

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA –



Faculté : Sciences de Technologie

Département : Génie Mécanique

Spécialité : Ingénierie de la Maintenance

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Thème :

***Des outils au service du plan de maintenance du
four rotatif***

Présenté par

Bendir Samiha

Devant le jury :

KHELIF RABIA	Pr	Encadrant
NEHAL ABDELAZIZ	MCA	Président
KALLOUCHE ABDELKADER	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Avant d'entamer ce travail, je tiens à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir muni de force et de bonne volonté pour arriver à ce stade de mon cursus universitaire.

Un grand merci à ma famille pour leur contribution, leurs soutiens et leurs patiences, je tiens à exprimer ma grande reconnaissance envers eux.

Je tiens à remercier mon Professeur Khelif Rabia de l'université Badji Mokhtar Annaba d'avoir orienté mes recherches et croire en mes capacités ainsi que pour ses encouragements, et qui n'a pas hésité à me donner des précieux conseils.

Je remercie d'avance, les membres du jury d'accepter d'examiner notre travail.

Mes remerciements les plus sincères au personnel de l'entreprise Hadjar-Soud qui ont bien voulu m'accorder du temps afin d'apporter des réponses à toutes mes questions tant opérationnelles, que d'ordre plus général et qui m'ont apporté des éclaircissements dont j'en avais besoin tout le long de mon stage.

Enfin, je remercie tous ceux et celles qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à:

Mes très chers parents «Samia, Mourad» pour leur amour, leurs sacrifices et leur encouragement et que DIEU les protègent.

Mes très chères sœurs « Sanaa, Wissal »,

Mon cher frère «Salah Adin »,

Et à toute ma famille.

Mes chers amis « Imen, Souhila, Wafa, Roumaissa, Amine, Anas ».

Ainsi, qu'à l'ensemble des étudiants de ma promotion :

« Ingénierie de la maintenance (2024-2025) ».

Bendir Samiha

Résumé

La maintenance industrielle devient de plus en plus essentielle et se positionne comme une des fonctions cruciales de l'entreprise moderne de production. L'étude se concentre sur l'analyse théorique et pratique de la fiabilité des équipements de four rotatif à la Cimenterie Hedjar-Soud SKIKDA. Dans ce projet, j'ai fait recours aux lois de fiabilité et aux techniques d'analyse (AMDEC, Test Shapiro-Wilk), couramment employées dans le secteur de la mécanique. Les techniques graphiques et numériques permettent d'identifier les paramètres de dégradation qui sont essentiels pour décider du genre de maintenance à mettre en œuvre. Une analyse de cas pratique, en me focalisant sur les composants critiques des dispositifs stratégiques du Four rotatif (notre cas d'étude) a été menée. Cette recherche m'a permis d'obtenir des résultats correspondant à la réalité de l'entreprise. Les résultats ont conduit à la formulation de recommandations d'amélioration et à l'élaboration d'un plan de maintenance préventive en adéquation avec la réalité opérationnelle.

Les mots clés: Maintenance, Four rotatif, Analyse Fonctionnelle, AMDEC, Shapiro-Wilk, Fiabilité.

Abstract

Industrial maintenance is becoming increasingly essential and is positioning itself as one of the key functions of the modern production enterprise. This study focuses on the theoretical and practical analysis of the reliability of rotary kiln equipment at the Hedjar-Soud Cement Plant in Skikda. In this project, I use reliability laws and analytical techniques (AMDEC, Shapiro-Wilk Test), which are commonly applied in the mechanical engineering sector. Graphical and numerical techniques are used to identify degradation parameters that are essential in deciding the type of maintenance to be implemented. A practical case study was conducted, focusing on the critical components of the rotary kiln's strategic systems (our case study). This research enabled me to obtain results that reflect the real conditions of the company. The findings led to the formulation of improvement recommendations and the development of a preventive maintenance plan aligned with the operational reality.

Keywords: Maintenance, Rotary Kiln, Functional Analysis, AMDEC, Shapiro-Wilk, Reliability.

ملخص

تُعد الصيانة الصناعية أكثر أهمية يومًا بعد يوم، وأصبحت تُشكل إحدى الوظائف الحاسمة في المؤسسة الإنتاجية الحديثة. تركز هذه الدراسة على التحليل النظري والتطبيقي لموثوقية معدات الفرن الدوار في مصنع الإسمنت حجار-سود سكيكدة ، وهي (Shapiro-Wilk ، واختبار AMDEC) في هذا المشروع، تم اللجوء إلى قوانين الموثوقية وتقنيات التحليل مثل تقنيات مستخدمة عادة في قطاع الميكانيك. تسمح التقنيات البيانية والعديدية بتحديد معالم التدهور التي تُعد ضرورية لاتخاذ القرار المناسب لنوع الصيانة المطلوب تطبيقها. وقد تم إجراء تحليل لحالة عملية من خلال التركيز على المكونات الحرجة للأجهزة الاستراتيجية الخاصة بالفرن الدوار (وهو موضوع دراستنا). مكنتني هذه الدراسة من الحصول على نتائج تتطابق مع واقع المؤسسة. وقد أدت النتائج إلى صياغة توصيات لتحسين الأداء وإعداد خطة صيانة وقائية تتماشى مع الواقع التشغيلي.

الموثوقية Shapiro-Wilk ، اختبار AMDEC، الصيانة، الفرن الدوار، التحليل الوظيفي، :الكلمات المفتاحية

Table des matières

Remerciements

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Introduction Générale..... 1

Chapitre I : Description de l'entreprise d'accueil : Société des ciments de Hadjar-Soud(SCHS)

Introduction	4
I.1 Présentation de la SCHS	4
I.1.1 Historique	4
I.1.2 Localisation	4
I.2 Processus et étapes de fabrication du ciment	5
I.2.1 Les constituants du ciment	5
I.2.2 Processus de fabrication du ciment	5
I.2.2.1 Zone de carrière.....	6
I.2.2.2 Zone crue.....	8
I.2.2.3 Zone cuisson.....	10
I.2.2.4 Zone ciment.....	13
I.2.2.5 Zone expédition.....	14
I.3 Les activités réalisées durant le stage.....	16
Conclusion	17

Chapitre II : Etat de la maintenance à la cimenterie

Introduction	19
II.1 Organisation du service maintenance	19
II.1.1 Structure organisationnelle	19
II.1.2 Planification et exécution des interventions	19
II.1.3 Collaboration avec des prestataires externes	20
II.2 Activités principales de maintenance.....	20
II.3 Difficultés rencontrées	21
II.4 Perspectives d'amélioration	22
II.5 Evaluation de la maintenance	22
II.5.1 L'entreprise et la maintenance	22

II.5.2 Les pannes.....	23
II.5.3 Les travaux de maintenance.....	24
II.5.4 La gestion des pièces de rechange	25
II.5.5 Budget et Coût	26
II.5.6 La politique de maintenance	26
II.5.6 L'informatique et la maintenance	27
II.5.7 La normalisation et la maintenance	28
Commentaire	28
Conclusion	29

Chapitre III : Description du four rotatif de ciment

Introduction	31
III.1 Description et fonctionnement.....	31
III.2 les différentes zones du four.....	33
III.3 Les composants du four.....	34
Conclusion	38

Chapitre IV : Application d'outils au four

Introduction	40
IV.1 Analyse fonctionnelle.....	40
IV.2 Définition de l'AMDEC.....	41
IV.3 Démarche pratique de la méthode AMDEC.....	41
IV.4 Analyse des mécanismes de la défaillance.....	42
IV.5 Estimation de la criticité.....	42
IV.6 Tableau de criticité (cas SCHS)	43
IV.7 Décomposition du système.....	44
IV.8 Les tableaux d'AMDEC	44
IV.8.1 Entraînement mécanique	45
IV.9 Interprétation des résultats de l'analyse AMDEC	48
IV.10 Fiabilité.....	49
IV.10.1 Les historiques des pannes de cimenterie (SCHS).....	49
IV.10.2 Test de normalité : Test de Shapiro et Wilk.....	50
IV.10.3 Détermination des périodicités d'intervention conditionnelle	57
IV.11 Proposition d'une PROCEDURE de CALCUL DU COUT DE MAINTENANCE..	59
Conclusion	62

Liste des figures

Figure I.1 : Les matières premières pour la fabrication du ciment.....	5
Figure I.2 : La ligne de production du ciment.....	6
Figure I.3 : Transport et décharge de calcaire et argile.	6
Figure I.4 : Schéma représentatif pour la manière de charger le concasseur giratoire par camions afin de concasser la matière première ‘calcaire’.	7
Figure I.5 : Deux photos représentatives d’un convoyeur à bande.	7
Figure I.6 : Schéma explique le déchargement et le concassage.	8
Figure I.7 : Schéma explicatif de l’APS et le broyage cru.	10
Figure I.8 : Photos représentatives d’un silo de l’intérieur et la répartition des aéroglisteurs au sein de ce dernier.....	10
Figure I.10 : Le refroidisseur du clinker.....	12
Figure I.11 : Schéma montrant les étapes de cuisson [1].	12
Figure I.12 : Les caractéristiques du Broyeur à boulets continus.	13
Figure I.14 : La livraison du ciment en sacs.	15
Figure I.15 : La livraison du ciment en vrac.	15
Figure III.1 : Four à 3 appuis.....	31
Figure III.2 : Disposition générale d'un four rotatif [5].....	32
Figure III.3 : Différentes zones du Four.....	33
Figure III.4 : Bandage de four rotatif.	34
Figure III.5 : Virole de four cimenterie.....	35
Figure III.6 : Brique réfractaire de four rotatif.....	36
Figure III.7 : Gallet de four.	36
Figure III.8 : Butée hydraulique.	37
Figure III.9 : Plaque nose-ring.	38
Figure IV.4 : Fonction de probabilité de défaillance $f(t)$ d’un four rotatif au cours du temps t	53
Figure IV.5 : Fonction de répartition $F(t)$ d’un four rotatif au cours du temps t	54
Figure IV.6 : Fonction $R(t)$ d’un four rotatif au cours du temps t	56
Figure IV.7 : Périodicité d’intervention systématique basée sur R_0 d’un four rotatif.....	57

Liste des tableaux

Tableau 01 : Composition du cru à Hadjar Soud.	9
Tableau 02 : Les activités réalisées.	16
Tableau 03 : Les activités principales de maintenance.	20
Tableau 04 : Caractéristiques de four de 1 ^{ère} ligne.....	32
Tableau 05 : Caractéristiques de four de 2 ^{ème} linge.....	32
Tableau 06 : Les indices de fréquence F.	42
Tableau 07 : Les indices de gravité G.	42
Tableau 08 : Les indices de Non-détection D.	43
Tableau 09 : Échelle de criticité.	43
Tableau 10 : Grille AMDEC d'Entrainement mécanique (Entraînement en translation).	45
Tableau 11 : Grille AMDEC d'Entrainement mécanique (élément Rotation (principale)).	46
Tableau 12 : Grille AMDEC d'Entrainement mécanique (élément Rotation(Virage)).	47
Tableau 13 : Grille AMDEC de guidage de rotation.....	47
Tableau 14 : L'historique du temps d'arrêts du four rotatif de la Société Hedjar soud.	49
Tableau 15 : Classement des TBF avec description des pannes.	50
Tableau 16 : Probabilité instantanée de défaillance.	52
Tableau 17 : Probabilité cumulée de défaillance.	54
Tableau 18 : Probabilité de survie.....	55
Tableau 19 : Périodicités d'intervention systématique.....	56

Introduction Générale

Ce mémoire vise à traiter la question de l'amélioration de la production du four rotatif au sein de l'entreprise Ciment Hedjar-Soud Skikda. Effectivement, ce projet a été conçu pour prévenir l'abondance des pannes au sein de cette société, dont les coûts d'entretien et les périodes d'inactivité des équipements (tels que le four rotatif) pèsent lourdement sur l'entreprise. Cela a un impact direct sur la productivité de la société et son personnel.

Dans ce projet, j'ai mis en œuvre des outils tels que l'AMDEC et le TEST de Shapiro-Wilk. Pour mener à bien l'étude, les méthodes graphiques et analytiques sont essentielles pour définir et confirmer les paramètres de dégradation. Ces derniers sont utilisés pour estimer le taux de panne des équipements situés au niveau du four et déterminer également le type de maintenance à mettre en place. Cette tâche offre une chance de mettre en avant des compétences techniques, une capacité d'analyse critique et une perspective stratégique, des traits indispensables pour une profession dans le domaine de l'ingénierie industrielle.

Le premier chapitre offre une analyse approfondie de l'entreprise, la Société des Ciments de Hadjar Soud (SCHS), soulignant son organisation structurelle, ses opérations et sa position au sein du groupe GICA.

Le chapitre deux examine la situation de la maintenance dans l'usine de ciment, en détaillant sa structure, les différentes opérations (préventive, corrective, prédictive, conditionnelle), ainsi que les obstacles auxquels elle est confrontée, comme l'âge des machines, le défaut de coordination et les délais de livraison. Des suggestions d'amélioration, telles que l'implémentation de la maintenance prédictive et le développement des compétences, sont aussi proposées.

Le chapitre trois met l'accent sur le four rotatif, un appareil essentiel dans la fabrication du clinker. Il explique son histoire, ses éléments constitutifs, ses opérations (décarbonatation, cuisson, transfert thermique) et ses spécifications techniques, comme sa longueur, son diamètre et sa capacité de production (de 1500 à 1800 tonnes par jour pour les deux lignes de production). Ce chapitre souligne l'importance d'une gestion efficace de cet appareil pour assurer la qualité du clinker et la continuité de la production.

Le chapitre quatre, essentiel à ce travail de recherche, examine l'utilisation d'outils pour améliorer la performance du four rotatif. Ce segment est crucial, car il offre des mesures

tangibles visant à perfectionner l'utilisation du four, minimiser les pannes et renforcer la fiabilité. Avec l'emploi d'instruments tels que l'analyse fonctionnelle, l'AMDEC ou le test de Shapiro-Wilk, ce chapitre se distingue par son aspect pratique : il transforme les études des chapitres antérieurs en conseils applicables, apportant ainsi un bénéfice direct à l'industrie du ciment. En intégrant des méthodes axées sur les données, ce chapitre a pour but d'améliorer la maintenance du four rotatif ainsi la compétitivité de la société dans un domaine extrêmement concurrentiel.

Chapitre I :

Description de l'entreprise d'accueil : Société des
ciments de Hadjar-Soud(SCHS)

Introduction

Le ciment est obtenu au terme d'un processus de fabrication précis, la majorité des cimenteries modernes utilisent le procédé dit « en voie sèche », considéré le plus économique en matière de consommation d'énergie. C'est le procédé que nous retiendrons pour la suite du travail. Dans ce chapitre, nous allons présenter la société accueillante en l'occurrence la SCHS ainsi que les différentes étapes de la production de ciments.

I.1 Présentation de la SCHS

I.1.1 Historique

La société des ciments de Hadjar-Soud (SCHS) est une filiale du groupe GICA de capital social de 1 550 000.000 DA, à partir du 01 février 2008 a rentré en partenariat avec le partenaire social Italien BUZZI-UNICEM d'un pourcentage de 35%, le groupe GICA est majoritaire de 65 %. La cimenterie qui est opérationnelle depuis 1973 intègre dans sa globalité le processus de production du ciment : Gisements de matières premières – Transport – Production de clinker et ciment – Stockage - Expédition.

La cimenterie est constituée de deux lignes de fabrication avec une capacité contractuelle de production de 900 000 tonnes :

1ère Ligne : date du démarrage 1973, capacité 1250T/J de Clinker.

2ème Ligne : date du démarrage 1975 (Adjonction d'un précalcinateur en 1993 pour porter la capacité à 1800t/j de clinker).

La cimenterie de Hadjar soud exploite 02 carrières, dénommées la carrière calcaire de Djebel Safia et la carrière d'Argile de Oued el kebir. Celles-ci constituent les principales réserves en matières premières de la cimenterie de Hadjar soud.

I.1.2 Localisation

La cimenterie de Hadjar Soud est située sur l'axe de la route N°44 reliant ANNABA-CONSTANTINE et SKIKDA, soit à 50km d'ANNABA et 45km de Skikda. La cimenterie fait partie de la commune de Bekkouche Lakhdar Daira de Ben Azzouz Wilaya de Skikda. La superficie de l'assiette du terrain de la cimenterie est de 29 ha 52a 40ca. Elle longe la ligne du chemin de fer à laquelle elle est raccordée par un tronçon de voie interne. Le climat de la région est subtropical caractérisé par un hiver pluvieux et un été chaud.

I.2 Processus et étapes de fabrication du ciment

I.2.1 Les constituants du ciment

La fabrication du ciment exige la combinaison entre les matières premières nécessaires notamment, le calcaire, l'argile, le sable, le minerai de fer. Ces différentes matières premières sont broyées à l'aide d'un concasseur et sont transportées vers la cimenterie. L'homogénéisation de ce premier mélange se fait dans un broyeur à boulet pour être broyées et séchées. Il est ensuite envoyé vers un four rotatif où il est chauffé à 1450°C à fin d'obtenir le clinker. Les granulés de clinker sont introduits dans le broyeur à boulet avec des ajouts (gypse, tuf) où ils sont broyés de nouveau et d'une manière très fine en vue de donner le produit final qui est le ciment.



Figure I.1 : Les matières premières pour la fabrication du ciment [1].

I.2.2 Processus de fabrication du ciment

I.1. Avant d'arriver au produit fini, un mélange de matières premières va passer par différentes phases durant lesquelles il va subir une transformation chimique et cristalline importante. Le processus de la fabrication et de l'expédition du ciment comprend cinq zones principales qui peuvent être résumées dans ce qui suit :

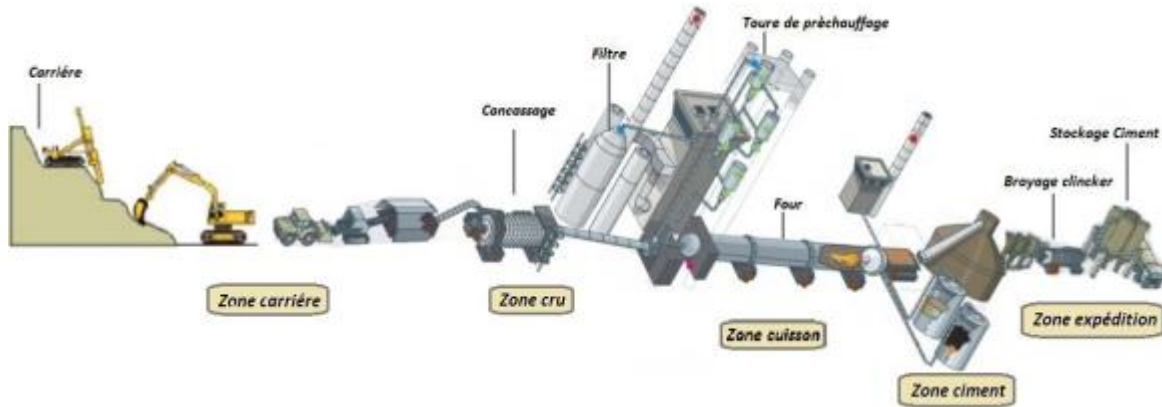


Figure I.2 : La ligne de production du ciment [1].

I.2.2.1 Zone de carrière

Les matières premières (calcaire, Argile) qui entrent dans le cadre de l'opération fabrication du ciment sont extraites des gisements de carrières (à ciel ouvert), et cela en passant par deux étapes :

- **L'extraction des matières premières :**

Les calcaires sont des roches sédimentaires, tout comme les grès ou les gypses, facilement solubles dans l'eau, composée majoritairement de carbonate de calcium CaCO_3 mais aussi de carbonate de magnésium MgCO_3 .

La carrière de calcaire est située à Djabel Safia (Daire de Benazzouz) à une distance de 8 km de l'usine, reliant la cimenterie par des transporteurs. Elle s'étale sur une superficie de 162 ha, les réserves géologiques exploitables sont estimées à plus de 150 millions de tonnes, dont sa qualité est caractérisée par un calcaire pur et homogène.



Figure I.3 : Transport et décharge de calcaire et argile.

- **Concassage :**

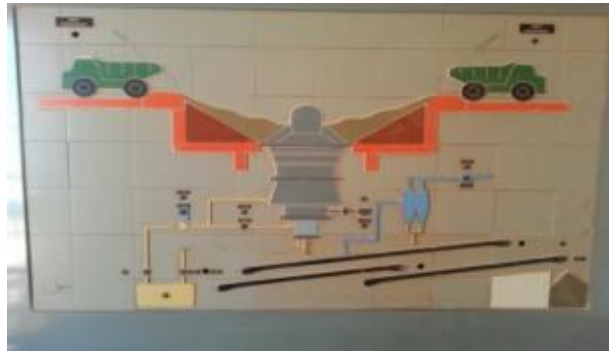


Figure I.4 : Schéma représentatif pour la manière de charger le concasseur giratoire par camions afin de concasser la matière première 'calcaire'.

Le produit concassée ensuite transporté à travers un crible, les non passant sont recyclés vers un concasseur à poisson d'une capacité de 350 tonne/heure, les passants ou tamisât de granulométrie entre 0 mm à 250 mm sont acheminé vers l'usine au moyen d'un convoyeur à bande d'une longueur de 4500 mètres avec un débit nominal de 300 tonnes/heure, le produit ainsi transporté est versé sur un tablier métallique puis a son tour sur un autre convoyeur d'une longueur de 2500 mètre.

La matière concassée est déversée à l'aide d'un stocker dans deux halls de stockage couvert (ligne 1 et ligne 2) d'une capacité de 10000 tonnes chacun.



Figure I.5 : Deux photos représentatives d'un convoyeur à bande.

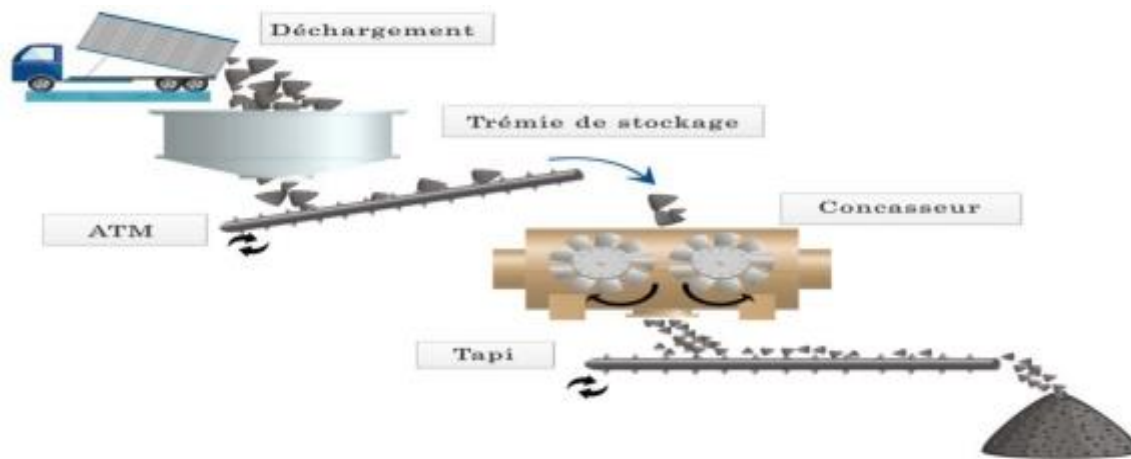


Figure I.6 : Schéma explicatif le déchargement et le concassage [1].

I.2.2.2 Zone crue

La zone crue reçoit les matières premières concassées en amont pour les transformer en farine, elle est destinée à l'alimentation du four.

a. La pré-homogénéisation

En général, deux constituants sont utilisés pour la préparation du cru à savoir le calcaire et l'argile. Après le concassage de ces deux constituants de base, on obtient une granulométrie inférieure à 25 mm. Ensuite, les deux composants sont acheminés vers l'usine par des transporteurs couverts, puis les matières premières sont stockées dans deux halls de pré homogénéisation.

- **Hall calcaire**

Le gratteur portique (à palettes) sert à gratter le calcaire en se déplaçant en translation de tas en tas et jette la matière sur le tapis pour la transporter à la trémie calcaire.

- **Hall ajouts**

Il existe deux gratteurs semi portiques (à palettes) qui servent à gratter les ajouts (argile, sable, fer), il déverse les produits sur les bandes transporteuses jusqu'aux trémies. Il existe 4 trémies (calcaire, fer, argile, sable), le dosage de ces différents constituants du ciment est comme suit :

Tableau 01 : Composition du cru à Hadjar Soud.

Matières premières	calcaire	Argile	Sable	Minerai de fer
Quantités en % (environ)	75	20	3	2

Le produit est acheminé par le transporteur (tapis) vers le broyeur à marteau qui sert à concasser la matière.

b. Pré-broyage et séchage (APS)

L'intérêt de l'Atelier de Pré-broyage et Séchage (APS) est la diminution du taux d'humidité des matières, surtout celui du calcaire et de l'argile (de 10% jusqu'à 7%), et ce grâce au « circuit gaz », qui permet de refouler l'air chaud du four dans la tour de conditionnement ainsi que le concasseur, de manière à chauffer la matière afin qu'elle puisse être broyée.

L'exception du sable, qui est versé directement dans le broyeur sans passer par l'APS, les trois autres matières sont versées par le biais des doseurs sur un tapis menant vers les trémies du concasseur à marteaux.

Le mélange est aspiré par des ventilateurs à air chaud vers le séparateur électrostatique qui a pour rôle de séparer la matière de différentes granulométries :

- ✓ Les grosses particules de refus sont dirigées vers le broyeur à boulets.
- ✓ Les fines particules sont envoyées vers le stockage (silos d'homogénéisation).

c. Broyage cru

Toutes les grosses particules de refus issues du séparateur statique, en plus du sable, passent dans le broyeur à boulets. L'élévateur à godets transporte la matière broyée vers le séparateur dynamique où le produit tourne à vitesse continue sur un plateau dispersé, les grosses particules (rejet) tombent sur l'Aéroglesseur et redirigées vers le broyeur à boulets pour être broyées de nouveau, tandis que, les petites particules sont envoyées vers les silos de stockage.

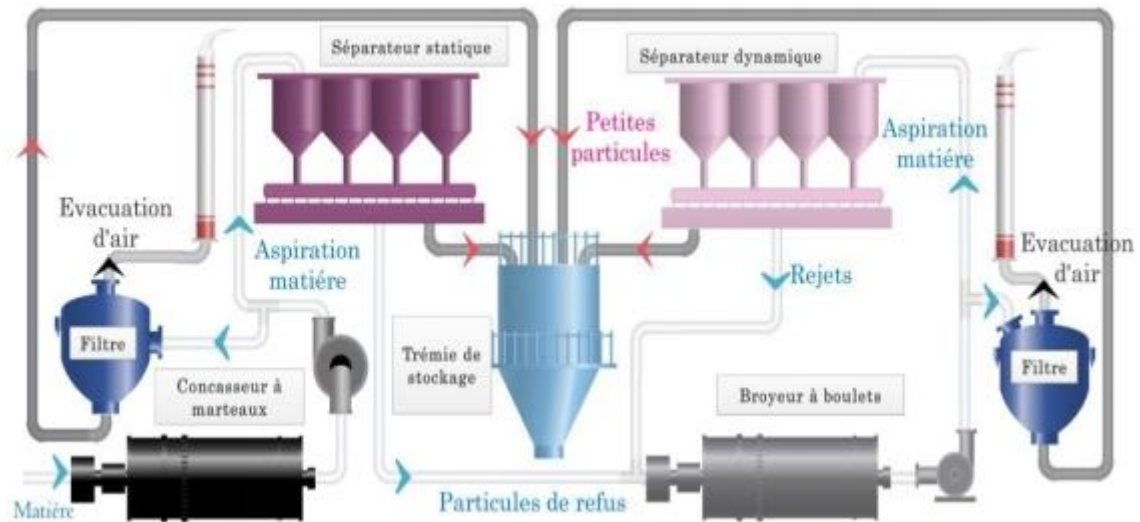


Figure I.7 : Schéma explicatif de l'APS et le broyage cru [1].

d. Homogénéisation

Le produit sera mélangé dans les silos H1, H2 pour être prêt au stockage. La capacité de stockage de chaque silo est de 10000 T. Chaque silo est équipé de deux sorties latérales pouvant assurer la totalité du débit farines vers le four.



Figure I.8 : Photos représentatives d'un silo de l'intérieur et la répartition des aéroglisteurs au sein de ce dernier.

I.2.2.3 Zone cuisson

Au cours du cycle de fabrication du ciment, la zone cuisson reçoit la farine en amont pour la transformer en clinker en aval, cela ne se fait qu'en passant par plusieurs étapes.

a) Préchauffage

Le préchauffage commence par l'évaporation de l'eau et la décarbonatation partielle du mélange cru avant son entrée dans le four. Il se déroule dans une série d'échangeurs à cyclones, chauffant progressivement la farine. La matière, déversée dans la tour par un élévateur, échange de la chaleur avec les gaz chauds aspirés du four. Elle passe à travers quatre cyclones, atteignant 90°C, et subit une pré-calcination dans une boîte à fumée avant le four, libérant le dioxyde de carbone et produisant la chaux vive nécessaire à la fabrication du clinker.

b) Le four rotatif

Il est en acier (avec revêtement intérieur réfractaire) de 50 à 90m de long, de 4 à 5m de diamètre, légèrement incliné (environ 3°) et tournant de 1 à 3 tours/min.

A Hadjar Soud, le four a 70m de longueur ; 4.5m de diamètre et tourne à une vitesse maximale de 2 tours/min. De l'entrée à la sortie du four, la matière passe par 5 zones caractérisées par les différentes températures.

1. Zone1 : De 800°C à 900°C :

Zone de décarbonatation partielle (1)



2. Zone2 : De 900°C à 1000°C :

Zone de décarbonatation totale (2)



3. Zone3 : De 1250°C à 1280°C :

Zone de transition : phase liquide par l'alumine, le fer avec la chaux (Aptitude au croutage) et la formation de C_2S .



Figure I.9 : Le four rotatif.

4. Zone 4 : De 1300°C à 1450°C :

Zone de cuisson : toute la chaux se combine avec la silice pour donner les silicates bicalcique (C_2S) et tricalcique (C_3S) c'est les éléments principaux du ciment.

5. Zone 5 : De 1450°C à 1250°C : Zone de sortie (Refroidissement).

c) Le refroidissement

Le clinker est refroidi dans des différents types de refroidisseur en citant : le refroidisseur à grilles, ballonnets et rotatif. Dans le cas de la cimenterie de Hadjar Soud le clinker est refroidi par des refroidisseurs à grilles. Le clinker va avancer à l'intérieur de refroidisseur grâce à coups répétés des grilles sur lesquelles ce dernier repose, à travers des grilles, de puissants ventilateurs vont souffler sous le clinker pour le refroidir à environ 100°C (cette opération s'appelle : la trempe).



Figure I.10 : Le refroidisseur du clinker.

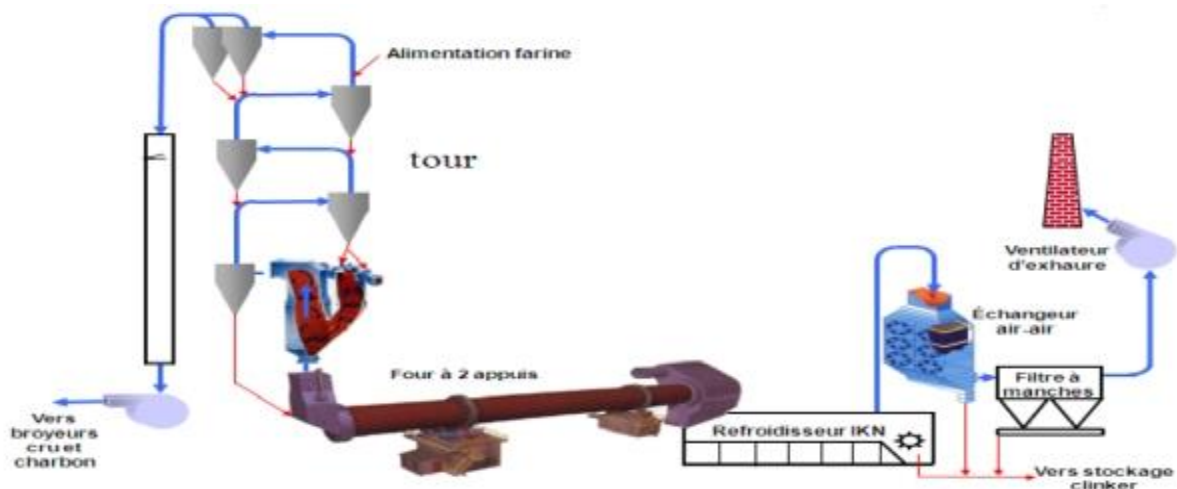


Figure I.11 : Schéma montrant les étapes de cuisson [1].

I.2.2.4 Zone ciment

Le clinker est broyé avec 3 à 5 % de gypse pour réguler la prise du ciment, généralement dans un broyeur à boulets. Ce cylindre en rotation, garni de boulets d'acier, permet d'obtenir le ciment Portland. À Hadjar Soud, les broyeurs comportent deux compartiments : le premier avec des boulets de 50 à 90 mm, le second de 20 à 50 mm, avec un débit de 120 t/h.

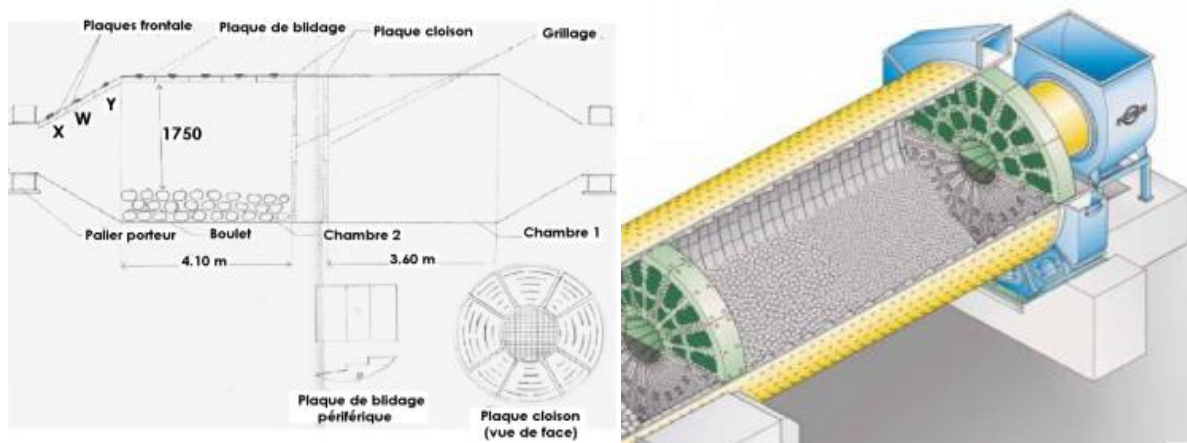


Figure I.12 : Les caractéristiques du Broyeur à boulets continu.

- **Les ajouts du ciment :**

- a. Le laitier :

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit hydraulique de l'industrie sidérurgique, obtenu par refroidissement rapide des minéraux restants après l'extraction du fer. Sa porosité, influencée par le type de refroidissement, détermine ses propriétés physiques et mécaniques.

- b. Pouzzolane naturelles (Z) :

Les pouzzolanes naturelles utilisées pour la fabrication du ciment sont :

- Des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition appropriée.
- Des argiles et des schistes activés thermiquement doivent leur nom aux cendres volcaniques de la région de Pouzzoles, en Italie, qui étaient utilisées par les romains pour la fabrication de ciment.

c. Cendres volantes :

Elles proviennent du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques alimentées au charbon. Ces derniers se résument en deux catégories dont :

- Les cendres volantes siliceuses qui ont des propriétés pouzzolaniques.
- Les cendres volantes calciques qui ont des propriétés hydrauliques et, parfois, pouzzolaniques.

d. Schistes calcinés :

Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800°C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.

e. Fumée de silice :

Les fumées de silice sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques et très faible diamètre (de l'ordre de 0.1 µm). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principale, elles doivent comporter au moins 85% (en masse) de silice amorphe et avoir une surface massique supérieure à 15 m²/g.

f. Tufs :

Roche de densité de 1.1 formée par l'accumulation de débris (généralement des cendres) éjectés lors d'explosion volcanique.

I.2.2.5 Zone expédition

Le processus de fabrication terminé, le ciment est stocké dans des silos où il subira un contrôle avant 48 heures, puis ensaché dans des sacs de 50 kg à destination du commerce ou livré aux utilisateurs en vrac, dans des véhicules spéciaux.



Figure I.13 : Ensacheuse.



Figure I.14 : La livraison du ciment en sacs.



Figure I.15 : La livraison du ciment en vrac.

I.3 Les activités réalisées durant le stage

Tableau 02 : Les activités réalisées.

Jour	Activité	Description
1	Accueil et intégration	Rencontre avec l'équipe, visite des locaux, formation sécurité, explication des procédures internes.
2	Découverte du processus de production	Observation du cycle complet de fabrication du ciment et des équipements associés.
3	Lecture de plans mécaniques	Analyse des schémas techniques et compréhension du fonctionnement des machines.
4	Préparation des outils de maintenance	Inventaire et organisation de l'atelier, vérification des outils nécessaires aux interventions.
5	Intervention sur le broyeur	Nettoyage, vérification des fixations, graissage, mesure d'usure sur les paliers et organes de rotation.
6	Diagnostic d'une panne sur convoyeur	Recherche de la cause d'un arrêt de production, tests, proposition de solutions.
7	Révision des ventilateurs et compresseurs	Démontage, nettoyage, graissage, contrôle d'usure des paliers et équilibrage mécanique des rotors.
8	Maintenance des pompes et circuits hydrauliques	Inspection, démontage de pompes, vérification des joints, clapets, et réparation des fuites sur les circuits hydrauliques.
9	Intervention sur le refroidisseur de clinker	Observation du fonctionnement mécanique, inspection des grilles, chaînes de transmission, et contrôle de l'usure.
10	Suivi de la maintenance préventive	Intervention planifiée : lubrification, changement de filtre, contrôle de vibration.
11	Réparation d'un arbre cisailé pour	Changement des paliers et roulements,

	tambour de contrainte dans un tour d'angle	Emplacement du tambour, Vérification du jeu des roulements.
12	Réparation des manches d'un accouplement FLEXACIER	Changement des ressorts et vérification du graissage et le jeu des roulements de la poulie motrice dans le concasseur giratoire.
13	Analyse des incidents mécaniques passés	Lecture des rapports de panne, analyse des causes répétitives, participation à des réunions de retour d'expérience.
14	Mise à jour des dossiers techniques	Organisation de la documentation, saisie des interventions dans le logiciel GMAO (Gestion de maintenance assistée par ordinateur).
15	Rédaction du rapport de stage et retour d'expérience	Évaluation finale, échanges avec les encadrants, et rédaction du rapport de stage incluant les activités, compétences acquises et suggestions.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'environnement et le processus de fabrication et de production du ciment au sein de la société du ciment de la Hadjar-Soud (SCHS).

Ce faisant, il a été constaté que l'opération de fabrication du ciment passe par des différentes zones allant de l'extraction de la matière première jusqu'à l'expédition de la matière finale en l'occurrence le ciment.

Chapitre II :

Etat de la maintenance à la cimenterie

Introduction

La maintenance industrielle constitue un pilier essentiel pour assurer la continuité de production dans les industries lourdes comme la cimenterie. À la cimenterie de Hadjar Soud, filiale du Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA), les enjeux liés à la maintenance sont cruciaux compte tenu de la complexité des équipements et du rythme de production soutenu. Ce chapitre présente un état détaillé de la maintenance, son organisation, ses principales activités, ainsi que les difficultés rencontrées.

II.1 Organisation du service maintenance

II.1.1 Structure organisationnelle

Le service maintenance de la SCHS est dirigé par un Directeur de la Maintenance, placé sous l'autorité du Directeur Général. Ce dernier est responsable de la coordination de toutes les activités de maintenance au sein de l'usine. Sous sa direction, plusieurs départements spécialisés sont chargés de la maintenance des différentes installations de la cimenterie :

- **Maintenance mécanique** : responsable de l'entretien des équipements tels que les broyeurs, les convoyeurs, les élévateurs et les fours.
- **Maintenance électrique** : s'occupe des systèmes électriques, des moteurs, des tableaux électriques et des systèmes de contrôle.
- **Maintenance instrumentale et automatisme** : gère les instruments de mesure, les capteurs et les systèmes automatisés de contrôle.
- **Maintenance des installations thermiques** : assure l'entretien des équipements liés à la production de chaleur, tels que les chaudières et les échangeurs thermiques.

Chaque département est dirigé par un chef de service, qui supervise une équipe de techniciens spécialisés [2].

II.1.2 Planification et exécution des interventions

Les interventions de maintenance sont planifiées selon un calendrier annuel, intégrant des arrêts programmés pour les travaux de maintenance préventive. Ces arrêts permettent de réaliser des travaux de maintenance préventive et de préparer les équipements pour les périodes de production intensive. Lors de ces arrêts, des équipes internes collaborent pour réaliser les opérations nécessaires. Cette approche assure une expertise technique de haut niveau et une efficacité accrue dans la réalisation des travaux.

II.1.3 Collaboration avec des prestataires externes

Pour certaines interventions spécifiques, la cimenterie fait appel à des prestataires externes spécialisés. Par exemple, la société Indusnet, spécialisée dans le nettoyage et la maintenance industrielle, intervient pour l'entretien des équipements tels que les échangeurs thermiques, les réservoirs et les canalisations. Cette collaboration permet de bénéficier de compétences techniques pointues et d'optimiser les coûts d'entretien.

II.2 Activités principales de maintenance

Tableau 03 : Les activités principales de maintenance.

<i>Activité de maintenance</i>	<i>Description</i>	<i>Exemples concrets à la cimenterie de Hadjar Soud</i>
Maintenance préventive	Entretien périodique pour éviter les pannes	<ul style="list-style-type: none"> - Graissage hebdomadaire des roulements du broyeur cru. - Vérification mensuelle des fixations du four rotatif. - Inspection visuelle des courroies de convoyeurs.
Maintenance corrective	Intervention après panne ou dysfonctionnement	<ul style="list-style-type: none"> - Remplacement d'un moteur grillé sur le ventilateur du refroidisseur à clinker. - Réparation d'un vérin hydraulique de silo bloqué. - Changement d'un capteur de niveau HS.
Maintenance prédictive	Surveillance continue pour anticiper les défaillances	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse vibratoire du broyeur à boulets pour détecter un défaut de roulement. - Analyse d'huile d'un réducteur du four.
Maintenance conditionnelle	Intervention selon l'état réel d'un composant	<ul style="list-style-type: none"> - Remplacement de segments de bande transporteuse si usure mesurée > 80%.
Nettoyage technique / industriel	Nettoyage des zones ou équipements sensibles	<ul style="list-style-type: none"> - Nettoyage des échangeurs thermiques par hydro décapage.

		<ul style="list-style-type: none"> - Dégagement du circuit pneumatique de ciment après colmatage. - Aspiration des poussières dans les silos.
Gestion des pièces de rechange	Approvisionnement et stockage pour éviter les arrêts prolongés	<ul style="list-style-type: none"> - Stock tampon de moteurs standard pour les convoyeurs. - Base de données des pièces critiques (paliers, courroies, capteurs). - Révision annuelle du stock par taux de rotation.
Formation et sécurité	Amélioration continue des compétences et respect des normes	<ul style="list-style-type: none"> - Formation sur le diagnostic des moteurs électriques. - Ateliers sur la consignation LOTO.
Suivi et amélioration continue	Analyse des performances et retour d'expérience	<ul style="list-style-type: none"> - Rapport mensuel des temps d'arrêt par zone. - Réunion hebdomadaire de retour d'expérience (REX) entre techniciens.

II.3 Difficultés rencontrées

La cimenterie fait face à de nombreuses contraintes qui limitent l'efficacité de la maintenance [3]:

a. Problèmes techniques

- Ancienneté de certains équipements sans modernisation.
- Non-disponibilité des pièces de rechange critiques sur site.

b. Problèmes organisationnels

- Faible niveau de coordination entre les équipes de production et de maintenance.
- Retards dans la prise de décision et la planification.

c. Ressources humaines

- Manque de formation continue sur les nouvelles technologies.
- Sous-effectif qualifié, en particulier dans l'automatisme et l'instrumentation.

d. Facteurs externes

- Retards d'approvisionnement (notamment importations).
- Impact des litiges administratifs.

II.4 Perspectives d'amélioration

Pour remédier aux problèmes actuels, plusieurs actions peuvent être envisagées :

- Mise en œuvre d'une politique de maintenance prévisionnelle basée sur l'analyse de données.
- Recrutement de techniciens spécialisés et formations ciblées.
- Renforcement des partenariats avec des fournisseurs locaux pour la fabrication de pièces sur mesure.

II.5 Evaluation de la maintenance

Nous avons conçu un questionnaire pour évaluer le degré de maturité de la maintenance dans la cimenterie. Il est composé de plusieurs axes. Nous l'avons renseigné en présence de plusieurs mainteniciens.

II.5.1 L'entreprise et la maintenance

1. Quelle est approximativement –à votre avis- l'efficacité de votre service maintenance [en %] ? **40 %**
2. Quel est le rapport (Effectif maintenance/ Effectif entreprise) ? **30/24 %**
3. Pour des exigences de disponibilité accrues des équipements, qu'est ce qui a tendance à augmenter dans votre service ? [cochez une case]
 - a. L'effectif maintenance :oui ()....non (**X**).... j'ignore ()
 - b. Le niveau de qualification :oui ()....non (**X**).... j'ignore ()
 - c. Les moyens techniques dont on dispose :oui ()....non (**X**).... j'ignore ()

d. Le nombre d'heures supplémentaires :oui (**X**)....non ().... j'ignore ()

II.5.2 Les pannes

1)Oui – Toujours 2) Oui – Quelques fois 3) Non 4) J'ignore

1. Pouvez-vous faire une analyse des pannes sur les équipements de manière globale à partir des informations dont vous disposez ? (1) (2) (3) (4)

En particulier la connaissance des informations suivantes :

- a. La machine concernée (1)
- b. Son implantation (1)
- c. La partie de la machine concernée (2)
- d. Les symptômes observés (1)
- e. Les conséquences sur la production (2)
- f. Les conséquences sur la sécurité (2)
- g. Le jour et l'heure du début de la défaillance (1)
- h. La nature de la défaillance (machine ou pièce) (2)
- i. L'origine de la défaillance (3)
- j. L'agent de maintenance intervenu (1)
- k. Le numéro de la pièce défaillante (3)
- l. Les unités d'usage au moment de la défaillance (4)
- m. La durée d'intervention (2)
- n. Les pièces de rechange utilisées (3)
- o. Le coût de l'intervention (2)

2. En dégagez-vous des indicateurs d'efficacité de la maintenance ? Oui () ...Non (**X**)

Lesquels ?

- 1. Y-a-t-il détermination par machine du :
 - a. MTBFoui ()....non (**X**).... j'ignore ()
 - b. Nombre d'heures d'arrêtoui (**X**)....non ().... j'ignore ()
 - c. Mesure de production perdueoui (**X**)....non ().... j'ignore ()
 - d. Coût de défaillanceoui ()....non (**X**).... j'ignore ()

II.5.3 Les travaux de maintenance

1. Disposez-vous des informations pour évaluer les temps actifs et les temps manqués de maintenance ?.....Oui () Non (X) J'ignore ()
 - a. Le temps de détection de la défaillanceoui ()....non (X).... j'ignore ()
 - b. Le temps saisie de la fonction maintenanceoui ()....non (X).... j'ignore ()
 - c. Le temps effectif sur la machineoui ()....non (X).... j'ignore ()
 - d. Le temps d'attente des pièces de rechangeoui ()....non (X).... j'ignore ()
 - e. Le temps de contrôle pour remise à la fabrication ...oui (X)....non ().... j'ignore ()
2. Connaissez-vous le pourcentage des divers types de travaux ?
 - a. La maintenance correctiveoui (X)....non ().... j'ignore ()
 - b. La maintenance préventive : - Systématique ...oui (X)....non ().... j'ignore ()
- Conditionnelle ...oui ()....non (X).... j'ignore ()
 - c. Les modernisations (rénovation de la reconstruction)...oui ()....non (X).... j'ignore ()
 - d. Les travaux neufsoui ()....non (X).... j'ignore ()
3. Connaissez-vous le pourcentage d'occupation réelle du personnel de maintenance ?
.....oui ()....non (X).... j'ignore ()

Si oui, combien

4. Opérez-vous un enregistrement immédiat des demandes de travaux ?
 - a. Sur des bonsoui (X)....non ().... j'ignore ()
 - b. Sur un planningoui (X)....non ().... j'ignore ()
 - c. Dans un système informatiqueoui ()....non (X).... j'ignore ()
5. Pour des travaux répétitifs ou importants, susceptibles d'être préparés, existe-t-il une gamme des opérations de maintenance ?oui (X)....non ().... j'ignore ()

Si elle existe, comporte-elle informations suivantes :

- a. La machine concernéeoui (X)....non ().... j'ignore ()
- b. Si préventif systématique, la périodicité ou unités d'usage....oui (X)....non ().... j'ignore ()
- c. Si correctif, les causes possibles de défaillance ...oui ()....non (X).... j'ignore ()
- d. Les outils nécessairesoui (X)....non ().... j'ignore ()

II.5.4 La gestion des pièces de rechange

1. Quelle nomenclature de pièce de rechange utilisez-vous :
 - b. Une nomenclature de propre à l'usineoui (X)....non ().... j'ignore ()
 - c. La nomenclature des fabricantsoui (X)....non ().... j'ignore ()
 - d. Une nomenclature spécifiqueoui ()....non (X).... j'ignore ()
2. Vérifie-t-on qu'un article est en nomenclature avant d'en passer commande ?...oui (X)
....non ().... j'ignore ()
3. Pour un type de pièce connaissez-vous :
 - a. Les machines sur lesquelles elle s'appliqueoui (X)....non ().... j'ignore ()
 - b. Les quantités en place pour chaque machineoui (X)....non ().... j'ignore ()
 - c. Les emplacements sur chaque machineoui (X)....non ().... j'ignore ()
 - d. Les références à la documentation de la machine ...oui (X)....non ().... j'ignore ()
 - e. Les autres pièces qui peuvent la remplaceroui ()....non (X).... j'ignore ()
 - f. Si elle est réparable ou nonoui (X)....non ().... j'ignore ()
 - g. Ses caractéristiques techniquesoui ()....non (X).... j'ignore ()
4. Existe-t-il des différences entre le stock réel et le fichier du stock ?oui (X)....non () j'ignore ()
5. Connaissiez-vous le taux de rotation du stock de pièce de rechange ?oui ()....non (X) j'ignore ()
6. Comment déterminez-vous les commandes de pièce de rechange à effectuer :
 - a. Périodiquement par rapport à un budget pour tout le stockoui (X)....non ().... j'ignore ()
 - b. Périodiquement pour une partie su stockoui (X)....non ().... j'ignore ()
 - c. Par seuil d'alerteoui ()....non (X).... j'ignore ()
 - d. Par suite d'inventaireoui (X)....non ().... j'ignore ()
6. Comment calculez-vous la quantité à commander pour chaque article :
 - a. Par point de commandeoui ()....non (X).... j'ignore ()
 - b. Par extrapolation des consommations passées ...oui (X)....non ().... j'ignore ()
 - c. Par analyse des besoins pour les activités de maintenance préventive ...oui (X)....non () j'ignore ()

II.5.5 Budget et Coût

1. Existe-t-il un budget du service maintenance ?oui (X)....non ().... j'ignore ()
2. Peut-il s'analyse :
 - a. Par nature des biens à mainteniroui (X)....non ().... j'ignore ()
 - b. Par ligne de productionoui ()....non (X).... j'ignore ()
 - c. Par nature des interventionsoui ()....non (X).... j'ignore ()
 - d. Par structure des coutsoui ()....non (X).... j'ignore ()
3. A votre avis, le budget maintenance est-il adapté et optimisé par rapport au plan de production ?oui ()....non (X).... j'ignore ()
4. A votre avis, le suivi d'exécution de ce budget permet-il d'infléchir l'activité et les orientations du service maintenance ?oui (X)....non ().... j'ignore ()

En ce qui concerne :

- a. Le recrutement du personneloui (X)....non ().... j'ignore ()
 - b. L'appel à la co-traitanceoui ()....non (X).... j'ignore ()
 - c. La priorité entre travauxoui (X)....non ().... j'ignore ()
 - d. L'achat des pièces de rechangeoui (X)....non ().... j'ignore ()
5. Y-t-il une analyse systématique du coût de maintenance interne sur un parc de machines ?oui ()....non (X).... j'ignore ()

II.5.6 La politique de maintenance

1. Pouvez-vous expliquer la politique de maintenance de votre entreprise ?oui ()
.....non (X) j'ignore ()

En particulier :

- a. Analyse les points sensibles et les goulots d'étranglement de l'appareil de production (à partir de l'historique d'utilisation des machines : poses, déposes, heures de fonctionnement, production réalisée) ?.....oui ()....non (X).... j'ignore ()
- b. Définir les méthodes de maintenance (corrective, préventive systématique ou conditionnelle) par type ou famille de machines les quantités en place pour chaque machine ?.....oui (X)....non ().... j'ignore ()

- c. Conseiller les acheteurs de l'entreprise et formuler des exigences auprès des fournisseurs (MTBF, arbres de dépannage, gammes de maintenance préventive, qualité de la documentation technique,...) ?...oui ()...non (X)... j'ignore ()
2. Connaissez-vous, pour les machines essentielles de l'entreprise, non seulement les statistiques d'indisponibilité, mais également les parts d'utilisation ou non utilisation de la disponibilité (temps de fonctionnement et temps d'attente) ?.....oui ()non (X)... j'ignore ()
3. Faites-vous des prévisions de coût et de rentabilité pour chaque opération d'amélioration ?oui ()...non (X)... j'ignore ()
4. Comment décidez-vous de remplacer une machine ou un équipement :
 - a. Par comparaison entre un devis de réparation et le prix d'une machine neuveoui (X)...non ()... j'ignore ()
 - b. Par comparaison entre le coût annuel maintenance et le prix d'une machine neuveoui ()...non (X)... j'ignore ()
 - c. Par analyse d'un raccourcissement du MTBFoui ()...non (X)... j'ignore ()
 - d. Par des exigences accrues de disponibilitéoui ()...non (X)... j'ignore ()
 - e. Pour des raisons d'obsolescence technologique ...oui (X)...non ()... j'ignore ()

Utilisez-vous un radio pour prendre une telle décision ? ...oui ()...non (X)... j'ignore ()

5. Les conditions de recours à la contrainte sont-elles formalisées ?oui ()...non (X)... j'ignore ()

Pour des raisons :

- a. De niveaux de maintenance requise :
 - Complexité et qualification du personnel ...oui ()...non (X)... j'ignore ()
 - Matériel de maintenance nécessaire pour équipementsoui ()...non (X)... j'ignore ()
- b. De contraintes de délai et de chargeoui ()...non (X)... j'ignore ()
- c. De flexibilité (souplesse)oui (X)...non ()... j'ignore ()

II.5.6 L'informatique et la maintenance

1. Existe-t-il des moyens informatiques dans l'entreprise ...oui (X)...non ()... j'ignore ()

2. Et des applications informatiques spécifiques à la fonction maintenance ...oui (**X**)
....non ().... j'ignore ()
3. Est-ce qu'il est utile pour vousoui (**X**)....non ().... j'ignore ()
4. Est-ce qu'il est efficaceoui ()....non (**X**).... j'ignore ()
5. Un schéma directeur informatique existe-t-il dans l'entrepriseoui (**X**)....non ()....
j'ignore ()

II.5.7 La normalisation et la maintenance

1. Connaissez-vous les normes de maintenance ?oui ()....non (**X**).... j'ignore ()

En particulier :

- a. De concepts et de terminologieoui ()....non (**X**).... j'ignore ()
- b. Sur les contrats de maintenanceoui ()....non (**X**).... j'ignore ()
- c. Sur les documents d'exploitation et de maintenance ...oui ()...non (**X**)... j'ignore ()
- d. De fiabilité et de maintenabilitéoui ()....non (**X**).... j'ignore ()
- e. Analyses statistiques des défaillancesoui ()....non (**X**).... j'ignore ()

Commentaire

L'analyse du questionnaire renseignées révèle des points forts et également un ensemble de points faibles qu'il est impératif d'étudier afin d'élaborer un plan d'actions correctives. Parmi les points forts, on note :

- La machine concernée.
- Son implantation.
- La partie de la machine concernée.
- Les symptômes observés.
- Les conséquences sur la production.
- Les conséquences sur la sécurité.
- Le jour et l'heure du début de la défaillance.
- ...etc.

Parmi les points à améliorer, il y a lieu de noter principalement :

- L'ignorance des MTBF des machines ce qui engendre des interventions non maîtrisées sur le plan temps.
- Les coûts de maintenance ne sont pas maîtrisés (composantes et calcul).
- Manque de formalisation des calculs des temps actifs et temps de maintenance.
- Le système de maintenance est non informatisé.
- Les pannes ne sont pas analysées donc il s'agit d'une démarche palliative.
- Les stocks de pièces de rechange sont gérés empiriquement. Le seuil d'alerte n'est pas pris en compte.
- L'inexistence d'une politique de maintenance formalisée.
- Absence de l'utilisation des normes de maintenance.
- ...etc.

Conclusion

L'état actuel de la maintenance à la cimenterie de Hadjar Soud reste dominé par une approche corrective, avec de nombreuses difficultés organisationnelles, techniques et humaines. Toutefois, des efforts d'optimisation sont en cours à travers la valorisation des ressources internes et la recherche de solutions structurelles. Une transformation numérique et stratégique du système de maintenance est indispensable pour assurer la pérennité de la production et renforcer la compétitivité de l'entreprise.

Chapitre III :

Description du four rotatif de ciment

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire le four rotatif utilisé dans les cimenteries, car il s'agit d'un élément crucial dans la production du ciment et du thème de notre travail. Nous passerons ensuite en revue tous ces organes qui le composent, ainsi que leurs fonctions et leurs caractéristiques distinctives.

III.1 Description et fonctionnement

Les fours rotatifs des cimenteries permettent la cuisson des matériaux de base pour l'obtention de clinker. Le four est un long cylindre incliné en rotation permanente permettant le déplacement du matériau. Un bruleur chauffe le matériau, et les gaz chauds circulent dans le sens contraire du déplacement du matériau. La virole du four rotatif se compose de plusieurs tronçons de tailles différentes assemblés par soudage et revêtus de briques réfractaires. Chaque tronçon du four a une épaisseur spécifique et les matériaux sont choisis pour résister aux contraintes dues aux charges mécaniques et thermiques appliquées. La température de service à l'intérieur du four dépasse les 1500 °C et croît au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'entrée, elle est contrôlée en permanence à l'extérieure de la virole au moyen d'un appareil de mesure approprié. Grace au revêtement réfractaire, la valeur de référence de la température maximale de la virole métallique est de 350 °C.

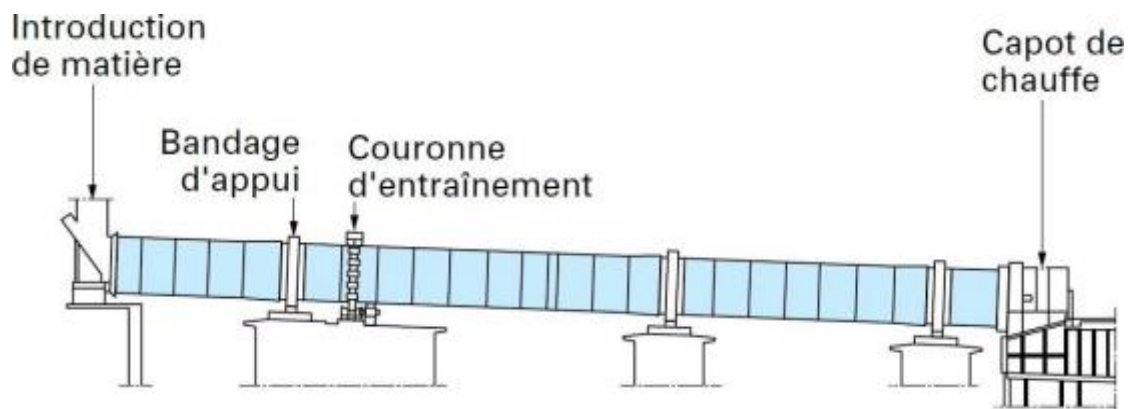


Figure III.1 : Four à 3 appuis.

La matière est introduite par l'amont du four, après être chauffée à 900°C par les gaz chauds du four. En cas de démarrage, la rotation du four et sa pente (3,5%) permet à la matière de se mouvoir vers la sortie du four, à travers laquelle une flamme de 1450°C assure le chauffage du four et la cuisson du clinker. Le four possède trois paliers, sur lesquels il s'appuie par le billet du bandage [4].

Chaque palier est constitué de deux galets cylindriques, et chaque galet est supporté par deux paliers contenant chacun un coussinet. Le four est entraîné en rotation par un moto-réducteur, agissant sur un pignon en grainé avec la couronne d'entraînement. Les fonctions principales du four rotatif sont :

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

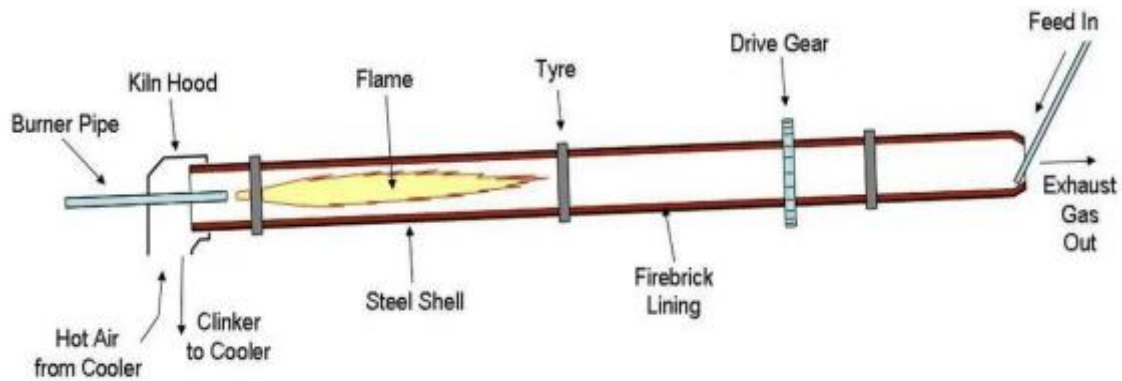


Figure III.2 : Disposition générale d'un four rotatif [5].

Les tableaux suivant représenté les caractéristiques de four de hedjar-asoud :

- 1^{er} ligne :

Tableau 04 : Caractéristiques de four de 1^{ère} ligne.

Usine :	Longueur (m)	Diamètre(m)	Nombre de supports	Vitesse (tr/min)	Production(t/jour)
Hedjar-asoud	4,4	70	3	2	1 500

- 2^{ème} linge :

Tableau 05 : Caractéristiques de four de 2^{ème} linge.

Usine :	Longueur (m)	Diamètre(m)	Nombre de supports	Vitesse (tr/min)	Production(t/jour)
Hedjar-asoud	4,45	70	3	2	1 800

III.2 les différentes zones du four

Le four rotatif est constitué par différentes zones :

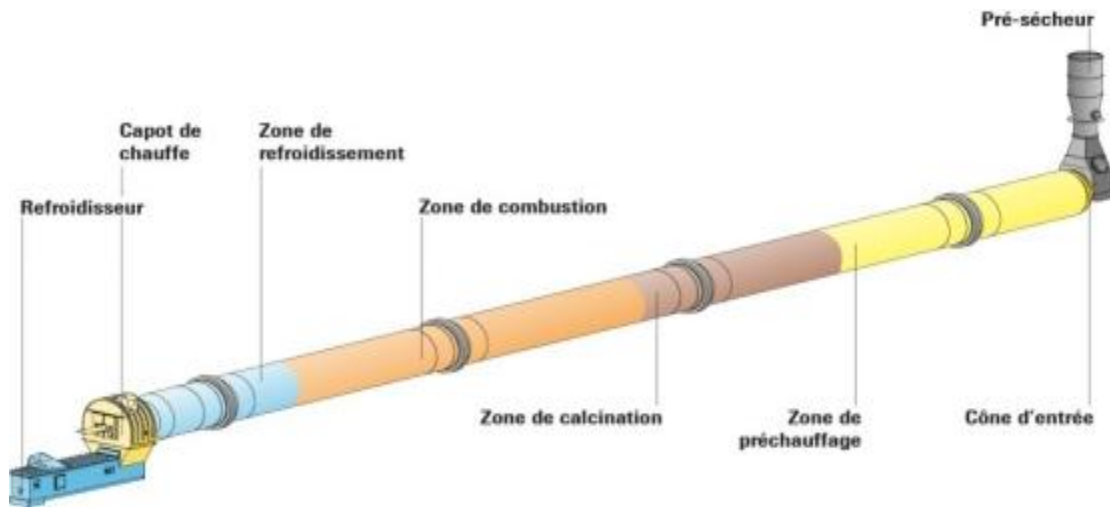


Figure III.3 : Différentes zones du Four.

a. Zone de préchauffage

Cette zone sert au séchage de la matière à cuire à des températures entre 600 et 900°C. Des briques de chamotte présentant une faible conductibilité thermique y sont utilisées [6].

b. Zone de calcination

La calcination (désacidification) de la matière à cuire a lieu dans cette zone. La calcination est effectuée jusqu'à environ 98 % dans cette zone. La température y est d'environ 1100 °C. Les produits doivent présenter des propriétés équilibrées en termes de réfractarité, de résistance à l'abrasion et de faible conductibilité thermique [7].

c. Zone de combustion

Dans la zone de combustion, la calcination complète a lieu à des températures situées entre 1100 et 1450 °C. Étant donné que cette zone est exposée à la sollicitation thermique maximale, des produits à haute réfractarité et à bonne résistance thermochimique y sont mis en œuvre. Les sollicitations dans cette zone peuvent être en contradiction avec l'exigence de conductibilité thermique faible [8].

d. Zone de refroidissement

La matière est cuite dans le four a La température est d'environ 1000 °C [9].

III.3 Les composants du four

a. Le bandage :

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

- ✓ Appui aval : \varnothing extérieur =5250 mm, Largeur =700 mm,
- ✓ Appui central : \varnothing extérieur =5370 mm, Largeur =800 mm,
- ✓ Appui amont : \varnothing extérieur =5250 mm, Largeur =700 mm.

• Rôle du bandage :

Le rôle principal du bandage est de protéger la virole du four de l'usure, de minimiser le frottement entre le four et ses paliers tout en conservant la forme cylindrique de la virole pour éviter les fissurations et la détérioration des briques réfractaires[10].

Le bandage permet aussi de diminuer le flux de chaleur transmis de la virole aux galets supports. Il existe deux types de bandage: le bandage flottant et le bandage cranté.

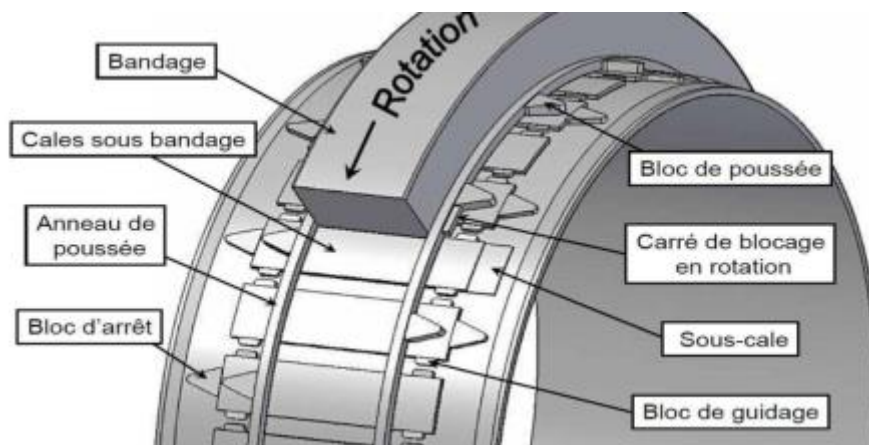


Figure III.4 : Bandage de four rotatif.

a. La virole :

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

Propriétés des tôles : les tôles sont en acier de construction S235 JR G2, de composition : Carbone 0.2%; manganèse 1% ; d'autres composants < 0.01 %.

L'acier utilisé présente une excellente conformation, une excellente soudabilité, mais une mauvaise tenue en corrosion, puisqu'il n'est pas allié en chrome, nickel et molybdène. Les tôles ont une longueur longitudinale d'environ 2000 mm, et leurs sections dépendent de leur emplacement axial.



Figure III.5 : Virole de four cimenterie.

La virole du four doit travailler dans une zone de température modérée inférieure à 450°C, car au-delà de cette température les propriétés mécaniques sont dégradées et présentent le risque de déformation permanente. La durée de vie de la virole est généralement entre 20 ans à 30 ans, mais la mauvaise tenue en corrosion peut entraîner des changements de viroles en quelques années. La virole de sortie du four est plus sollicitée thermiquement et peut conduire à des changements tous les 5 ans [10].

b. Les briques réfractaires :

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

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

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

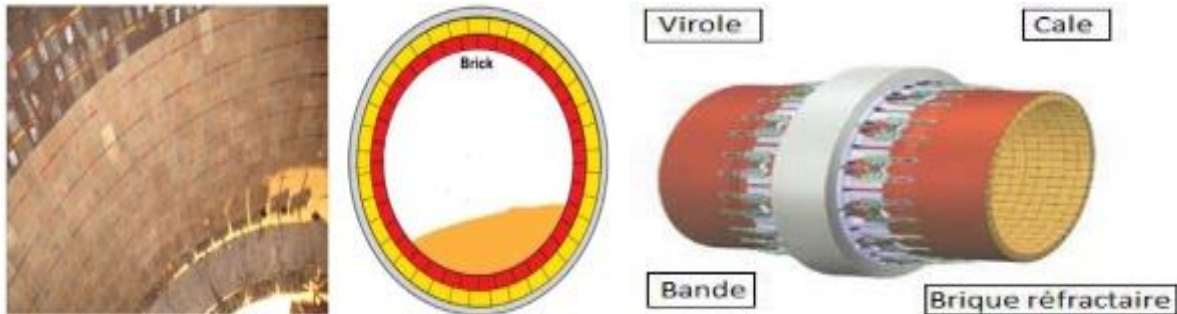


Figure III.6 : Brique réfractaire de four rotatif.

a. Les galets :

Les galets sont des formes cylindriques d'acier pleines, jouant le rôle de support du four. Ils permettent de minimiser le frottement par un faible coefficient de frottement de surface, ils sont de même nature quels bandages avec lesquels ils sont en contact, ce qui permet d'avoir une usure uniforme.

Le galet est composé d'un arbre et d'un corps, l'arbre est assemblé avec le corps avec un ajustement serré, l'assemblage se fait par frettage. Le galet est soutenu par deux palier, sur le quel est interposé un coussin et ou bague de frottement, le contact est constamment lubrifié par bain d'huile, qui est refroidie par un système de refroidissement à eau.

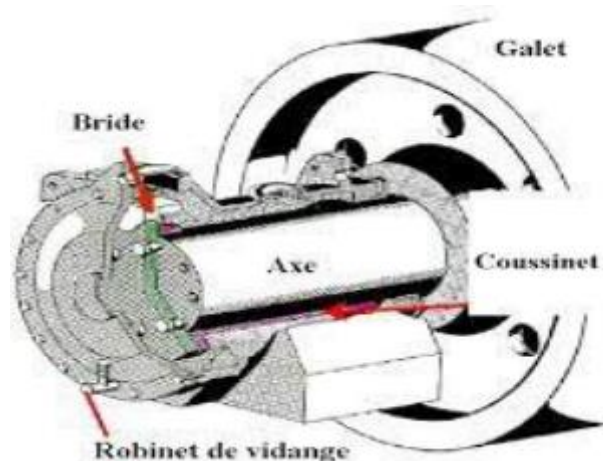


Figure III.7 : Gallet de four.

a. La butée hydraulique :

La butée hydraulique est un ensemble vérin hydraulique et butée, qui a pour but soit de garder la position axiale du four, soit de permettre la translation longitudinale du four. La translation longitudinale du four est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement et une bonne durée de vie des bandages et galets. Le bandage et le galet sont toujours en contact, la translation en continue du bandage par rapport au galet permet de répartir l'usure de surface et donc d'assurer un bon état de surface et un contact optimal du galet/bandage. Le mouvement axial du four est périodique, il est composé : d'un mouvement de montée, assuré principalement par la butée qui est entraînée par le vérin hydraulique, lequel est relié à une centrale hydraulique, sa durée nominale est quatre heures, puis d'un mouvement de descente dont la durée est huit heures.

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



Figure III.8 : Butée hydraulique.

b. Les joints du four:

Le four est équipé de deux joints, un joint amont à l'entrée du four, et un joint aval à sa sortie. Le rôle principal des joints est d'assurer l'étanchéité du four face à l'entrée d'air faux.

b. Les plaques nose-ring:

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

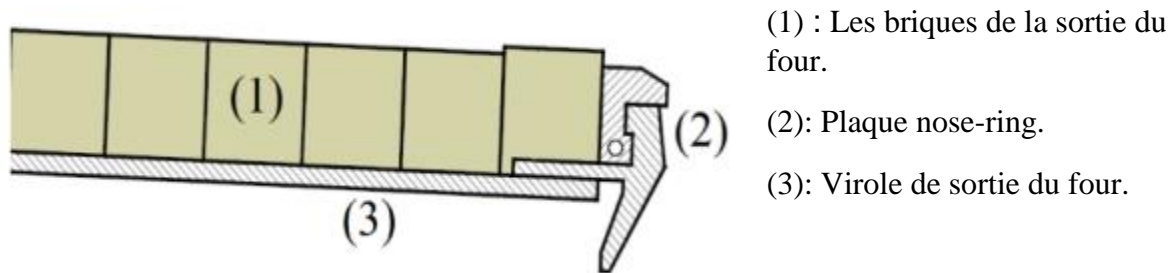


Figure III.9 : Plaque nose-ring.

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

Conclusion

Ce chapitre met en évidence la méthode de la production du ciment, son opération technique, et l'importance du four rotatif dans cette opération, car il est considéré comme le cœur battant dans l'industrie du ciment et la partie la plus importante de cette industrie. Nous avons également montré les parties et les composants les plus importants du four.

Chapitre IV :

Application d'outils au four

Introduction

L'analyse fonctionnelle et l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) sont des outils essentiels pour contribuer à l'optimisation de la fiabilité du four rotatif, cœur du processus de production de clinker en cimenterie. Soumis à des contraintes thermiques, mécaniques et chimiques intenses, cet équipement critique nécessite une approche rigoureuse pour minimiser les arrêts et maximiser la performance. L'analyse fonctionnelle identifie les fonctions principales et secondaires du four, clarifiant ses besoins et interactions. L'AMDEC, quant à elle, recense les défaillances potentielles (usure des réfractaires, désalignements, pannes de combustion), évalue leur gravité, fréquence et détectabilité, et propose des actions préventives. Ensemble, ces méthodes améliorent la fiabilité, réduisent les coûts de maintenance, prolongent la durée de vie du four et répondent aux exigences économiques et environnementales de l'industrie cimentière. Un échéancier d'intervention systématique et conditionnelle sera proposé en fonction de la fiabilité de l'installation.

IV.1 Analyse fonctionnelle

La bête à Corne est souvent utilisée pour mieux comprendre le besoin et définir les contours. Elle est simple, visuelle et clarifie le besoin réel.

- **Bête à cornes :**

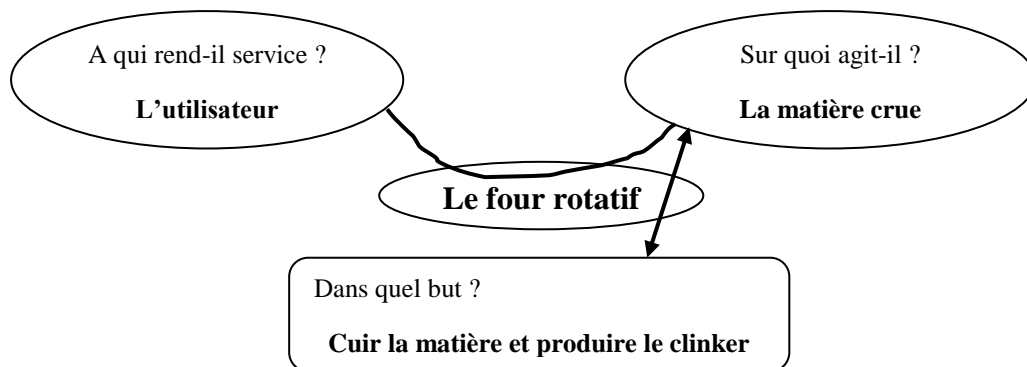


Figure IV.1 : Bête à Cornes.

- **Diagramme Pieuvre :**

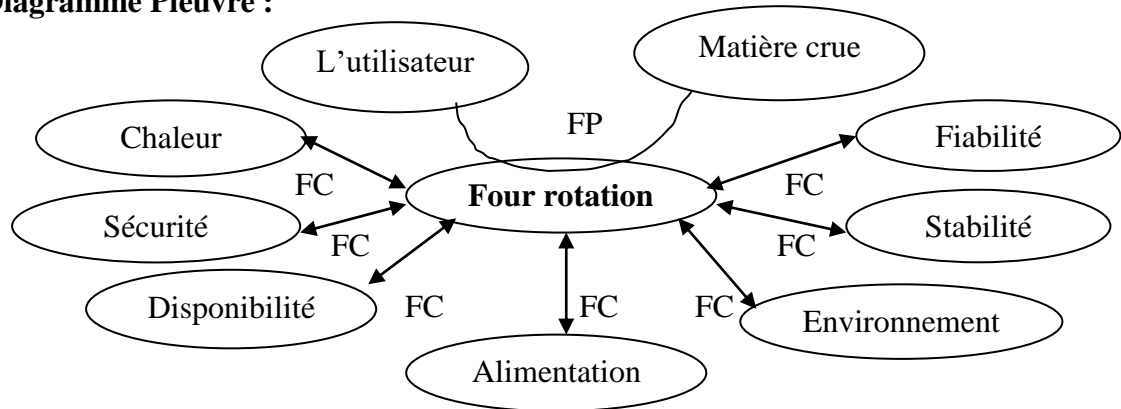


Figure IV.2 : Diagramme Pieuvre.

FP1: Permettre à l'utilisateur de produire le Clinker.

FC1: Avoir une fiabilité satisfaisante.

FC2 : Avoir un four stable en rotation.

FC3 : Minimiser le dégagement de gaz polluant.

FC4 : Entrainer le four par l'énergie électrique.

FC5 : Garantir une disponibilité élevée.

FC6: Permettre un fonctionnement sure.

FC7 : Produire la chaleur par combustion de gaz.

IV.2 Définition de l'AMDEC

L'AMDEC est une méthode d'analyse visant à assurer et à évaluer la fiabilité opérationnelle des machines en contrôlant les dysfonctionnements. Son but ultime est d'atteindre, au coût le plus bas possible, le rendement global maximal des machines de production et des équipements industriels.

IV.3 Démarche pratique de la méthode AMDEC

L'analyse AMDEC nous a conduits à travers trois phases consécutives. L'efficacité d'une analyse AMDEC dépend tout autant de son contenu que de son utilisation. L'étude AMDEC que nous avons menée n'aurait aucune valeur si elle n'était pas suivie par la mise en œuvre effective des actions correctives suggérées par le groupe, assorties d'un suivi régulier. L'analyse peut être étendue grâce à des travaux supplémentaires tels que les calculs de fiabilité et disponibilité, la mise en place de plans d'entretien et d'assistance au diagnostic, etc.

IV.4 Analyse des mécanismes de la défaillance

Cette étape implique l'analyse des raisons et des modalités selon lesquelles les fonctions du broyeur pourraient ne plus être correctement exécutées. Nous identifions de manière complète les mécanismes de défaillance des composants du broyeur.

IV.5 Estimation de la criticité

Cette étape implique l'évaluation de la gravité des pannes de chaque composant, sur la base de divers critères d'attribution distincts. On attribue un niveau (note ou indice) à chaque critère de cotation. On en déduit alors un degré de criticité, facilitant ainsi la priorisation des défaillances et l'identification des points critiques. La détermination de la criticité repose sur l'état présent du broyeur. Dans le tableau AMDEC, les niveaux respectifs des critères de criticité sont exprimés.

✓ *Indice de fréquence F*

Tableau 06 : Les indices de fréquence F.

Valeurs de F	Fréquence d'apparition de la défaillance
1	Défaillance rare : Moins d'une défaillance par ans.
2	Défaillance possible : Moins d'une défaillance par trimestre.
3	Défaillance fréquente : Moins d'une défaillance par semaine.
4	Défaillance très fréquente : Plusieurs défaillances par semaine.

✓ *Indice de gravité G*

Tableau 07 : Les indices de gravité G.

Valeurs de G	Gravité de la défaillance
1	Défaillance mineure aucune dégradation notable du système TI < 30 min.
2	Défaillance moyenne nécessitant une remise en état de courte durée. 30 min < TI < 10 h.
3	Défaillance majeure nécessitant une intervention de longue durée 10 h < TI < 24 h.
4	Défaillance catastrophique très critique nécessitant une longue intervention dommage matériel très important TI > 24h.

✓ *Indice de non-détection D*

Tableau 08 : Les indices de Non-détection D.

Valeurs de D	Non-détection de la défaillance
1	Les dispositions prises assurent une détection totale de la cause initiale ou du mode de défaillance, permettant ainsi d'éviter l'effet le plus grave provoqué par la défaillance pendant la production.
2	Il existe un signe avant-coureur de la défaillance mais il y a risque que ce signe ne soit pas perçu par l'opérateur. La détection est exploitable.
3	La cause et/ou le mode de défaillance sont difficilement décelable sou les éléments de détection sont peu exploitables. La détection est faible.
4	Rien ne permet de détecter la défaillance avant que l'effet ne se produit : il s'agit du cas sans détection.

La criticité s'exprime par leur produit $C = F \times D \times G$

IV.6 Tableau de criticité (cas SCHS)

Nous avons pris une échelle pour la nouvelle ligne de production au niveau de l'usine de Hedjar-Asoud, comme indiquée dans le tableau N°6ci-dessous.

Tableau 09 : Échelle de criticité.

C	Remarque
$1 \leq C < 16$	Ne pas tenir compte.
$16 \leq C < 32$	Mise sous préventive à fréquence faible.
$32 \leq C < 64$	Mise sous préventive à fréquence élevée.

IV.7 Décomposition du système

L'AMDEC est une méthode de réflexion créative qui repose essentiellement sur la décomposition fonctionnelle du système en éléments simples jusqu'au niveau des composants les plus élémentaires. D'après l'orientation de l'équipe d'usine HADJAR-ASOUD et chef département du service méthode et monsieur l'encadreur nous avons fait le schéma présenter dans la figure IV.3, qui nous ont aidés dans notre travail. On a décomposé le système en sous-systèmes. Chaque sous-système est décomposé jusqu'aux organes les plus élémentaires.

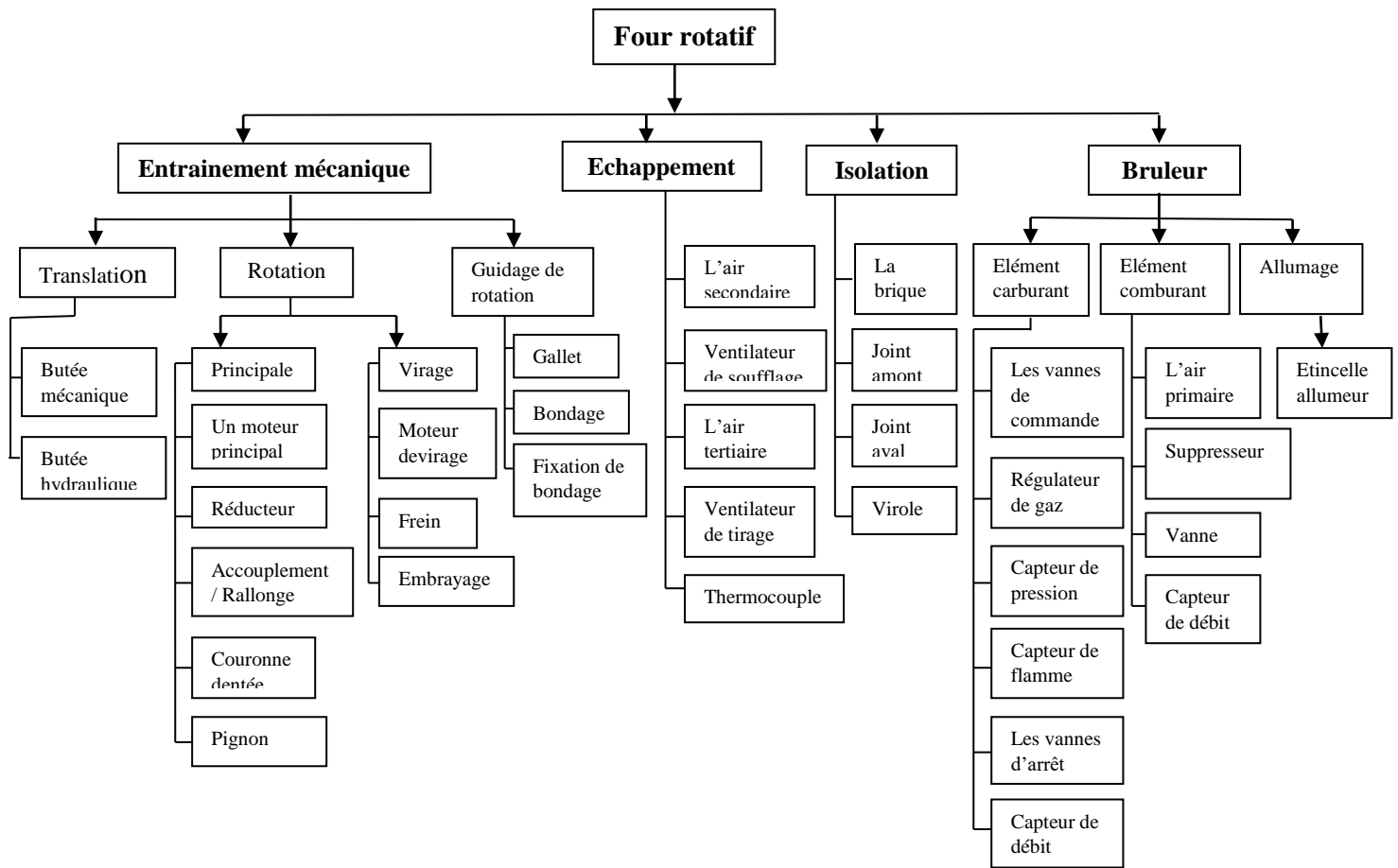


Figure IV.3 : Décomposition fonctionnel du four.

IV.8 Les tableaux d'AMDEC

Suite à l'établissement de la décomposition structurelle et fonctionnelle du système du four rotatif, nous allons maintenant appliquer l'AMDEC à l'élément le plus sollicité aux défaillances à savoir entrainement en translation. Ainsi l'analyse nous permettra de trouver les pannes et défaillances critiques, les analyser, puis proposer des solutions à mettre en place, en se basant sur la documentation technique du four délivré par le constructeur.

IV.8.1 Entraînement mécanique

IV.8.1.1 Monte décente :

Tableau 10 : Grille AMDEC d'Entraînement mécanique (Entraînement en translation).

Date de l'analyse: 28/04/2025	AMDEC MACHINE – ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITÉ					Page : 1/3			
	Système: Four rotatif		Sous-système 1:Entraînement en translation						
Élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Détection	Criticité			
						F	D	G	C
Butée mécanique	Limiter la course de la translation	- Blocage	- Détérioration de roulement - Absence graissage	Translation excessive	- Visuel	2	4	2	16
Butée hydraulique	Favoriser la translation	- Echauffement - Blocage - Fuit de vérin Hydraulique	- Manque de graissage - Détérioration des roulements - Détérioration kit de joint	Changement de la position du four	- Visuel	3	3	4	36

IV.8.1.2 Rotation (principale) :

Tableau 11 : Grille AMDEC d'Entrainement mécanique (élément Rotation (principale)).

Date de l'analyse: 28/04/2025	AMDEC MACHINE – ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITÉ					Page :2/3			
	Système: Four rotatif		Sous-système 1:rotation (principale)						
Élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Détection	Criticité			
						F	D	G	C
Un moteur Principal	-Entrainement réducteur	- Echauffement - Variation de puissance	-Mauvaise isolation statorique -Dur Mécanique	-Vitesse de rotation du four faible -Diminution de production -Risque de colmatage.	- Visuel (sale de contrôle)	2	2	4	16
Réducteur	-Réduction vitesse de rotation -Entrainement pignon	- Echauffement -vibration Fuite d’huile	- Usure pignon -Détérioration roulement -Mauvais graissage	- Arrêt de production	- Visuel (Analyse vibratoire)	3	3	4	36
Accouplement /rallonge	-Entrainement	- Vibration - cassure	- Usure tampon - mauvais Alignement	- Arrêt de production	-Visuel	3	3	4	36
Couronne Dentée	-L’entraînement de la virole	- Vibration - Cassure - Desserrage boulon fixation	- Mauvais graissage - Cassure denture - Alignement de four	-Arrêt du four Perte de production	-Visuel	2	1	4	8
Pignon	-Entrainement couronne denté	-Vibration -Cassure -Usure	- Mauvais graissage -Détérioration roulement -Cassure des dentures	- Perte de production	-Visuel	2	4	4	32

IV.8.1.3 Rotation (virage) :

Tableau 12 : Grille AMDEC d'Entrainement mécanique (élément Rotation(Virage)).

Date de l'analyse: 29/04/2025	AMDEC MACHINE – ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITÉ					Page :3/3			
	Système: Four rotatif		Sous-système 1:Rotation (virage)						
Élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Détection	Criticité			
						F	D	G	C
Moteur de Virage	-Entrainement de virage	- Echauffement - Variation de Puissance	- Mauvaise isolation statorique - Dur mécanique	Risque déformation de virole	- Visuel	2	2	2	8
Embrayage	-Couplage de rotation dans un seul sens	- Blocage	- Alignement - Desserrage fixation	Risque déformation de virole	- Visuel	4	3	4	48
Frein	- Freinage et positionnement de virole	-Usure de la Mâchoire	-Durée de vie	Difficulté de positionnement de virole	- Visuel	2	3	2	12

IV.8.1.4 Guidage de rotation :

Tableau 13 : Grille AMDEC de guidage de rotation.

Date de l'analyse: 29/04/2025	AMDEC MACHINE – ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITÉ					Page :3/3			
	Système: Four rotatif		Sous-système 1:Guidage de rotation						
Élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Détection	Criticité			
						F	D	G	C
Gallet	-Assise de virole -Favorisé la rotation	- Echauffement des paliers - Usure	- Lubrification insuffisante d’huile et l’eau - Empêche-la monte décente - Alignement axe de four et axe gallet	Pert de production (diminution de vitesse de rotation four)	- Visuel	4	2	4	32
Bandage	-Assure entrainement de virole	- Maillage - Glissement élève - Voilage	- Alignement axe de four et axe gallet -Usure des cale sous bandage (jeu de sommé)	Chute des briques	- Visuel	3	4	2	24

IV.9 Interprétation des résultats de l'analyse AMDEC

Ce travail a démontré la possibilité de mettre en œuvre une méthode d'analyse dysfonctionnelle. Cette approche repose sur l'analyse AMDEC. L'application d'une telle méthode prouve son efficacité dans la diminution des défaillances. En effet, elle permet de :

- Préciser les exigences de sûreté de fonctionnement.
- Identifier les fonctions critiques du système.
- Établir la politique de maintenance pour le système et ses éléments

La criticité des conséquences des différentes fonctions critiques du four a été évaluée selon des échelles de probabilité et de gravité. Concernant la fiabilité du système, nous avons repéré les composants nécessitant une attention particulière. L'exemple traité dans ce travail a été élaboré de manière logique et structurée, ce qui a permis une meilleure compréhension du système étudié tout en identifiant les faiblesses. Les éléments ayant une criticité supérieure à 16 doivent être traités en priorité en mettant en place des recommandations adéquates. Les actions à mener augmentent et deviennent plus importantes au même temps que la criticité augmente.

IV.10 Fiabilité

IV.10.1 Les historiques des pannes de cimenterie (SCHS)

Tableau 14 : L'historique du temps d'arrêts du four rotatif de la Société Hedjar soud.

DATE	Type d'arrêts (h)						Heures De marche (h)	TBF (h)
	Préventifs	Mécanique	Electrique	Régulation	Fabrication	Asservissement		
Janvier 2024	00	01	00	00	01	00	742	371
Février 2024	92	52	00	00	01	00	599	199
Mars 2024	Arrêt programmé							
Avril 2024	96	02	06	06	03	00	631	126
Mai 2024	00	09	07	00	04	00	731	243
Juin 2024	00	01	10	13	00	00	720	240
Juillet 2024	00	06	04	11	00	06	717	179
Aout 2024	00	20	11	00	09	10	694	173
Septembre 2024	00	42	09	00	07	00	686	228
Octobre 2024	00	06	00	00	07	00	731	365
Novembre 2024	87	00	04	00	02	00	651	217
Décembre 2024	00	42	00	03	05	00	694	231
Janvier 2025	00	18	00	00	08	00	718	359

IV.10.2 Test de normalité : Test de Shapiro et Wilk

- Préparation des données dans un tableau à 3 colonnes.

Dans le tableau ci-dessus, sont portées dans un ordre croissant de TBF (Temps de bon fonctionnement), avec description d'une chaque TBF.

Tableau 15 : Classement des TBF avec description des pannes.

Ordre	TBF	Description de la panne
1	126	Défaillance d'un capteur de température au niveau de la zone de cuisson.
2	173	Usure prématurée d'un segment de l'entraînement du four.
3	179	Problème d'obstruction partielle de la cheminée d'évacuation des gaz.
4	199	Fuite au niveau d'un joint tournant (étanchéité gaz ou poussières).
5	217	Dysfonctionnement du système de graissage automatique d'un point critique.
6	228	Panne de l'alimentation électrique d'un équipement auxiliaire (ventilateur, pompe).
7	231	Dégradation rapide et localisée du revêtement réfractaire interne.
8	240	Problème de régulation de la vitesse de rotation du four.
9	243	Alarme de surpression ou dépression anormale dans le four.
10	359	Dysfonctionnement du système d'injection de combustible secondaire.
11	365	Surcharge ce qui a touché les galets et la butée hydraulique.
12	371	Déformation (ovalisation) des viroles.

- Calculer la moyenne \bar{x} de la série de mesure :

$$\bar{x} = \text{moyenne} = \frac{1}{n} \sum Xi$$

$$\bar{x} = \frac{1}{12} \times (126 + 173 + 179 + 199 + 217 + 228 + 231 + 240 + 243 + 359 + 365 + 371)$$

$$\bar{x} = 244,25 \text{ h}$$

- **Calcul de la variance :**

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2$$

$$S^2 = [(126 - 244,25)^2 + (173 - 244,25)^2 + (179 - 244,25)^2 + (199 - 244,25)^2 + (217 - 244,25)^2 + (228 - 244,25)^2 + (231 - 244,25)^2 + (240 - 244,25)^2 + (243 - 244,25)^2 + (359 - 244,25)^2 + (365 - 244,25)^2 + (371 - 244,25)^2]$$

$$S^2 = 70380,25 \text{ h}^2$$

- **Calcul des différences respectives :**

$$d_1 = X_n - X_1, d_2 = X_{(n-1)} - X_2, \dots d_n$$

$$d_1 = 371 - 126 = 245$$

$$d_2 = 365 - 173 = 192$$

$$d_3 = 259 - 179 = 80$$

$$d_4 = 243 - 199 = 44$$

$$d_5 = 240 - 217 = 23$$

$$d_6 = 231 - 228 = 3$$

- **A chacune de ces différences, on affecte les coefficients a, donnés par la table, avec n le nombre de différences :**

$$245 \times 0,5475 = 134,14$$

$$192 \times 0,3325 = 63,84$$

$$80 \times 0,2347 = 18,78$$

$$44 \times 0,1586 = 6,98$$

$$23 \times 0,0922 = 2,12$$

$$3 \times 0,0303 = 0,09$$

- **Calcul du rapport caractérisant le paramètre W:**

$$W = \frac{\sum d_i \cdot a_i}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}$$

$$W = \frac{(134,14 + 63,84 + 18,78 + 6,98 + 2,12 + 0,09)}{70380,25}$$

$$W = 0,7254$$

- Comparer W calculé au W_α de la table, avec n nombre de données :
 - Si W calculé est supérieur au W_α de la table, la normalité est rejetée.

- Si W calculé est inférieur au $W\alpha$ de la table, la normalité est acceptée.

Dans notre cas, $W = 0,7254 < 0.859$, l'hypothèse de normalité est acceptée.

Dans ce cas, la loi normale va être utilisée. Alors, les éléments de mesure de la fiabilité du four rotatif seront présentés :

1) Probabilité instantanée de défaillance

$$f(t) = \frac{1}{\delta \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{t-\bar{x}}{2\delta^2}\right)^2}$$

$$\delta^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Xi - \bar{x})^2$$

$$\delta^2 = \frac{1}{12} \times (70380,25)$$

$$\delta^2 = 5865,02 \text{ h}^2$$

$$\delta = \sqrt{5865,02} = 76,58 \text{ h}$$

Tableau 16 : Probabilité instantanée de défaillance.

t	f(t)
0	0,0052072
40	0,0052079
80	0,0052085
120	0,0052089
160	0,0052092
200	0,0052094
240	0,0052095
280	0,0052094
320	0,0052093
360	0,0052090
400	0,0052086
440	0,0052080
480	0,0052074

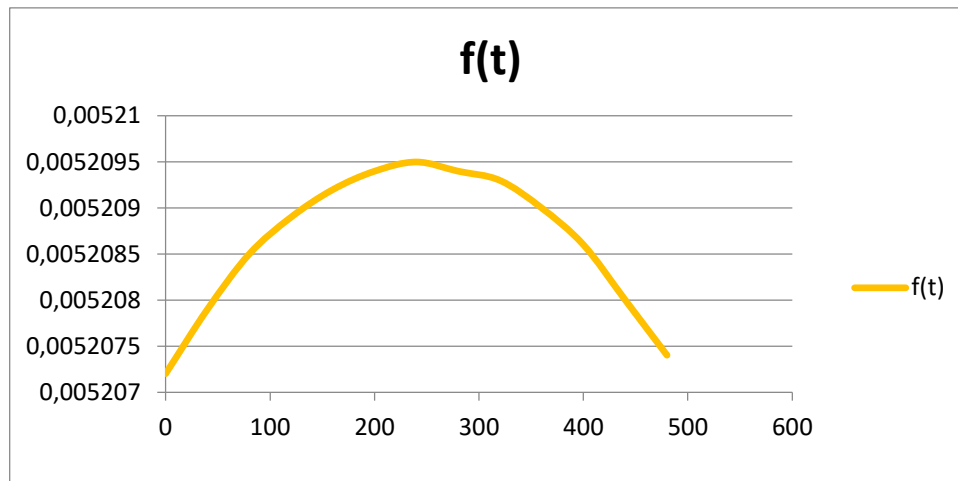


Figure IV.4 : Fonction de probabilité de défaillance $f(t)$ d'un four rotatif au cours du temps t .

Commentaire

Le graphe représente la fonction $f(t)$ qui varie en fonction du temps t . Il montre une courbe en forme de cloche, le maximum de la fonction $f(t)$ est atteint approximativement entre $t=250$ et $t=300$. A ce point, la valeur maximale de $f(t)$ est d'environ 0,005209, indiquant une probabilité instantanée de défaillance suivant une loi normale. La fonction augmente jusqu'à son maximum puis diminue symétriquement.

La fonction $f(t)$ représente la probabilité instantanée de défaillance d'un four rotatif au cours du temps. L'analyse de cette distribution permet de prédire les périodes à risque et d'optimiser la maintenance préventive afin d'améliorer la durabilité et la sécurité des systèmes mécanique.

2) Fonction de répartition

Elle caractérise la probabilité de panne de 0 à t.

$$F(t) = \int_0^t f(t). dt$$

U= Variable centrée réduite.

$$U = \frac{t - \bar{x}}{\delta}$$

$$F(-t) = 1 - U(t)$$

Tableau 17 : Probabilité cumulée de défaillance.

t	F(t)
0	0,00071
40	0,0038
80	0,0162
120	0,0526
160	0,1357
200	0,2810
240	0,4761
280	0,6808
320	0,8389
360	0,9345
400	0,9788
440	0,9948
480	0,99896

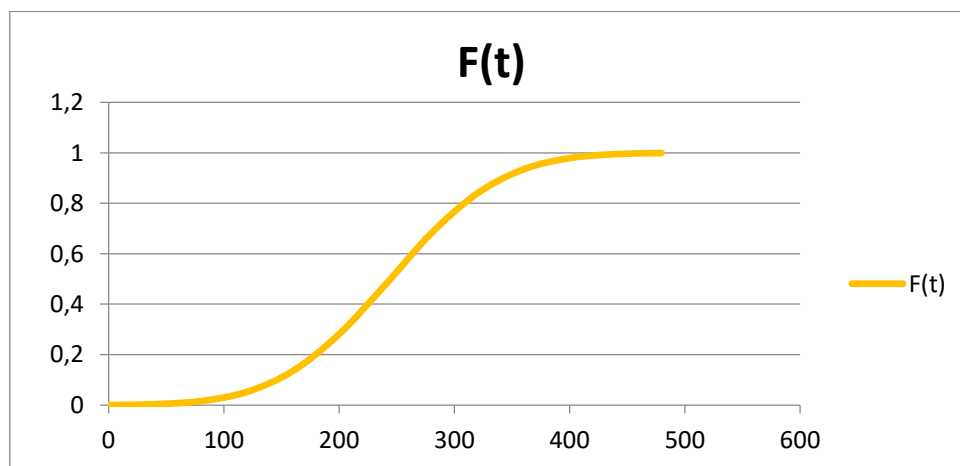


Figure IV.5 : Fonction de répartition F(t) d'un four rotatif au cours du temps t.

Commentaire

Comportement initial : Pour les faibles valeurs de t (entre 0 et environ 100 unités de temps), la valeur de $F(t)$ est très faible et proche de zéro. Cela indique que la probabilité de défaillance du four est très faible au début de son fonctionnement.

Période d'usure/ vieillissement : Entre environ 100 et 400 unités de temps, la courbe de $F(t)$ montre une croissance significative et de plus en plus rapide (la pente augmente). Cela signifie que la probabilité cumulée de défaillance augmente de manière notable.

Saturation : Au-delà d'environ 400 unités de temps, la courbe de $F(t)$ tend à se stabiliser et à se rapprocher de 1. Cela signifie que la probabilité cumulée que le four soit déjà défaillant est proche de 100%.

1) Fonction de Fiabilité

Tableau 18 : Probabilité de survie.

t	R(t)
0	0,99929
40	0,9962
80	0,9838
120	0,9474
160	0,8643
200	0,7190
240	0,5239
280	0,3192
320	0,1611
360	0,0655
400	0,0212
440	0,0052
480	0,00104

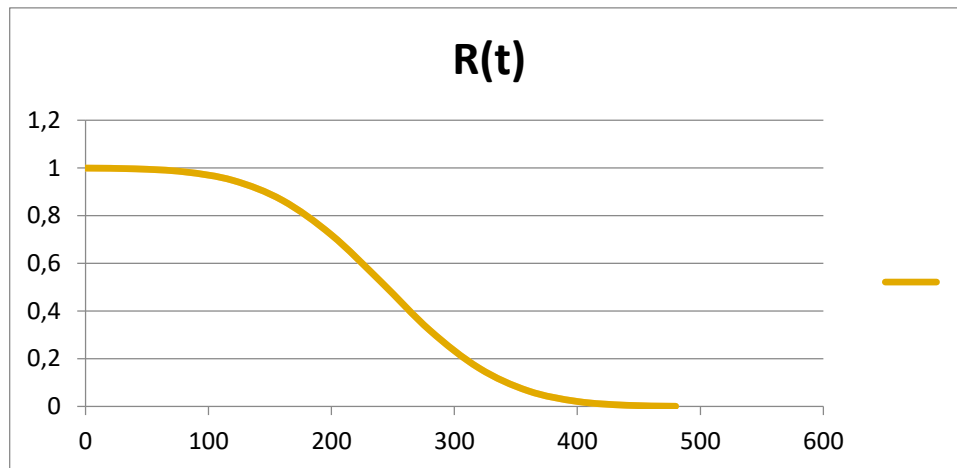


Figure IV.6 : Fonction $R(t)$ d'un four rotatif au cours du temps t .

Commentaire

Initialisation ($t=0$) : Au temps $t=0$, la valeur de $R(t)$ est égale à 1. Cela signifie qu'au début de son fonctionnement, le four est considéré comme parfaitement fiable.

Période de déclin de la fiabilité : A partir d'environ 150 unités de temps, la courbe de $R(t)$ commence à chuter de manière significative et de plus en plus rapide. La pente de la courbe devient plus raide. Cela signifie que la probabilité que le four fonctionne sans défaillance diminue rapidement.

Phase de faible fiabilité/ fin de vie : Au-delà d'environ 400 unités de temps, la courbe de $R(t)$ s'approche de zéro. Cela signifie que la probabilité que le four continue de fonctionner sans défaillance devient très faible. Il est hautement probable que le four ait déjà défailli.

1) Calcul des périodicités d'intervention

Tableau 19 : Périodicités d'intervention systématique.

R_0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,4
T_{sy}	146,23	179,92	204,43	225,11	263,31

$$U = \frac{t - \bar{x}}{\delta} \quad \longrightarrow \quad t = U \cdot \delta + \bar{x}$$

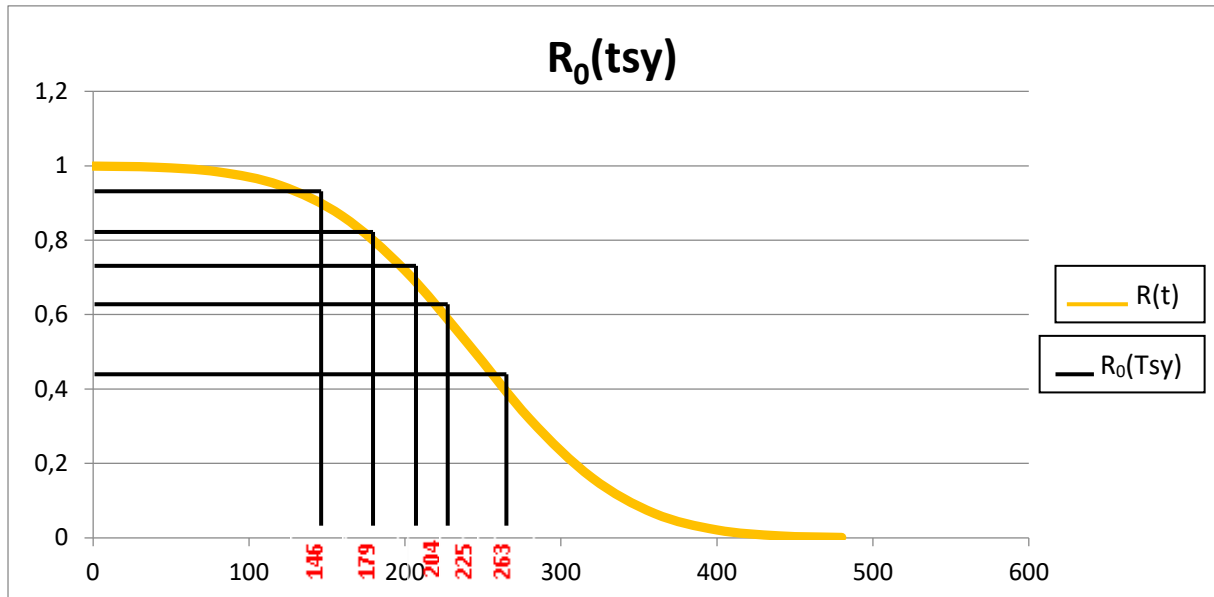


Figure IV.7 : Périodicité d'intervention systématique basée sur R_0 d'un four rotatif.

IV.10.3 Détermination des périodicités d'intervention conditionnelle

Les temps de bon fonctionnement suivent une loi normale validée par le test de Shapiro-Wilk. Nous avons déterminé les temps d'intervention systématique basés sur un seuil de fiabilité qui devrait être fixé par le service de maintenance en fonction de l'importance de la machine dans la chaîne de production.

Passons maintenant à l'idée de proposer un programme de maintenance conditionnelle. Pour cela, proposons ce qui suit :

Soit T : Le temps d'intervention conditionnelle,

Donc :

$R(T)$: Probabilité [fonctionner de 0 à T sans panne = Événement A].

$R(T+t)$: Probabilité [fonctionner sans panne de 0 à T et de T à $(T+t)$ = Événement A et B].

$R(T+t)$: Probabilité [bon fonctionner de $(T+t)$ sachant que l'équipement en bien fonctionné de 0 à T].

Donc : $P [A/B] = P (A \text{ et } B) / p(A)$

Puisque : $P [A \text{ et } B] = P(B/A).p(A)$

➡ $R(t/T) = R(T+t) / R(T)$

$$R(T) = 0,85\% \text{ (Seuil fixe)} \Rightarrow U = \frac{T-m}{\delta} \text{ de } N(0,1) = F(U) \Rightarrow T = U \cdot \delta + m$$

$$R(T+t) : U = \frac{T+t-m}{\delta} \Rightarrow R(t/T) = \frac{R(t+T)}{R(T)}$$

- **Mise en place de l'échéancier**

$$\diamond R(T_0) = 0,85$$

$$U = \frac{T-m}{\delta} \Rightarrow T = U \cdot \delta + m = 76,58 \times 1,04 + 244,25$$

$$T = 324 \text{ h}$$

$$\diamond R(T_0+t_1) = \frac{R(t_1+T_0)}{R(T_0)} = 0,85$$

$$R(T_0+t_1) = 0,85 \times R(T_0) = 0,85 \times 0,85 = 0,7225$$

$$T_0+t_1 = U \cdot \delta + m = 0,59 \times 76,58 + 244,25 = 289 \text{ h}$$

$$T_1 = t_1 + T_0 = 289 \Rightarrow t_1 = 324 - 289 = 34 \text{ h}$$

$$\diamond R(T_1+t_2) = \frac{R(T_1+t_2)}{R(T_1)} = 0,85$$

$$R(T_1+t_2) = 0,85 \times 0,7225 = 0,61$$

$$T_1+t_2 = U \cdot \delta + m = 0,29 \times 76,58 + 244,25 = 266 \text{ h}$$

$$T_2 = t_2 + T_1 = 289 \Rightarrow t_2 = 289 - 266 = 23 \text{ h}$$

Parmi les points faibles identifiés suite à l'analyse de l'enquête (questionnaire), nous avons vu précédemment que les temps de maintenance ne sont pas maîtrisés. Ceci nous a menés vers l'idée de proposer une procédure de calcul des temps d'intervention et d'arrêt. Ceci aidera l'entreprise à développer et maîtriser la maintenabilité des installations.

IV.11 Proposition d'une PROCEDURE de CALCUL DU COUT DE MAINTENANCE

1. OBJET

La procédure a pour objet de définir une méthode intégrant le calcul du coût de maintenance permettant le suivi et le contrôle des dépenses.

2. DOMAINE D'APPLICATION

Cette procédure s'applique à la fonction méthodes qui après analyse des coûts permet d'orienter la politique de maintenance, d'élaborer un budget maintenance et de faire figurer les indicateurs significatifs sur le tableau de bord du service.

3. REFERENCIELS UTILISEES

4. TERMINOLOGIE

Rédacteur
Nom :
Date :
Visa :
Vérificateur
Nom :
Date :
Visa :
Approbateur
Nom :
Date :

Visa :

5. Composition des coûts

- **Coûts de main d'œuvre** : c'est le produit « temps passés x temps horaire »
 - Temps passés : Ils sont normalement saisis sur l'ordre de travail honnêtement complété, vérifié et fourni par le chef d'équipe.
 - Taux horaire : Ils sont fournis par le service comptabilité et intègrent, outre le salaire horaire, l'ensemble des charges sociales afférentes au niveau de la qualification.

- **Frais généraux du service**

Ce sont des frais fixes du service, calculés au mois et ramenés à l'heure d'activité (parfois estimés en % des coûts directs.

Ils contiennent :

- la paie des cadres, employés de bureau
- les frais de chauffage, éclairage, téléphone, véhicule du service...
- les loyers, assurances, impôts directs....

- **Coûts des consommés, des matières et des produits**

Facture d'achat + coût de passation des commandes + coût de possession des stocks.

- **Coûts pièces de rechange**

Poste important, évalué comme précédemment.

- **Coûts sous traitance**

Les factures du prestataire permettent la saisie.

On peut majorer ces frais par un coefficient de « participation du service, prêt de matériel, contrôles.... »

- **Coûts indirects de maintenance ou coût d'indisponibilité de la production**

Remarque préliminaire

Soit TA le temps d'arrêt de production, on distinguera TAM temps d'arrêt imputable à la maintenance (ex : panne...) et TAF temps d'arrêt imputable à la fabrication (ex : manque de matière...).

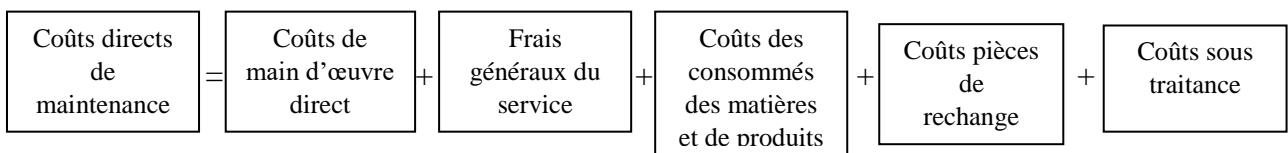
Contenu des coûts indirects de production

- Coût de perte des produits non fabriqués, des matières premières en cours de fabrication, perte de qualité, perte des produits déclassés. Ces coûts sont à adapter au contexte industriel, et nous les nommerons « coûts de déclassement »
- Coût de main d'œuvre (de fabrication) inoccupée
- Coût d'amortissement du matériel arrêté
- Frais induits : délais non tenu (pénalités de retard, perte de clients, image de marque ternie) et perte de qualité de fabrication
- Frais de remise en route du processus de production.
- **Coûts de défaillance**

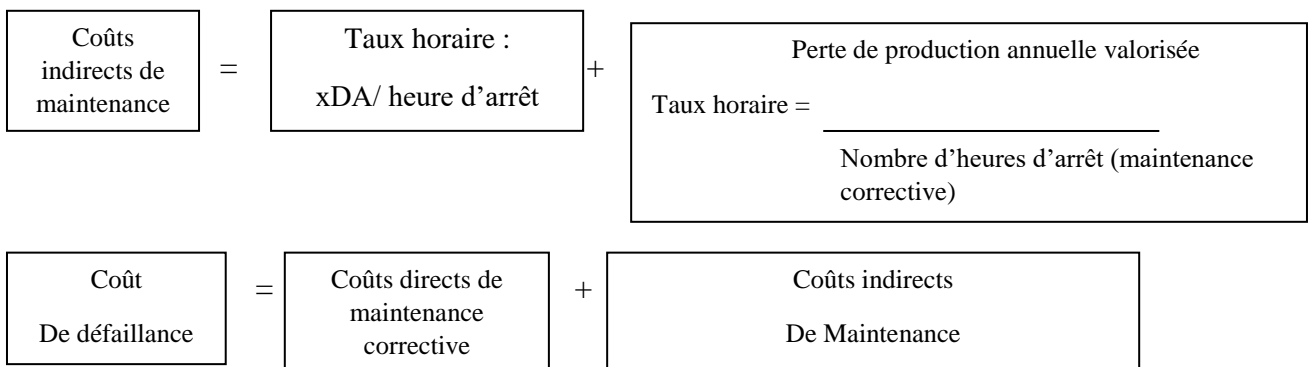
Ils sont un souci et un impératif industriel.

Ils représentent la somme des coûts directs et indirects attachés à une défaillance.

METHODE DE CALCUL DES COUTS DE MAINTENANCE



Mesures d'arrêt X taux horaire d'arrêt



Ventilation et analyse des coûts

1. Par nature

- Personnel
- Outillage et équipement de maintenance
- Pièces de rechange et consommable

- Sous-traitances
- Autres (à préciser)

2. Par destination

- Préparation (études, méthodes, ordonnancement)
- Documentation technique
- Intervention
- Suivi et gestion
- Formation
- Autres (à préciser)

3. Par type d'intervention

- Maintenance préventive systématique et conditionnelle
- Maintenance corrective
- Révision, rénovation, amélioration
- Tableaux neufs.

Conclusion

L'étude s'est portée sur l'analyse fonctionnelle et l'AMDEC suivie d'une étude de fiabilité.

Les fonctions techniques et de services du four ont permis de passer à l'analyse des modes de défaillance de leur effet et leur criticité. La criticité a abouti à l'identification des éléments les plus sollicités aux pannes. L'historique des pannes a permis de choisir le modèle de fiabilité le plus approprié en se basant sur le test de Shapiro-Wilk pour sa validation. Des périodicités de maintenance systématique et conditionnelle ont été calculées en se basant sur un seuil de fiabilité.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire m'a permis d'évaluer la fiabilité d'un four. Il n'existe pas de procédures standardisées pour le calcul de la fiabilité des systèmes mécaniques, le choix de la méthode à utiliser dans ce secteur dépend du type d'équipement, de sa taille, de la qualité de la production, des ressources disponibles ainsi que des données collectées. Dans notre étude, nous avons utilisé la loi normale en matière de fiabilité suivie d'une validation du modèle par le test de Shapiro Wilk, ce qui a permis de définir les paramètres qui caractérisent le taux de défaillance et qui mène à un suivi efficace de l'état des équipements afin de sélectionner correctement le type de maintenance à mettre en œuvre.

L'analyse des modes de défaillances de leur effet et leur criticité réalisée a révélé l'état global de notre matériel ainsi que les composantes les plus critiques qui entraîne l'arrêt du four, nous avons conclu que la panne du four est surtout due à la déformation (ovalisation) des viroles, et par conséquent à l'incohérence des briques réfractaires à l'intérieur. La chute des briques entraîne une élévation importante des températures des viroles, accompagnée de l'apparition de taches rouges. Cela a un impact sur la santé globale des viroles et, par conséquent, leur dégradation. L'un des facteurs majeurs de mauvais fonctionnement du four est sa surcharge, affectant ainsi les galets et l'arrêt hydraulique.

De plus, l'analyse du questionnaire renseigné m'a permis de maîtriser les éléments clés de la maintenance. Des points forts certes ont été identifiés mais un ensemble de faiblesses énumérées devraient être analysées afin d'arriver des solutions. A cet effet, nous avons proposé une procédure de gestion des temps d'intervention et d'immobilisation et des périodicités de maintenance systématique et conditionnelle.

L'utilisation de la méthodologie de résolution des problèmes (MRP) est conseillée. La fonction majeure d'un département de maintenance est de préserver les aptitudes opérationnelles des moyens de production, ainsi que leurs valeurs patrimoniales.

Ce sujet j'ai permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine de la cimenterie, notamment, le four rotatif de cimenteries. Ainsi, j'ai pu appliquer mes diverses connaissances pédagogiques en mettant en œuvre mes compétences d'analyse et relationnelles dans l'étude des problématiques de maintenance, d'étude et de conception.

Bibliographie

- [1] : <https://dspace.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/fc2c18e3-4099-43fb-b3eb-055a06eb80d6/content>.
- [2] : [https://chatgpt.com/#:~:text=Moubray%2C%20J.%20\(1997\).%20Reliability%2DCentere d%20Maintenance.%202nd%20Edition.%20Industrial%20Press%20Inc](https://chatgpt.com/#:~:text=Moubray%2C%20J.%20(1997).%20Reliability%2DCentere d%20Maintenance.%202nd%20Edition.%20Industrial%20Press%20Inc).
- [3] : SCHS – Société des Ciments de Hadjar Soud. (Rapports internes, si disponibles).
- [4] : M. BIDEQ , K. I. JANATI , L. BOUSSHINE , Etude de l'ovalisation d'un four rotatif de cimenterie , 13ème Congrès de Mécanique ,(Meknès, MAROC) ,(2017).
- [5] : Anonyme, site web (https://stringfixer.com/fr/Cement_kiln) Consulté a (17/05/2022, 21:00).
- [6] : <https://www.refra.com/fr/Cellulose-et-papier-Applications/>.
- [7] : LAAZAAR Kaoutar, « L'optimisation de l'énergie thermique dans le four de la cimenterie Holcim-Fès », Maroc, 2016.
- [8] : AOURABI Sarra, « optimisation des pertes d'énergie thermique par les parois au niveau de la ligne de cuisson du four 2 », Maroc, 2015.
- [9] : CHENITI Souhil, « influence de la substitution du ciment par la poussière de four de cimenterie (CKD) avec l'ajout des fibres métalliques », 2018.
- [10] : BASTIER.R, BOCAN.A, Bernard .G et REGNAULT.A, Techniques de l'ingénieur, (2000).