



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique
Spécialité : MAINTENANCE_FIABILITE_QUALITE

Thème

Application de l'A.M.D.E.C aux Four Rotatif de
La cimenterie de Lafarge_Holcim d'Oggaz

Présenté et soutenu publiquement par :

✚ AZZAOUI Amine

✚ BELHADJI Houssef Eddine

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr. LALAOUI M	MAA	IMSI d'univ d'Oran2	Président
Mr. BOUHAFS M	MCB	IMSI d'univ d'Oran2	Encadreur
Mr. ADJLOUA A	MAA	IMSI d'univ d'Oran2	Examinateur

2020/2021

Sommaire

Remerciements.....	I
Liste des figures.....	II
Liste des tableaux	III
Liste des symboles.....	V
Introduction générale	(1)

Chapitre 1 : Présentation et situation de l'entreprise

I. Introduction	(4)
II. Présentation la cimenterie LafargeHolcim.....	(4)
III. L'histoire de la cimenterie.....	(5)
IV. la fabrication de ciment.....	(6)
1. Définition de ciment.....	(6)
2. La composition du ciment.....	(6)
3. Fabrication industrielle.....	(7)
4. Désignation des ciments.....	(7)
5. Principe.....	(7)
6. Constituants.....	(8)
7. Les méthodes de fabrication.....	(9)
a. Ligne gris	(9)
b. Ligne blanc	(15)
V. four rotatif de cimenterie	(16)
1. Généralités	(16)
2. Analyse fonctionnelle	(17)
a. Bête à cornes	(18)
b. Diagramme des pieuvre.....	(18)
c. Cahier des charges fonctionnelles.....	(19)
d. Diagramme des solutions technologique.....	(20)
3. Description des composants du four	(21)
a. Le bandage	(21)
b. La virole	(22)
c. Les briques réfractaires	(23)
d. Les galets	(24)
e. La butée hydraulique	(25)
f. Les joints du four	(26)
g. Les plaques nose_ring.....	(27)

Chapitre 2 : Etude de la maintenance et de la fiabilité

I. Introduction	(29)
II. Description de la maintenance.....	(29)
1. Définitions	(29)
2. Objectifs de la maintenance	(30)
3. Stratégie de la maintenance	(30)
III. Service maintenance	(31)

Sommaire

1. Fonction du service maintenance	(31)
a. Fonction étude.....	(31)
b. Fonction préparation.....	(31)
c. Fonction ordonnancement.....	(31)
d. Fonction réalisation.....	(31)
e. Fonction gestion Domaines.....	(32)
2. Domaines d'action du service maintenance.....	(32)
3. Place du service maintenance dans l'entreprise.....	(32)
4. Organisation du service maintenance	(33)
a.Maintenance centralisée	(33)
b.Maintenance décentralisée	(33)
5. Technicien de maintenance.....	(34)
6. management de la maintenance.....	(34)
IV. Concepts de la maintenance.....	(34)
1. Evénements de l'origine de l'action.....	(34)
2. Méthodes de la maintenance.....	(35)
a. Maintenance corrective.....	(35)
b. Maintenance préventive.....	(36)
c. Maintenance préventive systématique.....	(36)
d. Maintenance préventive conditionnelle.....	(37)
3. Opérations de maintenance	(39)
a. Opérations de maintenance corrective.....	(39)
b. Opérations de maintenance préventive	(40)
V. Cinq niveaux de maintenance	(40)
VI. Méthodes d'optimisation de la maintenance.....	(42)
1. Méthode AMDEC.....	(42)
2. Diagramme de Pareto.....	(43)
a. Présentation.....	(43)
b. Construction du diagramme de « Pareto »	(43)
c. Analyse des résultats.....	(44)
VII. Description de la fiabilité	(44)
1. Définition.....	(44)
2. Fiabilité et Qualité.....	(44)
3. Expresions mathématiques de la fiabilité.....	(45)
4. Estimation de la fiabilité.....	(47)
a. La fiabilité du composant.....	(47)
b. Le taux de défaillance à l'instant.....	(48)
c. Allures typiques des taux de défaillance.....	(48)

Sommaire

5. Lois de probabilités usuelles en exponentielle.....	(49)
a. Loi exponentielle.....	(49)
b. Loi de « Weibull ».....	(51)
VIII. Conclusion.....	(53)

Chapitre 3: Analyse des modes de défaillance de leur effets et de leur criticité (AMDEC)

A. mise en place de l'AMDEC

I. Définition	(55)
II. Démarche pratique de la méthode AMDEC.....	(55)
III. Analyse des mécanismes de la défaillance.....	(55)
IV. Estimation de la criticité.....	(55)
1. Indice de fréquence F.....	(55)
2. Indice de gravité G.....	(57)
3. Indice de non-détection D.....	(58)
V. Tableau D'AMDEC.....	(61)
VI. Calcul de la criticité C.....	(65)
1. Courbe de criticité	(65)
2. Calcul de criticité cumulé.....	(66)
3. Analyse fonctionnelle.....	(67)

B . Fiabilité.....

I. Détermination des paramètre de fiabilité de four rotatif.....	(67)
1. l'historique d'une four rotatif cimenterie.....	(67)
II. Détermination des paramètre de weibull par la méthode graphique	(68)
1.Détermination des paramètres de weibull par la méthode graphique...	(70)
2. Analyse des résultats trouvés	(71)
III. Conclusion	(71)

Chapitre 4: Etude thermique du four rotatif

I. Zones et revêtement du four	(75)
II. Données opératoires.....	(76)
III. Etude thermique du four rotatif.....	(78)
1.Introduction.....	(78)
2. Combustion à l'intérieur du four.....	(78)
3. Transfert de chaleur par convection.....	(81)

Sommaire

a. Coefficient d'échange de chaleur par convection.....	(81)
b. Transfert de chaleur par convection forcée sans changement d'état.....	(81)
• Écoulement dans un tube.....	(81)
a. Régime turbulent :.....	(82)
b. Régime laminaire.....	(82)
V. Transfert de chaleur par Rayonnement.....	(83)
Loi de STEFAN-BOLTZMANN.....	(83)
VI. Transfert de chaleur par conduction.....	(83)
Concepts fondamentaux.....	(84)
2.1 Champs thermiques.....	(84)
2.2 Loi de Fourier.....	(84)
VII. Cas général : Équation de la chaleur.....	(85)
Bilan énergétique.....	(85)
Équation de la chaleur en milieu homogène et isotrope.....	(86)
VIII. Conduction en régime permanent.....	(86)
Cylindre creux multicouches.....	(87)
IX. Méthode de travail (le modèle mathématique)	(88)
Conclusion Générale.....	(92)

Liste de tableau

Chapitre 1 : Présentation et situation de l'entreprise

- 1.1 :les étages de préchauffeur
- 1.2 :les caractéristique de four de LafargeHolcim oggaz
- 1.3 :cahier de charges fonctionnelles

Chapitre 2 : etude de la maintenance et la fiabilité

- 2.1 :Fonction du service maintenances
- 2.2 :Les niveau de maintenance

Chapitre 3 : AMDEC et Fiabilité

- 3.1 :les indices de fréquence F
- 3.2 :Fréquences de four rotatif en 2020
- 3.3 :les indices de gravité G
- 3.4 :Gravité de four rotatif en 2020
- 3.5 :les indices de détection D
- 3.6 :Détection de four rotatif en 2020
- 3.7 :Tableau D'AMDEC de four rotatif en 2020
- 3.8 :Criticité cumulé
- 3.9 : L'historique des pannes de four rotatif en 2020
- 3.10 :les valeur de F(i) et R(i)

Chapitre 4 : etude thermique du four rotatif de la cimentrie

- 4.1 :débit set températures de la farine et du clinker
- 4.2 :composition massique des gaz
- 4.3 :débit ,température et pression des gaz
- 4.4 : température moyenne extern de la virole
- 4.5 :valeurs de la constante de STEFAN-BOLTZMANN

Liste de figure

Chapitre 1 : Présentation et situation de l'entreprise

- 1.1 :L'entrprise de la farageHolcim
- 1.2 :LafargeHolcim Oggaz
- 1.3 :La cart géographique de LafargeHoulcim oggaz
- 1.4 :carrière
- 1.5 :four rotatif
- 1.6 :broyage
- 1.7 :composants du ciment
- 1.8 :concasseur
- 1.9 :broyeur cru
- 1.10 :Broyage
- 1.11 :l'atolie de cuisson
- 1.12 :préchauffage
- 1.13 :four rotatif
- 1.14 :schéma de production du ciment
- 1.15 :Broyeur à ciment
- 1.16 :stockage du ciment
- 1.17 :broyeur cru
- 1.18 :four à 3 appuis
- 1.19 :bete à cornes
- 1.20 :diagramme pieuvre
- 1.21 :diagramme des solitions technologique
- 1.22 :types de bandages
- 1.23 :bandage flottant
- 1.24 :propriétés du matériau de la virole
- 1.25 :evolution de la température entre bandage et les briques

- 1.26 :butée hydraulique
- 1.27 :les composantes de la butée hydraulique
- 1.28 :joint amont
- 1.29 :joint aval
- 1.30 :plaque nose -ring

Chapitre 2 : etude de la maintenance et la fiabilité

- 2.1 :place du service maintenance dans l'entreprise
- 2.2 :méthodes de la maintenance
- 2.3 :principe de la maintenance conditionnelles
- 2.4 :courbes de fonctions de probabilité
- 2.5 :courbes paramétriques de la fiabilité
- 2.6 :courbe en baignoire du taux de défaillance
- 2.7 :principales propriétés de la distribution exponentielle
- 2.8 :principales propriétés de la distribution de weibull

Chpitre 3 : AMDEC et Fiabilité

- 3.1 :Courbe de criticité
- 3.2 : Diagramme ABC
- 3.3 :papier de weibull

Chapitre 4 :etude thermique du four rotatif de la cimentrie

- 4.1 :zones du four rotatif
- 4.2 :longueur de four
- 4.3 :Déroulement de la combustion dans le four
- 4.4 :grandeur géométrique de la flamme en fonction de la puissance du bruleur
- 4.5 :température de la flamme en fonction de l'xcès d'air
- 4.6 :longueur et orientation de la flamme
- 4.7 :mise en évidence du flux thermique sur surface
- 4.8 :écoulement dans une conduite circulaire

4.9 :flux de chaleur pour une paroi simple

4.10 :schéma des transferts dans un cylindre creux multicouches

4.11 :schéma électrique équivalent d'un cylindre creux multicouches

Liste des symboles

AMDEC : Analyse des modes de défaillances et études des criticités

MTBF : Mean Time Between Failures (Moyenne des temps de bon fonctionnement) OMF : Optimisation de la maintenance par la fiabilité

MBF : La maintenance basée sur la fiabilité TPM : LA maintenance

productive totale

MTTR : Mean Time To Repair (Moyenne des Temps Techniques de Réparation)

MTTA : Mean Time of Trival (Moyenne des Temps Techniques d'Arrêt)

TBF : Temps de bon fonctionnement avant la première défaillance[h]

$\lambda(t)$: Taux de défaillance.

$\mu(t)$: Taux de réparation.

$N(t)$: Le nombre de systèmes survivants à l'instant t

$F(t)$: Fonction de répartition [%]

m : Indice

N : Nombre d'éléments à l'instant (t_0)

$R(t)$: Fiabilité au temps t [%]

T : variable aléatoire « durée de vie »

[h] t : l'instant (t)

β : Paramètre de forme de la loi de "weibull"

η : Paramètre d'échelle de la loi de "weibull"[h]

γ : Paramètre de position de la loi de "weibull"[h]

G : indice de la gravité

F : indice de la fréquence

D : indice de la détection

C : indice de la criticité

A_g : surface du gaz à une section donnée (m²)

A_s : Surface du solide à une section donnée (m²)

A_m : surface du mur à une section donnée (m²)

C_{pg} : chaleur spécifique des produits gazeux 1173.82 (J/kg.oC)

C_{ps} : chaleur spécifique du solide 1089.97 (J/kg.oC)

Constantes d'équation C1, C2-WLF.

f_1 : coefficient de conduction—gaz à paroi 22,71 (W/m.oC)

f_2 : coefficient de conduction—solide à gaz 22,71 (W/m.oC)

f_3 : Coefficient de conduction-mur à solide 22,71 (W/m.oC)

f_4 : coefficient de conduction-mur à l'air extérieur 22,71 (W/m.oC)

h_0 : fraction de rayonnement 0,0757

h_{sh} : a coefficient de transfert de chaleur de la surface de la coque à l'air (W/m².oC)

k_b : conductivité de la rupture du revêtement ou du réfractaire (W/m.oC)

CHAPITRE I

Présentation et Situation de L'entreprise

I. Introduction :

La production mondiale de ciment s'élevait, en 2001, à 1692 millions de tonnes, en Afrique, en Asie, etc. En fait, l'évolution du marché est liée notamment au niveau d'industrialisation du pays. Ainsi, le niveau de production de ciment dans les pays industrialisés s'est globalement stabilisé depuis une dizaine d'années, et les fluctuations observées dépendent seulement d'aléas conjoncturels. En revanche, la production de ciment dans les pays en développement s'est accrue, et continue à progresser en fonction de leur évolution économique. D'abord, l'industrie cimentière est fortement consommatrice en énergie calorifique et électrique. Les besoins mondiaux en énergie pour la fabrication du ciment sont estimés à environ $6 \cdot 10^9$ GJ/an pour les combustibles et 200 TWh/an pour l'électricité.



Figure (1.1) : l'entreprise LafargeHolcim

II. Présentation la cimenterie LafargeHolcim :

LafargeHolcim produit et vend principalement du ciment, des granulats et du béton prêt à l'emploi dans le monde entier, essentiellement sous le nom commercial " LafargeHolcim ". Ses produits et solutions de construction sont utilisés pour construire ou rénover des logements, bâtiments et infrastructures.



Figure(1.2) :LafargeHolcim oggaz

III. L'histoire de la cimenterie :

LafargeHolcim commence à exploiter des fours à chaux au Teil, sur la rive droite du Rhône. Grâce à une croissance soutenue et de nombreuses acquisitions, LafargeHolcim devient le premier producteur français de ciment à la fin des années 30. Le premier développement international de Lafarge remonte à 1864, avec l'exportation de chaux pour la construction du canal de Suez. L'expansion se poursuit, d'abord dans le bassin méditerranéen (notamment en Algérie), puis au Canada et au Brésil dans les années 1950. En 1981, l'acquisition de General Portland Inc. lui permet de devenir l'un des principaux cimentiers d'Amérique du Nord ; celle du groupe suisse Cementia, en 1989, d'occuper de nouvelles positions, notamment en Europe et en Afrique de l'Est. Parallèlement au ciment, Lafarge développe son activité de granulats & béton prêt à l'emploi. En 1997.

Avec l'acquisition du groupe britannique Blue Circle en 2001, Lafarge accroît sa présence sur les marchés émergents et devient le premier cimentier mondial. En janvier 2008, LafargeHolcim acquiert la branche cimentière du groupe égyptien Orascom (Orascom Building Materials Holding SAE), qui lui apporte une position de leader au Moyen-Orient et en Afrique. L'activité Plâtre, qui avait commencé dès 1931, est cédée en majeure partie, au cours du second semestre 2011.

LafargeHolcim S.A. est une société anonyme de droit français, immatriculée au registre du commerce et des sociétés de Paris. La durée de la société est fixée jusqu'au 31 décembre 2066, et peut être prolongée, conformément à ses statuts. Le siège social est situé au 61, rue des Belles Feuilles, 75116 Paris, France. Le titre LafargeHolcim fait partie du CAC 40 depuis la création de cet indice.

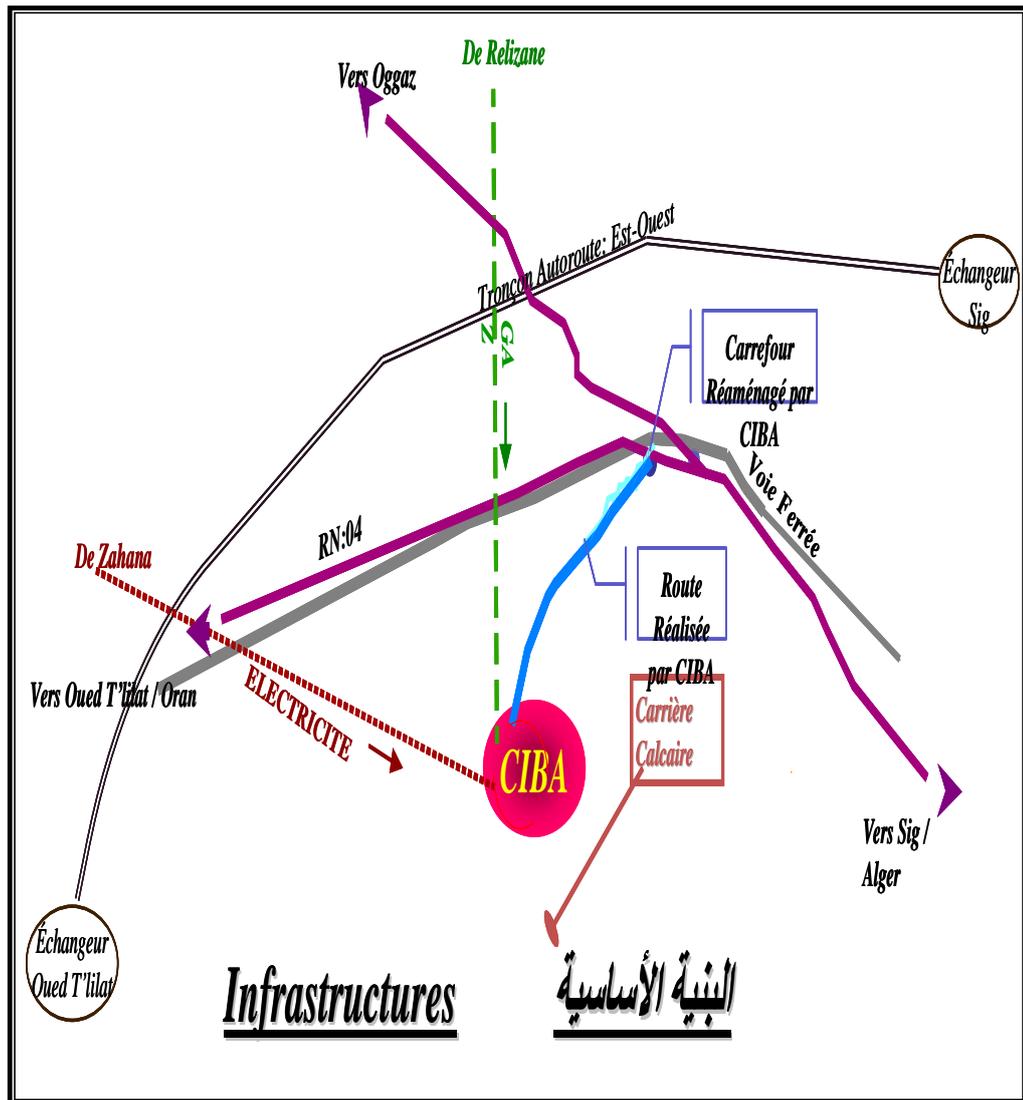


Figure (1.3) : la carte géographique de LafargeHolcimoggaz

IV. La fabrication du ciment

1. Définition de ciment :

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

2. La composition du ciment :

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃), et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes

déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe_2O_3 , l'oxyde ferrique. Les principales composantes sont :

- Silicate Tricalcique (C_3S): 3CaO , SiO_2 : 55 %
- Silicate Dicalcique (C_2S): 2CaO , SiO_2 : 20 %
- Aluminate Tricalcique (C_3A): 3CaO , Al_2O_3 : 10 %
- Ferroaluminate Calcique (C_4AF) : 4CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 : 10 %

3. Fabrication industrielle :

Avant d'obtenir du ciment, la matière première passe par diverses étapes de transformation physico-chimiques de l'extraction jusqu'à l'expédition.

- Exploitation de carrière
- Préparation du Cru
- Cuisson
- Broyage Ciment
- Expédition



figure (1.4) :carrière



figure (1.5) :four rotatif



figure (1.6) :broyage

4. Désignation des ciments :

Les ciments sont identifiés par leur type et leur classe de résistance :

- la notation du type associe la notation traditionnelle française et la future notation européenne (exemples CPA-CEM I ou CPJ-CEM II).
- un nombre (32,5 ou 42,5 ou 52,5) indique leur classe de résistance (valeur minimale spécifiée de la résistance à la compression mesurée à 28 jours et donnée en N/mm^2 ou MPa).
- Ciments les plus utilisés: CPJ-CEM II 32,5 : 46,4 % de la consommation et CPA-CEMI 42,5 : 32,9 %.

5. Principe:

Le ciment est un liant hydraulique constitué d'une poudre minérale, d'aspect grisâtre, obtenue par broyage et cuisson à 1450° , 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 d'un broyage de clinker et de sulfates de calcium ajoutés.

6. Constituants

Le ciment est composé de 80% de Clinker, 15 (\pm 5%) de pouzzola naturelle, des sulfates de calcium et des additifs.

➤ Clinker : C'est un matériau hydraulique constitué, d'au moins deux tiers ($2/3$) des silicates de calcium C_3S et C_2S . La partie restante contenant des silicates d'aluminium et de fer C_3Al , Ferrite C_4AF et d'autres oxydes. Le clinker portland est obtenu par cuisson d'un mélange homogène de matière crue contenant CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et de petites quantités d'autres matières, comme.

➤ Pouzzola naturelle : C'est une substance d'origine volcanique composée essentiellement de SiO_2 réactif, de Al_2O_3 , de Fe_2O_3 et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques.

➤ Sulfate de calcium : Les sulfates de calcium sous forme de gypse sont ajoutés à raison de 5% aux autres constituants du ciment en cours de sa fabrication, en vue de réguler la prise.

➤ Additif Un adjuvant ou agent de mouture destiné à favoriser le broyage du ciment est ajouté au cours du broyage du ciment. Les composants du ciment sont représentés dans la figure 1.5 :



Figure (1.7) : Composants du ciment

7. Les méthodes de fabrication :

• Ligne gris :

1. Carrière :

L'extraction consiste à extraire du calcaire et de l'argile à partir de la carrière. Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par de l'explosif ou à la pelle mécanique. La roche est acheminée par des dumpers ou des bandes transporteuses vers un atelier de concassage. Les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps

2. Le Concassage :

L'opération de concassage a pour but de réduire la granulométrie des blocs de pierre en fragments de faibles dimensions (25 à 40 mm). Elle assure également un certain mélange des matières premières arrivant de la carrière et contenant de fortes proportions d'argile, de fer et de traces d'autres éléments. En effet, ils sont transportés par les camions puis déchargés dans un trémie reliée à un alimentateur à vitesse variable qui permet de réguler le débit d'alimentation.

L'opération de concassage est la deuxième opération après l'extraction de la matière première.

Dans ce qui suit nous présentons les caractéristiques du concasseur employé par l'entreprise

- Dimensions : 1200x1000 x600 mm
 - Puissance:1200KW (primaire)+1600KW(secondaire)
 - Débit moyen :800à1200t/h selon le pourcentage d'humidité
 - D poussilage :Filtre à manche
 - Débit gaz traité : 50 000 m³/ h à température ambiante
- Surface filtrante :deux caissons de266 manches(130 x3000mm)

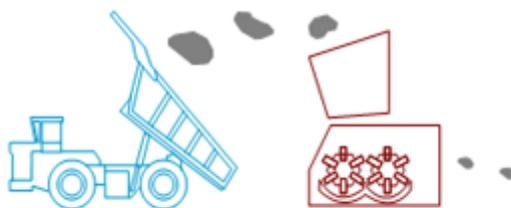


Figure (1.8) : concasseur

3. Broyeur Cru :

Les matières premières pré-homogénéisées doivent être finement broyées pour être chimiquement plus réactive au cours de leur cuisson dans le four. Elles passent donc dans des doseurs alimentant un broyeur sécheur (il ne doit pas pratiquement subsister des particules de dimensions supérieures à 0.2 mm). 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 l'humidité et du compactage des produits par les outils de broyage voir la(figure1.8).



Figure (1.9) :broyeur cru

2. Broyeur Conventionnel à Boulets :

Les cimenteries utilisent essentiellement des broyeurs à boulets. Ces broyeurs ont un faible rendement, car une grande partie de l'énergie fournie est transformée en chaleur. Le reste sert à la fragmentation des matériaux, mais aussi à leur réagglomération. Les grains sont traités collectivement à l'intérieur du broyeur par des boulets qui opèrent par chocs. Les Conditions Optimales de Broyage Sont:

- Le taux de chargement
- L'échelonnement des corps broyats
- Le diamètre des boulets
- La vitesse de rotation



Figure (1.10) :broyage

3. Cuisson

On entend par cuisson le processus de transformation de la matière crue en clinker par un apport thermique suffisant pour obtenir des réactions chimiques complètes conduisant à l'élimination presque totale de la chaux non combinée. Pour améliorer le bilan thermique, des échangeurs à cyclone sont utilisés en amont du four pour préchauffer la farine à une température aux environs de 900° C. La figure 1.14 présente les différentes étapes de la cuisson

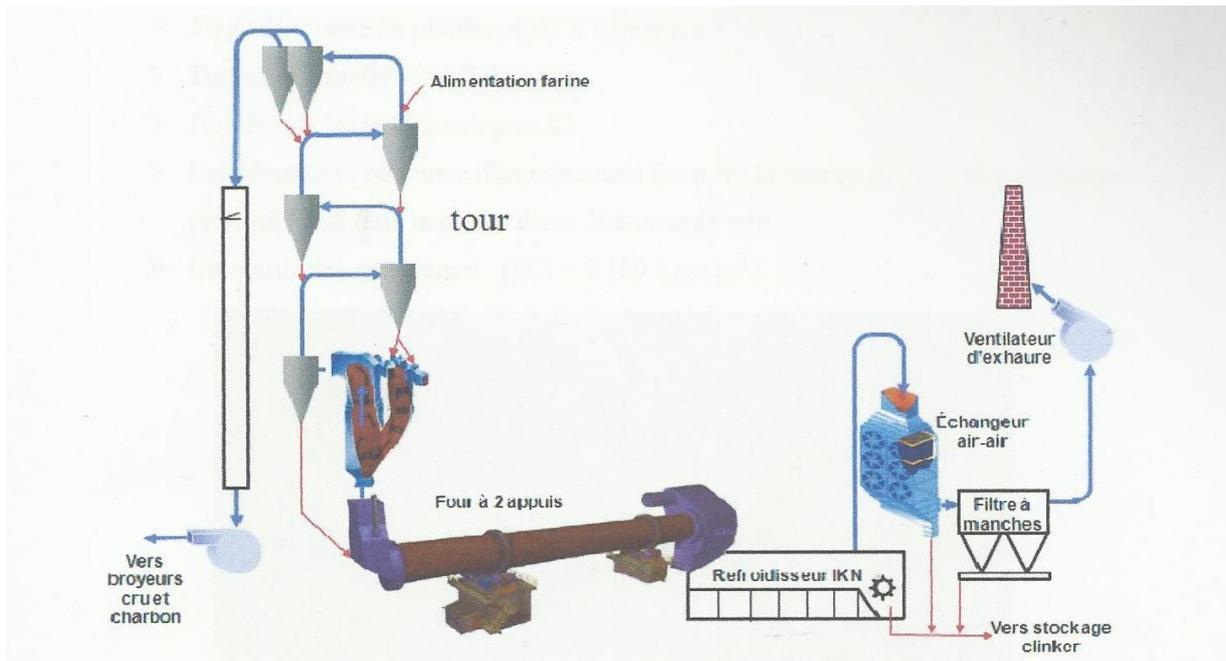


Figure (1.11) : l'atelier de cuisson

Le transfert de la chaleur dans les cyclones est dû à l'échange entre les gaz chauds sortant du four et le cru circulant à contre-courant, ce qui permet la décarbonatation du carbonate de calcium pour donner la chaux (CaO) avec dégagement du gaz carbonique (CO₂). Ce processus est appelé pré-calcination. Dans ce qui suit nous présentons les différentes composantes de l'atelier de cuisson avec les caractéristiques de chaque composante

➤ **préchauffeur :**

Le préchauffeur est un système comprenant quatre étages appelés cyclons

CYCLONE	C1	C2	C3	C4
Diamètre(enm)	3,35m	6,5m	6,5m	6,5m
Hauteur totale (enm)	7,15m	6,25m	6,25m	6,25m

Tableau (1.1) : Les étages de préchauffeur



Figure (1.12) : préchauffage

➤ **Four Rotatif :**

Le four est un réacteur en forme de tube rotatif incliné de 5 %. Le chauffage est assuré par une flamme au charbon installé à l'autre extrémité du four. La farine entrant dans le four à 1000°C environ est chauffée jusqu'à la température de frittage ou clinkérisation 1450°C. Dès lors les minéraux qu'elle contient, réagissent pour donner de nouvelles combinaisons minéralogiques principalement des silicates et des aluminates de calcium: le clinker.



Figure (1.13) :four rotatif

➤ **Refroidisseur:**

Il est situé à l'aval du four, c'est un refroidisseur à grilles horizontales au nombre de deux à commande hydraulique. Le refroidissement est assuré par onze ventilateurs. L'air produit

par ces ventilateurs est insufflé sous les grilles par des chambres de soufflage.

Le refroidisseur a un triple rôle:

- ✓ Refroidir le clinker qui sort du four.
- ✓ Récupérer le maximum de chaleur contenu dans le clinker.
- ✓ Assurer la trempe de clinker par un refroidissement énergétique et rapide.

➤ Ventilateur

Le système utilise deux ventilateurs d'exhaure. Leurs caractéristiques sont comme suit

- Débit d'air 155 000 m³/h
- Vitesse de rotation : 965 tr/mn
- Diamètre de la turbine : 2 250 mm
- Puissance du moteur : 450 KW

➤ Filtre à manche

Pour des raisons environnementales et économiques, la production du ciment nécessite la présence d'un système de filtration.

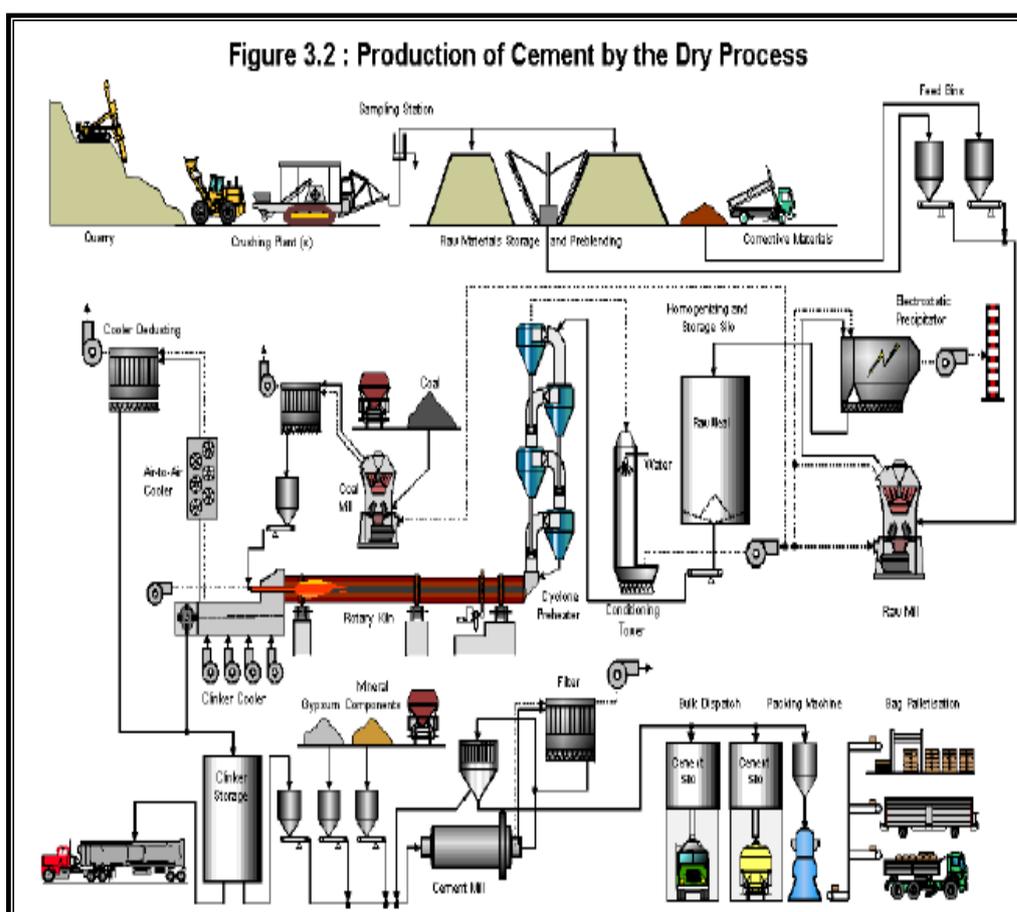


Figure (1.14):Schéma de production du ciment

4. Broyage du ciment

Cette zone comporte deux broyeurs, un séparateur et un électro filtre. Le broyage du ciment

est assuré par deux broyeurs à boulet (débit 90 t/h) en circuit fermé d'une puissance de 3 400 KW, équipé de séparateurs dynamiques, ces derniers sont alimentés par des élévateurs à godets de 400 t/h. L'air de ventilation du broyeur est épuré par un électro filtre. L'évacuation du ciment vers les silos de stockage est assurée par une pompe pneumatique: formant la zone de broyage ont les caractéristiques suivantes :

- Diamètre: 4 m
- Nombre de compartiments: 02
- Longueur utile de la 1^{ère} chambre: 4 250 mm
- Longueur utile de la 2^{ème} chambre: 9 750mm
- Charge de corps broyant de la 1^{ère} chambre: 67 tonnes
- Charge de corps broyant de la 2^{ème} chambre: 155 tonnes
- Vitesse de rotation: 15.7tr/mn
- Puissance installée du broyeur: 3 200KW
- Type de réducteur: Planétaire
- Attaque centrale : accouplement denté entre le broyeur et le réducteur ,et entre le

moteur et le réducteur

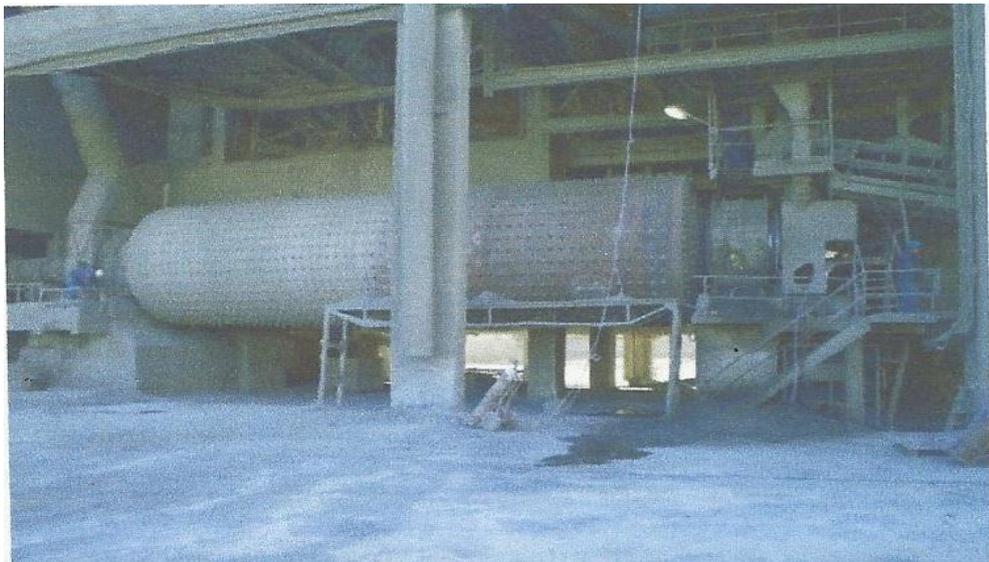


Figure (1.15) : Broyeur à ciment

a) Séparateur dynamique

Les éparateur dynamique et caractérisé par :

- Séparateur à air type ZUB45 WEDAG
- Diamètre de l'enveloppe: 4 500 mm
- Plage de vitesses du plateau: 55– 220 tr/mn
- Puissance absorbée du plateau:110 –115 KW

b) Electrofiltre

L'électro filtre est caractérisé par

- Un électro filtre à deux champs par broyeur
- Débit du gaz traité : 33000 nm³/h
- Ventilateur après filtre d'une puissance de: 75 KW

5. Expédition :

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage à partir desquels il est expédié soit en sacs, soit en vrac, par camions ou par voie ferrée.



Figure (1.16) :stockage du ciment

● Ligne blanc:

Cette procède est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie.Dans ce procédé, les sables sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau).On broye cette pâte avec calcaire et stocké dans de grands silo cru.



Figure (1.17) : broyeur cru

La farine est ensuite envoyée à l'entrée d'un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Un four rotatif légèrement incliné est constitué d'un cylindre d'acier dont la longueur peut atteindre 80 mètres. On distingue à l'intérieure du four plusieurs zones, dont les 3 zones principales sont:

- Zone de séchage.
- Zone de décarbonatation.
- Zone de clinker isation.

Les parois de la partie supérieure du four (zone de séchage - environ 20% de la longueur du four) sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges caloriques entre la farine et les parties chaudes du four.

Le clinker à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs (trempe du clinker) dont il existe plusieurs types (refroidisseur à eau). La vitesse de trempe a une influence sur les propriétés du clinker (phase vitreuse).

De toutes façons, quelque soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a un même clinker qui est encore chaud de environ 600-1200 °C. Après le refroidissement il faut de broyer, celui-ci très finement et très régulièrement avec environ 5% de gypse CaSO_4 afin de «régulariser» la prise.

Le broyage est une opération délicate et coûteuse, non seulement parce que le clinker est un matériau dur, mais aussi parce que même les meilleurs broyeurs ont des rendements énergétiques déplorables. Les broyeurs à boulets sont de grands cylindres disposés presque horizontalement, remplis à moitié de boulets d'acier et que l'on fait tourner rapidement autour de leur axe (20t/mn) et le ciment atteint une température élevée (160°C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs. On introduit le clinker avec un certain pourcentage de gypse en partie haute et on récupère la poudre en partie basse.

- Dans le broyage à circuit ouvert, le clinker ne passe qu'une fois dans le broyage.
- Dans le broyage en circuit fermé, le clinker passe rapidement dans le broyeur puis à la sortie, est trié dans un séparateur. Le broyage a pour but, d'une part de réduire les grains du clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (environ 4%) pour réguler quelques propriétés du ciment portland (le temps de prise et de durcissement).

On utilise aussi dans cette méthode le broyeur à sable, puisque le ciment est constitué du sable. Ce dernier qui émerger la différence entre les deux méthodes de fabrication. A la sortie du broyeur, le ciment à une température environ de 160 °C, il doit passer au refroidisseur à force centrifuge pour que la température de ciment reste à environ 65 °C.

V. Four rotatif

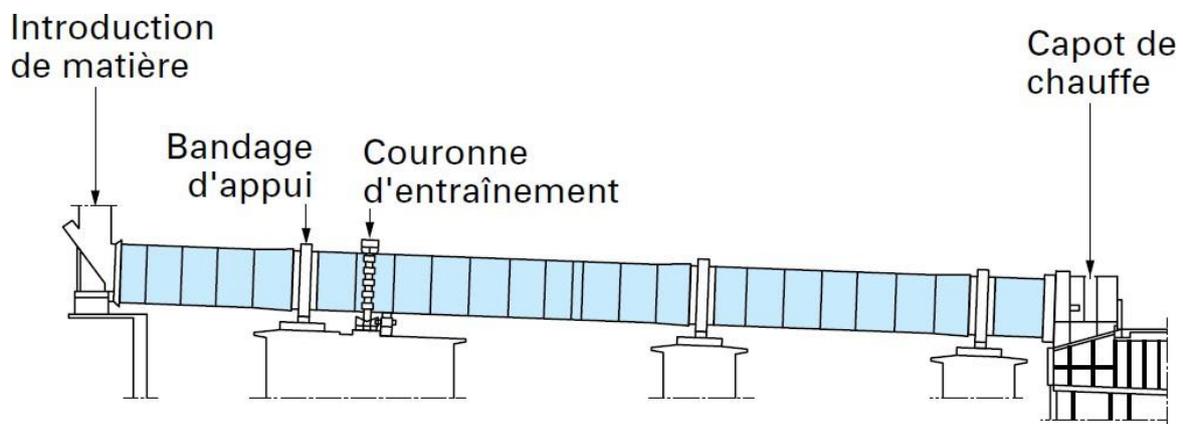
1. Description

Généralités

Les fours tournants (rotatif) sont très utilisés dans l'industrie du ciment, comme outils de production de clinker. Ils possèdent plusieurs avantages sur d'autres types de fours comme les lits fixes ; notamment le fait d'être des fours continus et le fait que les débits de production peuvent être élevés. Un procédé de combustion est nécessaire pour transformer le combustible chimique en chaleur capable de cuire le clinker. Une chaleur insuffisante peut laisser des particules de calcaire dans le clinker. A l'inverse, un excès de chaleur risque de diminuer la solidité des briques réfractaires du four, ce qui peut détériorer la virole de ce dernier.

Dans ce contexte plusieurs travaux ont été réalisés, à savoir Brimacombe et Watkinson (1978) [01] ont réalisé une étude sur le comportement thermique et le transfert de chaleur sur la paroi d'un four rotatif. Tandis que Tscheng et Watkinson (1979) ont développé un modèle pour calculer des coefficients de transfert de chaleur par convection du gaz des parois. Mastorakos et al. (1999) [02] ont réalisé une étude du comportement thermique d'un four rotatif avec la considération de la couche de croustade.

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



Figure(1.18) :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%) permettent à la matière de se mouvoir vers la sortie du four, à travers laquelle une flamme de 1450°C assure le chauffage du four et la cuisson du clinker.

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

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

- Obtenir la 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

Le tableau suivant représente les caractéristiques de four de LafargeHolcim Ofgaz

<i>Usine</i>	<i>Longueur(m)</i>	<i>Diamètre(m)</i>	<i>Vitesse(RPM)</i>	<i>Production (t/jour)</i>
LAFARGE HOLCIMOOGGAZ	80	3,8	4	6000

tableau (1.2) : les caractéristique de four de LafargeHolcim Oggaz

Analyse fonctionnelle

Bete à cornes :

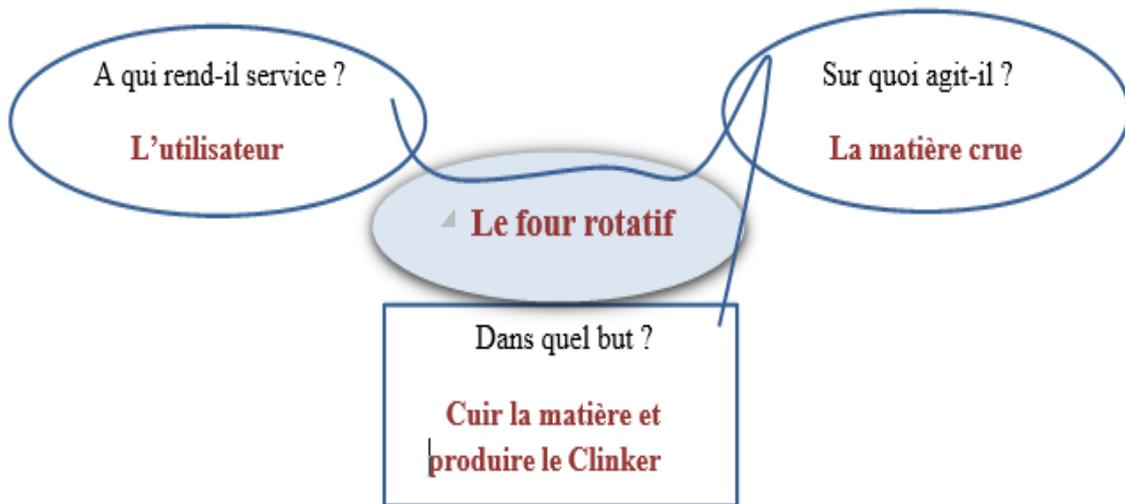


Figure (1.19) : bête à cornes

Diagramme Pieuvre :

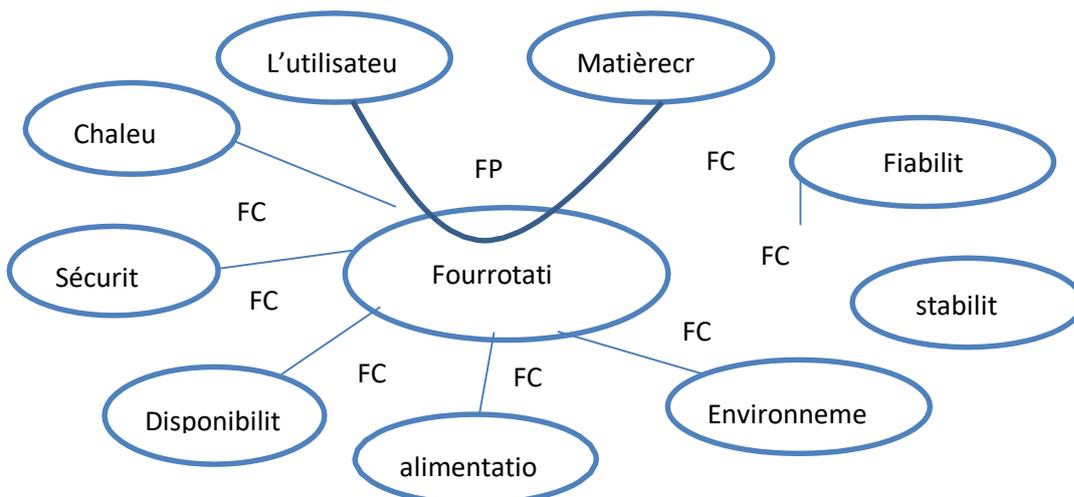


Figure (1.20) :diagramme pieuvre

- 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

Cahier des charges fonctionnelles:

Fonction	Critèred'appréciation	Niveaud'exigence	Flexibilité
FP1	Quantité produite	6000t/jour	+/-200t
FC1	Fiabilité	90%	+/-5%
FC2	Angled'appui	30°	+/-1°
FC3	NormeISO		
FC4	Puissance	520KW	+/-5%
FC5	Disponibilité	90%	+/-5%
FC6	Nombred'accident	1accident/an	+/-1
FC7	Température	1450°C	+/-50°C

Tableau (1.3):Cahier de charges fonctionnelles

Diagramme des solutions technologiques:

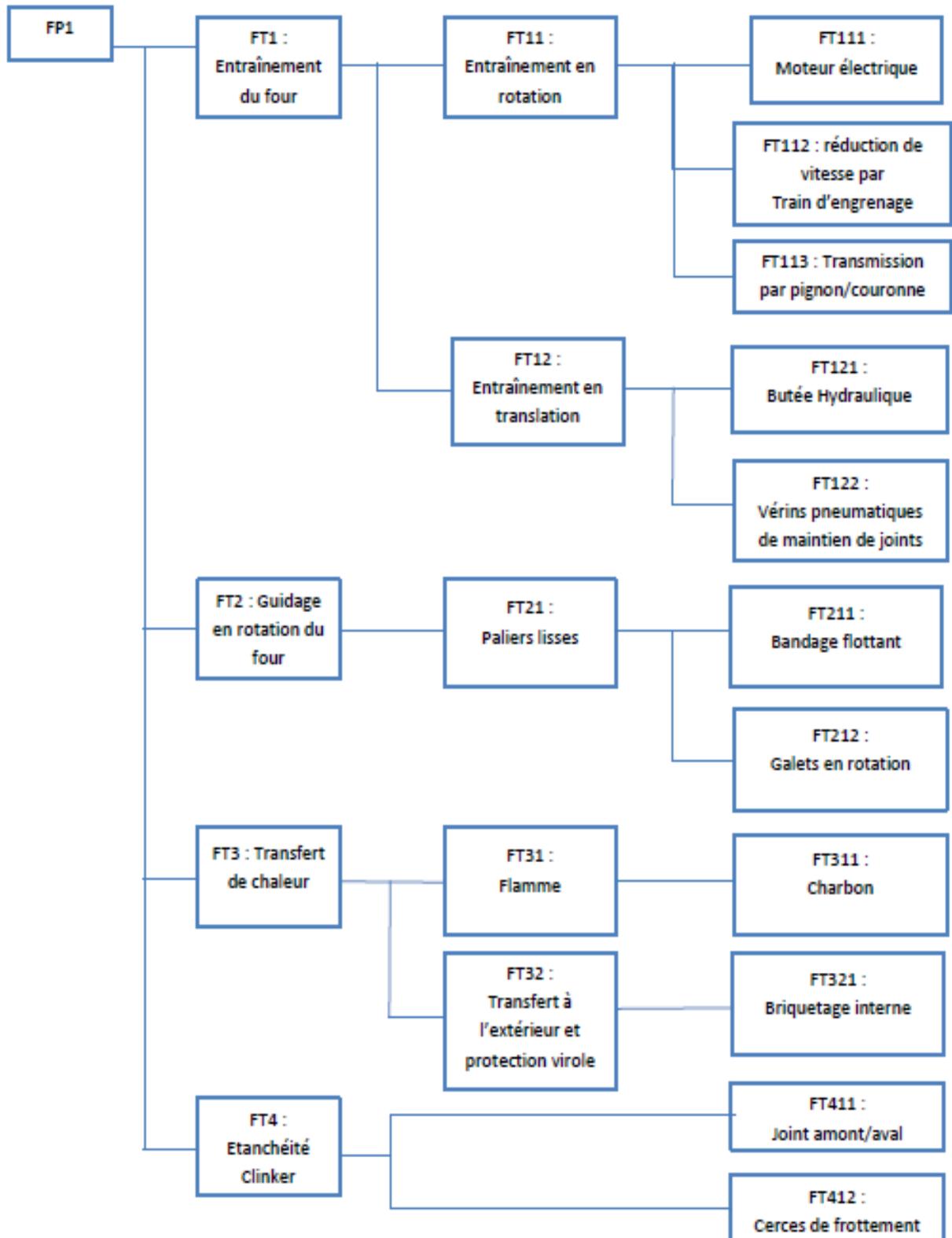


Figure (1.21): Diagramme des solutions technologiques

Description des 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.

✓ Rôle du bandage :

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

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

✓ Conception des bandages:

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

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

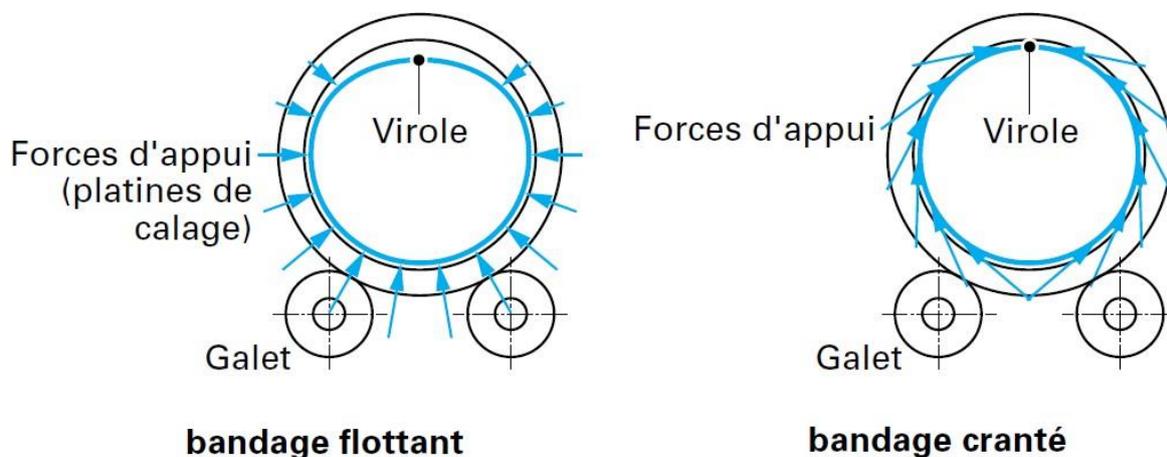


Figure (1.22):Types de bandages

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

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

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

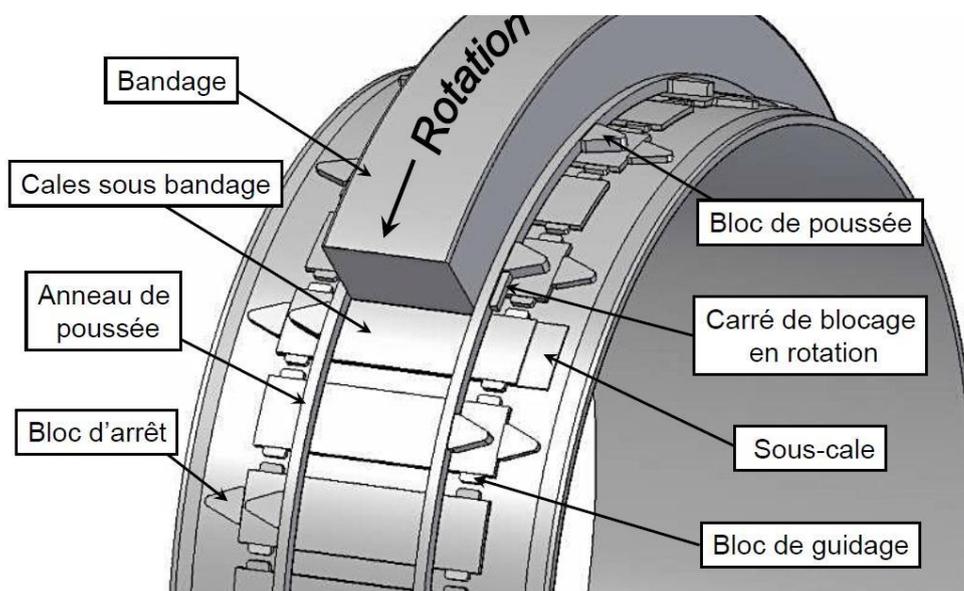


Figure (1.23): Bandage flottant

b. 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 formabilité, 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 :

Virole courante : épaisseur de 20mm
 Virole intermédiaire : épaisseur de 30mm ou 40mm
 Virole sous bandage: épaisseur 60mm

Propriétés de l'acier (S235 JRG2)

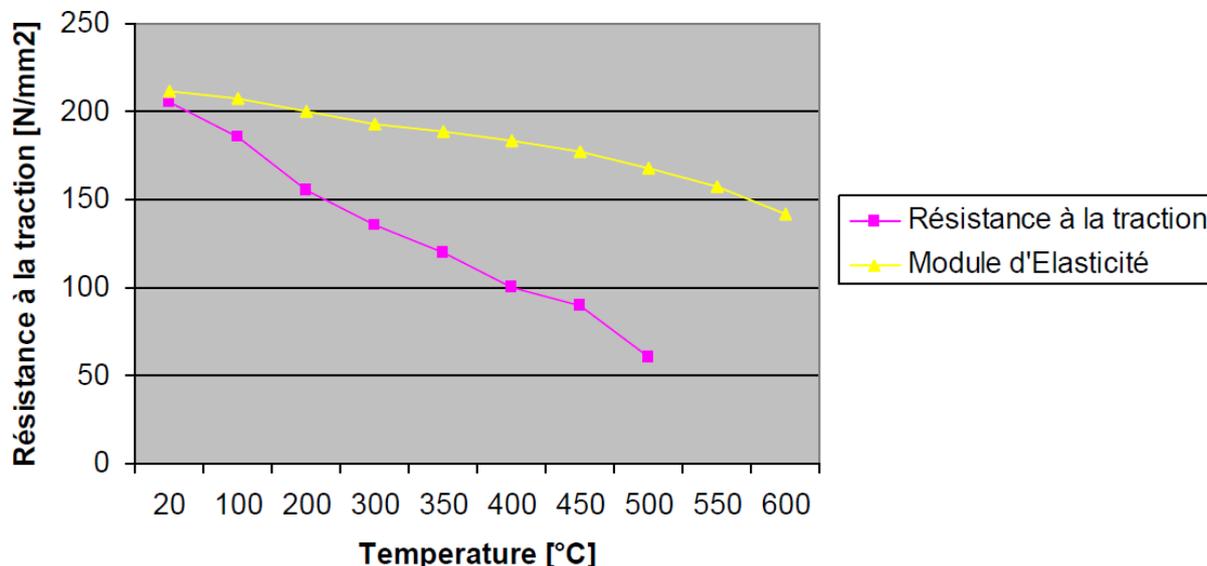


Figure (1.24) : Propriétés du matériau de la virole

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.

c. 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 voisine de la flamme de 1450°C à la sortie du four.

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

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

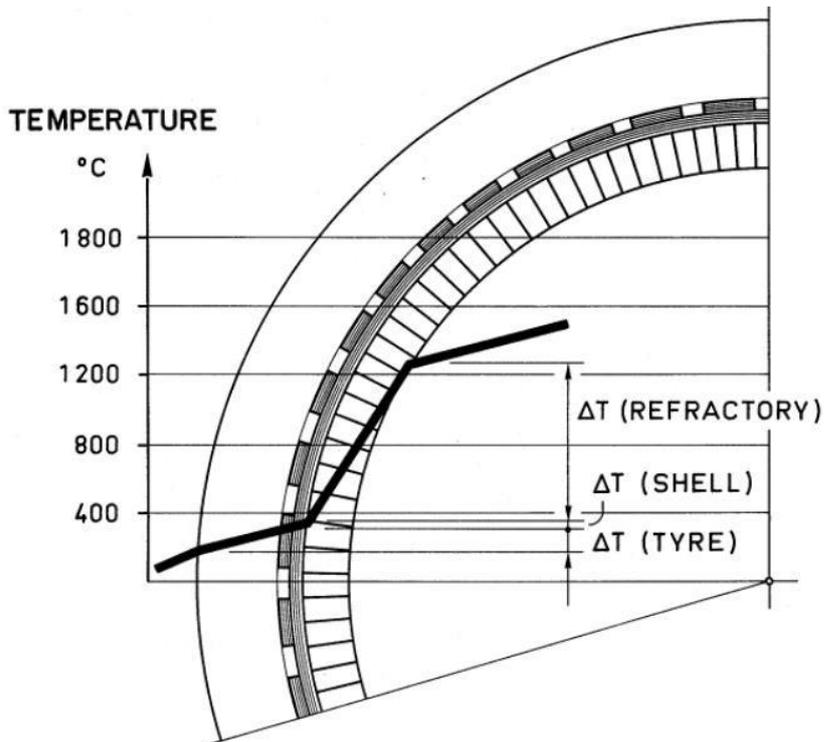


Figure (1.25): Evolution de la température entre bandage et les briques

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

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

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

d. Les galets :

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

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

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

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

e. Labutéehydraulique:

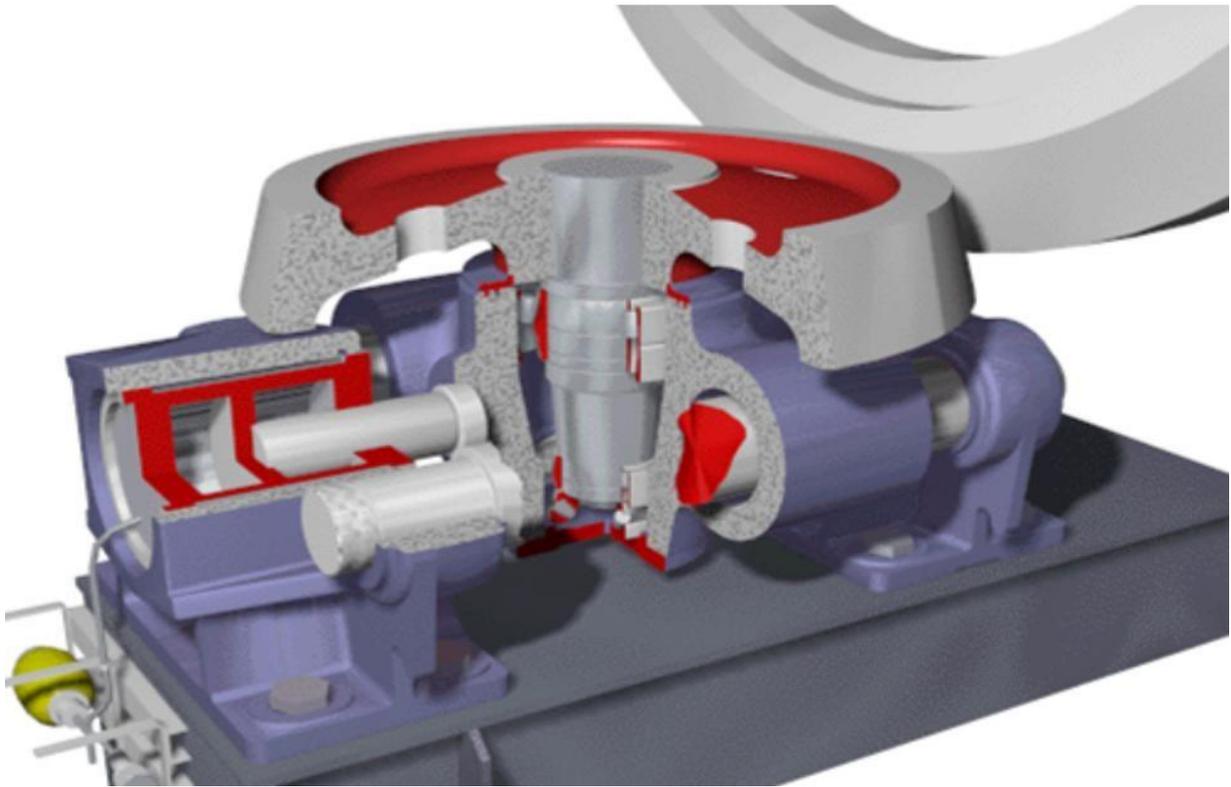


Figure (1.26):Butée hydraulique

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 continu 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.

Les composantes de la butée:

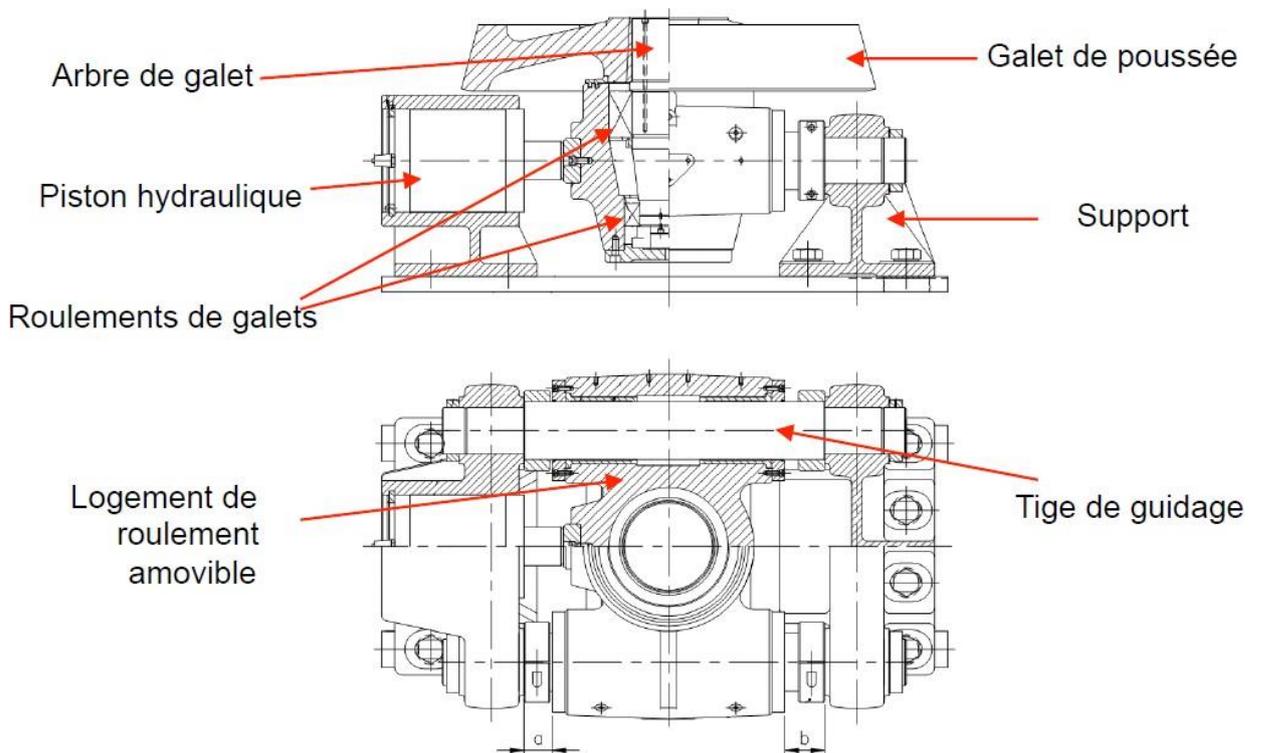


Figure (1.27): Les composantes de la butée hydraulique

f. Les joints du four:

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

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

Joint amont:

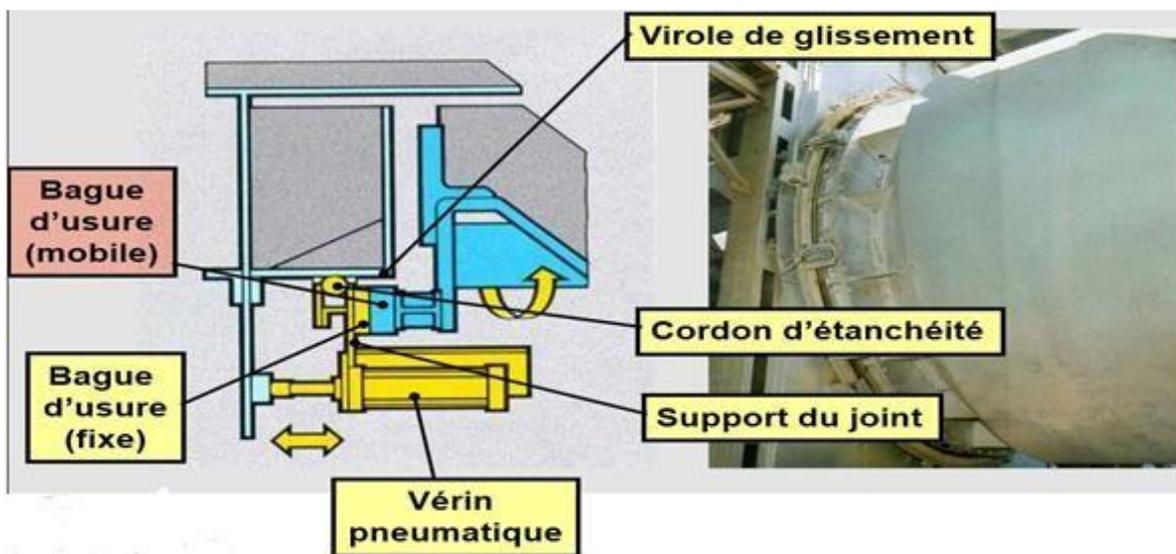


Figure (1.28) : Joint amont

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

Joint aval:

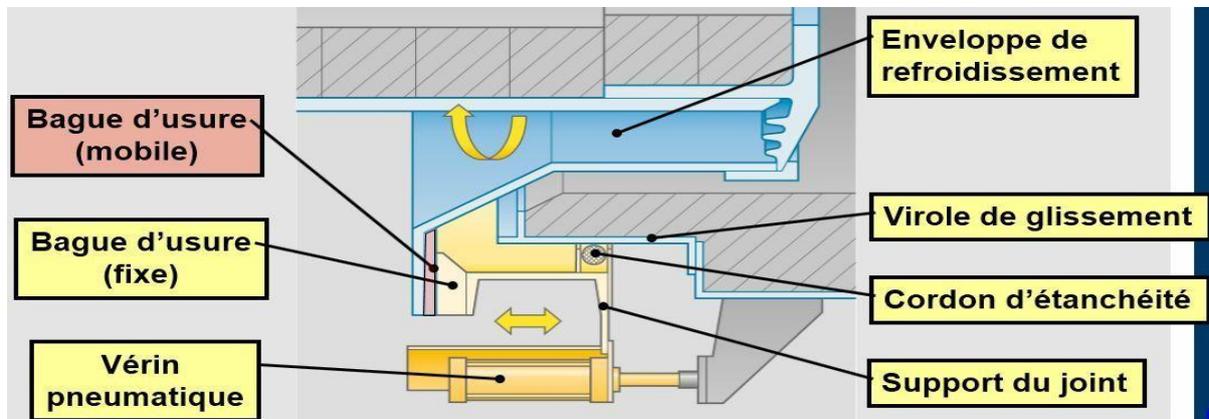


Figure (1.29): Joint aval

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

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

g. 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.

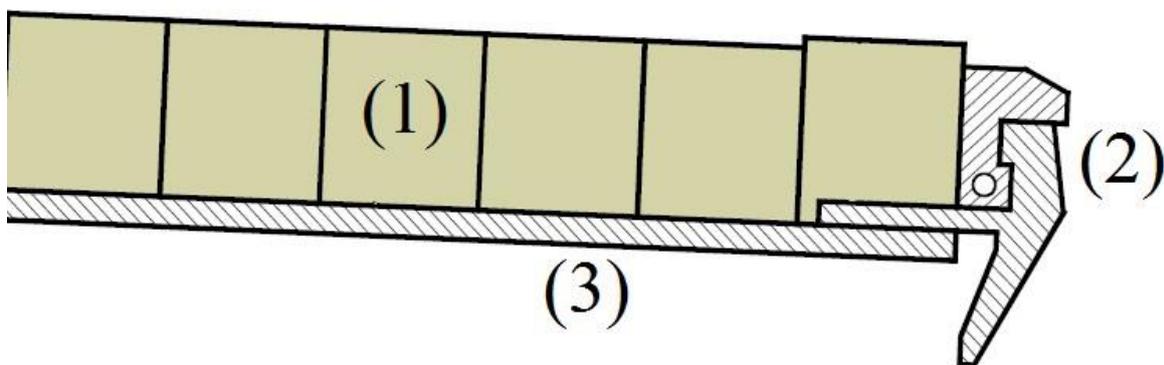


Figure (1.30) : Plaque nose-ring

(1) : les briques de la sortie du four

(2) : Plaque nose-ring

(3) : Virole de sortie du four

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

CHAPITRE II

Etude de La Maintenance et de La Fiabilité

I. Introduction

La maintenance s'inscrit parmi les contraintes que rencontre tout exploitant d'une installation industrielle. Plus généralement, une installation de production nécessitant un ensemble de moyens matériels et humains n'est en mesure d'assurer le service qu'on lui demande qu'après avoir surmonté diverses contraintes. Parmi ces contraintes, la maintenance des équipements de production et l'optimisation de leur durée de vie. Construire une usine ou un atelier ne sert à rien en l'absence de production significative, de personnel qualifié, ou d'un système d'organisation permettant le maintien en bon état des installations .

Les installations et les équipements tendent à se détériorer dans le temps sous l'action des causes multiples, telles que l'usure, la déformation due au fonctionnement ou l'action des agents corrosifs (agents chimiques, atmosphères, etc.). Ces détériorations peuvent provoquer l'arrêt de fonctionnement qui diminue les capacités de production et mettre en péril la sécurité des biens et des personnes et, ainsi provoquer des rébus et diminuer la qualité, augmenter les coûts de fonctionnement (augmentation de la consommation d'énergie, etc.) et diminuer la valeur marchande des ces moyens. On doit effectuer des opérations de dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration etc., qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production. Bien maintenir c'est aussi assurer les opérations d'exploitation au coût global optimal.

Aujourd'hui la maîtrise de la disponibilité des biens, des matériels et des équipements industriels, permet à l'industrie d'agir sur la régularité de la production, sur les coûts de fabrication, sur la compétitivité et sur le succès commercial. Pour vendre plus et mieux, il s'agit non plus seulement de proposer un meilleur mode de conduite de l'installation mais de garantir à l'exploitant un mode d'intervention rapide, une mise en place de détection et de diagnostic de défaillances, en un mot, il faut assurer une maintenance de qualité permettant d'atteindre la production optimum.

II. Description de la maintenance.

1. Définitions

La fonction maintenance est définie par la norme AFNOR NF-X-60-010, comme celle qui consisterait à maitre en œuvre tous les moyens disponibles pour maintenir les machines en bon état de fonctionnement, jusqu'au moment où elles doivent être retirées du service

L'AFNOR définit la maintenance «Comme étant ; l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié et en mesure d'assurer un service déterminé dans un temps déterminé »

Le terme maintenir renferme la notion de prévention sur un système en fonctionnement, tandis que rétablir supporte la notion de correction après défaillance

➤ Le projet "CEN" (Comité Européen de Normalisation) définit la maintenance par :

« L'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion durant le cycle de vie d'un matériel, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ».

La fonction requise est ainsi définie par : « la fonction ou l'ensemble des fonctions d'un bien considéré comme nécessaire pour fournir un service déterminé ». On remarque l'apparition d'un nouveau concept ; le projet européen ajoute une idée intéressante : les actions de la maintenance se rapportent au cycle de vie des matériels, ce qui implique une vision à moyen et à long terme de la stratégie de maintenance.

2. Objectifs de la maintenance

Selon la politique de maintenance de l'entreprise, les objectifs de la maintenance seront :

- la disponibilité et la durée de vie du bien
- la sécurité des hommes et des biens
- la qualité des produits
- la protection de l'environnement
- l'optimisation des coûts de maintenance

La politique de la maintenance conduit, en particulier, à faire des choix entre la maintenance corrective et préventive (systématique ou conditionnelle).

3. Stratégie de la maintenance

La stratégie de la maintenance est une méthode de management utilisée en vue d'atteindre les objectifs de la maintenance. Les choix de la stratégie de la maintenance permettent d'atteindre un certain nombre d'objectifs de maintenance

- Développer, adapter ou mettre en place des méthodes de maintenance
- Elaborer et optimiser les gammes de maintenance
- Organiser les équipes de maintenance
- Internaliser et/ou externaliser partiellement ou totalement les tâches de maintenance
- Définir, gérer et optimiser les stocks des pièces de rechange et des consommables

- Etudier l'impact économique (temps de retour sur l'investissement) de la modernisation ou de l'amélioration de l'outil de production en matière de productivité et de maintenabilité.

III. Service maintenance

1. Fonctions du service maintenance

Les fonctions du service maintenance sont présentés dans le tableau 2.1

Le service de la maintenance	Etude
	Préparation
	Ordonnancement
	Réalisation
	Gestion

Tableau (2 . 1) Fonctions du service maintenances

a) Fonction étude

Sa mission principale est l'analyse du travail à réaliser en fonction de la politique de la maintenance choisie. Elle implique la mise en œuvre d'un plan de maintenance avec des objectifs chiffrés et des indicateurs mesurables.

b) Fonction préparation

La préparation des interventions de maintenance doit être considérée comme une fonction à part entière du processus de la maintenance. Toutes les conditions nécessaires à la bonne réalisation d'une intervention de maintenance seront ainsi prévues, définies et caractérisées. Une telle préparation devra bien sûr s'inscrire dans le respect des objectifs généraux tels qu'ils sont définis par la politique de maintenance, tel que : coût, délai, qualité, sécurité,...

c) Fonction ordonnancement

L'ordonnancement représente la fonction du "chef d'orchestre". Dans un service maintenance caractérisé par l'extrême variété des tâches en nature, en durée, en urgence et en criticité.

d) Fonction réalisation

La réalisation consiste à mettre en œuvre les moyens définis dans le dossier de préparation

dans les règles de l'art, pour atteindre les résultats attendus dans les délais préconisés par l'ordonnancement.

e) Fonction gestion Domaines

La fonction gestion du service maintenance devra être capable d'assurer la gestion des équipements, la gestion des interventions, la gestion des stocks, la gestion des ressources humaines et la gestion du budget.

2. Domaines d'action du service maintenance

Voici la liste des différentes tâches dont un service maintenance peut avoir la responsabilité

- La maintenance des équipements : actions correctives et préventives, dépannages, réparations et révisions.
- L'amélioration du matériel dans l'optique de la qualité, de la productivité et de la sécurité.
- Les travaux neufs: participation au choix, à l'installation et au démarrage des équipements nouveaux.
- Les travaux concernant l'hygiène, la sécurité, l'environnement, la pollution et les conditions de travail
- L'exécution et la réparation des pièces de rechanges.
- L'approvisionnement et la gestion des outillages et pièces de rechange
- L'entretien général des bâtiments administratifs ou industriels, des espaces verts, des véhicules,... ce qui prouve le bien-fondé d'une formation polyvalente

3. Place du service maintenance dans l'entreprise

Les installations et les équipements tendent à se détériorer dans le temps sous l'action de causes multiples : usures, déformations dues au fonctionnement et action des agents corrosifs. Ces détériorations peuvent provoquer l'arrêt de fonctionnement, diminuer les capacités de production, mettre en péril la sécurité des personnes, provoquer des rebuts, diminuer la qualité et, augmenter les coûts de la production ou d'exploitation et diminuer la valeur marchande de ces moyens. Dans tous les cas ces détériorations engendrent des coûts directs ou indirects supplémentaires. Le service maintenance, comme le service de sécurité, devient une interface entre toutes les entités qui composent l'entreprise . voir figure 1

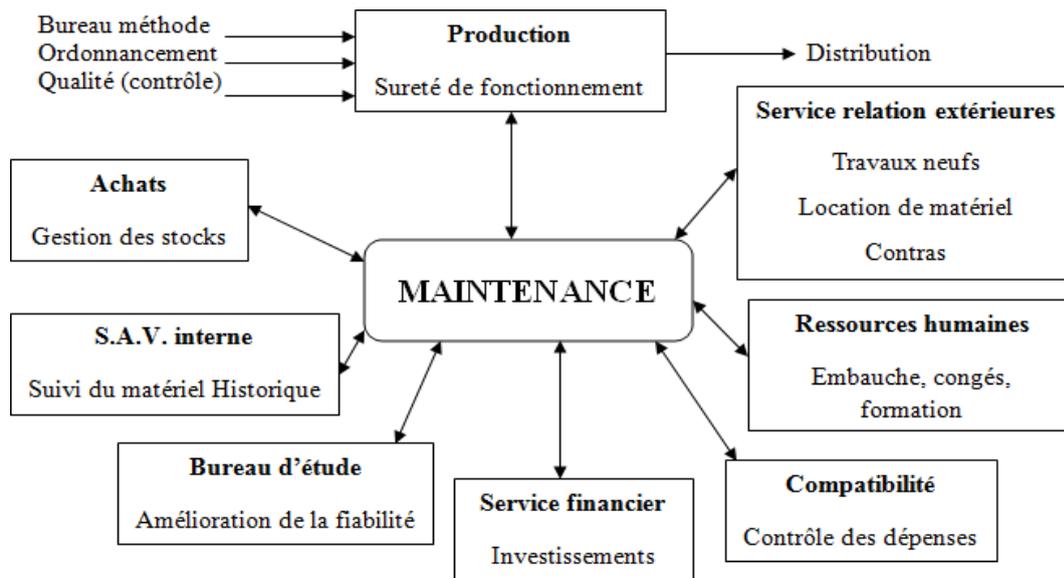


Figure (2 .1) Place du service maintenance dans l'entreprise

4. Organisation du service maintenance

Deux types d'organisation peuvent être mises en place selon la spécificité et la taille de l'entreprise .

a) Maintenance centralisée

Ce type d'organisation prévoit la centralisation de toutes les activités de maintenance sous forme d'une seule entité. Cette entité gère la maintenance globale de toute l'entreprise (ateliers et secteurs). Parmi les avantages de ce type d'organisation on peut citer :

- Facilité de planning
- Facilité de surveillance
- Magasins bien équipés
- Contrôle effectif de la main-d'œuvre

b) Maintenance décentralisée

Chaque secteur d'activité a son atelier sectoriel de maintenance. Comme caractéristique de ce type d'organisation on trouve :

- Service rapide
- Connaissances spécialisées

- Moins de paperasse
- Définir les frais réels de maintenance par poste de travail.

5. Technicien de maintenance

La technologie des matériels actuels implique une compétence technique polyvalente. Les frontières entre les domaines mécanique, électrique, hydraulique, pneumatique, informatique ... ne sont pas évidentes sur une machine compacte

Une polyvalence au niveau de la gestion est aussi indispensable, ainsi que la maîtrise des données techniques, économiques et sociales. Le profil du technicien de maintenance est celui d'un homme de terrain, de contact et d'équipe, qui s'appuie sur sa formation initiale puis sur son expérience pour faire évoluer la prise en charge du matériel dont il a la responsabilité.

6. Management de la maintenance

Le management de la maintenance est à la charge d'une (ou plusieurs) personne(s) désignée(s) dont les responsabilités et les autorités doivent être définies. Les objectifs de la maintenance sont :

- Définir les profils d'emploi nécessaires à l'accomplissement de la mission de la fonction maintenance
- Permettre d'assurer les tâches de la maintenance avec un optimum d'efficacité
- S'assurer que les règles de la sécurité sont connues et mises en œuvre
- Etre conforme aux exigences réglementaires.

IV. Concepts de la maintenance

L'analyse des différentes formes de maintenance repose sur quatre concepts

1. Événements de l'origine de l'action

- La référence à un échancier
- La subordination à un type d'événements prédéterminés (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure...)
- L'apparition d'une défaillance.

2. Méthodes de la maintenance

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise. Pour le bon choix des critères de la maintenance, il faut connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels, leur comportement en exploitation, les conditions d'application de chaque méthode, les coûts de maintenance et les coûts de perte de production.

D'après les normes AFNOR X600 10 et X 600 11, on peut distinguer deux grandes formes de maintenance « Corrective et Préventive », voir figure 2.

a) Maintenance corrective

La maintenance corrective appelée parfois curative a pour objet de redonner au matériel des qualités perdues, nécessaires à son utilisation.

La maintenance corrective est « la maintenance exécutée après détection d'une panne et elle est destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». Cette maintenance est utilisée lorsque l'indisponibilité du système n'a pas de conséquences majeures ou quand les contraintes de sécurité sont faibles .

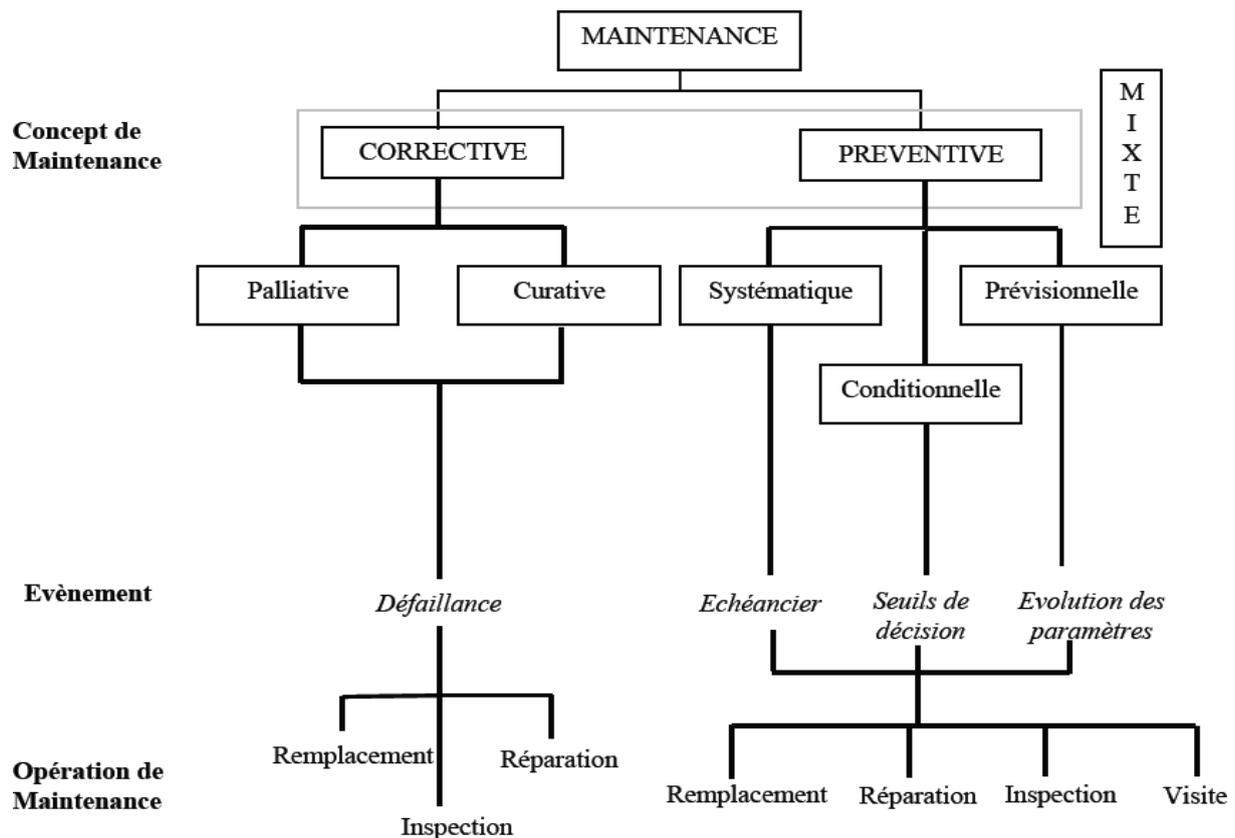


Figure (2.2) Méthodes de la maintenance

b) Maintenance préventive

Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dont l'objectif est de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

Buts de la maintenance préventive :

- Augmenter la durée de vie des matériels
- Diminuer la probabilité des défaillances en service
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne
- Prévenir et prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective
- Permettre de décider la maintenance corrective dans des bonnes conditions
- Éviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, de pièces détachées, etc.
- Améliorer les conditions de travail du personnel de production.
- Diminuer le budget de maintenance.
- Supprimer les causes d'accidents graves.

c) Maintenance préventive systématique

C'est la maintenance préventive effectuée sans contrôle préalable de l'état du bien conformément à un échéancier établi selon le temps, le nombre de cycles de fonctionnement, le nombre de pièces produites ou un nombre prédéterminé d'usages pour certains équipements (révisions périodiques) ou organes sensibles (graissage, étalonnage, etc..).

La maintenance systématique se traduit par l'exécution sur un équipement à dates planifiées d'interventions dont l'importance peut s'échelonner depuis le simple remplacement de quelques pièces jusqu'à la révision générale.

- Remise à niveau d'une ligne de production par arrêt annuel
- Révision générale d'un équipement
- Echange standard d'un sous-ensemble ou d'un composant sensible (filtre, joint, durite, balais d'un moteur CC, etc...)
- Lubrification

Les travaux révèlent alors un caractère systématique (contrairement à ce qui se passe dans la maintenance conditionnelle), ce qui suppose une parfaite connaissance du comportement de l'équipement, de ses modes et de sa vitesse de dégradation .

a. Maintenance préventive conditionnelle

Définition

C'est la « maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure, etc.) ou à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation et de la baisse des performances d'une entité ».

Cette surveillance de la dégradation permet de fixer un seuil d'alarme avant un seuil d'admissibilité (Figure 3). Le principal intérêt d'une telle stratégie est de pouvoir utiliser les entités au maximum de leur possibilité, mais aussi de diminuer le nombre des opérations de maintenance corrective .

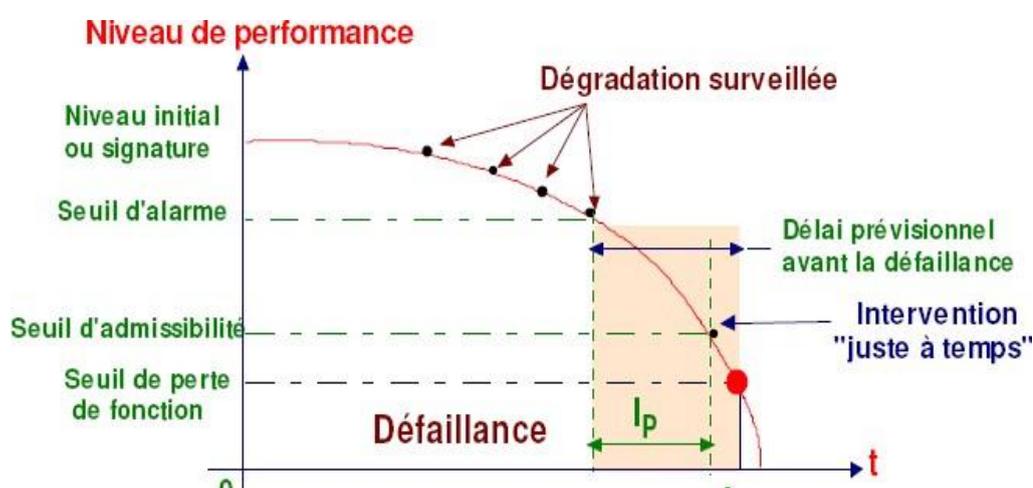


Figure (2.3) Principe de la maintenance conditionnelle

Elle se traduit par une surveillance des points sensibles de l'équipement, cette surveillance étant exercée au cours des visites préventives. Ces visites soigneusement préparées, permettent d'enregistrer différents paramètres : degré d'usure, jeu mécanique, température, pression, débit, niveau vibratoire, pollution ou tout autre paramètre qui puisse refléter l'état de l'équipement. Le niveau de performance initial, quelque soit le paramètre surveillé, s'appelle aussi « signature » de l'équipement : c'est la référence de bon fonctionnement de celui-ci pour le point sensible surveillé. Les mesures peuvent être :

- Visuelles (examen de l'usure à l'aide d'une cote, observation d'un jeu mécanique, d'une courroie détendue, etc...)
- Réalisées à partir d'appareil de mesures (voltmètre, oscilloscope, analyseur despectre, radiographie, comptage de particules, etc...)

- Visualisables grâce à des capteurs pré-réglés (témoin de plaquette de frein sur une voiture, témoin de température, etc...)

On ne décide des travaux de remise en état (changement de pièces, réparation, réglages) que si les paramètres contrôlés mettent en évidence une défaillance.

La décision « volontaire » d'intervention est donc liée au résultat des visites préventives qui sont réalisées de façon systématique et en fonction d'un planning. La maintenance préventive conditionnelle permet donc de « retarder » et de planifier les interventions .

b. But de la maintenance conditionnelle

Il s'agit de respecter les conditions suivantes

- D'éliminer ou de limiter le risque de panne, l'intervention ayant lieu avant que la dégradation n'atteigne un caractère critique
- De maintenir la production à un niveau acceptable, tant en quantités fabriquées qu'en qualité du produit
- De diminuer les temps d'arrêt, par la limitation du nombre des pannes, par une meilleure préparation des interventions (efficacité) et par une utilisation des créneaux horaires ne perturbant pas la production (ordonnancement)
- De réduire les dépenses d'entretien en intervenant à un stade précoce des dégradations, évitant ainsi des remises en état très coûteuses
- D'intervenir dans les meilleures conditions possibles, sans urgence, au moment choisi, avec la préparation adéquate
- De ralentir le vieillissement

La maintenance conditionnelle nécessite de connaître les points faibles des machines afin de les surveiller à bon escient. Elle devra aboutir à du « concret » si nécessaire (arrêt de la machine, échange d'une pièce parfois importante). Elle devra être prévue dès la conception de la machine, afin d'intégrer les capteurs nécessaires à la surveillance. L'exemple classique sur une automobile est le témoin de température ou le témoin de niveau d'huile. Mais, attention aux fausses informations, car un capteur peut lui aussi être soumis à une défaillance.

c. Formes de la maintenance conditionnelle

Selon la périodicité des mesures, on distinguera :

- **Surveillance périodique** : l'intervalle du temps Δt est fixé en fonction de la vitesse estimée de dégradation ; elle permet de détecter l'apparition de défauts à évolution lente. La période peut aller de deux semaines à six mois selon l'importance et le coût des équipements en cause

- **Surveillance continue** : les capteurs délivrent de manière continue une information, donc dans ce cas $\Delta t \rightarrow 0$. A la limite, on est capable de suivre sur écran ou sur traceur la loi de dégradation du matériel. Elle permet donc de suivre des défauts à évolution rapide. L'intervention préventive est alors signalée par une alarme. Cette alarme peut interrompre l'équipement si nécessaire (pour cause de sécurité par exemple). C'est certainement la forme la plus moderne de la maintenance. On y retrouve bien sûr, l'aspect maintenance conditionnelle et aussi la notion de surveillance auxquels on va associer le pouvoir de décision et d'ordonnancement.

4. Opérations de maintenance

a) Opérations de maintenance corrective

- **Dépannage**

Action sur un matériel en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement. Compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder des résultats provisoires (maintenance palliative) avec des conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas, elle sera suivie de la réparation. Le dépannage n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation sont à la base d'un bon diagnostic et permettent souvent de gagner du temps.

Souvent, les opérations de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses. De ce fait, les services de maintenance soucieux d'abaisser leurs dépenses tentent d'organiser les actions de dépannage. Ainsi, le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt .

- **Réparation**

Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après une panne ou une défaillance. L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite

d'un incident ou d'une défaillance soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

Remarque : la réparation correspond à une action définitive. L'équipement réparé doit assurer les performances pour lesquelles il a été conçu

Opérations de maintenance préventive

- **Inspections**

Activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements.

- **Visites**

Opérations de surveillance qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies préalablement qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel. Une visite peut entraîner une action de maintenance corrective.

- **Contrôles**

Vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement. Le contrôle peut :

- Comporter une activité d'information
- Inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement
- Déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

- **Opérations de surveillance**

Sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien (contrôles, visites, inspections). Elles sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou calculées sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

V. Cinq niveaux de maintenance

Les interventions de la maintenance ne sont pas tous identiques, D'une manière générale, selon la norme AFNOR elles sont classées en cinq niveaux en fonction de critères : la complexité des opérations à réaliser, la qualification des intervenants, la définition des procédures d'intervention, ainsi que l'outillage nécessaire et les pièces de rechanges.

Niveau	Types de travaux	Intervenant	Moyens
1^{er}Niveau	Réglage simples prévus par la constructeur ou moyen d'organes accessibles sans aucun démontage , ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité.	Pilote ou conducteur du système	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation
2^{eme} Niveau	Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations Mineures de maintenance préventive, telles que graissage ou contrôle de bon fonctionnement .	Technicien habilité	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation et pièce de rechanges sans délai
3^{eme} Niveau	Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général ou réaligement des appareils de mesure.	Technicien spécialisé	Outillage prévu et appareils de mesure, banc d'essai, contrôle
4^{eme} Niveau	Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction.	Equipe encadrée par un technicien spécialisé	Outillage général et spécialisé, matériels d'essai de control ..
5^{eme} Niveau	Travaux de rénovation, de Reconstruction ou réparation importantes confiée à un central.	Equipe complète et polyvalente	Moyens proches de la fabrication

Tableau (2.2) : Les Niveaux de maintenance

VI. Méthodes d'optimisation de la maintenance

Dans le contexte actuel d'ouverture des marchés, les entreprises doivent améliorer leur produit et donc leur productivité. « Produire plus et moins cher », avoir une meilleure disponibilité des moyens de production. Or la maintenance doit comprendre une maintenance mieux ciblée, qui augmente la disponibilité et une maintenance mieux maîtrisée, qui donne moins de dépenses. Au vu de l'importance du processus de maintenance et de son impact sur les performances des installations, des méthodes d'optimisation ont été développées permettant d'aider les responsables de la maintenance à construire ou à modifier les stratégies, telle que la méthode AMDEC, la méthode Ishikawa (ou le diagramme Causes Effets), Le diagramme de Pareto, méthode des 5S....

1. Méthode AMDEC

Le mot « AMDEC » signifie l'analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leur criticité. C'est une Technique d'analyse préventive permettant d'identifier et de traiter les causes potentielles des défauts et de défaillance avant qu'ils ne surviennent. AMDEC est une méthode rigoureuse de travail en groupe, très efficace grâce à la mise en commun de l'expérience et des connaissances de chaque participant, à condition toutefois que le responsable soit suffisamment expérimenté. On distingue :

- **AMDEC Produit**, pour vérifier le produit et la conformité développée par rapport aux exigences du client
- **AMDEC Processus**, pour valider la fiabilité du processus de fabrication
- **AMDEC Moyen**, pour vérifier la fiabilité des équipements.

Le principe consiste à recenser toutes les causes potentielles de chaque mode de défaillance et d'évaluer la criticité, qui résulte d'une triple cotation quantifiée :

- "**G**" : Gravité ou sévérité de l'effet du défaut ou de la défaillance
 - "**F**" : Occurrence ou fréquence d'apparition de la défaillance
 - "**D**" : Détection : probabilité de non détection de la défaillance
- L'indice de la criticité est obtenu par le produit des trois notes : $C = G * F * D$

❖ **Remarque :**

Plus la criticité est importante, plus le mode de défaillance considéré est préoccupant. Lorsque la criticité dépasse la limite prédéfinie par le groupe, ce dernier recherche les actions d'amélioration possible pour la ramener à un niveau acceptable en analysant :

- La gravité (exemple : la gravité d'une fuite de carburant sera diminuée par la mise en place d'un bassin de rétention),
- L'occurrence (exemple : en augmentant la fiabilité d'un composant, par la maintenance préventive ...),
- La non-détection (exemple : en mettant en place des outils de contrôle et de surveillance, en formant les contrôleurs...).

2. **Diagramme de « Pareto »**

a) **Présentation**

Le diagramme de « Pareto », également connu sous le nom de la loi des (80/20) est une méthode d'optimisation et de résolution des problèmes très connue dans le milieu industriel. De façon générale, on s'aperçoit que dans la plupart des situations, 80% des dépenses sont entraînées par 20% des défaillances. Rapporté à la maintenance, cela signifie que 80% des arrêts d'équipements vont être causés par seulement 20% des pannes référencées. Seulement, pour arriver à de telles conclusions, une analyse préliminaire est nécessaire, chose que nous allons détailler dans la suite à travers un exemple pratique.

b) **Construction du diagramme de « Pareto »**

La construction du diagramme de Pareto va se faire en plusieurs étapes :

- Le recensement de la récurrence des défaillances en fonction des causes
- On liste l'ensemble des causes des défaillances, et on associe le nombre de pannes qui en sont les conséquences.
- On classe ensuite par ordre décroissant de récurrence les causes des défaillances.
- On réalise le cumul des causes des défaillances, puis on ramène cela en pourcentage du total des défaillances, de façon à faire apparaître les causes les plus importants.
- On sélectionne les causes principales qui sont à l'origine de 80% des pannes matérielles .

c) Analyse des résultats

Le travail d'analyse des causes peut s'avérer très utile afin de se focaliser sur les sources de pannes. On établira cependant un historique fiable et complet à partir duquel on pourra extraire des chiffres justes de façon à ne pas se tromper dans la suite de la résolution des pannes.

VII. Description de la fiabilité

1. Définition

La fiabilité caractérise l'aptitude d'un système ou d'un matériel à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné.

. Elle est définie par :

- **Probabilité** : c'est le rapport :

$$\frac{\text{nombre de cas favorables}}{\text{nombre de cas possibles}} < 1$$

On notera $R(t)$ la probabilité de bon fonctionnement à l'instant (t) .

Le symbole "R" a pour origine le mot anglais (reliability).

On notera $F(t)$ la fonction définie par

$$F(t)=1-R(t),$$

c'est la probabilité complémentaire (ou événement contraire).

$F(t)$ est la probabilité de défaillance cumulative à l'instant (t)

2. Fiabilité et qualité

Ces notions sont indissociables. Si la qualité est prise dans son sens général de « satisfaction » du besoin des utilisateurs, il est évident que la fiabilité est un élément de la satisfaction de l'utilisateur. La fiabilité c'est la probabilité de bon fonctionnement.

Si la qualité est prise dans le sens « qualité initiale », nous pourrions dire que la qualité initiale garantit la conformité d'un produit à ses spécifications, alors que la fiabilité mesure son aptitude à demeurer conforme le long de sa vie utile. La fiabilité est l'extension de la qualité initiale dans le temps. Il n'y a pas de bonne fiabilité sans bonne qualité .

3. Expressions mathématiques de la fiabilité

Fonction de distribution et de répartition

Notion de variable aléato

On appelle variable aléatoire "T" une variable telle qu'à chaque valeur (t) de "T" on puisse associer une probabilité "f (t)". Une variable aléatoire peut être :

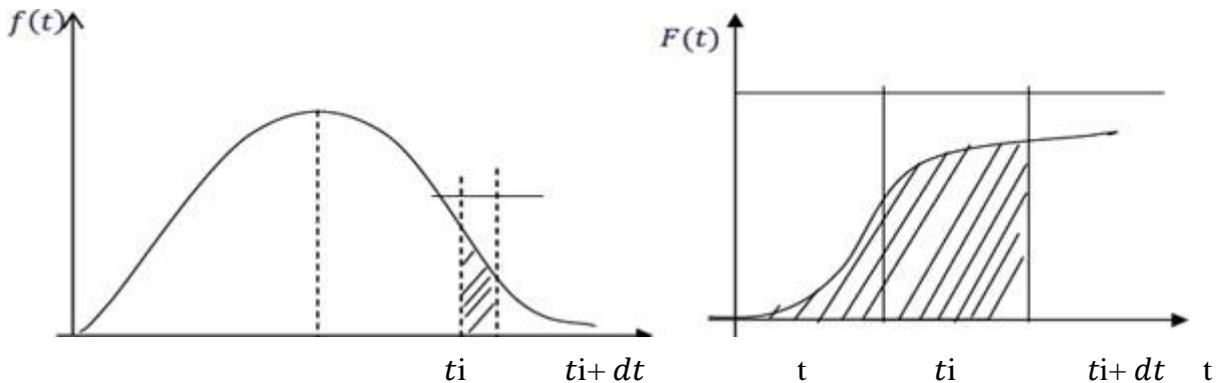
- Continue : intervalle de temps entre deux défaillances consécutives.
- Discrète : nombre de défaillances d'un composant lié à un intervalle de temps.
- Cas général d'une variable aléatoire continue

Soit une loi de probabilité relative à une variable aléatoire continue (t). Elle est caractérisée par sa fonction de répartition "F(t)" telle que :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lim_{\infty} \frac{f(\text{prob}(t < T < (t + dt)))}{dt} \quad (2.1)$$

La fonction de répartition "F(t)" représente la probabilité qu'un événement (une défaillance) survient à l'instant (t) dans l'intervalle [0,t] ;

tel que $F(t) = P(T < t)$, voir figure 4



(a) Fonction de distribution

(b) Fonction de répartition

Figure 4. Courbes des fonctions de probabilité

Si la variable aléatoire est continue

$$f(t)dt = \text{prob}(t < T < (t + dt)) \quad (2.2)$$

f(t) est une densité de probabilité.

$$F(t) = \int_{-\infty}^{ti} f(t)dt = \text{prob}(T < ti) \quad (2.3)$$

Si la variable aléatoire est discrète

$$F(t) = \sum_{i=1}^n f(ti) = \text{prob}(t < tn) \quad (2.4)$$

- **Application à la fiabilité**

Un dispositif mis en marche pour la première fois à (t₀) tombera en panne à un instant nonconnu à priori "t" qui est une variable aléatoire de la fonction de répartition "F(t)".

- F(t) est la probabilité d'une défaillance avant l'instant (ti).
- R(t) est la probabilité de bon fonctionnement à (ti)
- R(t) et F(t) sont des probabilités complémentaires

$$R(t) + F(t) = 1 \text{ ou } \int_0^t f(t)dt + \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 \quad (2.5)$$

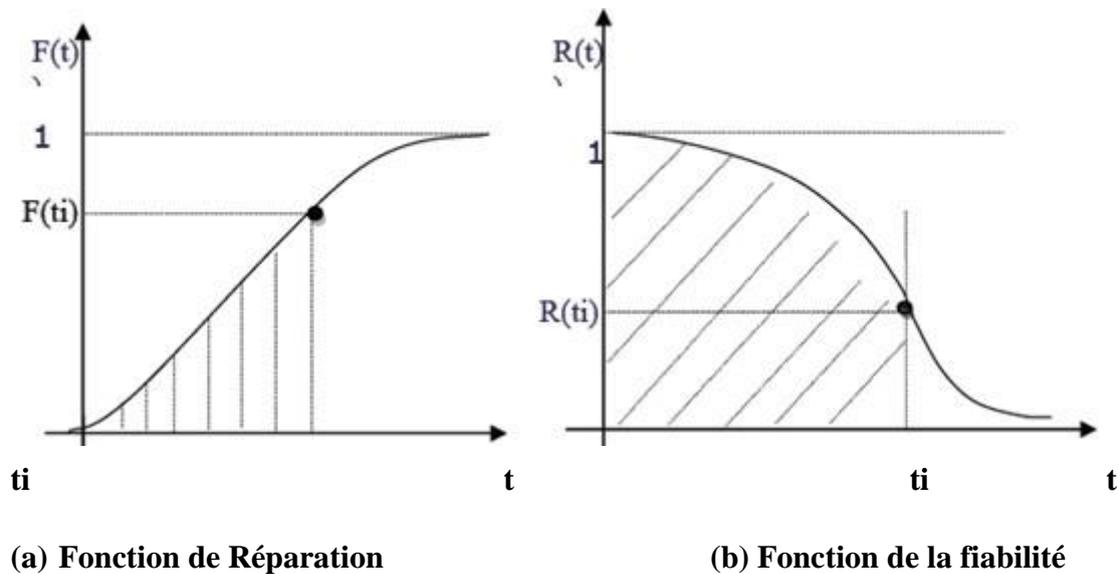


Figure (2.5) Courbes paramétriques de la fiabilité

4. Estimation de la fiabilité

On a vu précédemment que la fiabilité (probabilité de bon fonctionnement) , s'exprimait généralement par la fonction "R(t)". La probabilité de défaillance est désignée par "F(t)". Le temps (t) doit être choisi comme l'unité d'œuvre la plus représentative de la durée de sollicitation du composant (dispositif). Soit "N0" le nombre de dispositifs fonctionnant à (to) et N(t) le nombre de dispositifs fonctionnant à l'instant (t), on définit :

La fiabilité du composant

La fiabilité du composant est caractériser par

- N(t+ dt) le nombre de dispositifs (composants) fonctionnant à l'instant (t+ dt).
- N(t)/N0 est un estimateur de fiabilité R(t) avec N(t)-N(t+ dt)=ΔN>0A l'instant (t+ dt) il reste N(t+ dt)-N(t)= - ΔN (dispositifs)

Si (dt) tend vers zéro, l'estimateur tend vers une limite qui est le taux de défaillance instantané :

$$\lambda (t) dt = - \frac{dN}{N(t)} \quad (6)$$

$\lambda (t) dt$ est une probabilité conditionnelle de défaillance sur l'intervalle (t, t+dt) car elle ne s'applique qu'aux survivants à l'instant(t). Appliquons le théorème des probabilités conditionnelles. Alors la probabilité (d'avoir une panne entre t et dt) est égale probabilité de survie à t. ($\lambda(t).dt$)

$$(P(t \leq T \leq t+dt)=P(T \geq t) \lambda (t) dt =f(t).dt=R(t).\lambda(t).dt \quad (7)$$

$$\lambda (t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (8)$$

Le taux de défaillance à l'instant (t)

Le taux d'avarie (λ) représente la proportion de composants, ramenée à l'unité de temps qui, ayant survécu jusqu'à un instant (t) arbitraire, et ne seront plus en vie à l'instant (t+dt).

Le taux d'avarie (λ) est la proportion de composants qui deviennent défectueux durant l'unité de temps. Il s'obtient expérimentalement soit à partir d'essais de fiabilité, soit à partir de l'historique.

$$\lambda(t) = \frac{N(t + dt) - N(t)}{N(t + dt)} \quad (2.9)$$

Indicateurs de fiabilité (λ) et (MTBF) :

Précédemment le taux de défaillance λ a été défini par des expressions mathématiques à travers un calcul de probabilité. On peut également l'exprimer par une expression physique. Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours du temps. La durée de bon fonctionnement est égale à la durée totale en service moins la durée des défaillances.

Le MTBF (Mean Time Between Failure) est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances. En d'autres termes, Il correspond à l'espérance de la durée de vie t .

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)$$

Physiquement le MTBF peut être exprimé par le rapport des temps

$$MTBF = \frac{\text{somme des temps de fonctionnement entre les (n) défaillances}}{\text{nombre d'intervention de maintenance avec immobilisation}}$$

Par définition le MTBF est la durée de vie moyenne du système.

Allures typiques du taux de défaillance (λ)

L'allure générale de variation du taux de défaillance $\lambda(t)$ d'un équipement le long de sa durée de vie est représentée par la figure (2.6). Cette géométrie de courbe a un caractère « universel ».

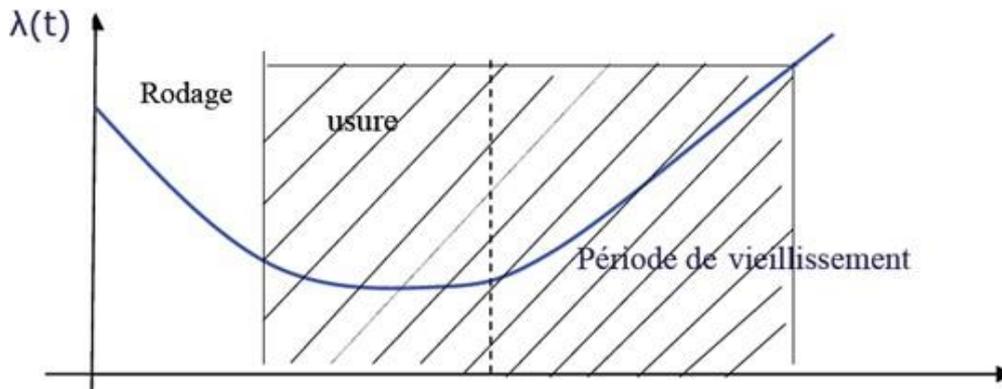


Figure (2.6) Courbe en baignoire du taux de défaillance

- Zone (1). Période de jeunesse (rodage).

Le taux de défaillance décroît relativement vite après élimination des composants de qualité médiocre ou mal montés.

- Zone (2). Période de maturité (pleine activité). Le taux de défaillance est constant. C'est la période de vie utile
- Zone (3). Période de vieillesse ou d'usure.

Les défaillances sont dues à l'âge ou à l'usure des composants, $\lambda(t)$ croît avec le temps du fait de la dégradation du matériel (usures mécaniques, fatigue, etc....).

5. Lois de probabilités usuelles en fiabilité

Nous présentons dans ce paragraphe les lois de fiabilité les plus couramment utilisés.

a) Loi exponentielle

En raison des applications multiples de cette loi qui n'est autre qu'un cas particulier de la loi de Weibull, on présentera dans ce qui suit un large développement de cette loi avec plusieurs applications.

Nous allons étudier des phénomènes physiques où la durée de vie est l'intervalle de temps écoulé entre l'instant de la mise en fonctionnement ou de la naissance, et l'instant de la première panne ou de la mort.

Les modèles de fiabilité basés sur le taux de panne aléatoire sont les plus utilisés
Hypothèses :

- Le taux de défaillance $\lambda(t)$ est indépendant de l'âge du système

- Pour le système qui opère sur demande, la panne à la nième demande est indépendante de celles à la n-1 demande.
- Pour le système opérant en continu, ceci représente un $\lambda(t)$ constant

Pour caractériser la durée de vie et mettre en évidence la notion de vieillissement. On montre en particulier l'utilité pratique de la loi exponentielle pour approcher la distribution des temps de panne.

La distribution exponentielle s'exprime ainsi :

$$\text{Fiabilité : } R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.10)$$

Avec les paramètres de significations :

- e : est la base de l'exponentielle (2,718...)
- λ : c'est l'intensité.

$$\text{Densité de probabilité : } f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.11)$$

La fonction de répartition

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (2.12)$$

Taux de défaillance

$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \text{constant} \quad (2.13)$$

La moyenne des temps de fonctionnement (MTTF) ou de bon fonctionnement (MTBF) un important estimateur de la fiabilité et de la disponibilité des systèmes et se calcul par l'expression :

$$MTTR = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.14)$$

Variance :

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.15)$$

Les distributions relatives à cette loi sont représentées par les courbes de la figure en fonction du taux de défaillance d'un ou plusieurs composants supposés avoir un même λ .

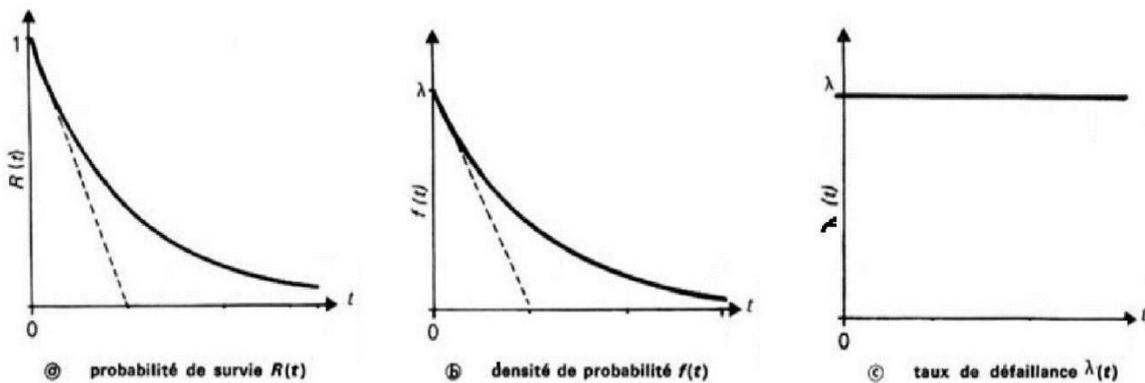


Figure (2.7) Principales propriétés de la distribution exponentielle .

La distribution exponentielle s'applique aux systèmes opérants en continu (systèmes électroniques) c'est ce qu'on appelle distribution sans mémoire. Les systèmes complexes ont aussi un $\lambda(t)$ constant.

b) Loi de « Weibull »

La loi de Weibull est utilisée en fiabilité, en particulier dans le domaine de la mécanique. Cette loi a l'avantage d'être très souple et de pouvoir s'ajuster à différents résultats d'expérimentations. La loi de Weibull est une loi continue à trois paramètres :

- Le paramètre de position γ qui représente le décalage pouvant exister entre le début de l'observation (date à laquelle on commence à observer un échantillon) et le début du processus que l'on observe (date à laquelle s'est manifesté pour la première fois le processus observé) .
- Le paramètre d'échelle η qui, comme son nom l'indique, nous renseigne sur l'étendue de la distribution.
- Le paramètre de forme β qui est associé à la cinétique du processus observé, voir figure 2.8.

-
- Densité de probabilité

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.16)$$

Fiabilité

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.17)$$

- Fonction de réparation

$$F(t) = 1 - e^{(-\frac{t-\gamma}{\eta})^\beta} \quad (2.18)$$

- Taux de défaillance

$$\gamma(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.19)$$

- Moyenne des temps de bon fonctionnement

$$MUT = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.20)$$

- Variance

$$\sigma^2 = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] \quad (2.21)$$

Le paramètre de position γ étant souvent nul, on se ramène à

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{(-\frac{t}{\eta})^\beta}$$

$$R(t) = e^{(-\frac{t}{\eta})^\beta}$$

$$F(t) = 1 - e^{(-\frac{t}{\eta})^\beta}$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

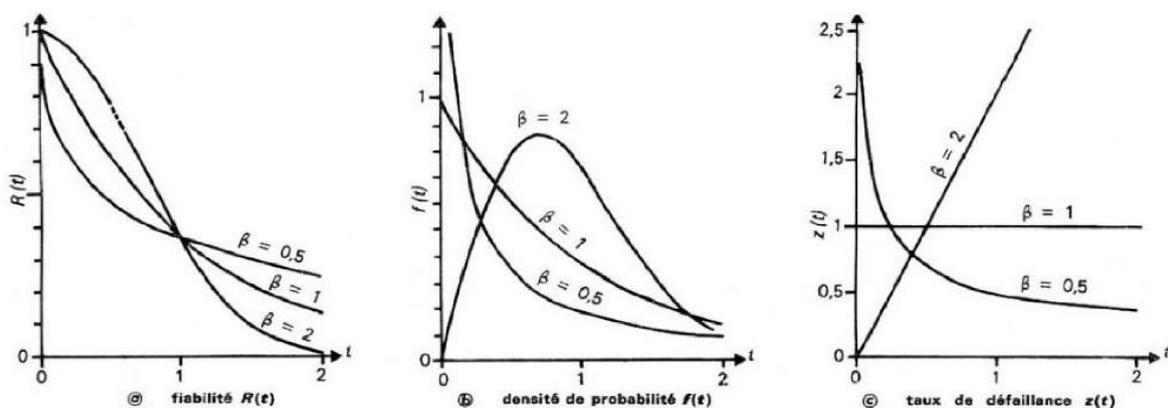


Figure (2.8) Principales propriétés de la distribution de Weibull

VIII. Conclusion

L'analyse de la fiabilité dans le domaine de la maintenance est un outil très important pour caractériser le comportement d'un équipement ou d'un dispositif dans les différentes phases de sa vie. En maintenance, l'analyse de la fiabilité apporte des réponses à plusieurs questions :

- L'optimisation des périodes d'interventions systématiques.
- L'optimisation de la gestion de la pièce de rechange.
- L'évaluation exacte des MTTR et MTBF d'un équipement pour le mieux gérer suivant l'indicateur de disponibilité.
- La MBF (maintenance basée sur la fiabilité).

CHAPITRE III

**Analyse des modes de
défaillance de leur
effets et de leur
Criticité (AMDEC)**

AMDEC

Mise en place de l'AMDEC

I. Définition

L'AMDEC est une technique d'analyse qui a pour but d'évaluer et de garantir la sûreté de fonctionnement des machines par la maîtrise des défaillances. Elle a pour objectif final l'obtention, au meilleur coût, du rendement global maximum des machines de production et équipements industriels.

II. Démarche pratique de la méthode AMDEC

L'étude AMDEC nous a mené à suivre 3 étapes successives. La puissance d'une étude AMDEC réside autant dans son contenu que dans son exploitation. Notre étude AMDEC resterait sans valeur si elle n'est pas suivie par la mise en place effective des actions correctives préconisées par le groupe, accompagnées d'un contrôle systématique.

L'étude peut être prolongée par des travaux complémentaires tels que les calculs de fiabilité et disponibilité, l'élaboration de plans de maintenance et des aides au diagnostic, etc.

III. Analyse des mécanismes de la défaillance

Cette phase consiste à examiner comment et pourquoi les fonctions du broyeur risquent de ne plus être assurées correctement. On identifie les mécanismes de défaillance des éléments du broyeur de manière exhaustive.

IV. Estimation de la criticité

Cette phase consiste à évaluer la criticité des défaillances de chaque élément, à partir de plusieurs critères de cotation indépendants. Pour chaque critère de cotation, on attribue un niveau (note ou indice). Un niveau de criticité en est ensuite déduit, ce qui permet de hiérarchiser les défaillances et d'identifier les points critiques.

L'évaluation de la criticité se fonde sur l'état actuel du broyeur. Les critères de criticité s'expriment dans le tableau AMDEC par leurs niveaux respectifs.

➤ Indice de fréquence F

Il représente la probabilité que la cause de défaillance apparaisse et qu'elle entraîne le mode potentiel de défaillance considéré. Il faut donc tenir compte simultanément de la probabilité d'apparition de la cause et de la probabilité que cette cause entraîne la défaillance. La note F correspond alors à la combinaison de ces deux probabilités. Le barème de cotation

varie entre 1 et 4 (voir tableau 3.1).

Valeurs de F	Fréquence d'apparition de la défaillance
1	Défaillance pratique men tin existante.
2	Défaillance rarement apparue (un défaut par an)
3	Défaillance occasionnellement apparue(un défaut par trimestre).
4	Défaillance fréquemment apparue(un défaut par moi).

Tableau (3.1) : Les indices de fréquence F

• **Représentation la fréquence de défaillance de four rotatif :**

Dans ce tableau on a représente la fréquence de défaillance de four rotatif en 2020

les élemenet	Une défaillance jamais apparue	Une défaillance ayant apparue une seule fois	Une défaillance ayant apparue deux fois	Une défaillance ayant apparue trois fois ou plus
Moteur électrique		Couple insuffisant		
Réducteur	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de la viscosité d'huile • Usure des dentures 			
Pignon	<ul style="list-style-type: none"> • Usure des dentures 			
Couronne	<ul style="list-style-type: none"> • Usure des dentures 			
Bandage	<ul style="list-style-type: none"> • Fissuration • Bandage oscillant • Usure des plaques de compensations • Rupture des blocs de poussée 			Glissement incorrecte
Galet	<ul style="list-style-type: none"> • Rupture fragile • Flexion excessive • Température élevée au palier • Cylindricité 			
Joint amont	<ul style="list-style-type: none"> • Etanchéité insuffisante 			
Joint aval	<ul style="list-style-type: none"> • Etanchéité insuffisante 			
Virole	<ul style="list-style-type: none"> • Ovalisation • Fissuration • Déviation de l'axe du four 	Déformation		
Les briques	<ul style="list-style-type: none"> • Usure des briques • Chute des briques 			
Butée hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> • Rupture des vis • Surpression • Chue de pression de descente 			
Plaques nose-ring	<ul style="list-style-type: none"> • Usure des plaques 			

Tableau (3.2) :fréquence de four rotatif en 2020

➤ Indice de gravité G

Les barèmes de cotation, variant de 1 à 5 (tableau 10), se basent sur les effets provoqués par la défaillance, en terme :

De Temps d'Intervention (TI) qui correspond au Temps Actif de Maintenance Corrective (diagnostic + réparation ou échange + remise en service),

de sécurité des hommes ou des biens.

L'indice sanctionne uniquement l'effet le plus grave produit par le mode de défaillance, même lorsque plusieurs effets ont été identifiés.

La note $G = 5$ est automatiquement attribuée lorsque l'effet peut impliquer des problèmes de sécurité des personnes, en dysfonctionnement ou en intervention.

Valeurs de gravité G	Gravité de la défaillance
1	Défaillance mineure aucune dégradation notable du système $TI < 30 \text{ min}$
2	Défaillance moyenne nécessitant une remise en état de courte durée. $30 \text{ min} < TI < 10 \text{ h}$
3	Défaillance majeure nécessitant une intervention de longue durée $10 \text{ h} < TI < 24 \text{ h}$
4	Défaillance catastrophique très critique nécessitant une longue intervention dommage matériel très important $TI > 24 \text{ h}$
5	Sécurité/qualité , accident pouvant provoquer des problèmes de sécurité des personnes, lors du dysfonctionnement ou lors de l'intervention

Tableau (3.3) : Les indices de gravité G

- **Présentation de gravité de défaillance de four rotatif en 2020**

Dans ce tableau on a représenté la gravité de défaillance de four rotatif en 2020

Les éléments	Défaillance mineure	Défaillance moyenne	Défaillance majeure	Défaillance catastrophique
Moteur électrique			• Couple insuffisant	
Réducteur	• Diminution de la viscosité d'huile • Usure des dentures			
Pignon		• Usure des dentures		
Couronne		• Usure des dentures		
Bandage	• Usure des cerces du bandage	• Usure des plaques de compensations	• Fissuration • Bandage oscillant • Rupture des blocs de poussée	• Glissement incorrecte
Galet		• Inclinaison axe galet/axe bandage • Cylindricité • Ecaillage de la surface du galet	• Rupture fragile	• Flexion excessive • Température élevée au palier
Joint amont		• Etanchéité insuffisante		• Usure des cerces.
Joint aval		• Etanchéité insuffisante		• Usure des cerces.
Virole		• Déviation de l'axe	• Fissuration	• Déformation • Ovalisation • Fissuration circulaire • Effet vilebrequin
Les briques		• Usure des briques		• Chute des briques
Butée hydraulique	• Chue dépression de descente • Blocage en descente	• Surpression	• Rupture des vis	
Plaques nose-ring		• Usure des plaques		

Tableau (3.4) : gravité de four rotatif en 2020

➤ **Indice de non-détection D**

C'est la probabilité de la cause ou le mode de défaillance supposés apparus provoquent l'effet le plus grave, sans que la défaillance ne soit détectée au préalable. Le barème de notation varie entre 1 et 4 (tableau 3.5).

Valeurs de la non-détection	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 : ils 'agit du cas sans détection.

Tableau (3.5) : Les indices de Non-détection D

- **Représentation la détection de défaillance des éléments de four rotatif**

Dans ce tableau on a représenté comment détecté le défaillance des éléments de four rotatif

les élément	délectable par les capteurs	délectable à l'œil nue par le personnel	délectable par le visiteur	nécessite un arrêt pour être détecté
Moteur électrique		• Couple insuffisant		
Réducteur	• Diminution de la viscosité d'huile		• Usure des dentures	
Pignon	• Usure des dentures			
Couronne	• Usure des dentures			
Bandage			<ul style="list-style-type: none"> • Fissuration • Glissement incorrect • Bandage oscillant • Usure des plaques de compensations • Rupture des blocs de poussée • Usure des cerces du bandage 	
Galet	• Température élevée au palier	• Ecaillage de la surface du galet	<ul style="list-style-type: none"> • Inclinaison axe galet/axe bandage • Cylindricité 	<ul style="list-style-type: none"> • Rupture fragile • Flexion excessive
Joint amont	• Problème de circuit d'air comprimé	<ul style="list-style-type: none"> • Usure des cerces. • Problème dans le vérin 	• Cordon d'étanchéité	
Joint aval	• Problème de circuit d'air comprimé	<ul style="list-style-type: none"> • Usure des cerces. • Problème dans le vérin 	• Cordon d'étanchéité	
Virole			<ul style="list-style-type: none"> • Déformation • Ovalisation • Fissuration circulaire • Fissuration longitudinale • Déviation de l'axe • Effet vilebrequin 	
Les briques		<ul style="list-style-type: none"> • Usure des briques • Chute des briques 		
Butée hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> • Surpression • Chue de pression de descente 	• Blocage en descente		• Rupture des vis
Plaques nose-ring				• Usure des plaques

Tableau (3.6) : détection de four rotatif en 2020

V. Tableau D'AMDEC

Élément	Mode de défaillance	Causes	Effets	F	G	D	C
Moteur électrique	Couple insuffisant	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Défauts internes ✓ Contrôle/réglage ✓ Charge excessive 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Vitesses de rotation du four faible. 	2	3	2	12
			<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Diminution de production. 				
			<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Risque de colmatage. 				
Réducteur	Diminution de la viscosité d'huile	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Température d'huile élevée 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Inefficacité de lubrification. ⊗ Usure des engrenages. ⊗ Mauvais rendement puissance du réducteur. 	1	1	1	1
	Usure des dentures	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lubrification insuffisante 	Diminution du rendement en puissance	1	1	3	3
Pignon	Usure des dentures	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lubrification défaillante. ✓ Entraxe déréglé. ✓ Désalignement denture pignon/couronne. 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Résistance aux dentures. ⊗ Durée de vie diminuée. ⊗ Rendement en puissance diminué. ⊗ Vibration. 	1	2	3	6
Couronne	Usure des dentures	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lubrification défaillante. ✓ Entraxe déréglé. ✓ Désalignement denture pignon/couronne. 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Résistance aux dentures. ⊗ Durée de vie diminuée. ⊗ Rendement en puissance diminué. ⊗ Vibration. 	1	2	1	2
Bandage	Fissuration	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mauvais contact bandage/galet. ✓ Usure excessive. ✓ Bandage oscillant. 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Affaiblissement de résistance. ⊗ Rupture du bandage. 	1	3	1	3
	Glissement incorrecte négatif	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmentation de température de la virole. 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Déformation permanente de la virole. ⊗ Dégradation des briques réfractaires. 	2	4	3	36

		✓ Mauvais suivi de démarrage à froid.					
	Glissement incorrecte positif	✓ Plaques compensations insuffisantes. ✓ Augmentation de température de bandage.	☐ Ovalisation de virole. ☐ détérioration brique. ☐ point chaud virole	2	4	3	36
	Bandage oscillant	✓ Cylindricité intérieure du bandage incorrecte. ✓ Jeu excessif bandage/virole.	☐ Pressions superficielles excessives. ☐ Usure de surface. ☐ Fissuration bandage et galet.	1	3	3	9
	Usure des plaques de compensations	✓ Frottement de glissement.	☐ Augmentation du jeu	1	2	3	6
	Rupture des blocs de poussée	✓ Fissuration ✓ Oscillation du bandage	☐ Détachement du bandage	1	3	3	9
	Usure des cerces du bandage	✓ Oscillation du bandage	☐ Oscillation importante	1	1	3	3
Galet	Rupture fragile	✓ Fatigue-effet vilebrequin. ✓ Flexion rotative. ✓ Charge excessive	☐ Résistance affaiblie ☐ Rupture ☐ diminution de durée de vie	1	3	4	12
	Flexion excessive	✓ Charge élevée. ✓ Effet vilebrequin. ✓ Bandage oscillant	☐ Risque de rupture élevée. ☐ Fissuration	1	4	4	16
	Température élevée au palier	✓ Température virole élevée. ✓ Refroidissement inefficace. ✓ Lubrification insuffisante. ✓ Frottement axial/radial	☐ Dégradation du coussinet. ☐ Microsoudure ou soudure entre coussinet et l'arbre.	1	4	1	4
	Inclinaison axe galet/axe bandage	✓ Mauvais réglage. ✓ Oscillation du bandage	☐ Surcharge au niveau de la surface de contact galet/bandage	1	2	3	6

	Cylindricité	✓ Usure non homogène	☒ Usure des surfaces de contact galet/bandage à cause de la charge surfacique excessive	1	2	3	6
	Ecaillage de la surface du galet	✓ Dépassement de la durée de vie	☒ Risque d'endommagement du bandage	1	2	2	4
		✓ Pression d'Hertz Excessive	☒ Risque d'endommagement du bandage	1	2	2	4
Joint amont	Etanchéité insuffisante	✓ Usure des cerces.	☒ Entrée de l'air dans le four.	1	4	2	8
		✓ Cordon d'étanchéité	☒ Entrée de l'air dans le four.	1	2	3	6
		✓ Problème dans le Vérin	☒ Ouverture du joint	1	2	2	4
		✓ Pression insuffisante ✓ Problème de circuit d'air comprimé	☒ Entrée de l'air dans le four	1	2	1	2
Joint aval	Etanchéité insuffisante	✓ Usure des cerces.	☒ Entrée de l'air dans le four.	1	4	2	8
		✓ Cordon d'étanchéité	☒ Entrée de l'air dans le four.	1	2	3	6
		✓ Problème dans le Vérin	☒ Ouverture du joint	1	2	2	4
		✓ Pression insuffisante ✓ Problème de circuit d'air comprimé	☒ Entrée de l'air dans le four	1	2	1	2
Virole	Déformation	✓ Tâche rouge ✓ Ovalisation ✓ flexion du four ✓ température non uniforme ✓ chute des briques ✓ croûtage	☒ Fissure galet-flexion arbre galet-charge excessive sur galet-chute/fissuration des briques. ☒ Faux ronds sur la couronne.	4	4	3	48
	Ovalisation	✓ Jeu relatif excessif	☒ Dommages briques. ☒ Fissuration longitudinale. ☒ Endommagement virole.	1	4	3	12

	Fissuration circulaire	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Endommagement de la soudure de transition entre deux épaisseurs différentes de la virole. ✓ Mauvais alignement de l'axe du four. ✓ Température élevée virole. ✓ Corrosion. ✓ variation brusque d'épaisseur. ✓ Mauvaise qualité soudure. 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Risque de rupture de la virole. ⊗ Fuite de matière à très haute température. 	1	4	3	12
	Fissuration longitudinale	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Soudure des blocs de fixation du bandage. ✓ Grande ovalisation. ✓ Charge excessive sur le bandage. ✓ Température élevée de la virole 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Fissuration et diminution de la durée de vie des briques 	1	3	3	9
	Déviations de l'axe	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mauvais réglage de position galet. ✓ Déformation plastique 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Problème de descente du four 	1	2	3	6
	Effet vilebrequin	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Point chaud ✓ Vilebrequin de température 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Flexion importante de l'arbre du galet ⊗ Risque de rupture du galet 	1	4	3	12
Les briques	Usure des briques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ovalisation. ✓ Déformation de la virole. 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Apparition de points chauds. ⊗ chute des briques. 	1	2	2	4
	Chute des briques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Choix thermique 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Apparition de points chauds. ⊗ Effet vilebrequin 	1	4	2	8
Butée hydraulique	Rupture des vis	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Surpression ✓ Surcharge du four ✓ Désalignement de l'axe du four ✓ Fatigue des vis 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Perte de maintien en position de la butée ⊗ Risque de rupture brusque du four 	1	3	4	12
	Surpression	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fatigue des vis 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Risque de rupture des vis à long terme 	1	2	1	2

	Chue de pression de descente	✓ Pressostat défaillant	⊗ Temps d'attente supplémentaire en fin de course	1	1	1	1
	Blocage en descente	✓ Alignement du four incorrect	⊗ Usure des bandes et galets à long terme	1	1	2	2
Plaques nose-ring	Usure des plaques	✓ Abrasion à haute température à cause du flux du clinker	⊗ Perte du matériau des briques réfractaires	1	2	4	8

Tableau (3.7) : Tableau d'AMDEC

VI. Calcul de la criticité C

On calcule le niveau de criticité, pour chaque combinaison cause / mode / effet, à partir des niveaux atteints par les critères de cotation. La valeur de la criticité est calculée par le produit des niveaux atteints par les critères de cotation. $C = F * G * D$

1. Courbe de criticité

Après avoir calculé les criticités des différents organes du broyeur, on trace la courbe de criticité qui nous permet de détecter l'organe le plus défaillant (l'organe qui a la plus grande criticité), et ainsi, on peut savoir les actions à appliquer pour diminuer le niveau de criticité des composants du four rotatif.

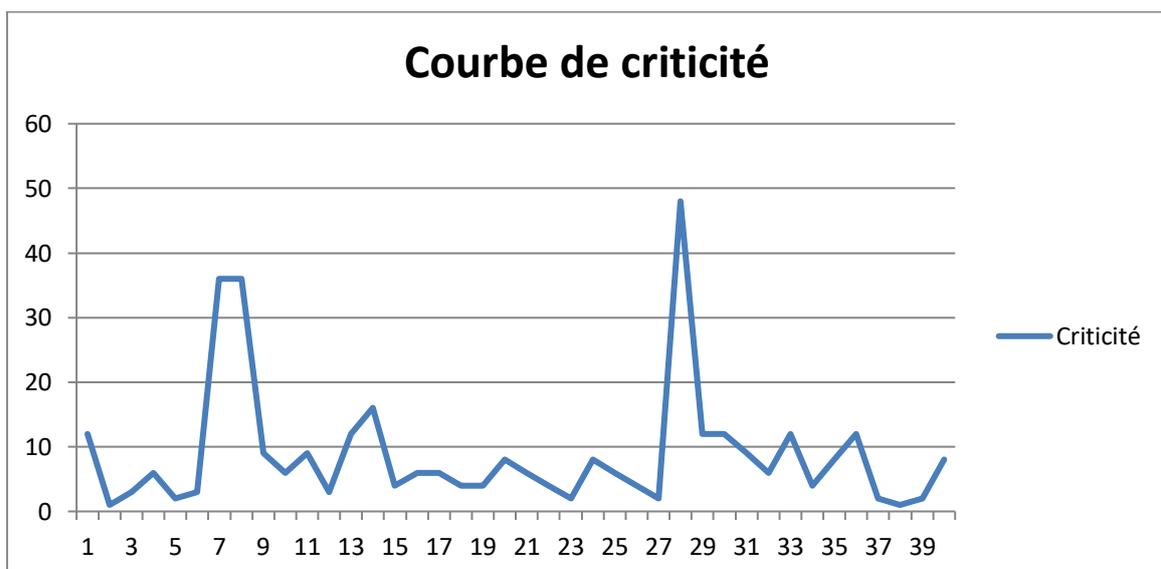


Figure (3.1) : courbe de criticité

Résultat : Les organes possédants la plus grande criticité sont la virole du four a cause de tache rouge .

2. Calcule de criticité cumulé

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

Nous allons trier les modes de défaillances par ordre décroissant selon leur note de criticité, puis calculer le cumul de criticité pour chaque défaillance qui sera représentée par un nombre de 1à40 qui est le nombre total des défaillances traitées.

<i>N° DE DEFAILLANCE</i>	<i>CUMCUL DE CRITICITE</i>	<i>POURCENTAGE CUMULE</i>
1	1	0.2907
2	2	0.5814
3	4	1.1628
4	6	1.7442
5	8	2.3256
6	10	2.9069
7	12	3.4884
8	15	4.3605
9	18	5.2326
10	21	6.1047
11	25	7.2674
12	29	8.4302
13	33	9.5930
14	37	10.7558
15	41	11.9186
16	45	13.0814
17	51	14.8256
18	57	16.5698
19	63	18.3140
20	69	20.0581
21	75	21.8023
22	81	23.5465
23	87	25.2907
24	95	27.6163
25	103	29.9419
26	111	32.2674
27	119	34.5930
28	128	37.2093
29	137	39.8256
30	146	42.4419
31	158	45.9302

32	170	49.4186
33	182	52.9070
34	194	56.3953
35	206	59.8837
36	218	63.3721
37	234	68.0233
38	270	78.4884
39	296	86.0465
40	344	100

Tableau (3.8) : criticité cumulé



Figure (3.2) : diagramme ABC

3. Analyse fonctionnelle

Le traçage des pentes permet de repérer la partie A du diagramme, et d'identifier le seuil de criticité. On remarque que la partie A est l'ensemble des défaillances de 1 à 27, c'est-à-dire, les défaillances dont la criticité est supérieure ou égale à 4.

En guise de conclusion de cette analyse, la virole est le siège des défaillances majeur en particulier le glissement incorrect positif et négatif. Dans la suite une étude approfondie de cet élément est indispensable.

Dans la partie suivante nous allons donner des solutions pour diminuer leur criticité.

Fiabilité

I. Détermination des paramètres de fiabilité de four rotatif

1. On donne l'historique d'un four rotatif cimenterie :

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
HM	618	687	452	459	469	608	291	716	578	744	662	718
NSFI	5	1	2	0	2	1	4	7	3	0	1	4
MTBF	123.51	686.77	225.99	458.6	234.66	608.35	72.75	102.34	192.72	744	661.9	179.6 1

Tableau 3.9 : l'historique du temps d'arrêts du four rotatif de la Société LafargeHolcim Oggaz

2. 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). on calcule alors les probabilités de défaillances estimées par les fréquences $F(t)$, (voir tableau 3.10)

Ordre i	Tbf	$F(i) = \frac{i-0,3}{N+0,4}$	$R(i) = 1 - F(i)$
1	291	0.0565	0.9435
2	452	0.1371	0.8629
3	459	0.2177	0.7823
4	469	0.2983	0.7017
5	578	0.3790	0.6210
6	608	0.4597	0.5703
7	618	0.5403	0.4597
8	662	0.6210	0.3790
9	687	0.7016	0.2984
10	716	0.7823	0.2177
11	718	0.8629	0.1371
12	744	0.9435	0.0565

Tableau (3.10) : les valeurs de $F(i)$ et $R(i)$

II. Détermination si cette loi de durée de vie suit une loi Weibull

1. Détermination des paramètres de Weibull par la méthode graphique

Sur le papier d'Allan fonctionnel de Weibull, on présente l'ensemble de nœuds $M_i (t_i, F(t_i))$, où t_i représente le temps (ici c'est les TBF) et $F(t_i)$ est la fréquence estimée par les rangs moyens. On remarque de la suite que les nuages des points peuvent être ajustés par une droite D1. On trace alors la droite D2 qui passe par l'origine du repère (X, Y). Cette deuxième droite permet de relever sur le papier fonctionnel de Weibull les deux autres paramètres, (voir figure 3.3)



Soit un historique de N TBF obtenues en exploitation.

- Les N valeurs sont classées de manière croissante selon un ordre i ($i=1$ à N).

• L'ordre $i=n(t)$ représente la i ème défaillance de l'échantillon.

- $F(i)$ est la probabilité cumulative de défaillance sur $(0, t)$.



Suivant la taille N de l'échantillon, on estime la fiabilité $R(i)$ par:

Si $N > 30$:
$$R(i) = 1 - \frac{i}{N} \quad (\text{Formule des rangs bruts})$$

Si $20 < N \leq 30$:
$$R(i) = 1 - i/(N + 1) \quad (\text{Formule des rangs moyens})$$

Si $N \leq 20$:
$$R(i) = 1 - ((i - 0,3))/(N + 0,4) \quad (\text{Formule des rangs médians})$$

$n < 20$: (Formule des rangs médians) :

$$R(i) = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \quad \text{avec } N : \text{nombre de tbf}$$

On utilisera le diagramme de Weibull pour déterminer β et γ et η

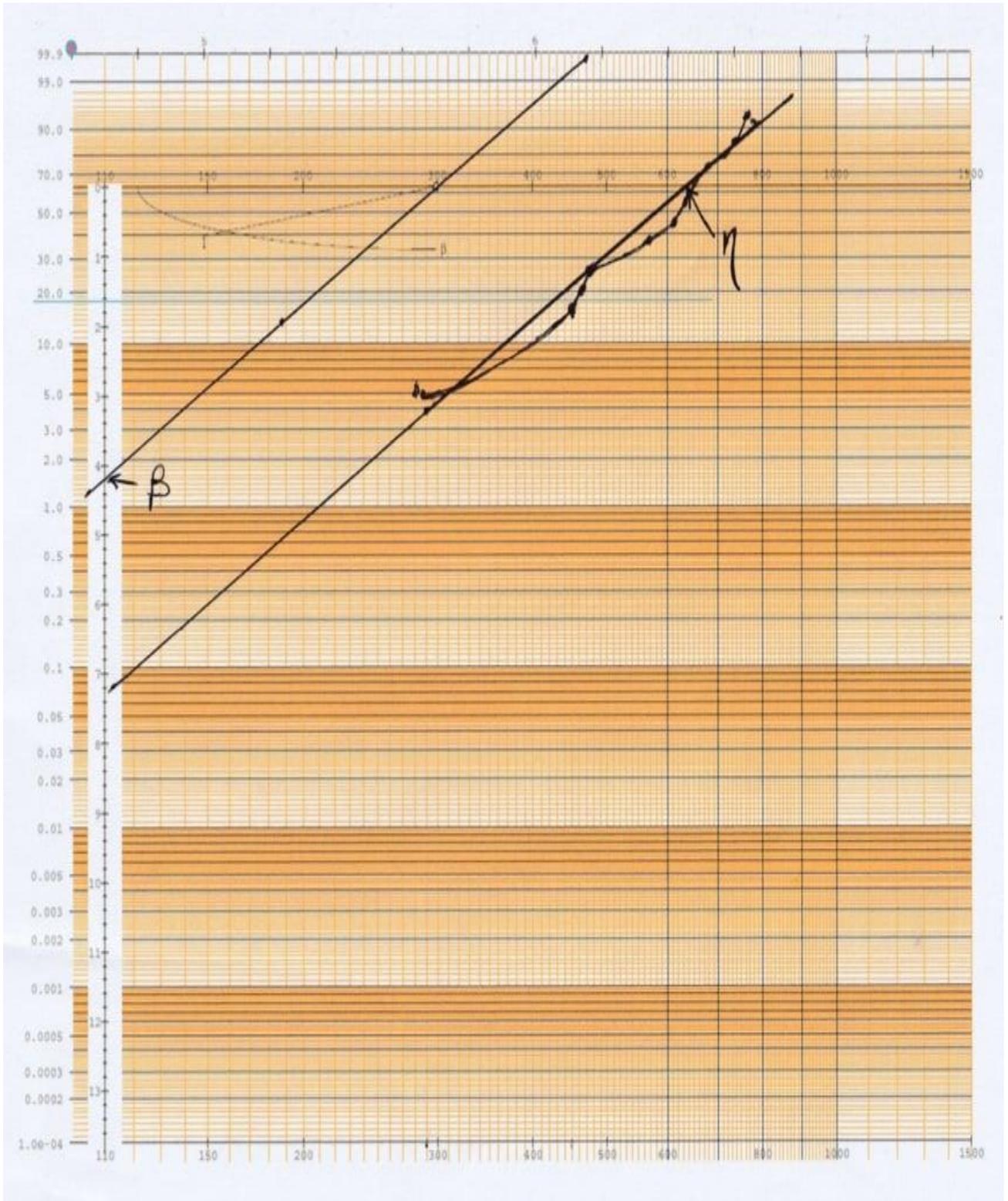


Figure (3.3) :papier de weibull

En suite on a utilisé l'annexe de loi de weibull pour déterminer A et B

- Le fait d'obtenir directement une droite D sans faire de redressement s'indique que $\gamma=0$ (paramètre déposition)

- La droite D coupe l'axe des temps à $t=\eta=615$ heures. C'est le paramètre de la loi de Weibull

- La droite D', // à D, passant par l'origine coupe l'axe «b» en un point $\beta=4.2$. C'est la valeur du paramètre de forme

Equations de la loi:

$$F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.1)$$

Détermination de la mtbf:

Les tables annexes donnent les valeurs de A et B:

$$\text{Pour } \beta=4,2 : A=0,9089 \text{ et } B=0,244. \quad (3.2)$$

On en déduit:

$$MUT = mtbf = A\eta + \gamma = 0,9089 * 615 + 0 = 559h \quad (3.3)$$

$$\sigma = B\eta = 0,244 * 615 = 150h \quad (3.4)$$

Analyse des résultats trouvés

Au cours de notre étude nous avons constaté que:

- a. Le paramètre β est supérieur à un (1) ; donc le bandage est en période de vieillissement.
- b. $\beta>3$: Donc l'organe est en période de vieillissement par fatigue.

- On a: $MTBF=T/N$ (3.5)

$$T=MTBF \times N = 559 \times 16 = 16770 \text{ heures} \quad (3.6)$$

- Avec ,T: La durée entre la mise en service jusqu'à la dernière défaillance.
- Et, N:Le nombre de défaillance.

Alors, on déduit que le Glissement incorrecte est soumis à une sollicitation de la fatigue.

A partir du L'historique et le tableau d'AMDEC étudié du société ; on déduire que les défaillances à cause du Température

La mise en application de la fiabilité opérationnelle à partir d'un retour d'expérience est primordiale pour le choix d'une politique de la maintenance préventive ou curative. Grâce à la détermination des paramètres de fiabilité d'équipement sélectionné par la méthode d'analyse utilisée en fiabilité, à savoir la méthode « AMDEC », on a déterminé l'organe critique.

CHAPITRE IV

Etude thermique du four Rotatif de La Cimenterie

I. Zones et revêtement du four

La figure II.4 donne, en fonction de la longueur du four (l), une subdivision approximative des différentes zones en voie sèche (Seidel et coll, 1980).

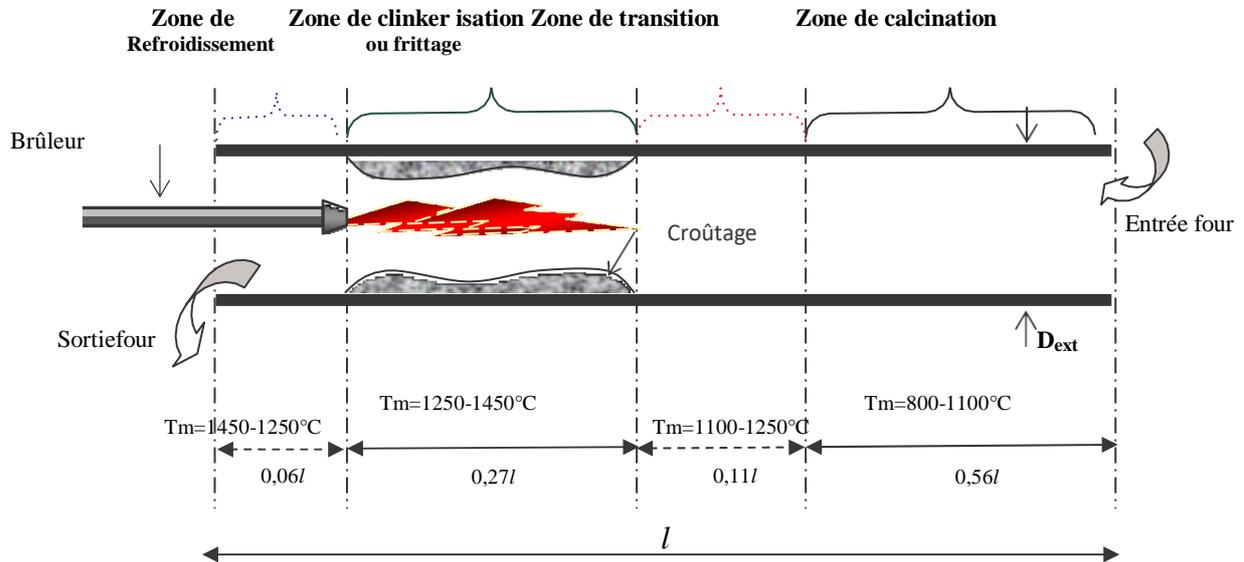
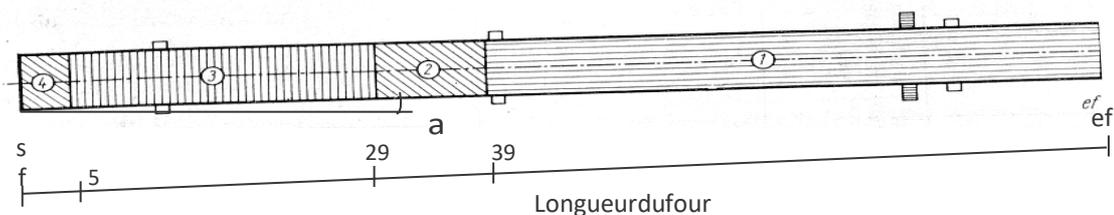


Figure (4.1): Zones du four rotatif

Par croûtage, on entend couramment toute la matière collée à la maçonnerie, spécialement dans la zone de clinkérisation qui détermine la longévité du revêtement de cette zone. Le croûtage d'une épaisseur comprise entre 50 et 200 mm suit souvent la forme de la flamme. Un croûtage stable a pour conditions une certaine quantité de matière fondue et une certaine viscosité. Les briques réfractaires, d'une épaisseur de 250 mm sont disposées à l'intérieur du four pour protéger la tôle contre la chaleur excessive et réduire les déperditions thermiques vers l'extérieur. Ces briques doivent être réfractaires et isolantes. Elles présentent de bonnes résistances mécaniques et à la corrosion provoquée par certains constituants de la matière à cuire.

On distingue plusieurs catégories de briques réfractaires, suivant les différentes zones du four rotatif, représentées en figure II.5 (l'entrée et la sortie du four sont désignées par ef et sf).



Zone 1 et 2: Il est nécessaire d'avoir des briques résistant à la chaleur et présentant une grande stabilité de volume. Les briques sont constituées de 40 à 50% de Al_2O_3 , ayant une conductivité thermique de 1,1 kcal/hmK.

Zone 3: Les conditions de température exigent un réfractaire particulièrement bien adapté. Le four utilise différentes briques de 70 à 85% Al_2O_3 , de 78 à 83% MgO et 8 à 11% Cr_2O_3 . Les briques chromo-magnésiennes sont employées dans cette zone pour maintenir le collage; elle sont un prix sensiblement plus élevé, mais l'usage est plus long; leur conductivité thermique est de l'ordre de 3,5 kcal/hm K.

Zone 4 : La matière cuite est encore très chaude ($1350^{\circ}C$), mais la température des gaz provenant du refroidisseur est plus basse. Le collage n'existe plus et le revêtement doit être hautement réfractaire, haut en alumine (55 à 75% Al_2O_3). Sa conductivité est de l'ordre de 1,14 kcal/hm K.

II. Données opératoires

Les débits de la farine d'alimentation et de production de clinker sont fournis au niveau de la salle d'opération ; la mesure est effectuée par des cellules doseuses installées par le constructeur au niveau de cet atelier. Quant aux débits de farine à l'entrée du four et de poussière à l'entrée du four et à la sortie du préchauffeur, ils sont rassemblés sur un tableau .

Les températures de la farine et du gaz, à l'entrée du four sont mesurées à l'aide de thermocouples de type [Ni-Cr-Ni] qui présentent une résistance aux hautes températures

(0 à 1000 °C) et une erreur de l'ordre de 0,5%. Les températures de l'air secondaire et du clinker à la sortie du four sont mesurés au moyen d'un pyromètre optique à infra rouge.

Paramètre	Farine, entrée préchauffeur	Farine entrée four	Poussières Sortie préchauffeur	Farine entrée four	Clinker
Débit(kg/s)	60,82	7,04	7,04	50,98	34,72
Température(°C)	63	1080	350	850	1200

Tableau (4.1) :Débit set températures de la farine et du clinker

La température et le degré hygrométrique de l'air ambiant enregistrés directement sur un thermo hygromètre portatif sont restés stables aux valeurs de 25°C et 70%. Les débits des gaz sont déterminés à partir de l'analyse des gaz de combustion à l'entrée du four; quant à leur pression, elle est mesurée directement sur les transmetteurs de pressions, installées en différents points.

Le tableau 4.3 donne la composition moyenne de l'air et des gaz (le détail de calcul est en annexe 2) et le tableau 4.4 donne leurs valeurs opératoires moyennes retenues.

	% CO ₂	% N ₂	% H ₂ O	% O ₂
Gaz de combustion	14,45	71,93	12,17	1,45
Air ambiant	-	77,42	2	20,58

Tableau (4.2):Composition massique des gaz

Paramètres opératoires	Gaz entrée four	Gaz naturel	Air Primaire	Air secondaire	Air parasite
Pression(bar)	0,989	1	1,011	1,016	1
Température(°C)	1080	15	25	800	25
Débit MASSIQUE(kg/s)	44,85	2,52	6,72	36,40	4,51

Tableau (4.3) :Débits, température et pression des gaz

La température moyenne de la virole du four, mesurée par le pyromètre optique à infra rouge pour les différentes zones est donnée au tableau 4.4.

Zone du four	1	2	3	4
Température de la virole(°C)	90	280	400	270

Tableau (4.4) :Température moyenne extern de la virole

III. Etude thermique du four rotatif

1. Introduction

L'aspect thermique est un aspect fondamental indissociable qui caractérise le fonctionnement du four rotatif. Il est extrêmement important, car il conditionne la cuisson du produit, sa qualité et son aspect calorifique. Il influe considérablement sur l'évolution de la vitesse des réactions chimiques. L'aspect thermique se compose de la combustion et des mécanismes d'échange de chaleur. En effet, le dégagement et le transfert de chaleur sont étroitement liés, car le processus du transfert de chaleur commence pendant les réactions de combustion.

2. Combustion à l'intérieur du four

Tous les processus physiques et chimiques qui apparaissent à l'intérieur du four rotatif sont en de thermiques, exception faite toutefois pour la réaction de formation du clinker qui est légèrement exothermique. Le fonctionnement du four nécessite donc un apport de chaleur important. Cet apport est fourni par la flamme de la combustion du gaz naturel injecté à l'aide d'un brûleur (figure 4.3).

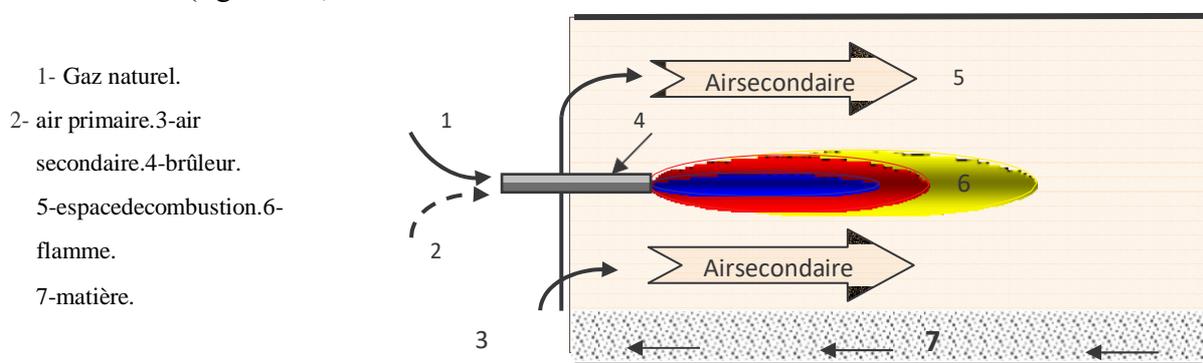


Figure (4.3) : Déroulement de la combustion dans le four.

Le brûleur a une importance capitale dans le déroulement de la combustion. Il permet en effet de produire une flamme constamment stable pour tous les débits, ce qui aura pour conséquence un croûtage stable et par la même, une protection à distance du réfractaire.

Dans les conditions normales, la longueur de la flamme et son diamètre dépendent des puissance calorifique c'est-à-dire des calories libérées durant une heure de combustion. Les courbes de la figure 4.4 (Demagh, 2002) permettent, en fonction de la puissance de la flamme, elle même imposée par le diamètre du four et du débit journalier, de prévoir ses dimensions.

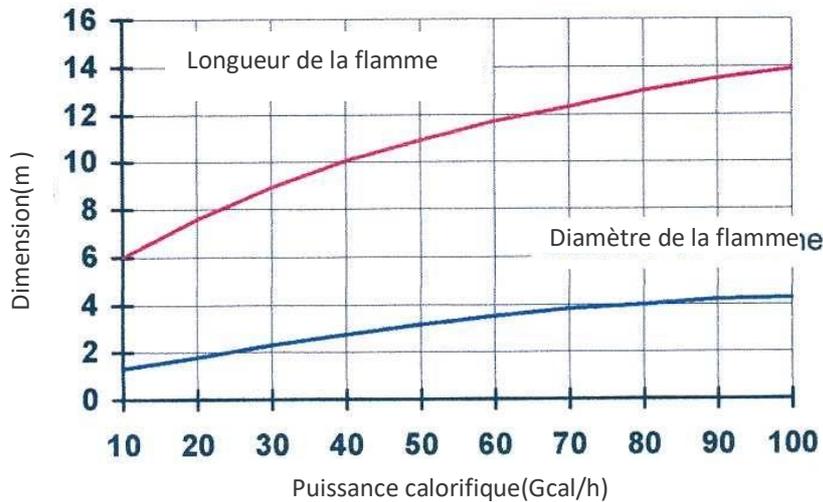


Figure (4.4) : Grandeur géométrique de la flamme en fonction de la puissance du brûleur

L'air primaire sert à véhiculer le combustible à l'intérieur de la tuyère et de le projeter dans le four, il est relativement froid. L'air secondaire est en quelque sorte l'air de tirage du four, il représente la quantité d'air récupérée lors du refroidissement du clinker chaud sortant du four. Il représente en moyenne 75% à 85% de l'air total nécessaire à la combustion.

La combustion étant une réaction chimique, il est nécessaire pour qu'elle soit complète industriellement, qu'il y ait un excès d'air. Il faut donc s'appliquer à obtenir une combustion légèrement oxydante, on ajoute alors une quantité d'oxygène par injection sous forme d'air et peut être caractérisée par un indice d'excès d'air compris entre 10 et 15%.

L'indice d'excès d'air est déterminé selon l'équation (Jager et coll, 1977)

O_2, N_2 sont les pourcentages des gaz de fumées.

La présence de cet excès influe directement sur la température de la flamme, comme le montre la figure 4.5 (Demagh, 2002) ci-après.

Nous pouvons faire la constatation qu'à chaque fois que l'excès d'air augmente de 10% la température de flamme chute environ de 100°C, ceci implique des consignes de tirage excessif des ventilateurs de la tour de préchauffage, ce qui provoqueraient une augmentation de l'excès d'air et abaisserait fortement la température de la flamme.

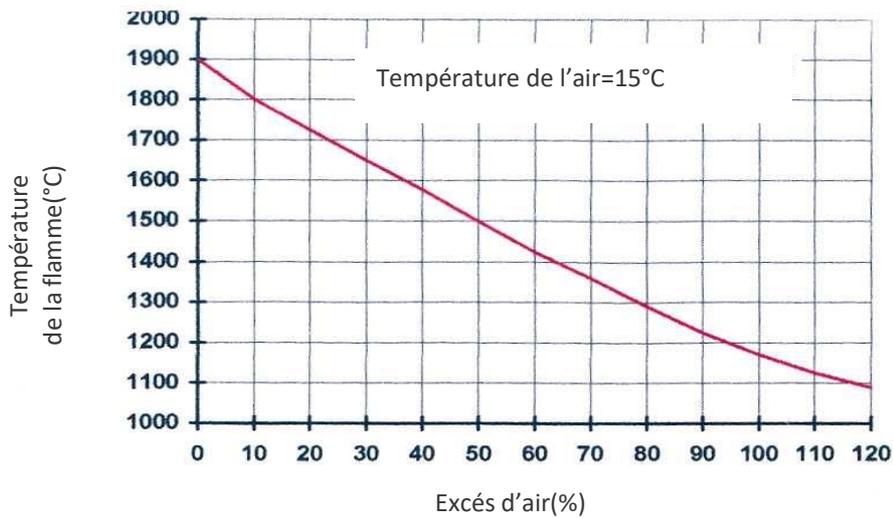


Figure (4.5): Température de la flamme en fonction de l'excès d'air

Dans le chauffage au gaz naturel, le problème est d'assurer un transfert de chaleur suffisamment élevé de la flamme à la matière à cuire. Les caractéristiques de la flamme peuvent être influencées par: la conception et la position du brûleur, la température d'air comburant (primaire et secondaire), le débit du combustible, la température de zone de clinkérisation, la concentration en poussière de l'air secondaire.

La règle générale veut que l'on essaye d'obtenir une flamme normale (ni plus courte, ni plus longue) qui s'étend sur une longueur d'environ 5 à 7 fois le diamètre intérieur du four, avec la température la plus haute possible, tout en évitant une action néfaste sur la qualité du clinker, le croûtage, la durée de vie des réfractaires et une surchauffe de la zone de sortie du four. Il est généralement admis que le meilleur échange entre la flamme et la matière a lieu quand la direction de celle-ci converge légèrement vers le lit de matière (figure 4.6).

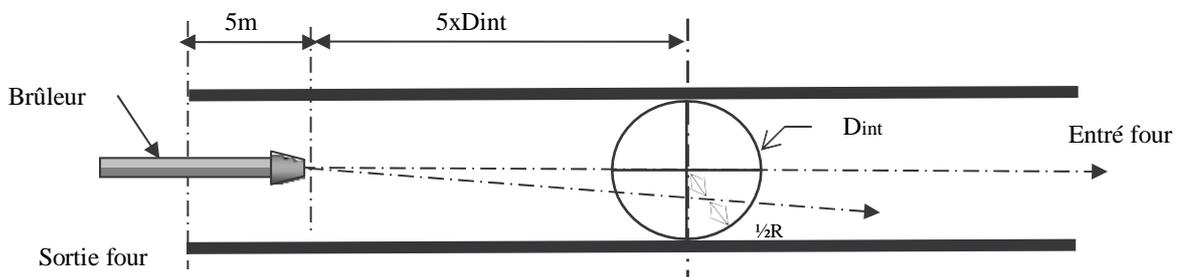


Figure (4.6) : Longueur et orientation de la flamme

La température de la flamme T_f est calculée selon l'équation (voir annexe A3)

$$T_f - 298 = \frac{G_c}{C_p \cdot G_g} \cdot (PCI + n \cdot L_{\min} \cdot C_{p_{AS}} \cdot (T'_{AS} - 298)) \quad (4.2)$$

IV. Transfert de chaleur par convection

1. Coefficient d'échange de chaleur par convection

Considérons sur la surface d'un corps solide un élément d'aire dS à la température T_p . Si le corps est au contact d'un milieu fluide en mouvement caractérisé par une température T_∞ , la quantité de chaleur dQ qui traverse dS pendant le temps dt peut s'écrire:

$$d^2Q = h(T_p - T_\infty)dS dt \quad (4.3)$$

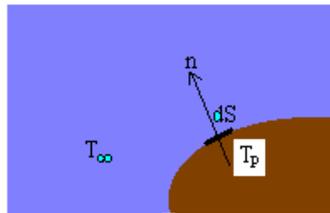


Figure (4.7) : mise en évidence du flux thermique sur surface

Le coefficient h est la conductance thermique de convection, ou coefficient d'échange thermique par convection s'exprimant en $W/(m^2.K)$, dQ s'exprime en Joules, et $\frac{d}{dt}(dQ)$ en Watts.

Tout calcul d'échange thermique par convection nécessite la détermination du coefficient h , ce qui est toujours une affaire compliquée, car le transfert de chaleur par convection est complexe. Il résulte de la superposition de deux phénomènes différents :

- conduction entre les particules de fluide qui se rencontrent;
- mélange de ces particules par suite du mouvement d'ensemble du fluide.

De plus, l'échange de chaleur peut être accompagné d'un changement de phase (condensation ou évaporation). On est donc amené à distinguer au moins trois types de problèmes :

- L'échange thermique monophasique en convection forcée.
- L'échange thermique monophasique en convection naturelle.
- L'échange thermique accompagné d'ébullition ou de condensation.
-

2. Transfert de chaleur par convection forcée sans changement d'état

Ce cas se rencontre très fréquemment en pratique industrielle dans les échangeurs thermiques de tous genres.

• Écoulement dans un tube

Un fluide s'écoule en régime permanent dans une conduite cylindrique circulaire de diamètre intérieur D . Dans une section droite, à l'abscisse x par rapport à l'entrée de la

conduite, la vitesse moyenne du fluide est U_m , sa température moyenne T_m , et la température de la paroi T_p .

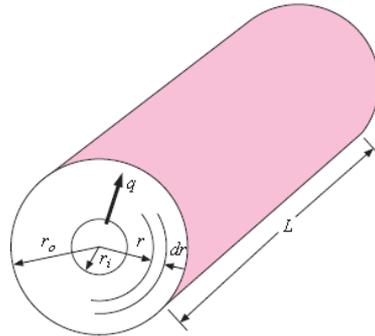


Figure (4.8) : écoulement dans une conduite circulaire

La corrélation expérimentale indiquée permet de calculer le flux de chaleur $d\Phi$ échangé à travers l'aire latérale de paroi dS comprise entre les abscisses x et $x + dx$:

$$d\Phi = h (T_m - T_p) \pi D dx \quad (4.4)$$

a- Régime turbulent :

Dans le domaine de Nombres de Reynolds défini par: $10^4 < Re < 1,2 \cdot 10^5$ on applique la formule de Colburn:

$$N_u = 0,023 P_r^{1/3} R_e^{0,8} \quad (4.5)$$

Il existe deux restrictions au domaine de validité de cette corrélation:

- Le fluide doit être tel que son Nombre de Prandtl soit compris entre 0,7 et 100.
- Le régime d'écoulement dans le tube doit être parfaitement établi, ce qui n'est garanti que si : $x/D > 60$.

Dans le cas où: $x/D < 60$, la corrélation de Colburn doit être corrigée de la manière suivante pour tenir compte de ce que le profil de vitesses du fluide dans le tube ne peut pas encore être complètement établi :

$$N_u = 0,023 P_r^{1/3} R_e^{0,8} \left[1 + \left(\frac{D}{x} \right)^{0,7} \right] \quad (4.6)$$

b- Régime laminaire

Dans le domaine $Re < 2000$, on peut appliquer les corrélation expérimentales de L'évêque, exprimées en fonction du paramètre :

$$A = \frac{1}{R_e P_r} \frac{x}{D}$$

ces corrélation ont pour expressions :

$$N_u = 3,66 \quad \text{pour } A > 0,05$$

$$N_u = 1,06 A^{-0,4} \quad \text{pour } A < 0,05$$

V. Transfert de chaleur par Rayonnement

Cette forme de transfert d'énergie n'a besoin d'aucun milieu de transport.

Ce transfert a également lieu dans le vide.

La différence de potentiel motrice est la différence entre les puissances quatrièmes des températures de la source et du récepteur.

Loi de STEFAN-BOLTZMANN

Cette loi de STEFAN-BOLTZMANN fournit l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans le vide, en fonction de sa température absolue. On peut l'établir en intégrant sur l'ensemble du spectre, la relation exprimant la loi de PLANCK, qui s'écrit comme suit :

$$M^0 = \sigma T^4 \quad (4.7)$$

σ est la constante de STEFAN-BOLTZMANN, dont l'expression et la valeur numérique sont données dans le tableau (4.5)

$\sigma = \frac{2 \pi^5}{15} \frac{k^4}{C_0^2 h^3}$	T	M^0
$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$	K	W/m^2

Tableau (4. 5) : valeurs de la constante de STEFAN-BOLTZMANN

VI. Transfert de chaleur par conduction

1 Introduction

On a vu au chapitre 1 que la conduction thermique est un mode de transmission de la chaleur dans la matière. La conduction concerne principalement les solides. En effet, bien que présente également dans les liquides et les gaz, elle y est le plus souvent négligeable par rapport à la convection et au rayonnement. Nous allons introduire les questions essentielles à traiter dans un problème de conduction thermique. Pour résoudre ces problèmes, il est nécessaire de connaître le mécanisme local du phénomène. Nous verrons que ce mécanisme sera décrit par une équation, dite équation de la chaleur, liant entre elles les différentes grandeurs intervenant (la température T, le temps t, les variables d'espace x, y, z).

Parmi toute une famille de solutions possibles de cette équation, il faudra retenir celle qui sera compatible avec le respect des conditions aux limites du domaine étudié. De même, la

répartition initiale de température dans le milieu étudié intervient également sur l'évolution ultérieure des températures dans ce milieu.

2 Concepts fondamentaux

2.1 Champs thermiques.

Considérant un champ thermique, qui est un champ scalaire, celui des températures $T(M, t)$, où $M(x, y, z)$ désigne un point quelconque. On peut voir que ce champ de températures peut être permanent ou variable. On appellera surface isotherme, le lieu des points M ayant la même température à un instant t . Supposons un câble chauffant apporte au un plancher une quantité de chaleur dQ pendant le temps dt . Le flux thermique qui va se propager vers le local à chauffer est :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{Watt}) \quad (4.8)$$

Si on suppose la structure parfaitement uniforme, on peut se contenter de raisonner sur une surface de plancher unité, et ensuite les résultats obtenus pourront être étendus à toute la surface S de ce plancher.

On appellera densité de flux thermique, la puissance échangée par surface unité, c'est-à-dire la grandeur :

$$\varphi = \frac{dQ}{Sdt} = \Phi/S \quad (\text{Watt/m}^2) \quad (4.9)$$

Mais notre hypothèse d'uniformité est sans doute trop simpliste. Aussi, renoncerons nous à considérer une seule densité de flux thermique φ valable en tout point de la surface S du plancher.

2.2 Loi de Fourier

Il existe une relation linéaire entre l'effet auquel on s'intéresse, c'est-à-dire la densité de flux thermique $\vec{\varphi}(M, t)$ et sa cause, qui est l'existence d'un gradient de température $\vec{\text{grad}} T$. En tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantanée est proportionnelle au gradient de température, ce qui s'écrit :

$$\vec{\varphi}(M, t) = -\lambda \vec{\text{grad}} T \quad (4.10)$$

λ est la conductivité thermique du milieu exprimé en W/mK ou $\text{W/m}^\circ\text{C}$. Pour un milieu isotrope et homogène, λ ne dépend que de la température T . Dans de nombreux cas, on peut considérer λ comme une constante lorsque les écarts de température ne sont pas trop élevés. Par convention, $\vec{\varphi}(M, t)$ est compté positivement dans le sens d'écoulement de la chaleur, c'est-à-dire vers les températures décroissantes. $\vec{\text{grad}} T$ est un vecteur porté par le même axe, mais de sens contraire à $\vec{\varphi}(M, t)$, d'où le signe moins de la loi de Fourier. $\vec{\varphi}(M, t)$ et $\lambda \vec{\text{grad}} T$ s'expriment en W/m^2 .

VII. Cas général : Équation de la chaleur

Bilan énergétique

Après avoir commencé par traiter le cas unidimensionnel en régime permanent, nous allons maintenant établir le bilan thermique d'une quantité de matière à l'état solide, contenue dans un volume fini v , délimité par une surface s , appartenant à un milieu en trois dimensions.

La substance considérée a des caractéristiques thermiques décrites par sa capacité thermique massique C et sa conductivité thermique λ . Nous supposons que les grandeurs C et λ ne dépendent ni de l'espace (substance homogène), ni de la température (approximation valable tant que les écarts de température ne sont pas trop importants).

Nous supposons en outre que le volume v contient des sources internes dégageant de la chaleur avec une puissance volumique p (par effet Joule par exemple).

Si le phénomène considéré n'est pas en régime permanent, mais en régime variable, cela signifie que l'échange de chaleur à travers la surface s provoque une variation de la quantité de chaleur accumulée dans le volume v .

La puissance thermique reçue (algébriquement) par le volume v a pour expression :

$$\Phi = - \iint \vec{\varphi} \cdot \vec{n} \, ds \quad (4.11)$$

Il faut y ajouter la puissance dégagée dans le volume v par les sources internes, soit :

$$\iiint p \, dv \quad (4.12)$$

Pendant l'intervalle de temps dt , la substance contenue dans le volume v emmagasine donc une quantité de chaleur Φdt , qui va provoquer une variation de température ∂T , dépendant de capacité thermique massique C .

Comme on raisonne sur l'unité de volume, il est nécessaire d'introduire la capacité thermique volumique égale à ρC .

$$\text{On aura donc:} \quad \Phi dt = \iiint \rho c \partial T \, dv \quad (4.13)$$

soit en tenant compte des expressions (2.4) et (2.5):

$$- \iint \vec{\varphi} \cdot \vec{n} \, ds + \iiint p \, dv = \iiint \rho c \partial T \, dv \quad (2.7)$$

La formule d'Ostrogradski permet de transformer l'intégrale de surface en une intégrale de volume:

$$\iint \vec{\varphi} \cdot \vec{n} \, ds = \iiint \text{div} \left(\vec{\varphi} \right) \, dv \quad (4.14)$$

En combinant les équations (2.7) et (2.8), on obtient alors:

$$\iiint \left[-\operatorname{div} \vec{\varphi} + p - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right] dv = 0 \quad (4.15)$$

Le volume v considéré étant arbitraire, le bilan thermique instantané s'exprime localement en chaque point M du volume considéré par :

$$-\operatorname{div} \vec{\varphi} + p - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4.16)$$

Équation de la chaleur en milieu homogène et isotrope

Si on tient maintenant compte de la Loi de Fourier :

$$\vec{\varphi}(M, t) = -\lambda \operatorname{grad} T \quad (4.17)$$

le bilan (2.10) devient :

$$\operatorname{div} \left(\lambda \operatorname{grad} T \right) + p - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4.18)$$

c'est-à-dire finalement :

$$\Delta T + \frac{p}{\lambda} - \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4.19)$$

qui constitue l'équation de la chaleur.

On écrit souvent cette équation sous la forme :

$$\Delta T + \frac{p}{\lambda} - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4.20)$$

en introduisant le paramètre :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (4.21)$$

a est la diffusivité thermique de la substance considérée. La diffusivité thermique d'un solide s'exprime en m^2/s , comme la viscosité cinématique d'un fluide.

VIII. Conduction en régime permanent

Nous commencerons par raisonner, pour plus de clarté, dans le cadre d'un problème à une seule dimension. Un tel problème unidimensionnel est connu sous le nom de problème du mur, dans lequel la chaleur se propage uniquement suivant la normale à ce mur. Le gradient de température est par conséquent porté par cette normale. Les isothermes sont des plans parallèles aux faces. Un tel champ thermique est unidirectionnel. Dans ce cas, la température T n'est fonction que de l'abscisse x . Considérons une paroi d'épaisseur e séparant deux domaines où règnent des températures respectives T_1 et T_2 , avec T_1 supérieure à T_2 .

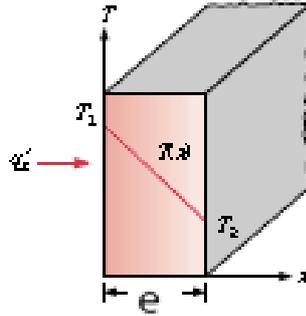


Figure (4.9) : flux de chaleur pour une paroi simple

Si le phénomène considéré est en régime permanent, les températures n'évoluent plus. C'est donc que l'on a atteint un régime d'équilibre entre l'apport de chaleur à travers la face chaude de la paroi, et la déperdition de chaleur à travers la face froide :

$$S \cdot \varphi_1 = S \cdot \varphi_2 \quad (4.22)$$

Flux entrant = Flux sortant

Dans l'hypothèse d'un déséquilibre, si :

$$S \cdot \varphi_1 - S \cdot \varphi_2 = S \Delta\varphi > 0 \quad (4.23)$$

la quantité de chaleur excédentaire $S\Delta\varphi$ accumulée chaque seconde dans la paroi, est liée aux caractéristiques physiques de cette paroi par l'expression :

$$S \Delta\varphi = \frac{mC_p \Delta T}{\Delta t} \quad (4.24)$$

et c'est cette accumulation de chaleur qui entraîne une augmentation de température de la paroi. Par contre, en régime permanent, on a :

$$mC_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 0 \quad (4.25)$$

ce qui s'intègre immédiatement, pour donner le profil de température dans le mur, qui varie linéairement en fonction de x :

Pour déterminer les valeurs des constantes a et b qui définiront une solution particulière,

$$\text{on peut } mC_p T(x) = ax + b \quad (4.26)$$

envisager plusieurs types de conditions de surface appliquées à ce mur, selon la nature du problème physique à résoudre.

1. Cylindre creux multicouches

C'est le cas pratique d'un tube recouvert d'une ou plusieurs couches de matériaux différents et où l'on ne connaît que les températures T_{f1} et T_{f2} des fluides en contact avec les faces interne et externe du cylindre ; h_1 et h_2 sont les coefficients de transfert de chaleur par convection entre les fluides et les faces internes et externes (figure (2. 8))

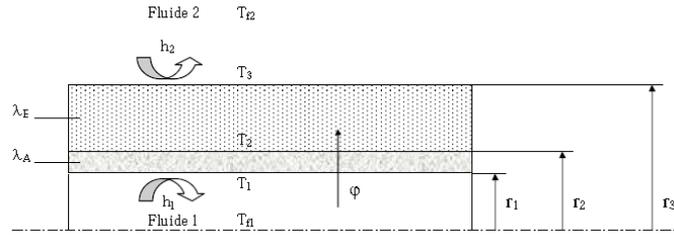


Figure (4.10) : Schéma des transferts dans un cylindre creux multicouches

En régime permanent, le flux de chaleur φ se conserve lors de la traversée des différentes couches et s'écrit :

$$\varphi = h_1 2\pi r_1 L (T_{f1} - T_1) = \frac{2\pi \lambda_A L (T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{2\pi \lambda_B L (T_2 - T_3)}{\ln(r_3/r_2)} = h_2 2\pi r_3 L (T_3 - T_{f2}) \quad (4.27)$$

D'où :

$$\varphi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \lambda_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \lambda_B L} + \frac{1}{h_2 2\pi r_3 L}} \quad (4.28)$$

ce qui peut être représenté par le schéma électrique équivalent de la figure (4.11).

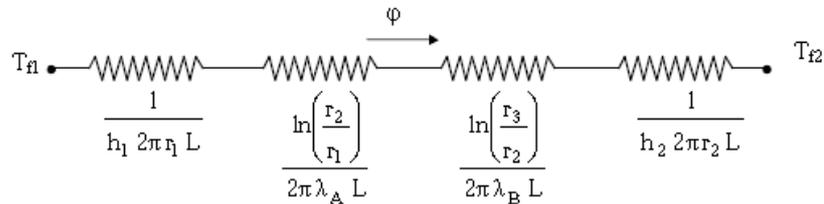


Figure (4.11) : Schéma électrique équivalent d'un cylindre creux multicouches

IX. Méthode de travail (le modèle mathématique)

Les système à l'intérieur de la zone de combustion est hautement non linéaire en raison du transfert complexe de chaleur et de masse .lerevêtement est formé sur les briques réfractaire après plusieurs réactions chimiques et différences de température .T affecter la précision du modèle. Ces hypothèses sont :

- Un modèle unidimensionnel en régime permanent a été développé pour calculer le profil de température de paroi dans le four
- Les diamètres intérieur et extérieur du four étaient constants
- Les chaleurs spécifiques et de réaction étaient indépendantes de la température et elles étaient constantes le long de la direction axiale

- La conduction des gaz et des matériaux solides dans la direction axiales de la paroi a été négligée
- Les coefficients de convection et d'émissivité étaient indépendants de la température et de la position
- La hauteur et la vitesse des matériaux solides étaient constantes à chaque section transversale du four
- Les solides transportés par flux gazeux n'ont pas été inclus dans le modèle
- La valeur moyenne de la conductivité du revêtement a été supposée égale à 0,73 W/m.oC
- La conductivité des briques de revêtement du four a peu être estimée par l'équation qui a été corrélée à partir des données expérimentales ,données par le fournisseur de réfractaires pour le type de briques cuites à la magnésite :

$$k_b = 3200 * T_b^{(-0.9125)} \quad (4.29)$$

- La conductivité de la coque métallique (alliage d'acier au carbone) a été considérée comme égale à 43 W/m. oC
- L'épaisseur de la brique du réfectoire était constante au niveau de la zone de combustion et égale à 20 cm .
- Le nombre de pointes de température de la coque scannés pour une rotation complète du four était de vingt-cinq. la température de chaque point de calcul à travers la position axiale a été supposée être une valeur mathématique moyenne de tous les points .les températures des coques scannées ont été prises chaque semaine pour capture les phénomènes de vieillissement. Cela fait de notre modèle un modèle quasi-dynamique et a permis de considérer les variations du coefficient de transfert de chaleur convectif dépendant à la fois du temps et de la distance longitudinale.

Les premières étapes pour établir notre modèle sont de faire les équations de bilan énergétique pour le gaz ,le solide et la paroi comme suit :

$$\text{Pour le gaz : } A_g C_{pg} \rho_g v_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = \beta_1 (T_m - T_g) + \beta_2 (T_s - T_g) + Q_{comb} \quad (4.30)$$

$$\text{Pour le solide : } A_s C_{ps} \rho_s v_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = \beta_2 (T_g - T_s) + \beta_3 (T_m - T_s) + A_s Q_c \quad (4.31)$$

$$\text{Pour mur : } \beta_1 (T_g - T_m) + \beta_3 (T_s - T_m) + \beta_4 (T_a - T_m) = 0 \quad (4.32)$$

Q_c : sont respectivement la chaleur dégagée par la flamme (J/s) et la chaleur générée par réaction chimique(W/m³) et tirées des tableaux des départements du four.

$(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4)$: Sont des fonctions non linéaires des températures ,la convection ,et les coefficients de transfert de chaleur par rayonnement, et la géométrie qui peuvent être calculées par les équations suivantes :

Le coefficient de transfert de chaleur entre les gaz et la paroi intérieure est le suivant :

$$\beta_1 = 1.7307 r_{in} P (f_1 + 1.37 * 10^{-9} (1 - h_0) \epsilon_g \epsilon_m (T_g^2 + T_m^2) (T_g + T_m)) \quad (4.33)$$

Le coefficient de transfert de chaleur entre les gaz et le solide est le suivant :

$$\beta_1 = 3.4314 r_{in} \sin\left(\frac{P}{2}\right) (f_2 + 1.37 * 10^{-9} (1 - h_0) \varepsilon_g \varepsilon_s (T_g^2 + T_s^2) (T_g + T_s)) \quad (4.34)$$

Le coefficient de transfert de chaleur entre la paroi et le solide est le suivant :

$$\beta_3 = r_{in} (2\pi - P) (f_3 + 1.73 * 10^{-9} h \varepsilon_m \varepsilon_s (T_s^2 + T_m^2) (T_s + T_m)) \quad (4.35)$$

Le coefficient de transfert thermique entre le mur extérieur et la température ambiante est le suivant :

$$\beta_4 = 2\pi f_4 r_{in} \quad (4.36)$$

La précision du modèle sera augmentée en supposant que le coefficient de transfert de chaleur de l'enveloppe externe est la somme des coefficients de transfert de chaleur convectif et radiatif comme suit :

Les coefficients de transfert de chaleur convectif et radiatif dépendent fortement de la température de sorte que la distribution des températures de la coque du four sera enregistrée pratiquement par un appareil simple appelé scanner de température de la coque du four (analyseur situé sur le terrain qui mesure la température d'une coque du four). Cet appareil est connecté aux ordinateurs de la salle de contrôle à l'aide d'un logiciel spécial appelé (data température cs100). Ce programme mesure les températures de rayonnement de la coque au niveau de la zone de combustion du four .

La formation du revêtement est un processus cumulatif dépendant principalement de la température de référence et du temps nécessaire pour former une couche pendant que le four tourne sur lui-même . Lorsque la température du clinker liquide atteint la température de référence (Tref), il se transforme en l'état solide et une couche de revêtement va se déposer sur la brique réfractaire et on peut dire qu'elle est exposée à des phénomènes de vieillissement. L'équation WLF peut capturer le vieillissement du processus de revêtement :

Notant que $T_w = T$

La zone de brûlage a été divisée en n tranches de taille égale et sera calculée comme suit : =

La longueur de la flamme a été tirée pratiquement des cartes du département des fours. Pas de maille obtenue en maillant la longueur du four à un nombre de pas connu, le pas de maille sera pris = 0.05m.

L'ensemble précédent d'équations différentielles et algébriques a été résolu par le logiciel MATLAB 5 pour obtenir la température de la paroi. Le profil de la température de paroi T_w (la température de la paroi intérieure du four) après résolution du modèle sera ensuite utilisé pour obtenir l'épaisseur du revêtement en utilisant un autre ensemble d'équation qui sera formé dans le modèle d'équation de revêtement.

Résultat

Data

$$c_{pg} = 1173.82 \text{ (J/KG.}^\circ\text{C)} \quad ; \quad C_{ps} = 1089.97 \text{ (J/KG.}^\circ\text{C)}$$

$$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = 22.71 \quad (\text{w/m. }^\circ\text{C)}$$

$$h_0 = 0.0757 \quad , \quad p=(3\pi/2) \quad , r_{in} = 5.1(m) \quad , r_{out} = 5.2(m) \quad , r_c = 4.9(m)$$

$$\rho_g = 0.24 \left(\frac{kg}{m^3}\right), \quad \rho_s = 905 \left(\frac{kg}{m^3}\right), \quad \Delta Z = 0.05(m)$$

$$\varepsilon_{sh} = 0.5 \quad , \quad \varepsilon_b = 0.8 \quad , \quad \varepsilon_m = 0.9$$

$$\sigma = 5.6697 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad , FL_1 = 12m, FL_2 = 11m$$

Epaisseur de brique=20 cm, zone de combustion longueur=35m,

$k_{sh} = 43 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$, k_b :fonction de la température de référence comme dans eau

$k_c = 0.73 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ $T_a = 30^\circ\text{C}$, T_{sh} : mesuré à partir du scanner de coquille de parent, $v_g = 32(\text{m/s})$, $v_s = 2.1 \text{ (m/s)}$ $Q_c = 45000 \text{ (W/m}^3)$ $Q_{comp} = 92 \text{ (J/s)}$, $c_1 = 18$,

$$c_2 = 1000^\circ\text{C} \quad , T_{ref(c)} = 901^\circ\text{C}$$

Epaisseur de revêtement sera estimée au niveau de la zone de combustion uniquement (du brûleur vers le milieu du four) car aucun revêtement n'est trouvé dans les autres zones. La température à l'intérieur des fours(T_w) a été calculée à partir des équations (4)-(14) car elle était impossible à mesurer par aucun instrument. Les travaux pratiques ont commencé le 3 mars 2011 lorsque le professeur de maintenance Figure 5 (remplacement de la magnésie dans la zone de combustion) a été terminé pour les fours n°2 et 3. Le temps requis pour étudier le revêtement dans cet article était d'environ 6 mois. Ensuite, après l'arrêt et le refroidissement des fours, les épaisseurs de revêtement ont été mesurées dans différentes positions.

conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire nous a permis de déterminer l'évaluation de la fiabilité des équipements industriels et leur optimisation par des diagnostics et des méthodes graphiques et numériques. Il n'y a pas des méthodes normalisées pour calculer la fiabilité des systèmes, le choix de la méthode à appliquer se fait en fonction des types d'équipement, de la grandeur des équipements, de la qualité exigée, des moyens disponibles et des données recueillies.

Dans notre travail, nous avons étudié les principales lois utilisées en fiabilité ainsi que les différentes méthodes pour déterminer les paramètres de dégradation qui caractérisent le degré de défaillance et, permettent de bien suivre l'état des équipements afin de choisir correctement le type de la maintenance à appliquer. Après une étude bibliographique, nous avons relevé quatre facteurs essentiels pour le calcul de la fiabilité.

On a déduit que : L'épaisseur du revêtement a été estimée en utilisant un modèle résistant au transfert de chaleur dans adjacent aux couches cylindriques. Le modèle mathématique de régime permanent utilisé précédemment par Sadighi et. Al. 2011 a été formulée pour estimer la température profil de la surface intérieure de la paroi du four à ciment .

- La première étape de réalisation du modèle a été réalisée en calculant la température profil le long de la longueur du four et le profil de température mesuré de l'extérieur surface

- Il a été conclu que la différence entre les valeurs estimées par modèle avec les données pratiques pourraient provenir de la conductivité du revêtement dans la zone de combustion et de la rupture du revêtement instable pendant le processus d'arrêt et de refroidissement

- La comparaison des résultats du modèle et de deux ensembles de données qui ont été recueillies à partir de fours industriels de Kufa, a confirmé que le modèle avait une bonne capacité à calculer l'épaisseur du revêtement.

- Les résultats des courbes ont démontré que pour avoir une épaisseur de revêtement acceptable du point de vue de l'écoulement solide le long du four et de la protection réfractaire, la virole la température entre 200-250°C était satisfaisante.

- Cause de température plus basse en empêchant le mouvement des solides le long du four et la valeur supérieure est néfaste pour la couche réfractaire.

- Il est démontré qu'il y a une progression rapide de l'épaisseur du revêtement dans la période 3-16 semaines de vie du revêtement et il est recommandé de faire quelques recherches pour discuter ce phénomène.

- La valeur théorique du temps nécessaire pour réaliser un enrobage constant dans le four n°2 est d'environ 24 heures ou 960 tr/min.