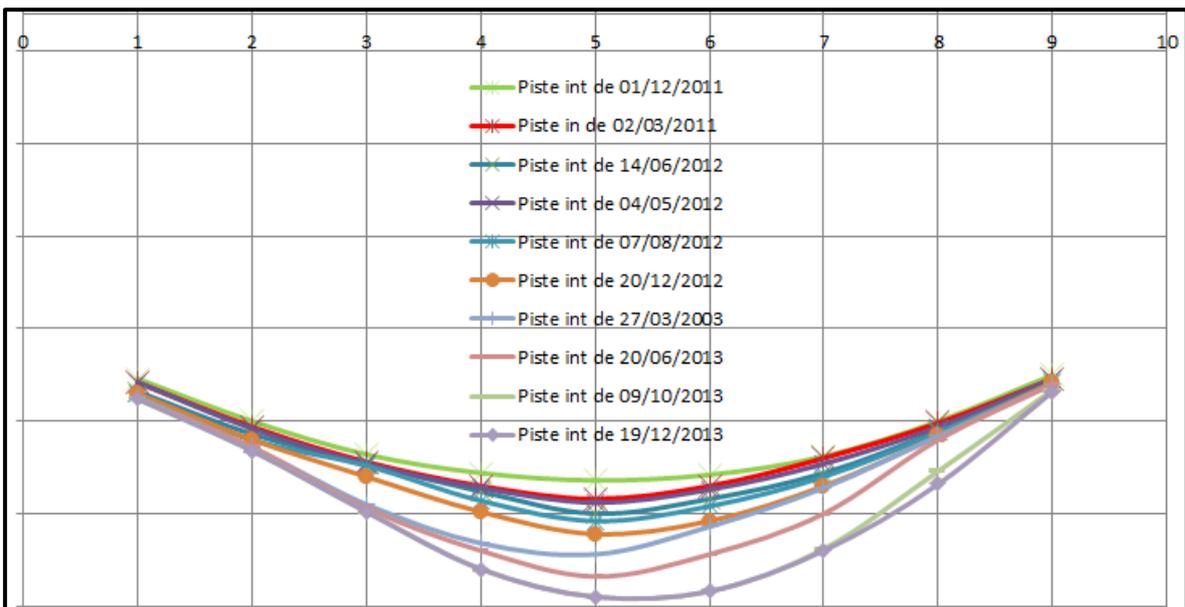


Figure 73: Usure de la piste intérieure

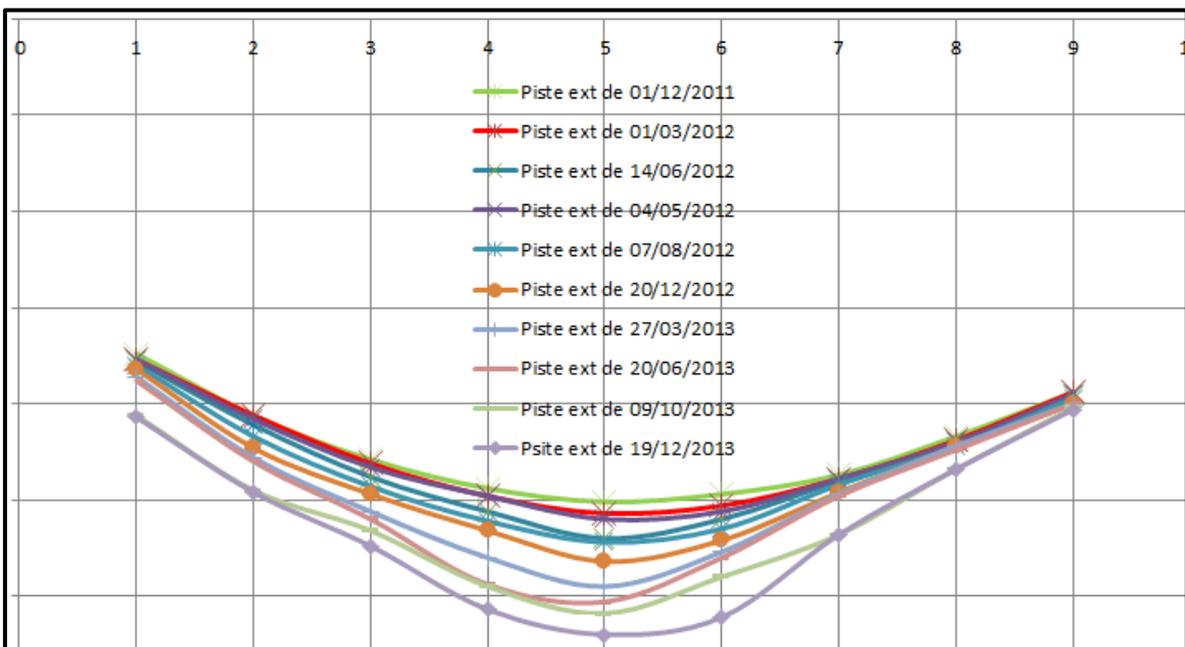


Figure 74: Usure de la piste extérieure

Annexe 5 : Contrôle par ultrasons

I. Principe

Les ultrasons sont des ondes mécaniques générées à partir d'un élément piézoélectrique excité à une fréquence comprise pour de nombreuses applications entre 2 et 5 MHz.

Les ultrasons sont transmis dans la pièce à contrôler par l'intermédiaire d'un milieu de couplage, et se propagent à une vitesse qui dépend du matériau.

Lorsque les ultrasons rencontrent un défaut favorablement orienté par rapport à l'onde incidente, un écho revient vers le traducteur. Cette énergie mécanique réfléchie est transformée en signal électrique par l'élément piézoélectrique et se signale par un écho sur le système de visualisation à l'appareil à ultrasons.

Deux techniques existent pour assurer ce couplage : le contrôle par contact et le contrôle par immersion.

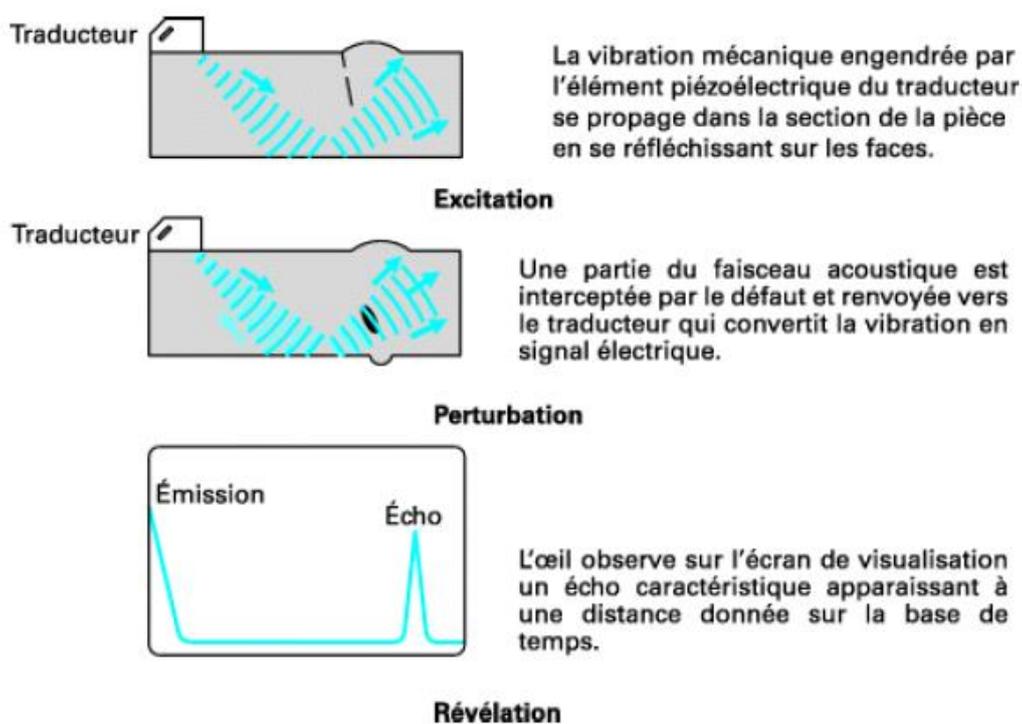


Figure 75: Principe du contrôle par ultrasons

II. Contrôle par contact

Le traducteur est directement placé sur la pièce à contrôler. La liaison acoustique est assurée par une couche d'agent de couplage : graisse, huile, colle cellulosique, gels

spéciaux dont l'épaisseur est de l'ordre du dixième de millimètre. Cette technique, dite de palpage, est surtout employée lors de contrôles manuels. Elle nécessite l'intervention d'un opérateur pour le déplacement du traducteur. La constance du couplage, et donc du contrôle, n'est pas assurée.

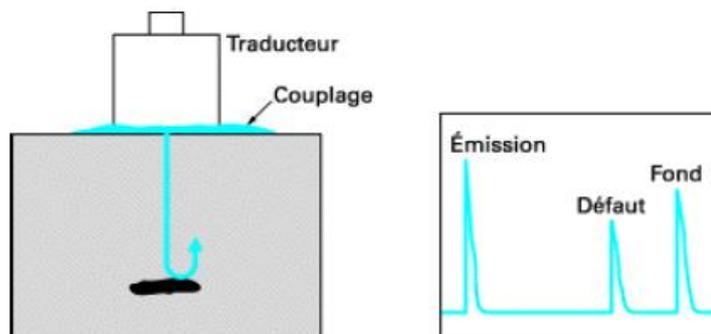


Figure 76: Principe du contrôle par contact

III. Contrôle par immersion

Le traducteur est situé à une certaine distance de la pièce, le couplage est assuré par un liquide, habituellement de l'eau. Il peut s'agir :

- **D'une immersion totale** : le traducteur et la pièce sont entièrement immergés dans une cuve de contrôle ;
- **D'une immersion locale** : le traducteur et la partie de la pièce qui est contrôlée sont reliés entre eux par un volume de liquide, grâce à des dispositifs spéciaux.

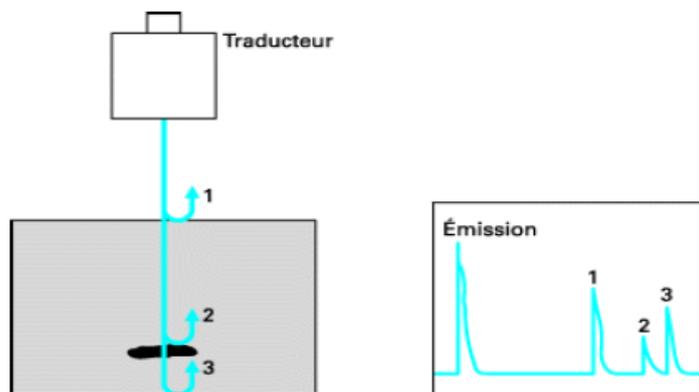


Figure 77: Principe du contrôle par immersion

IV. Anomalies détectés

- Anomalies d'impédance acoustique ;
- Défauts internes : discontinuités, délaminage, fissures, hétérogénéités porosités, inclusions, ... ;
- Caractérisation et détermination de la grosseur du grain des matériaux métalliques.

V. Domaine d'application

- Examen de pièces métalliques (moulées, forgées, usinées, soudées...) à tous stades d'élaboration et d'utilisation (fabrication, maintenance) ;
- Contrôle des cordons de soudure ;
- Caractérisation et contrôle de matériaux composites et de bétons ;
- Contrôle de précontrainte dans les assemblages boulonnés ;
- Mesure de propriétés physiques ou métallurgiques de matériaux ;
- Suivi en service d'installations et de matériels (nucléaire, transports aérien et ferroviaire, pétrochimie...).

VI. Avantages

- Détection et localisation des défauts plans et volumiques ;
- Dimensionnement des défauts plans et volumiques ;
- Mise en évidence des discontinuités très fines ;
- Contrôle effectué en ayant accès à une seule face de la pièce ;
- Pouvoir de pénétration très important ;

VII. Inconvénients

- Sensibilité de la méthode est fortement influencée par l'orientation du défaut ;
- Interposition d'un milieu de couplage ;
- Interprétation délicate des résultats.

Annexe 6 : Contrôle par émission acoustique

I. Principe

L'Émission Acoustique (EA) est un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau soumis à une sollicitation. La détection et l'analyse des signaux permettent d'obtenir des informations inédites sur les anomalies du champ de contraintes, liées par exemple à la présence de défauts. La détection est réalisée par un capteur piézoélectrique avec une fréquence de 50 kHz à 1 MHz (généralement 50 à 500 kHz).

La technique de CND par émission acoustique n'est sensible qu'aux processus irréversibles qui s'accompagnent par une libération d'énergie dont une partie se transforme en une énergie mécanique qui se propage sous forme d'onde élastique. Un tel processus peut être un endommagement en évolution tel que une plastification en croissance, une fissure qui se propage, une corrosion active ou encore un processus actif tel que la turbulence d'un fluide passant une fuite soumise à un différentiel de pression.

II. Conditions liées à l'onde émise

Pour être détectée, l'onde générée doit atteindre un capteur d'émission acoustique située au voisinage de sa source. Ce capteur doit être adéquatement choisi, principalement, en fonction des caractéristiques fréquentielles de l'onde détectée. L'onde doit aussi présenter des caractéristiques particulières permettant de la distinguer du bruit de fond ambiant. Dans la plus part des applications industrielles, l'onde émise par le processus sous contrôle atteint le capteur le plus proche de sa source avec une amplitude supérieure à celle du niveau de bruit de fond. Dans ce cas, il suffit de sélectionner un seuil de détection légèrement supérieur au niveau de bruit de fond ambiant pour ne garder que les signaux utiles à l'analyse. Il est parfois nécessaire d'effectuer le contrôle en présence d'un niveau de bruit de fond qui excède les amplitudes des ondes émises par le processus contrôlé. Dans ce cas, pour pouvoir les distinguer du bruit de fond, ces ondes doivent présenter au moins une caractéristique commune permettant de les identifier. Elle se présente souvent sous la forme d'une combinaison de paramètres appelée «signature acoustique».

III. Conditions liées à la procédure de contrôle

La façon dont le test est réalisé peut aussi affecter la sensibilité. La procédure contrôle par EA doit, en effet, prévoir les dispositions favorables à l'activation du processus contrôlé.

A titre d'exemple : Le suivi par émission acoustique de l'épreuve de qualification d'un appareil à pression a pour but d'évaluer l'intégrité mécanique de la structure avant de la mettre en service. La procédure du contrôle prévoit d'imposer à l'appareil un cycle de pressurisation précis afin de favoriser une propagation contrôlée des fissures. Une évaluation en temps réel des données d'émission acoustique, sur la base des critères spécifiés préalablement par la procédure, permet de stopper le chargement de l'appareil en présence d'une propagation instable de fissure.

De la même façon la procédure de contrôle d'un fond de bac de stockage prévoit le remplissage du bac au maximum de sa capacité pour favoriser l'activation des fuites et les fissurations de dépôts de produits de corrosion qui traduisent par leur présence une corrosion plus au moins avancée (corrosion ancienne). Ce type de contrôle est souvent réalisé en utilisant le produit de service afin de réunir les conditions favorables à l'activation des réactions de corrosion (corrosion active).

IV. Avantages

- La possibilité d'effectuer une évaluation globale de l'intégrité d'une structure;
- La possibilité de contrôler des structures en service en minimisant l'interruption de production;
- La rapidité du contrôle.

V. Inconvénients

La principale limitation du contrôle non destructif par émission acoustique découle du fait qu'il s'agit d'une technique passive qui n'est sensible qu'aux processus qui sont actifs lors du contrôle.

Annexe 7: Contrôle par magnétoscopie

I. Principe

Cette méthode consiste à créer un flux d'induction magnétique intense (saturation magnétique) dans des structures ferromagnétiques entraînant, au droit des défauts, des flux de fuite. Ces flux sont mis en évidence par des traceurs magnétiques finement micronisés et déposés à la surface des matériaux.

La reproductibilité de l'examen peut être obtenue à condition d'éliminer ou de réduire l'aimantation rémanente qui peut subsister dans les pièces.

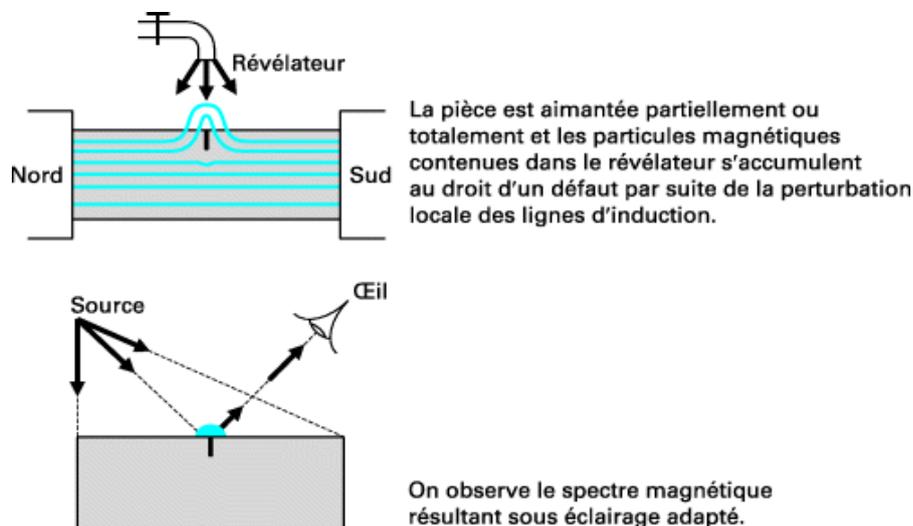


Figure 78: Principe du contrôle par magnétoscopie

L'examen peut être effectué en lumière blanche avec des fonds contrastants et des traceurs (révélateurs magnétiques) colorés ou en lumière ultraviolette avec des traceurs fluorescents. Les traceurs peuvent être secs ou humides :

- **Les traceurs secs** : ils sont ferromagnétiques, très mobiles sur la pièce et très visibles à l'œil ;
- **Les traceurs humides** : les liquides porteurs sont soit des produits aqueux non inflammables (eau + mouillant + anti moussant + antioxydant + bactéricides), soit des produits au kérosène inflammables (kérosène + anti dermique).

II. Les méthodes d'aimantation

II.1 Par passage de flux magnétique dans les pièces (aimantation longitudinale)

Cette méthode permet de détecter les discontinuités transversales (ou perpendiculaires). Le flux est parallèle à l'axe principal entre les pôles. Les lignes de force sont sensiblement parallèles à l'axe Nord-Sud.

II.2 Par passage de courant dans les pièces (aimantation transversale) :

Cette méthode permet de détecter les discontinuités longitudinales (ou parallèles). Le flux se boucle dans la pièce perpendiculairement à l'axe électrique. Les lignes de force traversent le produit perpendiculairement à l'excitation électrique.

III. Anomalies détectées

Discontinuités matière ouvertes, débouchant à la surface de la pièce examinée.

IV. Avantages

- Les défauts sous-jacents peuvent être détectés (de 1 à 2 mm à partir de la surface) ;
- Il existe plusieurs méthodes d'aimantation ;
- Les défauts peuvent être obstrues (oxyde, calamine...) ;
- Bonne sensibilité de détection des défauts avec appréciation de leur longueur : la sensibilité des défauts dépend de l'acuité visuelle et du seuil différentiel de contraste de l'opérateur, de l'orientation des défauts et de la forme du flux magnétique utilisé, de la qualité du produit révélateur, de l'état de surface et de la qualité du nettoyage de la pièce, de la présence ou pas de colorations parasites ;
- Visualisation des défauts par produits indicateurs, soit visible en lumière du jour (colorés), soit en lumière UV-A (fluorescents) ;
- Rapidité.

IV.1 Inconvénients

- Difficile à mettre en œuvre pour des pièces de grandes dimensions (longueur du banc de magnétisation, puissance électrique ou magnétique) ou de formes complexes (comme par exemple les filetages) ;

- Risque d'amorçage d'arc et d'échauffement des pièces en surface au niveau des contacts électriques (méthode d'aimantation par passage de courant) ;
- Nécessité de démagnétiser et de nettoyer les pièces après le contrôle ;
- Hygiène et sécurité : utilisation de lumière ultraviolette, utilisation stockage et élimination de produits chimiques dont certains sont inflammables ;
- Ne s'applique qu'aux matériaux ferromagnétiques ;
- Sensible à l'orientation des défauts.

Annexe 8 : Le ressuage

I. Principe du ressuage

Cette méthode, très ancienne, consiste à appliquer un pénétrant (liquide coloré ou fluorescent) sur la surface à contrôler.

Le liquide pénètre à l'intérieur des défauts débouchant (criques, fissures, porosités, piqûres).

Après élimination par lavage de l'excès de pénétrant, la surface est recouverte d'une fine couche de révélateur qui, agissant comme un buvard, "aspire" le pénétrant contenu dans les défauts et donne une tache colorée.

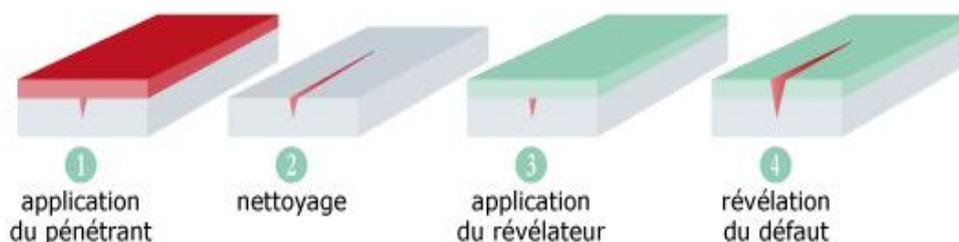


Figure 79: Principe du contrôle par ressuage

II. Le mode d'examen

Quel que soit le procédé utilisé : ressuage coloré, lumière blanche (lumière du jour) et pénétrant coloré (rouge) ou ressuage fluorescent, lumière ultraviolette et pénétrant fluorescent, la mise en œuvre reste identique.

III. Précautions

- La sensibilité de détection des défauts est souvent déterminée par le mode de préparation des surfaces ;
- La rigueur apportée au nettoyage préliminaire favorise grandement les résultats de l'examen.

IV. Avantages

- Il peut être effectué sur toutes sortes de matériaux non poreux et non rugueux, de géométrie et de dimensions quelconques ;

- Facilité de la mise en œuvre ;
- Bonne sensibilité de détection des défauts avec appréciation de leur longueur (la sensibilité de détection des défauts dépend de l'acuité visuelle et du seuil différentiel de contraste de l'opérateur, de l'état de surface et de la qualité du nettoyage de la pièce) ;
- Méthode globale autorisant l'examen de la totalité de la surface de la pièce.

V. Inconvénients

- Les défauts doivent être débouchant et non obstrués (par de la graisse, de la peinture, de l'oxyde, de la calamine ou des contraintes résiduelles de compression) ;
- Il est nécessaire d'effectuer un dégraissage et un décapage préalables soignés ;
- Les opérateurs doivent posséder une grande expérience.

Annexe 9: Ultrasonic Flaw Detector TUD360



ULTRASONIC FLAW DETECTOR TUD360



Features:

- Sampling frequency reach up to 160MHz
- Color TFT LCD display
- Memory up to 1024 A scanned images, parameters and 64000 thickness values
- 32 detecting channels are available with separated detecting parameters and DAC curve in every channel
- Equipped with gate setting and alarming function
- Two scanning modes: A scan and B scan
- Auto gain and manual B scanning
- USB 1.1, fullspeed communication port available
- Can be connected with PC to print out result
- Ruler voltage adjustable
- Two measuring unit: mm/inch
- Three detecting modes: single-probe, dual-probe and transmission
- Real time waveform display and review
- Four rectify ways: positive half-wave, negative half-way, full wave and radio frequency

Technical Specification

Scanning range	2.5mm—9999mm
Frequency	0.1MHz—25MHz
Gain range	0dB—110dB
Vertical linearity error	≤3%
Horizontal linearity error	≤0.2%
Dynamic range	≥34dB
Rectification	Positive half wave, negative wave, full wave, and RF
Sensitivity levings	≥60dB
D-Delay	-20μm—3400μm
P-Delay	0μm—99.99μm
Scanning resolution	0.1mm(2.5mm—99.99mm); 1mm(100mm—9999mm)
Sound velocity	1000m/s—9999m/s
Overall dimension	243 × 173 × 85mm
Weight	1500g
Test mode	Pulse-echo, dual and through transmission
Damping	60 ohms, 100 ohms, 190 ohms
Unit	mm/inch
Interface	RS232/USB
Printer	EPSON inkjet printer
Temperature	-10—40°C
Power supply	Li battery 4 × 3.6V
Humidity	20%—90%RH

Standard Delivery

- Main unit 1
- Couplant 1
- Power adaptor 1
- Power cable to power adaptor 1
- Neck strap 1
- Connecting cable 1
- Straight probe 1
- Angle probe 1
- Flash disk 1
- Instruction manual 1
- TME certificate 1
- Warranty card 1

Optional Accessory

- Connecting cable
- Dataview software
- EPSON ink-jet printer
- Various probes(see page 48)

