



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة العربي التبسي - تبسة  
Université Larbi Tebessi - Tébessa  
معهد المناجم  
Institut des Mines  
قسم الإلكتروميكانيك  
Département Electromécanique



## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Option : Maintenance Industrielle

**Maintenance basée sur la fiabilité du four rotatif  
(cas de la cimenterie Elmalabiod Tébessa)**

Par

BOUMOUS Oussama et MERAMRIA Bilel

Devant le jury :

LOUAFILM	PR	Président	Université Larbi Tebessi Tébessa
TALEB .M	MCB	Encadreur	Université Larbi Tebessi Tébessa
SOUDANI.M	MAA	Examineur	Université Larbi Tebessi Tébessa
RAIS.K	MCB	Examineur	Université Larbi Tebessi Tébessa

Promotion 2021/2022

# RMERCIEMENT

Nous remercions tout d'abord notre créateur **ALLAH** le tout puissant miséricordieux et le bienveillant, de nous avoir donné la force, le courage et la patience pour mener à terme ce travail.

Nous tenons à exprimons notre immense gratitude à notre encadrante **Dr TALEB Mounia** pour ses remarques avisée, ces conseils pratique, technique et scientifiques tout au long de ce travail.

Nous remercions **Pr LOUAFI Messaoud** d'avoir accepté de présider notre jury.

Nous remercions **Mr SOUDANI Med saleh** et **Mr Rais Khaled** d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous désirons aussi remercions vivement tous ceux qui de prés ou de loin ont participé à la réalisation de ce projet.

# DÉDICACES

Je dédie ce mémoire à :

✚ Mes très chers parents pour leur amour, leurs sacrifices et leur Encouragement et que **'ALLAH'** les protègent.

✚ Mes chers frères.

✚ Mes chers Amis.

✚ A l'âme de notre frère et ami **Djlailia Omran**, que **Dieu** lui fasse miséricorde.

✚ Toute ma famille.

✚ L'ensemble des étudiants de ma promotion.

BOUMOUS Oussama

# DÉDICACES

Je dédie ce mémoire à :

✚ Ma tres chère maman pour leur amour, leur sacrifice et leur Encouragement et que 'ALLAH' la protège.

✚ A l'âme de mon très cher père **Mérameria Abdelhamid** , que **Dieu** lui fasse miséricorde.

✚ Mes chers frères et sœurs.

✚ Ma chère femme que 'ALLAH' la protège.

✚ Toute ma famille.

✚ L'ensemble des étudiants de ma promotion.

MERAMRIA Bilel

# RÉSUMÉ

La maintenance industrielle prend une importance croissante et se révèle être une des fonctions clé de l'entreprise de production moderne. Notre travail est consacré à l'étude théorique et pratique de la fiabilité des équipements de four rotatif au niveau de Cimenterie Elmalabiod TEBESSA.

Dans ce projet nous avons utilisé les lois de fiabilité et les méthodes d'analyse (AMDEC, Weibull) la très utilisée dans le domaine de mécanique. Afin de concrétiser notre mémoire, nous avons exploité les méthodes graphiques et numériques pour déterminer les paramètres de dégradation, qui sont utilisés pour l'évaluation du taux de défaillance des équipements et déterminer le type de la maintenance à appliquer.

Enfin, nous avons validé notre travail par une étude de cas pratique, en choisissant les organes sensibles des équipements stratégiques du Four rotatif (notre cas d'étude). Cette étude nous a permis de trouver des résultats en conformité avec la réalité au niveau de l'entreprise.

**Mots clés :** Diagnostic, Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Défaillance, Taux de défaillance, Maintenance industrielle, Four, Cimenterie.

## ABSTRACT

Industrial maintenance is becoming increasingly important and is proving to be one of the key functions of the modern production company. Our work is devoted to the theoretical and practical study of the reliability of rotary kiln equipment at Cimenterie Elmalabiod TEBESSA.

In this project we used reliability laws and methods of analysis (FMEA, Weibull) widely used in the field of mechanics. In order to concretize our thesis, we used graphical and numerical methods to determine the degradation parameters, which are used for the evaluation of the failure rate of the equipment and determine the type of maintenance to be applied.

Finally, we validated our work by a practical case study, choosing the sensitive components of the strategic rotary kiln equipment of Elmalabiod TEBESSA Cement. This study allowed us to find results in line with reality at the company.

**Keywords :** Diagnosis, Reliability , Maintainability , Availability, Failure, Industrial maintenance, Kiln , Cement .

## ملخص

الصيانة الصناعية أصبحت ذات أهمية متزايدة، ويبرهن هذا على أنها واحدة من المهام الرئيسية لشركات الإنتاج الحديثة. ويخصص عملنا على الدراسة النظرية والعملية للموثوقية على الفرن الدوار لمؤسسة صناعة الاسمنت الماء الأبيض تبسة.

في هذه الدراسة استخدمنا قوانين الموثوقية و طرق التحليل المستعملة كثيرا في المعدات الميكانيكية , با الأخص قانتن واييل , ولتحقيق هذه الدراسة حددنا الأساليب البيانية و التحليلية لتحديد معالم الموثوقية و التي تستخدم لتقييم معدل تدهور المعدات و تحديد نوع الصيانة التي يجب تطبيقها.

و أخيرا قمنا با التحقق من صحة الدراسة و النتائج مع دراسة الحالات العملية من طرف المشرف السؤل عن الفرن , و اختيار الأجزاء الحساسة من الفرن الدوار لشركة انتاج الاسمنت الماء الأبيض تبسة , با تطبيق قانون واييل تمكنا من تحديد معالم الموثوقية للفرن الدوار و تحديد نوع الصيانة اللازمة.

**الكلمات المفتاحية:** صيانة صناعية , الفشل , تقييم الفشل , قابلية الصيانة , اعتمادية , التوفر.

# **TABLE DES MATIERES**

<b><u>Table des matières</u></b>	<b>page</b>
Remerciements	I
Dédicaces	II
Résumé	III
Table des matières	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VI
Liste des symboles	VII
Introduction générale	01

## **CHAPITRE 1 : LA FONCTION MAINTENANCE**

Introduction	02
Historique	02
1. Définition de la maintenance et ectypes	02
1.1 Maintenance corrective	02
1.2 La Maintenance préventive	03
1.3 La maintenance a méliorative	06
2. définitions des opérations de maintenance	07
3. objectifs de la maintenance	10
4. Les niveaux de la maintenance	10
5. Les méthodes de la maintenance	12
6. La notion de la défaillance	12
6.1 Fonction requise	13
6.2 Dégradation	13
6.3Triptyque « faute-défaut-défaillance »	13
7. Gestion de maintenance	14
8. Conclusion	14

## **Chapitre 2 :La maintenance basée sur la fiabilité(MBF)**

Introduction	16
La méthode MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité)	16
1. Définition	16
2. Objectifs de la MBF	16
3. Les principes de la MBF	17
4.Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC)	17
4.1Définition	17
4.2.Les définitions liées à l' AMDEC	18
4.3. Types d'AMDEC	18
4.4. Les étapes de l' AMDEC	19
4.5. Objectifs de l'A.M.D.E.C	21
5.Limites de l'AMDEC	21
Conclusion	21

## **CHAPITRE 3 : Etude de la Fiabilité**

Introduction	22
1.La sureté de fonctionnement	22
1.1.Principaux concepts	22
2. Fiabilité	23
2.1. Définition	23
2.3.Conséquences d'une mauvaise fiabilité	23
2 .4 . Quelques termes utilisés en fiabilité	23
2.5. Application de la fiabilité	24
3 .Différentes lois de la fiabilité	24

## **TABLE DES MATIERES**

3.1. Loi Binomiale	24
3.2. Loi de Poisson	24
2.3.3. Loi normale	25
2.3.4. Loi exponentielle	25
2.3.5. Loi de Weibull	26
3. Paramètres de la fiabilité MTBF, MTTR, MTTA	26
3.1 .Moyenne des temps de bon fonctionnement « MTBF »	26
3.2. Moyenne des temps techniques de réparation « MTTR »	26
3.3. Taux de défaillance et de réparation	27
3.3.1. Taux de défaillance	27
3.3.2. Evolution du taux de défaillance	28
3.3.3. Taux de réparation	28
4. Qu'est-ce que la sureté de fonctionnement(SDF)	29
4.1.Maintenabilite et disponibilité	29
4.1.1.La Maintenabilite	29
4.1.2. Définition	29
4.1.3.Maintenabilite et maintenance	30
4 .2.La disponibilité	30
4.2.1 Définition	30
4.2.3.Maintenabilite et disponibilité	30
Conclusion	30

### **Chapitre 4 : Présentation du four rotatif de la cimenterie**

Introduction	31
1. Fabrication de ciment	31
1.2 Les principales étapes de la fabrication du ciment	32
1.3 Les différents types de ciments	33
2. Les fours rotatifs de cimenteries	33
3. Description des composants du four	35
3.1. Le bandage	35
3.1.2. Rôle du bandage	35
3.2. La virole	35
3.3. Les briques réfractaires	36
3.4.Les galets	36
3.5. La butée hydraulique	37
3.6. Les joints du four	38
3.7. Les plaques n'ose-ring	38
3.8. Caractéristiques du four cimenterie Elmalabiod Tébessa	38
4. Les principaux risques dans les cimenteries	39
4.1. Risques chimiques des cimentiers	39
4.2. Risques thermiques des cimentiers	39
4.3. Risques acoustiques des cimentiers	40
4.5. Risques physiques des cimentiers	40
4.6. Risques liés au ciment sur l'équipement	40
Conclusion	40

### **CHAPITRE 05 : Partie pratique**

1. Introduction	41
2. les historique de pannes de cimenterie Elmalabiod	42
3. L'analyse AMDEC du four cimenterie Elmalabiod	43
4. Etude de fiabilité	49
4.1. Signification des paramètres de la loi WEIBULL	49
4.1.1. Paramètres de forme ( $\beta$ )	49

## **TABLE DES MATIERES**

4.1.2. Paramètre d'échelle	49
4.1.3. Paramètres de localisation (y)	49
4.2. Calcul des paramètres de « WEIBULL »	50
5. Étude de cas( four cimenterie Elmalabiod	51
6. Etude de Maintenabilite	53
6.1. Calcul de Maintenabilite	53
6.2. Représentation mathématique	53
7. Etude de la disponibilité	55
7.1. forme de disponibilité	55
8. Recommandations	56
9. Conclusion	57
Conclusion générale	57
Bibliographie	58
Liste des annexes	59

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b> Applications des méthodes de maintenance .....	<b>06</b>
<b>Figure 2.</b> Les méthodes de maintenance. ....	<b>12</b>
<b>Figure 3.</b> Dégradation du bien et durée de vie .....	<b>13</b>
<b>Figure 4.</b> Triptyque « faute - défaut – défaillance » .....	<b>13</b>
<b>Figure 5.</b> Principe de la MBF .....	<b>17</b>
<b>Figure 6.</b> Sûreté de fonctionnement .....	<b>22</b>
<b>Figure 7.</b> Probabilités complémentaires .....	<b>24</b>
<b>Figure 8</b> Tracé de la loi exponentielle .....	<b>25</b>
<b>Figure 9.</b> Les phases d’une intervention corrective.....	<b>27</b>
<b>Figure 10.</b> Courbe en baignoire .....	<b>28</b>
<b>Figure 11.</b> Maintenabilité et disponibilité.....	<b>30</b>
<b>Figure 12.</b> les grandes étapes de la fabrication du ciment. ....	<b>32</b>
<b>Figure 13.</b> Les différentes étapes de la fabrication du ciment. ....	<b>33</b>
<b>Figure14.</b> Four rotatif dans une cimenterie de la région d’Elma labiod Tébessa. ....	<b>34</b>
<b>Figure 15.</b> Disposition générale d'un four rotatif. ....	<b>35</b>
<b>Figure 16.</b> Bandage de four rotatif .....	<b>35</b>
<b>Figure 17.</b> virole de four cimenterie .....	<b>36</b>
<b>Figure 18.</b> Brique réfractaire de four rotatif .....	<b>36</b>
<b>Figure 19.</b> Gallet de four cimenterie .....	<b>37</b>
<b>Figure 20.</b> Butée hydraulique .....	<b>38</b>
<b>Figure 21.</b> Plaque nose-ring. ....	<b>38</b>
<b>Figure 22.</b> Détermination graphique des Paramètres de fiabilité .....	<b>50</b>
<b>Figure 23.</b> Fonction de fiabilité $R(t)$ .....	<b>52</b>
<b>Figure24.</b> Fonction La fonction de réparation $F(t)$ .....	<b>52</b>
<b>Figure 25.</b> Fonction de Maintenabilité $M(t)$ .....	<b>54</b>
<b>Figure 26.</b> Fonction de disponibilité .....	<b>56</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 01.</b> Les niveaux de maintenance .....	<b>11</b>
<b>Tableau 02.</b> La forme de tableau l'AMDEC.....	<b>20</b>
<b>Tableau 03.</b> Caractéristiques du four cimenterie Elmalabiod Tébessa .....	<b>39</b>
<b>Tableau 04.</b> les historiques de pannes de cimenterie Elmalabiod .....	<b>42</b>
<b>Tableau 05.</b> les coefficients de la criticité.....	<b>43</b>
<b>Tableau 06.</b> Analyse AMDEC de four (notre cas d'étude) .....	<b>46</b>
<b>Tableau 07.</b> Résultats de l'analyse AMDEC avec les action.....	<b>47</b>
<b>Tableau 08.</b> préparation des données .....	<b>50</b>
<b>Tableau 09.</b> Résultats de l'étude de fiabilité .....	<b>52</b>
<b>Tableau 10.</b> La Maintenabilité .....	<b>54</b>
<b>Tableau 11.</b> Disponibilité en fonction de TBF .....	<b>55</b>

## LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

<b>AMDEC</b>	Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité
<b>MBF</b>	Maintenance basée sur la fiabilité
<b>MTTF</b>	L'estimation de la durée moyenne s'écoulant entre la mise en service du système et la survenance.
<b>MBF</b>	Maintenance basé sur la fiabilité.
<b>MTBF</b>	La durée moyenne entre deux défaillances consécutives.
<b>MTTR</b>	Le temps moyen mis pour réparer le système.
$\lambda(t)$	Taux de défaillance.
<b>TBF</b>	Temps de bon fonctionnement entre deux défaillances.
$f(t)$	Densité de probabilité.
$F(t)$	La fonction de répartition.
$R(t)$	La fonction de fiabilité.
$M(t)$	Fonction maintenabilité.
$D(t)$	Fonction de disponibilité.
$D_i$	Disponibilité intrinsèque.
$\beta$	Paramètre de forme.
$\gamma$	Paramètre de position.
$\eta$	Paramètre d'échelle.
$\mu(t)$	Taux de réparation.
<b>A et B</b>	Nombre réel.
<b>FMD</b>	Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité.

# Introduction Générale

Ce présent mémoire, préparé dans le cadre de l'obtention du diplôme de master en électromécanique, option maintenance industrielle, consiste à approcher la problématique de l'amélioration de la production du four rotatif au niveau de l'entreprise de Ciment Elmalabiod TEBESSA. En effet, ce travail a été élaboré pour éviter le grand nombre des défaillances dans cette entreprise, dont le coût de la maintenance et le temps d'arrêt de machines (four rotatif) revient très cher à l'entreprise cela affecte directement le rendement de l'entreprise ainsi que son personnel.

Dans ce projet nous avons utilisé les méthodes d'optimisation, en se basant, sur des outils, comme (AMDEC et Weibull), qui sont très connues en fiabilité, en particulier, la loi de "Weibull" qui est très utilisée dans le diagnostic des équipements mécaniques. Afin de concrétiser notre étude, les méthodes graphiques et analytique déjà citée nous aides à déterminer et valider les paramètres de dégradation, utilisés pour l'évaluation du taux de défaillance des équipements au niveau du four et déterminer, ainsi que le type de la maintenance à appliquer.

Cette étude nous a permis de trouver les résultats de la fiabilité (maintenabilité, disponibilité...) et l'identification des pannes les plus importantes et les plus critiques composant du notre four et les causes de ces pannes.

A la fin de ce travail nous avons proposé quelque recommandations nécessaire pour réduire les temps d'arrêt de la production et améliorer la fiabilité de notre Equipment ainsi prolonger sa durée de vie, réduire les temps d'arrêt, les coûts et augmenter la production pour que l'entreprise soit compétitif et répond aux exigences du marché économique.

**CHAPITRE 1**  
**LA FONCTION**  
**MAINTENANCE**

## ❖ Introduction

Au moment de la détermination de la politique de maintenance qui va être mise en œuvre pour un équipement ou une installation, l'homme de maintenance se trouve devant une alternative classique : doit-il attendre ? la défaillance du matériel ? et donc être amené à intervenir sur ce matériel qui n'assure plus tout ou partie de sa fonction requise ou bien doit-il faire l'impossible pour éviter que cette défaillance ne se développe et entraîne la « panne » du matériel ?

Le maintien des équipements de production est un enjeu clé pour la productivité des usines aussi bien pour la qualité des produits.[1] L'objectif de ce chapitre est de définir la **maintenance** et les **normes** utilisées.

- D'après Larousse: La maintenance est l'ensemble de tous ce qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement.

## ❖ Historique

Le terme « maintenance », forgé sur les racines latin « Manus et Ténéré », est apparu dans la langue française au XIIe siècle. L'étymologiste « Wace » a trouvé la forme mainteneur (celui qui soutient), utilisée en 1169 : c'est une forme archaïque de « mainteneur ». Les utilisations anglo-saxonnes du terme sont donc postérieures. A l'époque moderne, le mot est réapparu dans le vocabulaire militaire : « maintien dans les unités de combat, de l'effectif et du matériel à un niveau constant ». Définition intéressante, puisque l'industrie l'a repris à son compte en l'adaptant aux unités de production affectées à un « combat économique » !

## 1. Définition de la maintenance et ces types :

Selon la définition de l'AFNOR, la **maintenance** vise à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé.

La maintenance regroupe ainsi les actions de dépannage et de réparation, de réglage, de révision, de contrôle et de vérification des équipements matériels (machines, véhicules, objets manufacturés, etc.) ou même immatériels (logiciels).

Un service de maintenance peut également être amené à participer à des études d'amélioration du processus industriel, et doit, comme d'autres services de l'entreprise, prendre en considération de nombreuses contraintes comme la qualité, la sécurité, l'environnement, le coût, etc.[2]

### 1.1) Maintenance corrective

Définition AFNOR (norme X 60-010) : «Opération de maintenance effectuée après défaillance ».

La maintenance corrective correspond à une attitude de défense (subir) dans l'attente d'une défaillance fortuite, attitude caractéristique de l'entretien traditionnel.

C'est l'ensemble des activités réalisées après défaillance d'un bien ou dégradation de sa fonction, afin de lui permettre d'accomplir, au moins provisoirement, une fonction requise. Ces activités comprennent la détection/localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec

ou sans modification, et le contrôle du bon fonctionnement. La remise en état peut prendre deux formes : le dépannage ou la réparation.[3]

## a- Opérations de la maintenance corrective

Après apparition d'une défaillance, le maintenancier doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations dont les définitions sont données ci-dessous. Ces opérations s'effectuent par étapes (dans l'ordre) :

- **Test** : c'est à dire la comparaison des mesures avec une référence.
- **Détection** ou action de déceler l'apparition d'une défaillance.
- **Localisation** ou action conduisant à rechercher précisément les éléments par lesquels la défaillance se manifeste.
- **Diagnostic** ou **identification** et analyse des causes de la défaillance.
- **Dépannage**, réparation ou remise en état (avec ou sans modification).
- **Contrôle** du bon fonctionnement après intervention.
- **Amélioration éventuelle** : c'est à dire éviter la réapparition de la panne.
- **Historique** ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure.

## b- Le temps en maintenance corrective

Les actions de maintenance corrective étant très diverses, il est toujours difficile de prévoir la durée d'intervention :

- Il peut être faible (de quelques secondes pour réarmer un disjoncteur ou changer un fusible à quelques minutes pour changer un joint qui fuit).
- Il peut être très important (de 0,5 à plusieurs heures) dans le cas du changement de plusieurs organes simultanément (moteur noyé par une inondation).
- Il peut être majeur en cas de mort d'homme (plusieurs jours si enquête de police).

Le responsable maintenance doit donc tenir compte de ces distorsions et avoir à sa disposition une équipe « réactive » aux événements aléatoires. Pour réduire la durée des interventions, donc les coûts directs et indirects (coûts d'indisponibilité de l'équipement), on peut : - Mettre en place des méthodes d'interventions rationnelles et standardisées (outillages spécifiques, échanges standards, logistique adaptée, etc..). - Prendre en compte la maintenabilité des équipements dès la conception (trappe de visites accessibles, témoins d'usure visible, etc..).[4]

## 1.2) La Maintenance préventive

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

## **a- La maintenance préventive systématique**

C'est la Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage.

Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité, la longueur et la masse des produits fabriqués, la distance parcourue, le nombre de cycles effectués, etc.

Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle.

Cette méthode nécessite de connaître :

- Le comportement du matériel.
- Les modes de dégradation.
- Le temps moyen de bon fonctionnement entre 2 avaries

## **Cas d'application**

- Equipements soumis à une législation en vigueur (sécurité réglementée) : appareils de levage, extincteurs, réservoirs sous pression, convoyeurs, ascenseurs, monte-charge, etc....
- Equipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves : tout matériel assurant le transport en commun des personnes, avions, trains, etc....
- Equipement ayant un coût de défaillance élevé : éléments d'une chaîne de production automatisée, processus fonctionnant en continu (industries chimiques ou métallurgiques).
- Equipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps de service : consommation excessive d'énergie, éclairage par lampes usagées, allumage et carburation déréglés (moteurs thermiques), etc....

## **b- La maintenance préventive conditionnelle**

On l'appelle aussi maintenance prédictive (terme non normalisé). C'est la maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc...).

La maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendante de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel. Elle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant le cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et, à partir de là, de décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint. Mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs. Tout le matériel est concerné; cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement.[4]

## Les paramètres mesurés peuvent porter sur

- Le niveau et la qualité de l'huile.
- Les températures et les pressions.
- La tension et l'intensité du matériel électrique.
- Les vibrations et les jeux mécaniques.
- Le matériel nécessaire pour assurer la maintenance préventive conditionnelle devra être fiable pour ne pas perdre sa raison d'être. Il est souvent onéreux, mais pour des cas bien choisis, il est rentabilisé rapidement.

## C- Opérations de la maintenance préventive

Ces opérations trouvent leurs définitions dans la norme NF X 60-010 et NF EN 13306.

- **Inspection** : contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien ; elle permet de relever des anomalies et d'exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de la production ou des équipements (pas de démontage).

- **Contrôle** : vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Ce contrôle peut déboucher sur une action de maintenance corrective ou alors inclure une décision de refus, d'acceptation ou d'ajournement.

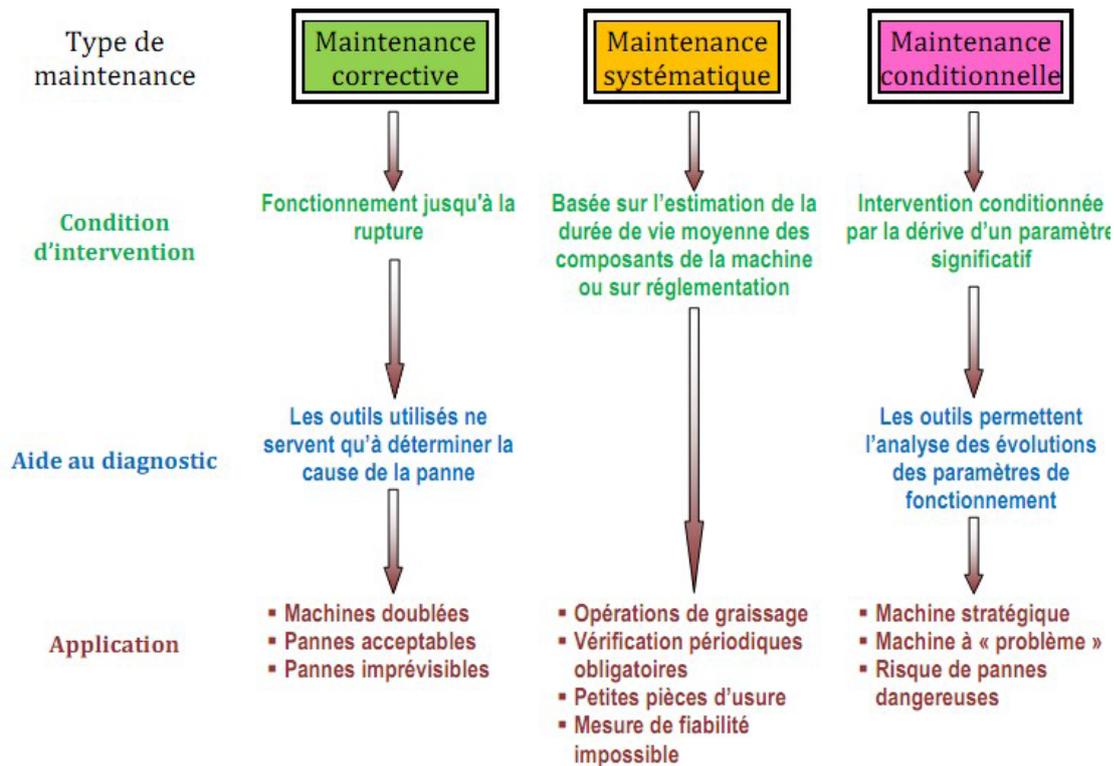
- **Visite** : examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance du premier et du deuxième niveau ; il peut également déboucher sur la maintenance corrective.

- **Test** : comparaison des réponses d'un système par rapport à un système de référence ou à un phénomène physique significatif d'une marche correcte.

- **Echange standard** : remplacement d'une pièce ou d'un sous-ensemble défectueux par une pièce identique, neuve ou remise en état préalablement, conformément aux prescriptions du constructeur.

- **Révision** : ensemble complet d'examens et d'actions réalisées afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité d'un bien. Une révision est souvent conduite à des intervalles prescrits du temps ou après un nombre déterminé d'opérations. Une révision demande un démontage total ou partiel du bien. Le terme révision ne doit donc pas être confondu avec surveillance. Une révision est une action de maintenance de niveau 4.

. Les trois premières opérations sont encore appelées « opérations de surveillance ». Elles caractérisent parfaitement la phase d'apprentissage et sont absolument nécessaires si on veut maîtriser l'évolution de l'état réel d'un bien. On accepte donc de payer pour savoir puis pour prévenir. Elles sont effectuées de manière continue ou à intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou sur le nombre d'unités d'usage.[4]



**Figure 1 : Applications des méthodes de maintenance [4]**

## Objectifs de la maintenance préventive

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

## 1.3) La maintenance a améliorative

L'amélioration des biens d'équipement est un « ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise » (norme NF EN 13306). On apporte donc des modifications à la conception d'origine dans le but d'augmenter la durée de vie des composants, de les standardiser, de réduire la consommation d'énergie, d'améliorer la maintenabilité, etc.. C'est une aide importante si l'on décide ensuite de construire un équipement effectuant le même travail mais à la technologie moderne : on n'y retrouvera plus les mêmes problèmes. [4]

## a) Opérations de la maintenance améliorative

### • Rénovation.

C'est l'inspection complète de tous les organes, la reprise dimensionnelle complète ou le remplacement des pièces déformées, la vérification des caractéristiques et éventuellement, la réparation des pièces et sous-ensembles défectueux. C'est donc une suite possible à une révision générale. Une rénovation peut donner lieu à un échange standard.

### • Reconstruction .

« Action suivant le démontage du bien principal et remplacement des biens qui approchent de la fin de leur durée de vie et/ou devraient être systématiquement remplacés ». La reconstruction diffère de la révision en ce qu'elle peut inclure des modifications et/ou améliorations. L'objectif de la reconstruction est normalement de donner à un bien une vie utile qui peut être plus longue que celle du bien d'origine. La reconstruction impose le remplacement de pièces vitales par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes. La reconstruction peut être assortie d'une modernisation ou de modifications. Les modifications peuvent apporter un plus en terme de disponibilité (redondance), d'efficacité, de sécurité, etc.... Attention toutefois à une forme particulière de reconstruction : c'est la « **cannibalisation** » qui consiste à récupérer, sur le matériel mis au rebut (casse), des éléments en bon état, de durée de vie espérée inconnue, et de les utiliser en rechanges ou en pièces de rénovation. Est-ce une bonne solution ?...

### • Modernisation .

C'est le remplacement d'équipements, d'accessoires, des logiciels par des sous-ensembles apportant, grâce à des perfectionnements techniques n'existant pas sur le bien d'origine, une amélioration de l'aptitude à l'emploi du bien. Une modernisation peut intervenir dans les opérations de rénovation ou de reconstruction. [4]

## b) Objectifs de la maintenance améliorative

La maintenance améliorative est un état d'esprit nécessitant un pouvoir d'observation critique et une attitude créative. Un projet d'amélioration passe obligatoirement par une étude économique sérieuse : l'amélioration doit être rentable. Tout le matériel est concerné, sauf bien sûr, le matériel proche de la réforme. Les objectifs de la maintenance améliorative d'un bien sont :

- L'augmentation des performances de production.
- L'augmentation de la fiabilité.
- L'amélioration de la maintenabilité.
- La standardisation de certains éléments ou sous-ensemble,
- L'augmentation de la sécurité des utilisateurs.

## 2) définitions des opérations de maintenance

Il existe des définitions normatives des différentes opérations de maintenance ; néanmoins:

- Les normes donnent l'esprit d'une intervention mais ne définissent pas toujours clairement les opérations à effectuer .

## CHAPITRE 1 : LA FONCTION MAINTENANCE

- Les normes ne couvrent pas toutes les prestations.

De ce fait, pour éviter toute ambiguïté, il est nécessaire pour chaque entreprise de définir parfaitement les prestations attendues ou effectuées (objectif, détail des opérations, etc.)

- **Réparation :**

Action définitive et limitée de la maintenance à la suite d'une défaillance.

- **Dépannage :**

Action consécutive à la défaillance de bien, en vue de rendre apte à accompli une fonction requise, au moins provisoirement.

**Note:** compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation, hors règle de procédures, de coût et de qualité et dans ce cas, sera suivi d'une réparation.

- **Vérification :**

Confirmation par examen et établissement des preuves que les exigences spécifiées ont été satisfaites

Le résultat d'une vérification se traduit par une décision de remise en service, d'ajustage, de réparation, de déclassement ou de réforme. Dans tous les cas, une trace écrite de la vérification effectuée doit être conservée dans le dossier individuel de l'appareil de mesure.

**Note:** La vérification peut être effectuée au vu des caractéristiques constructeurs ou au vu des résultats des certificats d'étalonnage.

La vérification est une intervention métrologique, fondé sur la comparaison à un étalon.

- **Vérification préliminaire :**

La vérification préliminaire est une opération de vérification effectuée après l'opération de contrôle fonctionnel et avant toute autre opération.

**NOTE:** la vérification préliminaire est un constat de l'exactitude de l'appareil dans une configuration d'origine et avant toutes interventions d'ajustage ou de maintenance corrective.

- **Contrôle :**

Activité, tel que mesurer, examiner, essayer ou passer au calibre une ou plusieurs caractéristiques d'une entité et comparer les résultats aux exigences spécifiées en vue de déterminer si la conformité est obtenue pour chacune de ces caractéristiques.

- **Ajustage :**

Opération destinée à amener un appareil de mesure à un fonctionnement et à une justesse convenable pour son utilisation.

- **Calibrage :**

Le calibrage consiste à remettre un appareil à un niveau de précision optimale.

- **Etalonnage :**

Ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs indiquées par un appareil de mesure ou un système de mesure et les valeurs connues correspondantes d'une grandeur mesurée

- **Expertise technique :**

En vue d'évaluer l'état d'un appareil présumé défectueux, l'expertise technique comprend:

- Des examens visuels (externe, interne, sécurité)
- Un examen fonctionnel,
- Une vérification si l'examen fonctionnel c'est avéré satisfaisant.

L'expertise technique ne remet en aucun cas l'appareil dans des conditions de fiabilité, de sécurité ou de précision.

- **Réglage :**

Ajustage utilisant uniquement les moyens mis à la disposition de l'utilisateur.

- **Déclassement :**

Action par laquelle un bien est affecté à une classe d'utilisation moins sévère.

- **Réforme :**

Action administrative par laquelle il est décidé d'exclure de toute utilisation, un bien usagé dont on a constaté l'inaptitude totale ou partielle à accomplir la fonction requise et qu'il n'est pas possible de déclasser.

- **Recette fonctionnelle :**

La recette fonctionnelle permet de s'assurer de l'état de fonctionnement global d'un appareil de mesure sans préjuger de sa précision.

La recette fonctionnelle comprend entre autres les contrôles de sécurité, extérieur, un examen fonctionnel et un contrôle de la conformité à la commande.

- **Recette technique :**

La recette technique correspond à une recette fonctionnelle suivie d'une opération de vérification. Ceci permet d'assurer qu'un appareil de mesure, neuf ou d'occasion, satisfait aux prescriptions qui autorisent sa mise en service.

**Not:** La recette technique se différencie de l'intervention de vérification par le contrôle de la confirmée à la commande

## 3) objectifs de la maintenance

### Les objectifs de coût

- Minimiser les dépenses de maintenance.
- Assurer la maintenance dans les limites d'un budget.
- Avoir des dépenses de maintenance portant sur le service exigé par l'installation en fonction de leur âge et de leur taux d'utilisation.
- Tolérer à la discrétion du responsable de la maintenance une certaine quantité de dépense imprévue

### Les objectifs opérationnels

- Maintenir le bien durable:
- Dans un état acceptable
- Dans des meilleures conditions
- Assure la disponibilité maximale à un coût raisonnable.
- Eliminer les pannes à tout moment et au meilleur coût.
- Maximiser la durée de vie de bien.
- Remplacer le bien à des périodes prédéterminées.
- Assurer au bien des performances de haute qualité.
- Assurer au bien un fonctionnement sûr et efficace.
- Obtenir de l'investissement un rendement maximum.
- Garder au bien une présentation suffisamment satisfaisante.
- Maintenir le bien dans un état de propreté absolue.

## 4) Les niveaux de la maintenance

### 1<sup>er</sup> niveau :

Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité, tels que voyants ou certains fusibles, etc....

Ce type d'intervention peut être effectué par l'exploitant du bien, sur place, sans outillage et à l'aide des instructions d'utilisation. Le stock des pièces consommables nécessaires est très faible.

### 2<sup>ième</sup> 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.

Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien habilité de qualification moyenne, sur place, avec l'outillage portable défini par les instructions de maintenance, et à l'aide de ces mêmes instructions.

On peut se procurer les pièces de rechange transportables nécessaires sans délai et à proximité immédiate du lieu d'exploitation.

# CHAPITRE 1 : LA FONCTION MAINTENANCE

## 3<sup>ième</sup> 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.

Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien spécialisé, sur place ou dans le local de maintenance, à l'aide de l'outillage prévu dans les instructions de maintenance ainsi que des appareils de mesure et de réglage, et éventuellement des bancs d'essais et de contrôle des équipements et en utilisant l'ensemble de la documentation nécessaire à la maintenance du bien ainsi que les pièces approvisionnées par le magasin.

## 4<sup>ième</sup> niveau :

Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance, et éventuellement la vérification des étalons du travail par les organismes spécialisés.

Ce type d'intervention peut être effectué par une équipe comprenant un encadrement technique très spécialisé, dans un atelier spécialisé.

## 5<sup>ième</sup> niveau :

Rénovation, reconstruction ou exécution des réparations importantes confiées à un atelier central ou à une unité extérieure.

Par définition, ce type de travaux est donc effectué par le constructeur, ou par le reconstruteur, avec des moyens définis par le constructeur et donc proches de la fabrication. [4]

**Tableau N1. Les niveaux de maintenance [6]**

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réglages simples</li> <li>- Sur place</li> <li>- Personne non qualifiée peut réaliser l'opération</li> </ul> <p><i>Exemple :</i> changement d'un consommable</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Actions peu complexes</li> <li>- Sur place</li> <li>- Nécessite un technicien habilité pour réaliser l'opération</li> </ul> <p><i>Exemple :</i> changement d'un relais</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Actions complexes</li> <li>- Sur place ou en atelier</li> <li>- Nécessite un technicien spécialisé</li> </ul> <p><i>Exemple :</i> changement d'une pompe</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Actions de grande importance</li> <li>- En atelier spécialisé</li> <li>- Nécessite une équipe avec un responsable spécialisé</li> </ul> <p><i>Exemple :</i> réparation spéciale</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Actions complexes</li> <li>- Chez le constructeur</li> <li>- Nécessite l'équipe de construction</li> </ul> <p><i>Exemple :</i> reconstruction d'un appareil</p>

## 5) Les 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 choisir, il faut donc connaître :

- Les objectifs de la direction.
- Les directions politiques de maintenance.
- Le fonctionnement et les caractéristiques du matériel. - Le comportement du matériel en exploitation.
- Les conditions d'application de chaque méthode. - Les coûts de maintenance.
- Les coûts de perte de production.

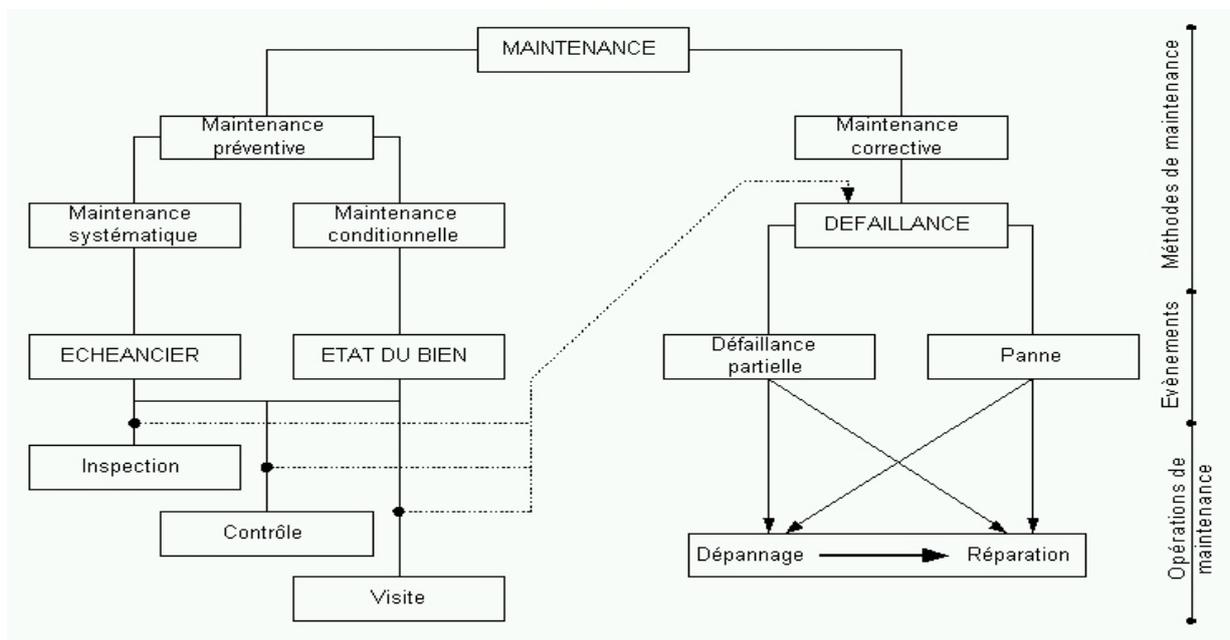


Figure 2. Les méthodes de maintenance.[5]

## 6) La notion de la défaillance

Définition de la défaillance selon la norme NF X 60 – 011 : « altération ou cessation d'un bien à accomplir sa fonction requise ». Synonymes usuels non normalisés : « failure » (anglais), dysfonctionnement, dommages, dégâts, anomalies, avaries, incidents, défauts, pannes, détériorations.

Une défaillance peut être :

- Partielle : s'il y a altération d'aptitude du bien à accomplir sa fonction requise.
- Complète : s'il y a cessation d'aptitude du bien à accomplir sa fonction requise.
- Intermittente : si le bien retrouve son aptitude au bout d'un temps limité sans avoir subi d'action corrective externe. [4]

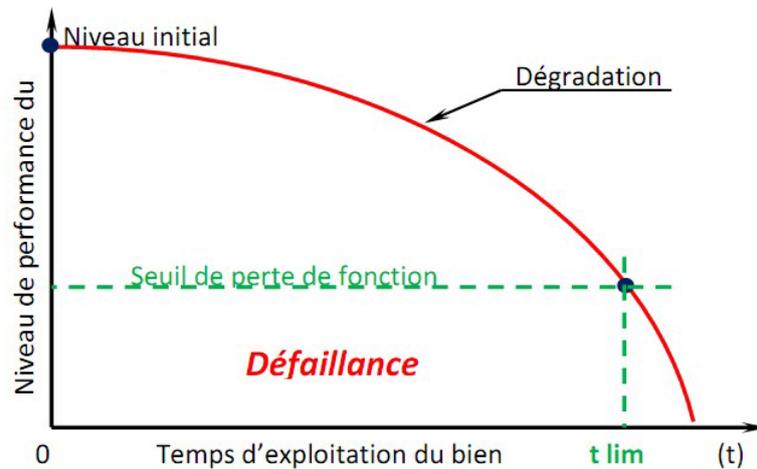


Figure 3. Dégradation du bien et durée de vie [4]

**NB :**  $t_{lim}$  indique le moment d'apparition de la défaillance.

## 6 /1) Fonction requise

Fonction d'un produit dont l'accomplissement est nécessaire pour la fourniture d'un service donné. Une fonction requise pourra être une fonction seule ou un ensemble de fonctions. La notion du service pourra recouvrir une mission, c'est à dire une succession de phases par lesquelles doit passer le produit sur un intervalle du temps donné.

## 6 /2) Dégradation

État d'une entité présentant une perte de performances d'une des fonctions assurées par celle-ci ou alors un sous-ensemble lui-même dégradé, voire défaillant, sans conséquence fonctionnelle sur l'ensemble. On peut aussi parler de dérive.

## 6 /3) Triptyque « faute-défaut-défaillance »

La défaillance est la conséquence d'un défaut, dont la cause est une faute. [4]



Figure 4. Triptyque « faute - défaut – défaillance » [4]

**Faute :** elle peut être physique (interne ou externe) ou due à l'utilisateur.

C'est la notion de 5M : Matières, Matériel, Milieu, Moyens et Main d'œuvre. Elle entraîne une erreur.

**Défaut :** au départ, il est latent, car on ne s'en aperçoit pas tout de suite. Il devient ensuite effectif. Le défaut peut être :

-*Soudain* : s'il était imprévisible.

-*Catalectique* : s'il est soudain et irréversible.

-*Progressif*: s'il était prévisible et éventuellement réversible (exemples : organe qui rouille, fuite sur une soupape).

-*Précoce*:s'il se manifeste en début de vie de l'équipement.

- *D'usure*:s'il se manifeste en fin de vie de l'équipement.

**Panne** : État d'un produit le rendant inapte à accomplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation : c'est un état. Elle résulte toujours d'une défaillance.

## **7) Gestion de maintenance**

Gérer c'est administré, dirigé, gouverné, exercer des fonctions de direction est de contrôle pour son propre compte ou pour le compte d'un autre. [7]

La gestion de la maintenance dans une installation industrielle c'est :

- ✓ Lui définir des objectifs chiffrés est mesurable.
- ✓ Définir les moyens à mettre en œuvre pour atteindre ses objectifs.

Le gestionnaire de maintenance est responsable de la mise en classe d'un système de gestion adapté à son entreprise, il doit tenir compte :

- Des spécifié de l'entreprise.
- De sa taille.
- De l'importance de la maintenance.
- Du degrés d'information.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les généralités de la maintenance industrielle , ses types , son importance dans les installations industrielles et ses différentes opérations.

L'importance de la maintenance industrielle réside dans son rôle de maintien du fonctionnement des systèmes et les mécanismes le plus longtemps possible avec le meilleur rendement et réduisant les nombres d'heures d'arrêt , les pannes donc en réduisant les coûts.

Grâce aux opérations de maintenance, nous pouvons créer une base de données à travers les défauts précédents et développer de meilleurs systèmes industriels plus moins de défauts.

**CHAPITRE 2**  
**LA MAINTENANCE**  
**BASEE SUR LA**  
**FIABILITE(MBF)**

### ❖ Introduction

Dans le monde industriel actuel, les équipements sujets à des pannes et/ou détériorations sont nombreux. Souvent critiques, ces équipements doivent être maintenus afin de continuer à remplir les missions pour lesquelles ils ont été conçus. La maintenance joue ainsi un rôle primordial permettant de garantir la disponibilité pour la production. Toutefois, cette fonction a souvent été négligée car trop fréquemment perçue comme une source de dépenses. Mais cet état d'esprit tend à changer avec l'évolution des équipements et des techniques de production. Qui plus est, les machines sont de plus en plus complexes et les industriels cherchent à les exploiter à leur plein régime dans un souci de compétitivité et de respect des délais tout en cherchant à garantir les exigences de qualité et de sécurité requises. Ces objectifs peuvent difficilement être atteints sans une maintenance adéquate. Dans ce chapitre, nous découvrirons les méthodes les plus utilisées dans le domaine industriel pour maintenir le processus et la santé des équipements.

### **La méthode MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité) [9]**

#### **1) Définition :**

La maintenance basée sur la fiabilité (MBF) est née dans le secteur aéronautique à la fin des années 1970 avec les avions gros porteurs. Normalisée sous le nom de RCM (Reliability centered maintenance), elle est aujourd'hui utilisée par tous les compagnies aérien et dans les secteurs industriels qui basent leur recherches sur les enquêtes compétitives.

Le principe de cette politique de maintenance, structurée et rationnelle, est d'identifier les matériels dont les modes de défaillances ont des conséquences significatives pour les objectifs de l'entreprise (productivité, sécurité, qualité, coûts...) et de ne retenir que des tâches efficaces et applicables de maintenance préventive.

Au préalable, les outils de sûreté de fonctionnement, les méthodes et technologies de maintenance conditionnelle et prévisionnelle font l'objet de développements détaillés pour faciliter la compréhension et la réalisation d'une étude MBF.

La maintenance basée sur la fiabilité est un ouvrage de référence et de travail pour tous ceux qui désirent mettre en œuvre ou se familiariser avec cette politique de maintenance qui a fait largement ses preuves dans les entreprises industrielles et commerciales.[8]

#### **2) Objectifs de la maintenance basée sur la fiabilité (MBF)**

L'améliorer de la disponibilité passe par :

- ✓ Une réduction des défaillances par la mise en place d'une maintenance préventive efficace.
- ✓ Une réduction des durées de pertes de production par une répartition des tâches entre la production et la maintenance.

D'autres objectifs sont aussi recherchés :

1. Maîtrise des coûts par l'optimisation des plans de maintenance par des interventions « au bon endroit au bon moment », donc par l'élimination d'opérations de maintenance préventives constatées improductives.
2. Mise en œuvre d'une démarche structurée d'analyse des modes de défaillance.
3. Mise en œuvre d'une démarche participative par la création de groupes de travail MBF

incluant des acteurs de la production et de la maintenance

### 3) Les principes de la MBF

1) **Principe d'auto limitation:** ou de sélection systématique.

Il s'applique aux criticités des équipements et à des niveaux successifs:

Equipements critiques → Sous-ensembles fragiles → Leurs défaillances → Les causes → Les tâches de maintenance.

2) **Principe de subordination :** les tâches de maintenance dépendent obligatoirement de la connaissance fiabiliste des défaillances et de leurs causes ; ce qui implique une connaissance fonctionnelle et des fonctionnelle des équipements.

3) **Principe de participation :** la MBF repose sur des groupes de travail impliquant tous les acteurs liés au processus (production, maintenance, qualité).

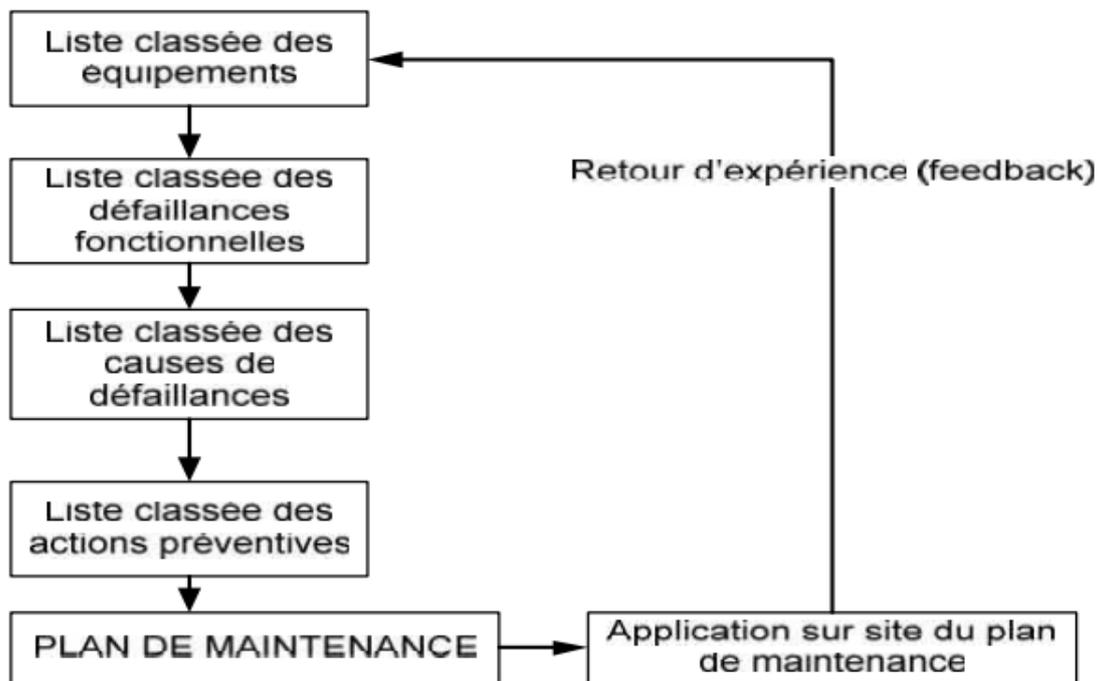


Figure 5. Principe de la MBF. [9]

### 4. Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC)

#### Définition

L'AMDEC, analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité, est un outil d'analyse performant qui permet de recenser de manière exhaustive les risques de dérive d'un processus, d'un produit ou d'un moyen de production. Elle s'inscrit dans la logique de maîtrise des risques ; sa finalité est de mettre en place des plans d'actions préventives visant à éliminer ou réduire les risques liés à la sécurité de l'utilisateur, au non qualité, à la perte de productivité, à l'insatisfaction des clients... [10]

En d'autres termes, c'est une méthode systématique, participative et préventive permettant d'analyser un système en analysant les causes et les effets des défaillances qui peuvent affecter les composants de ce système.

### 4.2. Les définitions liées à l' AMDEC

Pour comprendre cette méthode, il est important de bien connaître les termes qui lui sont associés.

- **Le mode de défaillance** : c'est la manière dont le système peut s'arrêter de fonctionner, s'écarter des spécifications prévues initialement, fonctionner anormalement, etc. Il s'exprime en terme physique.

**Exemple** : fuite, court-circuit, déformation, etc.

La recherche de défaillance consiste à se poser les questions suivantes

- Qu'est-ce qui ne fonctionne pas ?
- Qu'est-ce qui s'est arrêté de fonctionner ?
- Est que quelque chose s'est dégradé dans le fonctionnement du système ?
- Le fonctionnement est-il intempestif ?
- **La cause de la défaillance** : C'est l'anomalie pouvant conduire à la défaillance.
- **L'effet de la défaillance** : Ce sont les conséquences causés par l'utilisateur.
- **La criticité** : C'est un moyen de déterminer l'acceptabilité de la situation par la combinaison de plusieurs facteurs. En fonction de son activité ou du chef de projet, la méthode de cotation peut différer. [11]

### 4.3. Types d'AMDEC

Il existe cinq principaux types d'AMDEC :

- **L'AMDEC fonctionnelle**, permet, à partir de l'analyse fonctionnelle (conception), de déterminer les modes de défaillances ou causes amenant à un événement redouté.
- **L'AMDEC produit**, permet de vérifier la viabilité d'un produit développé par rapport aux exigences du client ou de l'application.
- **L'AMDEC processus**, permet d'identifier les risques potentiels liés à un procédé de Fabrication conduisant à des produits non conformes ou des pertes de cadence.
- **L'AMDEC moyen de production**, permet d'anticiper les risques liés au non-fonctionnement ou de fonctionnement anormal d'un équipement, d'une machine.
- **L'AMDEC flux**, permet d'anticiper les risques liés aux ruptures de flux matière ou d'informations, les délais de réaction ou de correction, les coûts inhérents au retour à l'anormale.

Chacun de ces types d'AMDEC donne en sortie un document de travail incontournable pour la suite du développement, par exemple :

- Pour l'AMDEC produit, un plan de fiabilisation ;
- Pour l'AMDEC processus, un plan de surveillance, contrôle qualité ;
- Pour l'AMDEC moyen, une gamme de maintenance préventive ;
- Pour l'AMDEC flux, le plan de sécurisation ainsi que les stocks et délais de sécurité.

### 4.4. Les étapes de l'AMDEC

Cette méthode s'inscrit dans une démarche en huit étapes selon le procès ci-dessous.

#### Etape 1 : Construire le groupe de travail

Cette première étape consiste à construire LE groupe de travail. Chaque membre du groupe doit être sensibilisé d'un minimum au préalable à la méthode AMDEC et doit venir d'horizons différents afin de mettre en commun les compétences de chacun et d'être dans une démarche constructive.

#### Etape 2 : Définir le périmètre de l'étude

En amont, il est nécessaire de connaître et de comprendre le produit, procédé ou processus traité pour définir le périmètre de l'étude et pouvoir l'analyser. On peut obtenir ces informations à l'aide d'une analyse fonctionnelle, dont les questions clés sont les suivantes :

- Quelle est la fonction d'usage ?
- Quelles sont les fonctionnalités attendues ?
- Quelles sont les contraintes ?
- Quelles sont les fonctions techniques ?

On peut utiliser les différents outils de l'analyse fonctionnelle : présentation du besoin, expression fonctionnelle, hiérarchisation des fonctions, cahier des charges fonctionnel, etc...

Lors de cette phase, les objectifs et les limites de l'étude sont définis.

Cette étape est indispensable pour démarrer une AMDEC. En ayant peu de connaissances de son sujet, on risque de s'éloigner de la cible et les résultats peuvent être erronés.

#### Etape 3 : Identifier les modes de défaillances

Une fois ce périmètre établi, on peut identifier les modes de défaillances potentielles en se posant la question « Qu'est-ce qui pourrait aller mal ? ». A partir de là, on peut commencer à remplir la grille d'analyse.

Le but de cette étape est de rechercher les défaillances premières et non les causes racines.

#### Etape 4 : Identifier les effets et les causes

Pour chaque mode de défaillance, identifiez les effets associés par la question « Quels sont les effets et les causes entraînés par ce mode de défaillance ? » ne pa se limite, on peut avoir une ou plusieurs causes et effets par mode de défaillance.

#### Etape 5 : Evaluer les défaillances

Cette étape quantitative permet d'attribuer à chaque défaillance potentielle un indice de criticité. La criticité est la résultante de la combinaison de trois facteurs :

- La gravité de la défaillance et de l'effet (G) : conséquence plus ou moins grave pour l'utilisateur.
- La fréquence d'apparition de la défaillance, l'occurrence (O).
- La probabilité de non-détection (D) : la défaillance se produit et il y a risque de ne pas la détecter.

On doit définir une échelle pour chaque facteur. On retrouve couramment une échelle allant de 1 à 4 ou de 1 à 10. 1 étant une gravité/occurrence/probabilité faible - 10 étant une gravité/occurrence/probabilité forte.

## CHAPITRE 2 : LA MAINTENANCE BASEE SUR LA FIABILITE(MBF)

Pour évaluer les défaillances, il est important de bien définir l'échelle et d'y inscrire des critères en face de chaque point.

A titre d'exemple, sur une échelle allant de 1 à 4, on peut définir une fréquence d'apparition sur les critères suivants :

- 1 : Annuelle ou plus
- 2 : Trimestrielle
- 3. Mensuelle
- 4. Hebdomadaire à quotidienne

Plus on sera précis dans les critères, plus il sera facile d'appliquer une notation en se rapprochant de la réalité.

### Etape 6 : Hiérarchiser les défaillances

Après avoir fait ce calcul, on peut classer les défaillances par ordre de priorité en définissant des seuils d'alerte afin d'organiser le traitement des données par ordre d'importance.

Voici un exemple de différents seuils d'alerte sur la base d'une notation allant de 1 à 4 :

- 37 - 64 : criticité majeure
- 28 – 36 : criticité importante
- 10 – 27 : criticité mineure
- 1 – 9 : criticité faible

Ce résultat permet ainsi de traiter en priorité les défaillances ayant une criticité majeure, puis importante, et ainsi de suite.

### Etape 7 : Rechercher des solutions

Après avoir classé les différents modes de défaillance, deux solutions s'offrent :

- Supprimer la défaillance.
- Réduire la défaillance.

Dans le deuxième cas, on peut rechercher des solutions par actions correctives et/ou préventives dans le but d'obtenir une criticité plus faible de l'occurrence/la probabilité de non-détection/la gravité. Pour chaque action, un responsable doit être désigné.

### Etape 8 : Suivre les actions

L'objectif est de vérifier l'efficacité des solutions qui ont été entreprises et de réévaluer la criticité, afin de s'assurer que celle-ci a bien été réduite. Ce suivi est important, car il permet de déterminer l'efficacité et l'impact des actions qui ont été entreprises.[11]

**Tableau 2. La forme de tableau AMDEC.[12]**

Fonction du produit	Mode de défaillance	Effet de la défaillance	Causes possibles de la défaillance	Evaluation				Actions préventives		Résultats				
				Détection	Occurrence	Gravité	Criticité	Recommandées	Mises en places	Détection	Occurrence	Gravité	Nouvelle criticité	

### 4.5. Objectifs de l'A.M.D.E.C

L'AMDEC est une technique d'analyse prévisionnelle qui permet d'estimer les risques d'apparition de défaillance ainsi que les conséquences sur le bon fonctionnement du moyen de production, et d'engager les actions correctives nécessaires.

- ✓ L'objectif principal est l'obtention d'une disponibilité maximale.

Les objectifs intermédiaires sont les suivants :

- ✓ Analyser les conséquences des défaillances.
- ✓ Identifier les modes de défaillances.
- ✓ Préciser pour chaque mode de défaillance les moyens et les procédures de détection.
- ✓ Déterminer l'importance ou la criticité de chaque mode de défaillance.
- ✓ Classer les modes de défaillance.
- ✓ Établir des échelles de signification et de probabilité de défaillance.[13]

### 5. Limites de l'AMDEC

Si l'AMDEC est un outil très intéressant pour la sûreté de fonctionnement, elle ne permet pas cependant d'avoir une vision croisée des pannes possibles et de leurs conséquences : deux pannes surviennent en même temps sur deux sous-systèmes, quelle est la conséquence sur le système tout entier ? Dans ce cas, des études Complémentaires sont nécessaires, par arbres de défaillances ou blocs diagrammes de fiabilité notamment.

Par exemple, dans l'aéronautique, les accidents d'avions sont très rarement liés à une seule défaillance; ils résultent généralement de plusieurs défaillances techniques ou organisationnelles qui se manifestent simultanément.

L'AMDEC ne permet pas de tenir compte des phénomènes dynamiques. La qualité d'une AMDEC est liée à l'exhaustivité des modes de défaillance identifiés. Celle-ci est fortement dépendante de l'expérience des auteurs de l'étude.

De plus, l'outil AMDEC ne doit pas devenir une fin en soi. Les actions préconisées doivent être mises en œuvre et un suivi de leur efficacité doit être assuré.[13]

### Conclusion.

En examinant ce chapitre, nous avons pu identifier la maintenance basée sur la fiabilité et ses objectifs et les étapes les plus importantes pour analyser l'état de l'équipement pour atteindre l'entretien approprié afin d'assurer le fonctionnement de l'équipement et sa disponibilité dans l'entreprise.

**CHAPITRE 3**  
**ETUDE DE LA**  
**FIABILITE**

## ❖ Introduction

De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation), et maîtriser les sources de défaillance.

L'analyse de la fiabilité dans le domaine de l'industrie est un outil très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie, mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission.

Dans ce chapitre, nous apprendrons la signification de la fiabilité dans le domaine industriel et les lois les plus importantes et comment les appliquer.

## 1. Sureté de fonctionnement

### 1.1. Principaux concepts

La sureté de fonctionnement est apparue comme une nécessité au cours du XX<sup>ème</sup>, notamment avec la révolution industrielle. Le terme dependability est apparu dans une publicité sur des moteurs Dodge Brothers dans les années 1930. L'objectif de la sureté de fonctionnement est d'atteindre le Graal de la conception de système : zéro accident, zéro arrêt, zéro défaut (et même zéro maintenance). Pour pouvoir y arriver, il faudrait tester toutes les utilisations possibles d'un produit pendant une grande période ce qui est impensable dans le contexte industriel voire même impossible à réaliser tout court. La sureté de fonctionnement est un domaine d'activité qui propose des moyens pour augmenter la fiabilité et la sureté des systèmes dans des délais et avec des couts raisonnables.[21]



Figure 6. Sureté de fonctionnement

### 2. Fiabilité

#### 2.1. Définition

Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné (NF EN 13306) ou « caractéristique d'un bien exprimée par la probabilité qu'il accomplisse une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné » (NF X 60-500).

#### 2.3. Conséquences d'une mauvaise fiabilité

D'une manière générale une fiabilité insuffisante peut avoir des conséquences :

- ✓ sur les coûts :
- ✓ le coût de la pièce hors d'usage,
- ✓ le coût des dégradations secondaires : un exemple limite peut être le coût occasionné par la destruction d'une fusée par une simple panne d'un transistor ou par la défaillance d'un joint d'étanchéité (comme c'était le cas en 1987 de la navette spatiale américaine Challenger).
- ✓ Les frais occasionnés par la nécessité d'avoir un stock de pièces détachées.  
**important** : coût de stockage, coût des dégradations des pièces en stock.
- ✓ sur la sécurité du personnel et des utilisateurs.[14]

#### 2.4. Quelques termes utilisés en fiabilité

- **Fiabilité estimée** : c'est la fiabilité d'un produit déterminé au cours d'une séquence d'essai précise.
- **Fiabilité prédite** : c'est la fiabilité déterminée partir d'un modèle mathématique reposant lui-même sur des données réelles ou estimées.
- **Fiabilité opérationnelle** : c'est la fiabilité d'un produit en période d'utilisation normale.
- **Fiabilité intrinsèque** : elle est fonction de la fiabilité des éléments, du projet ou de la conception, et enfin de la réalisation technique du système.
- **Probabilité de survie** : c'est la probabilité de ne pas avoir de défaillance jusqu' un temps fixé.
- **Défaillance soudaine** : défaillance d'un équipement qui n'était pas prévisible par examen de l'équipement.
- **Défaillance progressive** : défaillance d'un équipement qui était prévisible.
- **Défaillance partielle** : c'est une défaillance d'une ou plusieurs parties d'un système n'entraînant pas l'arrêt du système.
- **Défaillance complète** : défaillance d'une ou plusieurs parties d'un système entraînant l'arrêt du système.
- **Défaillance catalectique** : c'est une défaillance soudaine et complète.
- **Défaillance par dégradation** : c'est une défaillance progressive et partielle.
- **Sûreté** : un système est sûr s'il est apte satisfaire une mission donnée dans un contexte donné.
- **Sécurité** : un système est en sécurité s'il est dans un état dans lequel il ne peut pas porter atteindre l'homme, aux biens ou l'environnement.
- **Composant** : il est composé d'un élément géométrique (composant physique) et de son comportement mécanique ou autre.

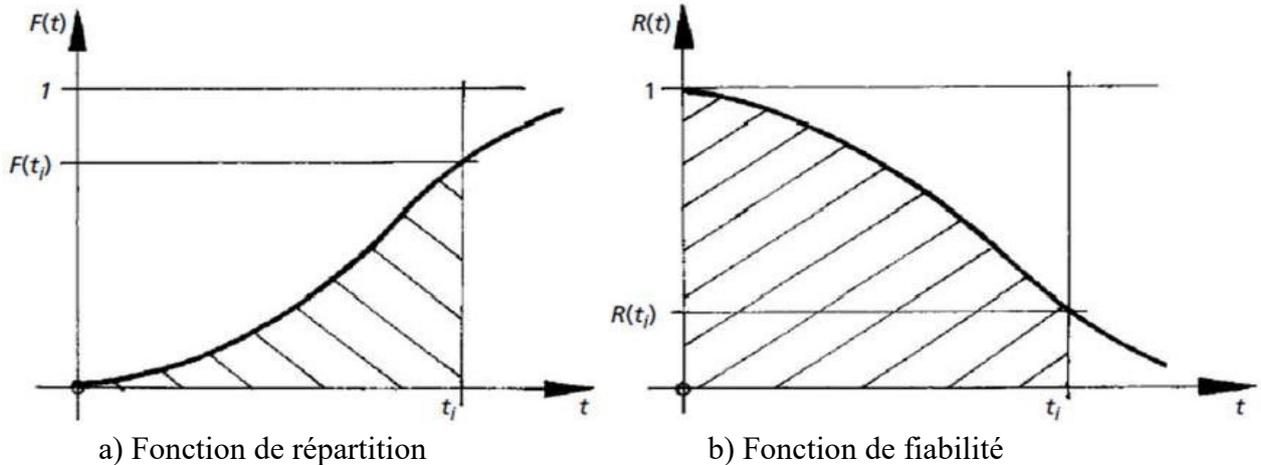
- **Système** : c'est un ensemble d'éléments reliés entre eux d'une manière bien déterminée. Il a pour objectif d'assurer une fonction très précise. [14]

**2.5. Application de la fiabilité**

Un dispositif mis en marche pour la première fois à (t<sub>0</sub>) tombera en panne à un instant non connu à priori "t" : date de la panne est une variable aléatoire de la fonction de répartition "F(t)". Voir figure suivante.

- ✓ F(t) est la probabilité d'une défaillance avant l'instant (t<sub>i</sub>).  $F(t) = Pr(t < t_i)$ .
- ✓ R(t) est la probabilité de bon fonctionnement à (t<sub>i</sub>).  $R(t) = Pr(t > t_i)$
- ✓ Probabilités complémentaires :

$$F(t) + R(t) = 1 \text{ ou } \int_0^t f(t).dt + \int_t^{+\infty} f(t).dt = 1 \dots\dots\dots (III-01)$$



**Figure 7. Probabilités complémentaires [17]**

**3. Différentes lois de la fiabilité**

Pour évaluer la fiabilité, il est donc nécessaire de recourir à certains outils mathématiques de calcul de probabilité. L'objet n'est pas ici de présenter de façon détaillée les différentes lois, retenons simplement que l'utilisation de quelques-unes peut être nécessaire pour la détermination de la fiabilité.

**3.1. Loi Binomiale**

Elle permet d'évaluer le nombre d'éléments défaillants d'un échantillon prélevé dans une population dont on connaît la probabilité de défaillance.

$$P(x = k) = C_n^k \times P^k \times (1 - P)^{(n-k)} \text{ avec } C_n^k = \frac{n!}{(n-k)! \times k!} \dots\dots\dots (III-02)$$

Avec les paramètres de signification :

- ✓ (n ≥ 0) : Nombre d'épreuves
- ✓ (0 ≤ p ≤ 1) : probabilité de succès

**3.2. Loi de Poisson**

Elle permet, lorsque l'on connaît le taux de défaillance d'un système sur une longue période, de calculer la probabilité d'une panne sur une période plus courte. Le cas du temps d'une production par exemple.

$$P(x = k) = \frac{e^{-m} . m^k}{k!} \dots\dots\dots (III-03)$$

L'espérance mathématique :  $E(x) = m = \lambda \cdot t \dots \dots \dots$  (III-04)

### 2.3.3. Loi normale

La loi normale est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes. En fiabilité, la distribution normale est utilisée pour présenter la distribution des durées de vies des dispositifs en fin de vie (usure) car le taux de défaillance est toujours croissant. On l'utilisera que si la moyenne des durées de vie est supérieure à trois fois l'écart type.

la loi normale décrit bien le comportement de systèmes complexes dont les probabilités de défaillance s'additionnent ; c'est une conséquence du théorème central limite. Le taux de défaillance  $\lambda$  est croissant, ce qui correspond à un système avec usure.

Si l'on appelle  $\Phi$  la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite, alors la fonction de fiabilité est de la forme :

$$R(t) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \dots \dots \dots$$
 (III-05)

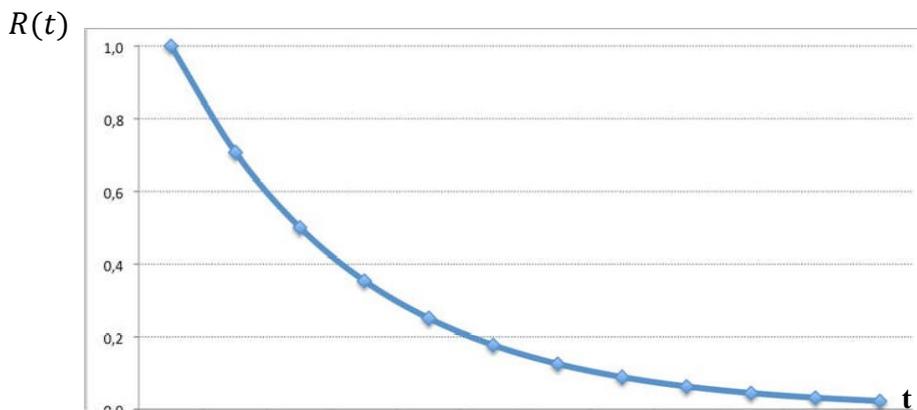
### 2.3.4. Loi exponentielle

Elle est particulièrement bien adaptée lorsque le taux de défaillance est constant. De ce fait, on l'emploie dans le cas de matériels électrique ou électroniques et pour les systèmes mécaniques lors de leur période maturité.

L'espérance mathématique est  $E(t) = 1/\lambda$ , et son expression est

$$R(t) = e^{-\lambda t} \dots \dots \dots$$
 (III-06)

représente l'allure de la fiabilité en fonction du temps. Voir figure suivante :



**Figure 8.** Tracé de la loi exponentielle

Sur papier semi-logarithmique  $R(t)$  devient  $\log R(t)$  et le nuage de points correspondant au TBF ajustable par une droite prouve que le taux de défaillance est constant.

A cette fonction  $R(t)$  est associée une fonction

$$F(t) = 1 - R(t) \dots \dots \dots$$
 (III-07)

Dite fonction de réparation. Elle représente en quelque sorte la probabilité, en fonction du temps, de connaître une défaillance. [15]

La densité de probabilité  $f(t)$  peut se définir comme la réparation probable des défaillances, appelée aussi distribution des défaillances :

$$f(t) = \lambda(t) \times R(t) = \lambda e^{-\lambda t} \dots\dots (III-08)$$

Le taux de défaillance est quant à lui :

$$\lambda(t) = f(t)/R(t) \dots\dots (III-09)$$

### 2.3.5. Loi de Weibull

Contrairement à la loi exponentielle, la loi de Weibull convient quel que soit la valeur du taux de défaillance. Grâce à sa souplesse elle s'adapte à toutes les valeurs de  $\lambda(t)$  mais elle permet en plus de déterminer dans quelle période de sa vie (jeunesse, maturité, obsolescence) se trouve le système étudié [16].

Outre son adaptabilité à toutes les situations, le modèle de Weibull livre d'autres informations en plus de niveau de fiabilité d'un dispositif à un instant t.

Les trois paramètres  $\beta$ ,  $\eta$  et  $\gamma$  de son expression :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots (III-10)$$

Permettent une analyse plus fine et donc une image plus précise de l'état du système. Le paramètre  $\beta$  fournit des indications à la fois qualitatives et quantitatives du taux de défaillance instantané. Il est dit indicateur de la forme de la courbe de densité de probabilité, si sa valeur est  $< 1$ , alors  $\lambda(t)$  est décroissant, indiquant que le système est en période de jeunesse.

Maintenant, si  $\beta$  est égal ou très voisin de 1, c'est le signe d'un comportement régulier du système avec un taux de défaillance sensiblement constant. C'est donc la période de maturité qui est la plus longue dans le cycle de vie d'un matériel.

Enfin si la valeur du paramètre de forme  $\beta$  est supérieure à 1, alors le modèle de Weibull est encore plus instructif. Dans ce cas,  $\beta$  révèle d'abord une phase d'obsolescence et c'est l'expression quantitative qui retiendra davantage l'attention, car il est possible de lier la valeur au degré d'obsolescence de matériel.

## 3. Paramètres de la fiabilité MTBF, MTTR, MTTA

### 3.1. Moyenne des temps de bon fonctionnement « MTBF »

La **MTBF** est la moyenne des temps de bon fonctionnement. Un temps de bon fonctionnement est le temps compris entre deux défaillances. La moyenne de ces temps est un indicateur indispensable pour tout gestionnaire d'un parc matériel. Le taux de défaillance  $\lambda$  donne une image de la qualité du comportement des systèmes.

La **MTBF** global est la résultante des **MTBF** des composants du système. Les **MTBF** sont calculées à partir des renseignements des historiques des systèmes ou des documents d'activité des techniciens de maintenance.

### 3.2. Moyenne des temps techniques de réparation « MTTR »

La **MTTR** est la Moyenne des Temps Techniques de Réparation. Comme la **MTBF**, elle est calculée à partir de données portées sur les comptes rendus et sur les historiques.

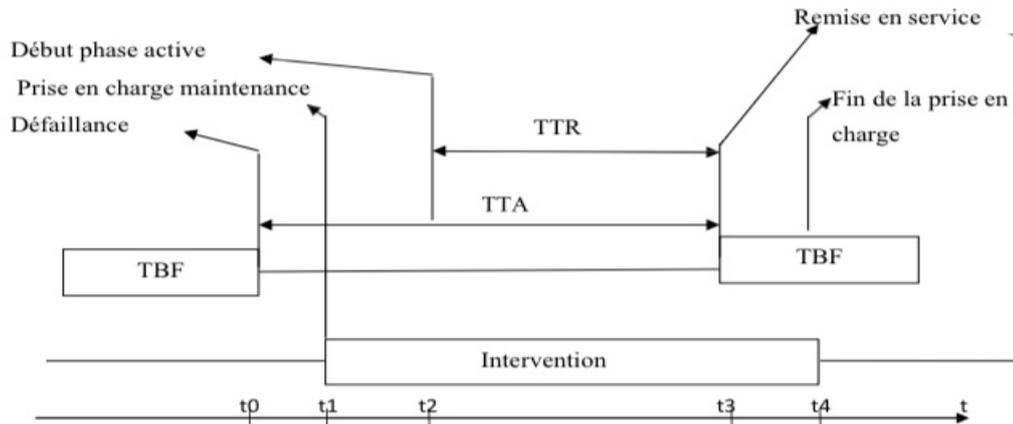
Le **TTR** est le temps durant lequel on intervient physiquement sur le système défaillance. Il débute lors de la prise en charge de ce système et se termine après les contrôles et essais, lorsque le système est remis en route.

### 3.3. Moyenne des temps techniques d'arrêt « MTTA » :

La **MTTA** est la Moyenne des Temps Techniques d'Arrêt. Les **TTA** sont une partie des temps d'arrêt qu'un système en exploitation peut connaître

## CHAPITRE 3 : ETUDE DE LA FIABILITE

Les **TTA** concernent principalement la maintenance corrective dans la mesure où les interventions sont effectuées hors production. Les **TTR** sont donc généralement inclus aux **TTA**. Néanmoins, dans certaines conditions, l'inverse est possible lorsque l'intervention peut débuter avant l'arrêt du système. Voir figure suivante :



**Figure 9.** Les phases d'une intervention corrective [17]

- $t_0 - t_1$  : temps de détection de la défaillance et d'appel.
- $t_1 - t_2$  : temps logistique, de préparation et de diagnostic.
- $t_2 - t_3$  : phase active.
- $t_3 - t_4$  : temps annexes (compte rendu, nettoyage, déplacement).

Afin d'optimiser la disponibilité des systèmes et réduisant l'écart entre **TTA** et **TTR**, il est indispensable de chercher à réduire les temps non actifs (de  $t_0$  à  $t_2$ ).

### 3.3. Taux de défaillance et de réparation

De la **MTBF** et la **MTTR** qui sont des indicateurs précieux pour un service maintenance puisqu'ils permettent d'évaluer la santé des matériels ainsi que l'activité de service, on déduit deux estimateurs indispensables de la fiabilité :

$$\lambda(t) \text{ et } \mu(t) \dots \dots \dots \text{(III-11)}$$

- $\lambda(t)$  représente le taux de défaillance
- $\mu(t)$  représente le taux de réparation.

#### 3.3.1. Taux de défaillance :

Pour un ensemble de systèmes, le taux de défaillance représente une proportion ramenée à l'unité de temps d'éléments qui, ayant survécu à un instant arbitraire, ne sont plus en vie à l'instant  $t + dt$ . Sa forme générale est le rapport : Nombre de défaillance / durée d'usage. Le taux moyen de défaillance s'obtient également par la relation :  $\lambda(t) = 1 / MTBF$  L'écriture mathématique du taux de défaillance à l'instant  $t$ , noté  $\lambda(t)$ , est la suivante [18] :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \right) \dots \dots \dots \text{(III-12)}$$

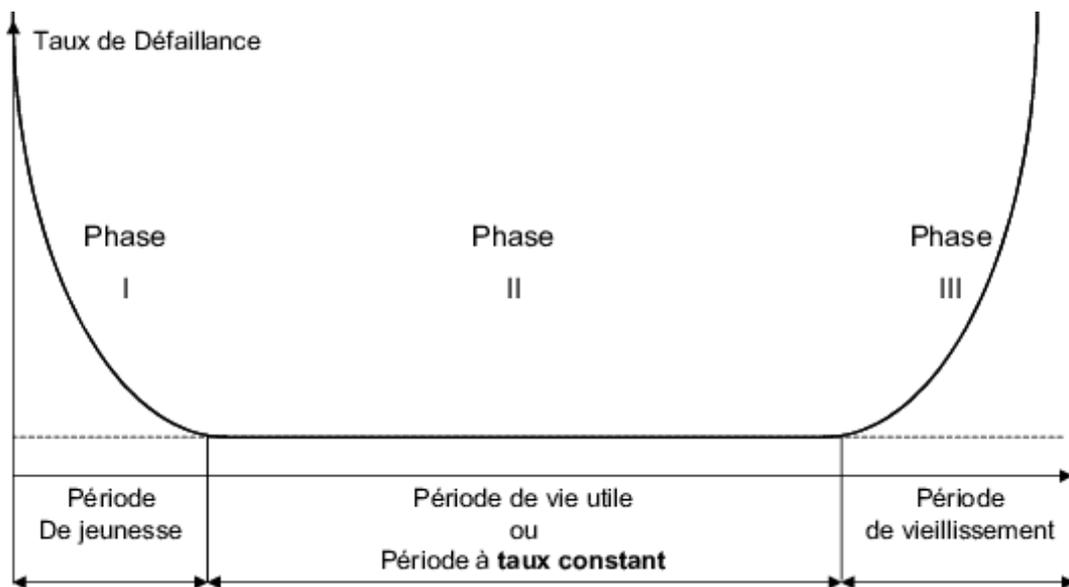
Le taux de défaillance d'un dispositif à l'instant  $t$  est donc défini par :

$$\lambda (t) = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \dots\dots (III-13)$$

**3.3.2. Evolution du taux de défaillance**

Au cours de vie d'un système, le comportement de celui-ci n'est pas et ne peut pas être constant. Après une période dite de jeunesse, le système connaît une période de maturité qui, elle-même, précède une période de vieillesse.

Le taux de défaillance peut être assimilé à un indicateur représentatif du rythme auquel surviennent les défaillances. Lors des trois phases de la vie d'un système, ce taux n'est pas constant. Si nous représentons le taux de défaillance en fonction du temps, nous obtenons une courbe appelée « baignoire » qui est divisée en trois parties : la première est appelée période de mortalité infantile où le taux de panne est en décroissance ce qui correspond aussi au rodage la deuxième partie n'est autre que la durée de vie utile : c'est la zone où le taux de panne est constant, la dernière partie est appelée période de vieillissement où d'usure : en atteignant cet âge, le composant commence à vieillir et le taux de défaillance augmente en fonction du temps.[19]



**Figure 10.** Courbe en baignoire. [19]

**3.3 .3. Taux de réparation**

Il est noté  $\mu(t)$  (mu) et s'obtient par la relation :

$$\mu(t) = 1 / MTTR. \dots\dots (III-14)$$

Dans le cas où  $\mu(t)$  est constant, la fonction de maintenabilité est

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \dots\dots (III-15)$$

Il est à la fois un indicateur de l'aptitude d'un bien à être dépanné et/ou réparé et de l'efficacité de la maintenance durant la phase active d'une intervention. Il introduit ainsi la notion de maintenabilité d'un système, dans la norme *AFNOR X 60 – 010*.

### 4. Qu'est-ce que la sureté de fonctionnement(Sdf)

La sureté de fonctionnement est souvent appelée la science des défaillances ; elle inclut leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise. Il s'agit d'un domaine transverse qui nécessite une connaissance globale du système comme les conditions d'utilisation, les risques extérieurs, les architectures fonctionnelle et matérielle, la structure et fatigue des matériaux. Beaucoup d'avancées sont le fruit du retour d'expérience et des rapports d'analyse d'accidents.

**Définition 1 (SdF) :** La sureté de fonctionnement (de pend a bility, Sdf) consiste à évaluer les risques potentiels, prévoir l'occurrence des défaillances et tenter de minimiser les conséquences des situations catastrophiques lorsqu'elles se présentent.

**Définition 2 (Laprie96) :** La sureté de fonctionnement d'un système informatique est la propriété qui permet de placer une confiance justifiée dans le service qu'il délivre.

Il existe de nombreuses d2finitions, de standards (qui peuvent varier selon les domaines d'application – nucléaire, spatial, avionique, automobile, rail . . .). On peut néanmoins considérer que le Technical Comite 56 Dependability de l'International Electrotechnique Commission (IEC) développe et maintient des standards internationaux reconnus dans le domaine de la sureté de fonctionnement. Ces standards fournissent les méthodes et outils d'analyse, dévaluation, de gestion des équipements, services et systèmes tout au long du cycle de développement. [21]

#### 4.1. MAINTENABILITE ET DISPONIBILITE

##### 4.1.1. La maintenabilité

##### 4.1.2. Définition

Dans des conditions données, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

***Maintenabilité = être rapidement dépanné***

C'est aussi la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

A partir de ces définitions, on distingue :

- **La maintenabilité intrinsèque :** elle est « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges prenant en compte les critères de maintenabilité (modularité, accessibilité, etc).
- **La maintenabilité prévisionnelle :** elle est également « construite », mais à partir de l'objectif de disponibilité.
- **La maintenabilité opérationnelle :** elle sera mesurée à partir des historiques d'interventions.

L'analyse de maintenabilité permettra d'estimer la MTTR ainsi que les lois probabilistes de maintenabilité (sur les mêmes modèles que la fiabilité). [20]

##### 4.1.3. Maintenabilité et maintenance

Pour un technicien de maintenance, la maintenabilité est la capacité d'un équipement à être rétabli lorsqu'un besoin de maintenance apparaît. L'idée de « facilité de maintenir » se matérialise par des mesures réalisées à partir des durées d'intervention.

Il est évident que la maintenabilité intrinsèque est le facteur primordial pour que la maintenance soit performante sur le terrain. En effet, une amélioration ultérieure de la maintenabilité initiale n'est jamais chose facile.

Il est donc indispensable que la maintenance sache définir ses besoins et les intégrer au cahier des charges d'un équipement nouveau afin que celui-ci puisse être facilement maintenable.

### 4.2.LA DISPONIBILITE

#### 4.2.1 Définition

Un matériel disponible est un matériel dont on peut se servir. La disponibilité dépend par conséquent à la fois de :

- Du nombre de défaillances : Fiabilité.
- De la rapidité avec laquelle elles sont réparées : Maintenabilité.
- Des procédures définies pour la maintenance : Maintenance.
- De la qualité des moyens mis en œuvre : Logistique.

#### 4.2.3. Maintenabilité et disponibilité

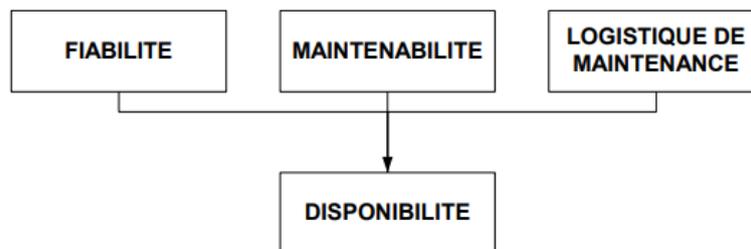


Figure 11. Maintenabilité et disponibilité. [20]

Le schéma ci-dessus rappelle les composantes de la disponibilité d'un équipement. Il met en évidence :

- Que la maintenabilité est un des leviers d'action pour améliorer la disponibilité et donc la productivité d'un équipement.
- Que la fiabilité et la maintenabilité sont 2 notions parallèles de même importance (et dont les démarches d'analyse sont semblables).

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mis le point sur les concepts de la sûreté de fonctionnement à savoir (la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité) dans le but d'identifier le degré de défaillance en se basant sur les calculs des concepts cités précédemment (voir chap. 5)

# **CHAPITRE 4**

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

## ❖ Introduction

Le développement des êtres humains est très étonnant, en particulier au cours des deux derniers siècles, et l'une des caractéristiques les plus importantes de ce développement est l'architecture moderne qui a révolutionné le domaine de la construction, alors que des gratte-ciel géants et des merveilles d'ingénierie architecturale sont apparus au monde, et pour que ces bâtiments soient construits, de grandes quantités de ciment doivent être fournies.

Afin de fournir de grandes quantités de ciment, l'équipement de l'usine doit être maintenu en bon état et entretenu, et le plus important de ces équipements est le four rotatif de ciment, qui fait l'objet de ce chapitre.

## 1. Fabrication de ciment

Le ciment est un liant hydraulique (qui durcit sous l'action de l'eau), utilisé dans la préparation du béton, et aujourd'hui le plus souvent employé dans la confection des dallages, des parpaings, des enduits et des mortiers. Les ciments sont actuellement classés sous la dénomination « CEM » suivi d'un chiffre romain allant de I à V suivi d'une lettre majuscule en fonction de leur teneur en clinker et d'autres composants (chaux, fumées de silice, pouzzolane, laitier de hauts fourneaux, etc.). Le terme « ciment Portland » est tombé en désuétude depuis la fin des années 1970, remplacé par les termes « CPA » (ciment Portland pur) et « CPJ » (ciment Portland composé), abandonnés à leur tour lors du passage à la norme européenne, mais qu'on trouve encore dans plusieurs pays. Le mortier de chaux existe depuis l'Antiquité mais le ciment et ses nombreuses applications est une invention du XIXe siècle.

Les matières premières nécessaires à la production de ciment sont le carbonate de calcium, la silice, l'alumine et le minerai de fer. Elles sont, pour l'essentiel, tirées de la roche calcaire, de la craie, de la marne, du schiste argileux et de l'argile. Ces matières premières sont concassées puis broyées et mélangées dans des proportions adéquates. Le mélange est ensuite introduit dans un four rotatif et chauffé à une température d'environ 1 500 °C pour obtenir du clinker. Broyé avec du gypse, celui-ci permet d'obtenir le ciment. Il est également possible de substituer à certaines matières premières - ou d'ajouter à la fin du processus de fabrication - d'autres composants : calcaire, laitier broyé (sous-produit de la fabrication de l'acier), cendres volantes (provenant de la combustion du charbon dans les centrales thermiques) ou pouzzolane (scories volcaniques). Cette technique permet notamment de réduire la facture énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub> et d'élargir la gamme de produits.[22]

En 2008, plus de deux milliards de tonnes de ciment étaient produites par an dans le monde, à 80 % produits et consommés dans les pays émergents, avec une croissance de plus de 5 % par an de 1991 à 2008.

## 1.2 Les principales étapes de la fabrication du ciment



Figure 12. les grandes étapes de la fabrication du ciment.[23]

- **Étape 1 : Extraction et broyage des matières premières**

Les matières premières qui entrent dans la fabrication du ciment (carbonate de calcium, silice, alumine et minerai de fer) sont généralement extraites de roche calcaire, de craie, de schiste ou d'argile. Ces matières premières sont prélevées des carrières par extraction ou dynamitage. Ces derniers sont ensuite broyés mécaniquement. À ce stade, d'autres minéraux sont ajoutés pour corriger la composition chimique du ciment. Ces minéraux sont des déchets ou des sous-produits d'autres industries, comme des cendres de papier. Le broyage permet de produire une fine poudre, appelée « cru de ciment », qui est ensuite préchauffée, puis placée dans un four où elle est soumise à d'autres procédés.

- **Étape 2 : Chauffage et broyage du cru de ciment**

Le four est au cœur du procédé de fabrication du ciment. Une fois dans le four, le cru de ciment est chauffé à environ 1 500 degrés Celsius (°C) - ce qui correspond à peu près à la température de la lave en fusion. À cette température, des réactions chimiques se produisent et entraînent la formation du clinker, substance qui contient des silicates de calcium hydrauliques. Pour chauffer des matières à une température aussi élevée, il faut produire une flamme de 2 000 °C à l'aide de carburants fossiles et de déchets. Le four est incliné de trois degrés par rapport à l'horizontale, ce qui permet à la matière de le traverser en 20 à 30 minutes. À sa sortie du four, le clinker est refroidi, puis entreposé, avant d'être broyé afin de produire le ciment.

- **Étape 3 : Broyage et expédition du ciment**

Une petite quantité de plâtre (de trois à cinq pour cent) est ajoutée au clinker pour réguler le durcissement du ciment. Ce mélange est ensuite moulu très finement pour obtenir du « ciment pur ». Pendant cette phase, d'autres minéraux, appelés « adjuvants », pourraient être ajoutés en plus du plâtre. Ces adjuvants d'origine naturelle ou industrielle sont dosés pour conférer au ciment des propriétés précises : perméabilité réduite, résistance accrue aux sulfates et aux environnements agressifs, maniabilité améliorée, meilleure qualité des finis, etc. Enfin, le ciment est entreposé dans des silos avant d'être expédié en vrac ou en sacs aux chantiers où il sera utilisé.[22]

# CHAPITRE 4 : PRESENTATION DU FOUR ROTATIF DE LA CIMENTERIE

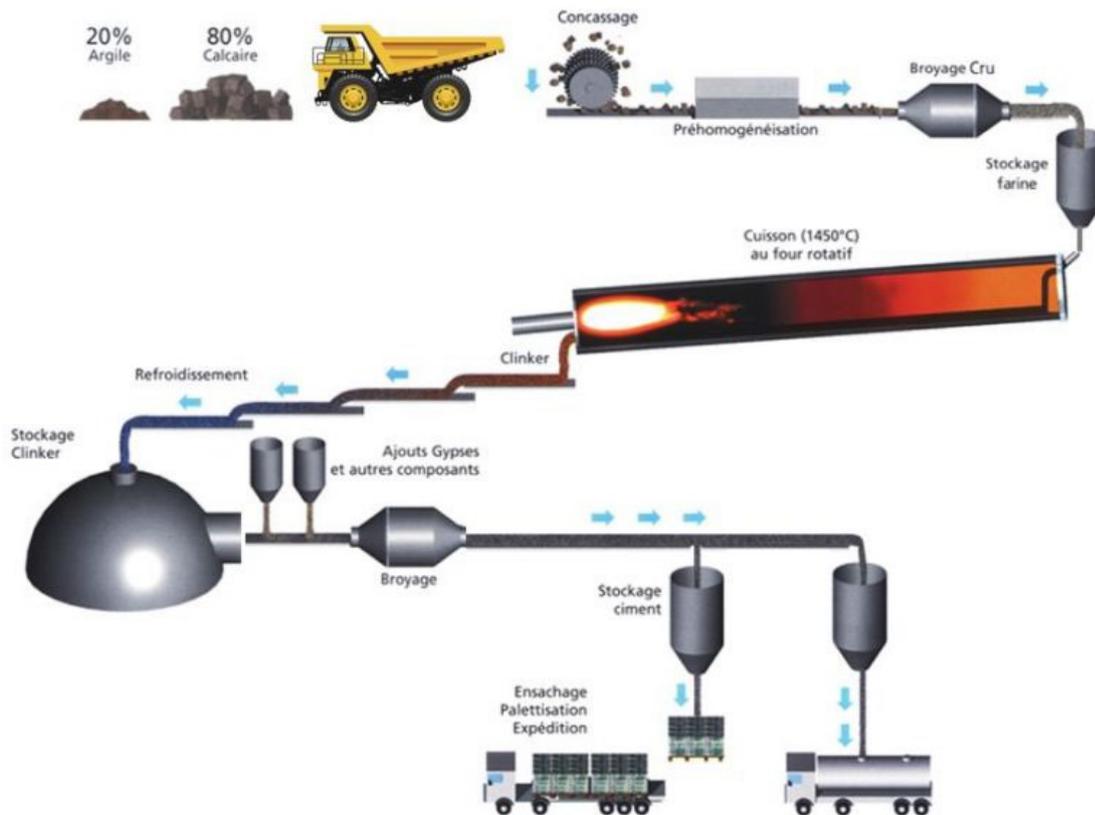


Figure 13. Les différentes étapes de la fabrication du ciment. [23]

## 1.3 LES DIFFÉRENTS TYPES DE CIMENTS

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme ciment (norme NF EN 197-1).

- **Le ciment Portland: CEM I**

Il contient au moins 95% de clinker et au plus 5% de constituants secondaires.

- **Le ciment Portland composé : CEM II/A ou B**

Il contient au moins 65% de clinker et au plus 35% d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice, pouzzolane, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.

- **Le ciment de haut fourneau :**

CEM III/A ou B : contient entre 36 et 80% de laitier et 20 à 64% de clinker.

CEM III/C : contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker.

- **Le ciment pouzzolanique : CEM IV/A ou B**

Il contient 45 à 89% de clinker et 11 à 55% de pouzzolanes.

- **Le ciment composé : CEM V/A ou B**

Il contient 20 à 64% de clinker, 18 à 49% de laitier et 18 à 49% de cendres volantes ou de pouzzolanes.[23]

## 2. Les fours rotatifs de cimenteries

Les fours rotatifs des cimenteries permettent la cuisson des matériaux de base pour l'obtention de clinker. Le four est un long cylindre incliné en rotation permanente permettant le déplacement du matériau. Un bruleur chauffe le matériau, et les gaz chauds circulent dans le sens contraire du déplacement du matériau. La virole du four rotatif se compose de plusieurs tronçons

## CHAPITRE 4 : PRESENTATION DU FOUR ROTATIF DE LA CIMENTERIE

de tailles différentes assemblés par soudage et revêtus de briques réfractaires. Chaque tronçon du four a une épaisseur spécifique et les matériaux sont choisis pour résister aux contraintes dues aux charges mécaniques et thermiques appliquées. La température de service à l'intérieur du four dépasse les 1500 °C et croît au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'entrée, elle est contrôlée en permanence à l'extérieure de la virole au moyen d'un appareil de mesure approprié. Grâce au revêtement réfractaire, la valeur de référence de la température maximale de la virole métallique est de 350 °C.



**Figure14.** Four rotatif dans une cimenterie de la région d'Elma labiod Tébessa.

En service, il arrive que la température extérieure de la virole dépasse la valeur limite précitée. Une température excessive au niveau de la virole du four est le résultat d'un briquetage endommagé ou une couche de briquetage trop mince par suite de l'usure. Le remplacement ou la réparation du revêtement réfractaire dans les zones de températures excessives de la virole devient urgent. [24]

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

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

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

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

Les fonctions principales du four rotatif sont :

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

# CHAPITRE 4 : PRESENTATION DU FOUR ROTATIF DE LA CIMENTERIE

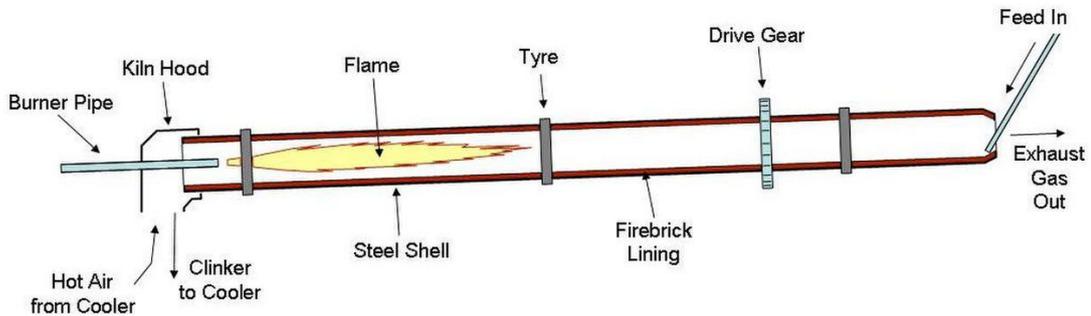


Figure 15. Disposition générale d'un four rotatif.[25]

## 3. Description des composants du four

### 3.1. Le bandage

Le bandage est un anneau métallique à section rectangulaire, installé sur la virole du four dans les zones des paliers, leurs nombres diffèrent d'un four à un autre selon sa conception .

#### 3.1.2. 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.[26]

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

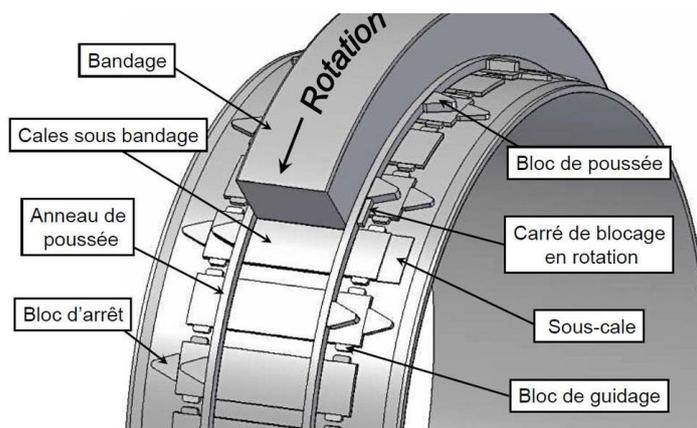


Figure 16. Bndage de four rotatif.

### 3. 2. La virole

La virole est un ensemble de tôles dont le rayon de courbure coïncide avec le rayon du four, les tôles sont soudées deux à deux tout en évitant une continuité de soudure dans la direction axiale. Propriétés des tôles : les tôles sont en acier de construction S235 JR G2, de composition :

## CHAPITRE 4 : PRESENTATION DU FOUR ROTATIF DE LA CIMENTERIE

Carbone 0.2% ; manganèse 1% ; d'autres composants < 0.01 % L'acier utilisé présente une excellente conformation, une excellente soudabilité, mais une mauvaise tenue en corrosion, puisqu'il n'est pas allié en chrome, nickel et molybdène.



Figure 17. virole de four cimenterie.

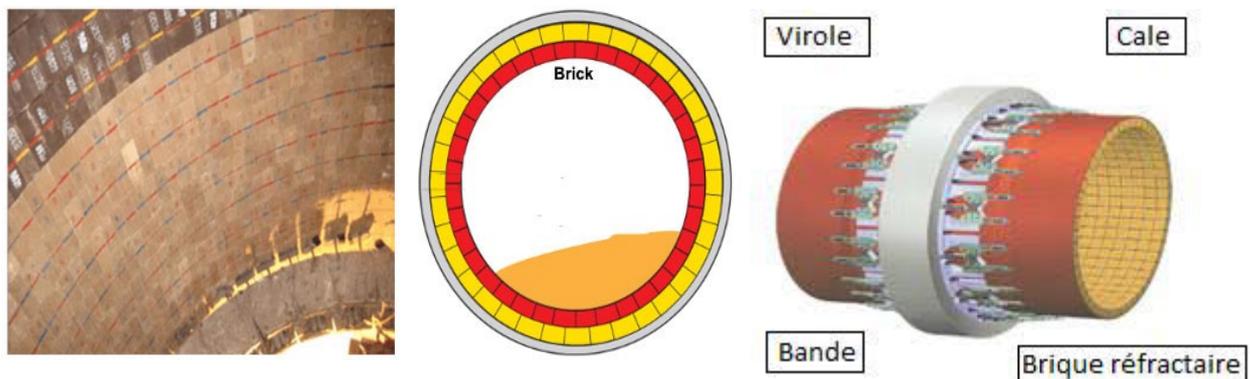
La virole du four doit travailler dans une zone de température modérée inférieure à 450°C, car au-delà de cette température les propriétés mécaniques sont dégradées et présentent le risque de déformation permanente. La durée de vie de la virole est généralement entre 20 ans à 30 ans, mais la mauvaise tenue en corrosion peut entraîner des changements de viroles en quelques années. La virole de sortie du four est plus sollicitée thermiquement et peut conduire à des changements tous les 5ans. [26]

### 3.3. Les briques réfractaires

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

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

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



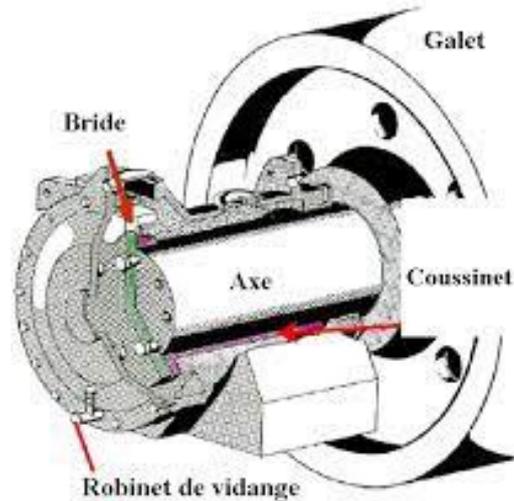
Figur18. Brique réfractaire de four rotatif.

### 3.4. Les galets

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

## CHAPITRE 4 : PRESENTATION DU FOUR ROTATIF DE LA CIMENTERIE

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



Figur19.Gallet de four

### 3.5. La butée hydraulique

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

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



Figure 20. Butée hydraulique.

### 3.6. Les joints du four

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

Le rôle principal des joints est d'assurer l'étanchéité du four face à l'entrée d'air faux.

### 3.7. Les plaques nose-ring

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

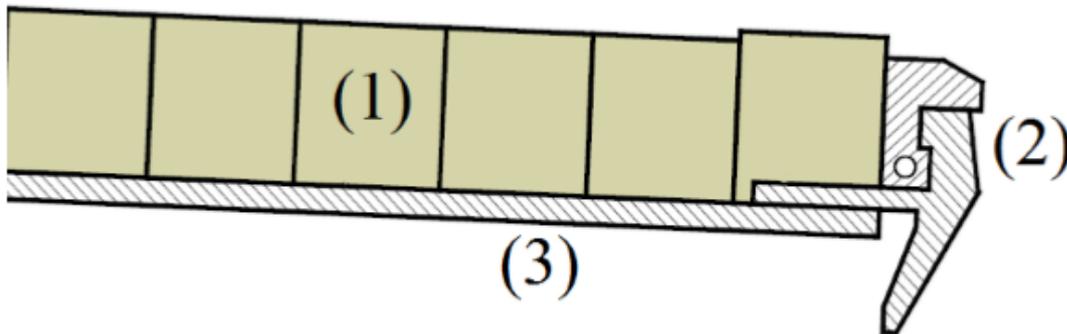


Figure 21. Plaque nose-ring.

(1) : les briques de la sortie du four.

(2) : Plaque nose-ring.

(3) : Virole de sortie du four.

### 3.8. Caractéristiques du four cimenterie Elmalabiod Tébessa

D'après la consultation des responsables de l'atelier de maintenance et le Bureau des Etudes et des Méthodes de la société des ciments nous avons identifié les documents technique et les fiches historique des pannes les que nous avons résumés dans les tableaux N° (3 et 4)

# CHAPITRE 4 : PRESENTATION DU FOUR ROTATIF DE LA CIMENTERIE

**Tableau 03.** Caractéristiques du four cimenterie Elmalabiod Tébessa

Caractéristiques du four		
Constructeur du four	FLSmidth	
Dimensions du four (diam. x longueur)	4,55 x 92,4 m	
Nombre de supports	4	
Emplacement de la couronne dentée	Côté sortie du support IV	
Dispositifs de guidage	Dispositif de retenue hydraulique - 50 sur supports III et IV	
Inclinaison	3,5 %	
Type de refroidisseur	Unax	
Première mise en service du four	1993	
Production (nominale/actuelle)	1500 tpj	1500 tpj
Vitesse du four (conception/réelle)	2,00 tr/min	1,65 tr/min
Sens de rotation *)	Sens antihoraire	

## 4. Les principaux risques dans les cimenteries

### 4.1. Risques chimiques des cimentiers

La forte alcalinité du ciment est un facteur important des risques chimiques du ciment, ainsi que les traces de chrome hexa valent, de cobalt et de nickel qu'il contient. Mais c'est la poussière qui engendre le risque majeur de la fabrication du ciment, du fait que ces particules sont irritantes et susceptibles d'atteindre les alvéoles pulmonaires.

Les ciments sous forme sèche, poussières présentes en quantité dans les cimenteries, présentent des risques pour les voies respiratoires (rhinites, asthme, altération de la fonction respiratoire comme la bronchite chronique, l'emphysème....).

Les poussières de ciment peuvent être aussi responsables d'affections oculaires : conjonctivite, blépharocariose ou blépharite (lésions de follicules pileux des cils de paupières).

La forte alcalinité des ciments lors de l'humidification au contact d'une peau humide, provoque les lésions cutanées (peau rouge et luisante).

La dermatite de contact allergique (eczéma) est due aux substances allergènes contenues dans le ciment : chrome, nickel, cobalt et résines époxydiques. Le cimentier se sensibilise progressivement à ces produits de façon spécifique du fait de la multiplicité des contacts cutanés non protégés.

### 4.2. Risques thermiques des cimentiers

Les hautes températures ambiantes au voisinage des portes et des plates-formes des fours génèrent une chaleur rayonnante due à l'énergie des rayons infrarouges. La proximité d'une source de chaleur peut entraîner des céphalées, hypersudation, tachycardie, hypotension et, conjuguée à des températures de l'air élevée, provoquer des malaises dus à la déshydratation et

## CHAPITRE 4 : PRESENTATION DU FOUR ROTATIF DE LA CIMENTERIE

des troubles circulatoires. Au-delà de 25C°, l'inconfort se fait ressentir avec, de plus, toutes les conséquences psychologiques que cela peut avoir sur la précision des gestes, la vigilance et donc la sécurité (diminution des capacités de réaction, irritabilité, agressivité).

### 4.3. Risques acoustiques des cimentiers

Les sources de bruits dans les cimenteries sont nombreuses, créant un environnement bruyant du fait en particulier des opérations de broyage, tamisage... Les niveaux de pression acoustique engendrés par les bruits des broyeurs à leur voisinage peuvent dépasser 110 dB. En dehors des atteintes au système auditif (déficit auditif, acouphènes...), le bruit ambiant peut entraîner une gêne ou un stress vecteur de troubles du psychisme et de pathologies qui nuisent non seulement à la santé du travailleur mais aussi à la sécurité de son travail par baisse de vigilance et de dextérité ou de concentration.

### 4.5. Risques physiques des cimentiers

D'autres risques ne sont pas spécifiques aux cimenteries, mais communs à toute activité industrielle : chutes de plain pied sur sol glissant, inégal ou encombré, projections de corps étranger dans les yeux, contusions et coupures lors des opérations de manutention...

Les charges lourdes portées manuellement, ou le nombre excessif de manipulations et mouvements avec torsion du dos, rotation pour le déplacement, flexion pour le soulèvement, ou la station debout prolongée ... sont à l'origine d'accidents de travail concernant la colonne vertébrale (dorsalgies, lombosciatiques) et le vieillissement progressif des structures ostéoarticulaires.

Il y a des risques physiques accrus à l'occasion des opérations de chargement de ciment pour livraison.[27]

### 4.6. Risques liés au ciment sur l'équipement

- Dépôt de ciment à l'intérieur des axes rotatifs.
- Entrée de poudre de ciment dans le système de lubrification.
- durcissement du ciment sur les boulons et les vis.
- Effet chimique sur l'équipement (corrosion).
- L'effet sur la qualité de la ventilation pour la combustion de gaz.

### Conclusion :

Ce chapitre met en évidence la méthode de la production du ciment son opération technique, et l'importance du four rotatif dans cette opération, car il est considéré comme le cœur battant dans l'industrie du ciment et la partie la plus importante de cette industrie. Nous avons également montré les parties et les composant les plus importants du four, ainsi que les risques de ciment pour les équipe anisé que la santé des travailleurs.

**CHAPIT 5**

**PARTIE PRATIQUE**

### **❖ Introduction**

L'étude de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants. De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits (rentable) au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Cout/ Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance.

L'étude de la fiabilité dans le domaine industriel est un outil très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie, mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission.

Dans ce chapitre, nous nous appuyerons dans notre étude sur la loi de Weibel (cas du four cimenterie Elmalabiod Tébéssa ) pour connaître son état de santé et sa fiabilité, identifier les défauts, et apporter quelques solutions pour améliorer son fonctionnement .

## Chapitre 05 : PARTIE PRATIQUE

### 2. Les historique de pannes de cimenterie elmalbiod

DATE	Type D arrêts (h)												TBF
	MEC	ELECT	CMR	ARRET programmé	Briquetage	bourrage	Délestage Fréquence	Surtension	Coupure	Utilité	Cauffet	Manque farine	
Janvier 2021	00	00	07	00	528	03	00	00	00	00	37	00	155
Février 2021	00	00	08	01	151	00	00	00	01	00	05	00	541
Mars 2021	05	00	05	80	02	01	00	00	00	00	08	00	629
Avril 2021	00	00	00	00	162	00	00	00	00	02	47	00	519
Mai 2021	04	00	00	00	68	03	02	00	00	00	19	00	656
Juin 2021	04	00	06	01	129	07	00	00	01	00	24	00	554
Juillet 2021	07	00	07	00	247	02	00	00	00	00	39	00	428
Aout 2021	06	00	06	00	127	08	01	00	00	00	32	00	551
Septembre 2021	43	00	00	00	53	01	00	00	00	00	26	00	593
Octobre 2021	04	00	00	396	23	03	01	00	00	00	10	00	295
Novembre 2021	00	00	00	720	00	00	00	00	00	00	00	00	00
Décembre 2021	00	00	00	720	00	00	00	00	00	00	49	00	00
Janvier 2022	94	04	00	00	67	00	00	00	00	00	45	00	521
Février 2022	23	01	02	00	00	01	00	00	00	00	00	00	648

**3. Analyse du four (cas notre étude) par l'AMDEC**

L'AMDEC (Analyse des modes de défaillance de leurs effets et leur criticité) est une méthode d'analyse qui permet de recenser les défaillances dont les conséquences affectent le fonctionnement, dans le cadre d'une application donnée. La mise en oeuvre de l'AMDEC comporte du système :

- Une phase préliminaire, pour définir les limites de l'étude et constituer le groupe de travail ;
- L'analyse des défaillances : qui se fait par la détermination des modes de défaillances, la recherche des causes et l'inventaire des effets.
- Le calcul de la criticité.

La gravité des conséquences d'une défaillance se mesure par la prise en compte de la fréquence d'apparition des défaillances caractérisé par un taux de défaillance, de la probabilité de non détection des causes de défaillances et enfin de la gravité des effets de la défaillance par rapport à la sécurité des personnes et des biens, ou par rapport à l'importance des couts de défaillance.

A chaque critère est associé un coefficient dans une échelle de valeurs préalablement établie (Tableau n°5):

- Fréquence : coefficient **F**
- Non détection coefficient **D**
- Gravité : coefficient

**Tableau 05.** les coefficient de la criticité

<b>FREQUENCE : F</b>	
1	1 défaillance maxi par an
2	1 défaillance maxi par trimestre
3	1 défaillance maxi par mois
4	1 défaillance maxi par semaine
<b>NON DETECTION : D</b>	
1	Visible par l'opérateur
2	Détection aisée par un agent de maintenance
3	Détection difficile
4	Indécelable
<b>GRAVITE (INDISPONIBILITE) : G</b>	
1	Pas d'arrêt de production
2	Arrêt =1 heure
3	1 heure < arrêt <1jour
4	Arrêt >1 jour

La criticité s'exprime par leur produit  $C = F \times D \times G.....(VII-01)$

## Chapitre 05 : PARTIE PRACTIQUE

Elément	Mode de défaillance	Causes	Effets	F	D	G	C
<b>Moteur électrique</b>	Couple insuffisant	-Défauts internes. -Contrôle/réglage. -Charge excessive.	-Vitesse de rotation du four faible. -Diminution de production. -Risque de colmatage.	2	2	2	8
<b>Pignon</b>	Usure des dents	-Mauvaise Lubrification. -Entraxe déréglé. -Désalignement denture pignon/couronne.	-Résistance affaiblie des dents. -Durée de vie diminuée. -Rendement en puissance diminué. -Vibration.	2	2	2	8
<b>Bandage</b>	Fissuration	-Mauvais contact bandage/galet. -Usure excessif. -Bandage oscillant.	-Affaiblissement de résistance. -Rupture du bandage.	1	3	3	9
	Glissement incorrecte	-Augmentation de température virole. -Mauvais suivi de démarrage à froid. -Plaques compensations insuffisantes. -Augmentation de température de bandage.	-Déformation permanente de la virole. -Dégradation des briques réfractaires. -Ovalisation de la virole. -détérioration brique. -point chaud virole.	3	3	4	36
<b>Galets</b>	Propagation rapide des fissures.	-Fatigue-effet Vilebrequin. -Flexion rotative. Charge excessive.	-Résistance affaiblie-rupture et diminution de la durée de vie	2	4	4	32
	Flexion excessive	-Charge élevée. -Effet vilebrequin. -Bandage oscillant.	-Risque de rupture élevée. -Fissuration.	2	4	3	24

## Chapitre 05 : PARTIE PRACTIQUE

<b>Galets</b>	-Température élevée au palier	-Température virole élevée. -Refroidissement inefficace. -Lubrification insuffisante. -Frottement axial/radial	-Dégradation du coussinet. -Microsoudure ou soudure entre coussinet et l'arbre.	2	2	2	8
<b>Joints</b>	Etanchéité insuffisante	-Usure du cerceau. -Cordon d'étanchéité. -Problème dans le vérin. -Pression insuffisante. -Problème de circuit d'air comprimé.	-Entrée de l'air faux dans le four. -Ouverture du joint.	3	3	3	27
<b>Virole</b>	Déformation	-Tâche rouge. -Flexion du four. -Température non uniforme. -Chute des briques. -Croûtage.	-Fissure galet-flexion arbre galet-charge excessive sur galet-chute/fissuration des briques. -problèmes de la rotation.	3	3	4	36
	Ovalisation	-Jeu relatif excessif	-Dommages des briques. -Fissuration longitudinale. -Endommagement virole.	3	3	4	36
	Fissuration	-Endommagement de la soudure de transition entre deux épaisseurs différentes de la virole.	-Risque de rupture de la virole. -Fuite de matière à très haute température.				

## Chapitre 05 : PARTIE PRACTIQUE

		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mauvais alignement de l'axe du four.</li> <li>-Température élevée virole.</li> <li>-Corrosion.</li> <li>-Mauvaise qualité soudure.</li> </ul>	-Fissuration et diminution de la durée de vie des briques.	2	2	3	12
	Effet vilebrequin	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Point chaud.</li> <li>-Vilebrequin de température.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Flexion importante de l'arbre du galet.</li> <li>-Risque de rupture du galet.</li> </ul>	2	3	4	24
<b>Les Briques</b>	Usure et chute des briques.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ovalisation.</li> <li>Déformation de la virole.</li> <li>Choc thermique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Apparition de points chauds.</li> <li>Chute des briques.</li> <li>Effet vilebrequin.</li> </ul>	3	3	4	36
<b>Butée hydraulique</b>	Rupture des vis	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Surpression.</li> <li>-Surcharge du four.</li> <li>-Désalignement de l'axe du four.</li> <li>-Fatigue des vis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Perte de maintien en position de la butée.</li> <li>-Risque des problèmes du brusque du four.</li> </ul>	2	4	4	32
	Surpression	-Charge du four élevé.	-Risque de rupture des vis à long terme.	1	2	3	6
	Blocage en descente	-Alignement du four incorrect.	-Usure des bandages et galets à long terme.	2	2	2	8
<b>Plaques noser-ing</b>	Usure des plaques	-Abrasion à haute température à cause du flux de clinker.	-Perte du maintien des briques réfractaires.	3	3	4	36

**Tableau 06.** Analyse AMDEC de four (notre cas d'étude)

### ❖ Interprétation de résultats

Suite à l'analyse AMDEC appliquée sur le four nous constatons que les composants (Bandage, Galet, Viroles, Briques ,Plaques noser-ring ,Butée hydraulique) présentent des coefficients de criticité très élevés par rapport aux normes internationales , ce qui affecte directement la santé et l'état général du four, ce qui se reflète sur la chaîne technologique de fabrication du ciment voir la paralysie totale de tout le processus.

Pour remédier à ce problème et réduire la criticité des composants cités précédemment nous proposons quelques actions de maintenance corrective et préventive, puis nous procédons au calcul d'un nouveau indice de criticité de chaque composant dont la criticité est élevée dépassant le seuil. Les résultats sont présentés dans le tableau n°7.

**Tableau 07.** Proposition d'actions de maintenance

Élément	Mode de défaillance	Causes	Effets	Action de maintenance	F	D	G	C
<b>Bandage</b>	-Fissuration. -Glissement incorrect.	-Mauvaise contact bandage /galet. -Augmentation de température.	-Rupture du bandage. -Déformation permanente de la virole.	-Suivi continu du glissement, et l'ovalisation de virole. -Réparation les fissure.	2	2	3	12
<b>Galet</b>	-Propagation rapide des fissures. -Flexion excessive	-Charge élevée. -Flexion rotative. -Charge excessive.	-Résistance affaiblie rupture diminution de la durée de vie. -Risque de rupture élevée. -Fissuration.	-Contrôle de la Déformation Du four. -Ne charger pas le four au-delà de la charge maximale recommandée par le constructeur	2	2	3	12

## Chapitre 05 : PARTIE PRACTIQUE

<b>Virole</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Déformation.</li> <li>-Ovalisation.</li> <li>-Fissuration.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Tâche rouge.</li> <li>Flexion du four.</li> <li>Température non uniforme.</li> <li>- Chute des briques.</li> <li>Croûtage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dommage des briques.</li> <li>- Fissuration longitudinale.</li> <li>Endommagement virole.</li> <li>- Flexion importante de l'arbre du galet.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Suivi régulier de la température de la virole.</li> <li>-CND pendant l'arrêt du four.</li> <li>-Changement de la virole.</li> </ul>	1	2	4	8
<b>Briques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Usure et chute des briques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Ovalisation.</li> <li>-Déformation de la virole.</li> <li>-Choc thermique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Apparition de points chauds.</li> <li>-Chute des briques.</li> <li>-Effet vilebrequin.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Correction de la déformation de la virole.</li> <li>-contrôle des briques pendant l'arrêt du four.</li> <li>-Suivi régulier de la température de la virole.</li> <li>-Installation de brique haute qualité selon les normes.</li> </ul>	2	3	3	18
<b>Butée hydraulique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Surpression.</li> <li>-Rupture des vis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Charge du four élevé.</li> <li>-Surpression.</li> <li>Surcharge du four.</li> <li>-Désalignement de l'axe du four.</li> <li>Fatigue des vis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Perte de maintien en position de la butée.</li> <li>-Risque de retour brusque du four.</li> <li>-Usure des bandages et galets à long terme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Contrôle de l'alignement du four.</li> <li>-Respecter le poids maximum de chargement du four.</li> </ul>	2	3	3	18
<b>Plaques noser-ing</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Usure des plaques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Abrasion à haute température à cause du flux de clinker.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Perte du maintien des briques réfractaires.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Changement des plaques nose-ring.</li> </ul>	2	3	3	18

**Constat :** d'après les résultats du tableau n°7, nous voyons que la l'indice de criticité des composants analysés a diminué. Par exemple Bandage C égal 12 au lieu 36.

Après avoua identifier les éléments critiques, et déterminer un nouveau indice de criticité qui s'avérait réduit , nous passons aux calculs de la fiabilité et ses indicateur : MTBF, Y(t)

**4. Etude de fiabilité**

Dans un premier temps, nous devons calculé la fiabilité. Pour réaliser cette étape, nous allons mettre en application le modèle de « weibull ». C’est un modèle mathématique particulièrement adapté à l’étude statistique des défaillances, ce dernier à l’avantage d’être souple et pouvant s’ajuster à différents résultats d’expérimentation. Une variable aléatoire continue distribuée suivants la loi de « weibull » est caractérisée par :

- La densité de probabilité  $f(t)$  : C’est la probabilité d’avoir une seule avarie au temps (t). Elle est donnée par la formule :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[ \frac{t-y}{\eta} \right]^{\beta-1} e^{-\left[ \frac{t-y}{\eta} \right]^{\beta}} \dots\dots (V-02)$$

- La fonction de répartition  $F(t)$  Elle est donnée par la formule :

$$f(t) = 1 - e^{-\left[ \frac{t-y}{\eta} \right]^{\beta}} \dots\dots (V-03)$$

- La fiabilité correspondante est  $R(t)$  : C’est la probabilité de non défaillance dans l’intervalle du temps (0, t) elle donnée par la formule :

$$R(t) = e^{-\left[ \frac{t-y}{\eta} \right]^{\beta}} \dots\dots (V-04)$$

- Le taux d’varie (le taux de défaillance) correspondant  $\lambda(t)$  parfois noté  $z(t)$ , c’est la probabilité d’avarie au temps  $(t + \Delta t)$ , il est exprimée par la formule :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[ \frac{t-y}{\eta} \right]^{\beta-1} \dots\dots (V-05)$$

**4.1. Signification des paramètres de la loi WEIBULL**

**4.1.1. Paramètres de forme ( $\beta$ )**

C’est un paramètre sans dimensions, il définit l’allure de la distribution  $f(t)$  de défaillance d’un système. Sa valeur caractéristique de chacune des trois phases de vie d’un système.

- ✓ si  $\beta = 1$ , alors  $\lambda(t)$  constant, c’est la phase d’obsolescence que l’on peut analyser plus finement pour orienter un diagnostic c’est une phase de vieillesse avec apparition d’un mode de défaillance particulier.
- ✓  $1,5 < \beta < 2,5$ . Phénomène de fatigue.
- ✓  $3 < \beta < 4$ . Phénomène d’usure, de corrosion, de dépassement d’un seuil (domaine de déformation plastique).
- ✓  $\beta = 3,5$ .  $f(t)$  est symétrique, la distribution est normale.

**4.1.2. Paramètre d’échelle**

Caractérisant le choix d’une échelle. Il s’exprime dans la même unité de temps (heures, cycles...) que le temps de bon fonctionnement( $TBF$ ).

**4.1.3. Paramètres de localisation ( $y$ )**

Egalement nommé paramètre de décalage ou de position, il s’exprime en unité de temps, il indique la date d’apparition du mode de défaillance caractérisé par  $\beta$ .

- ✓ si  $y > 0$ , il  $y$ ’a une survie totale a  $t=0$  et  $t=y$ .

- ✓ si  $y=0$ , les défaillances débutent à l'origine de temps.
- ✓ si  $y<0$ , les défaillances ont débuté avant l'origine des temps relevés.

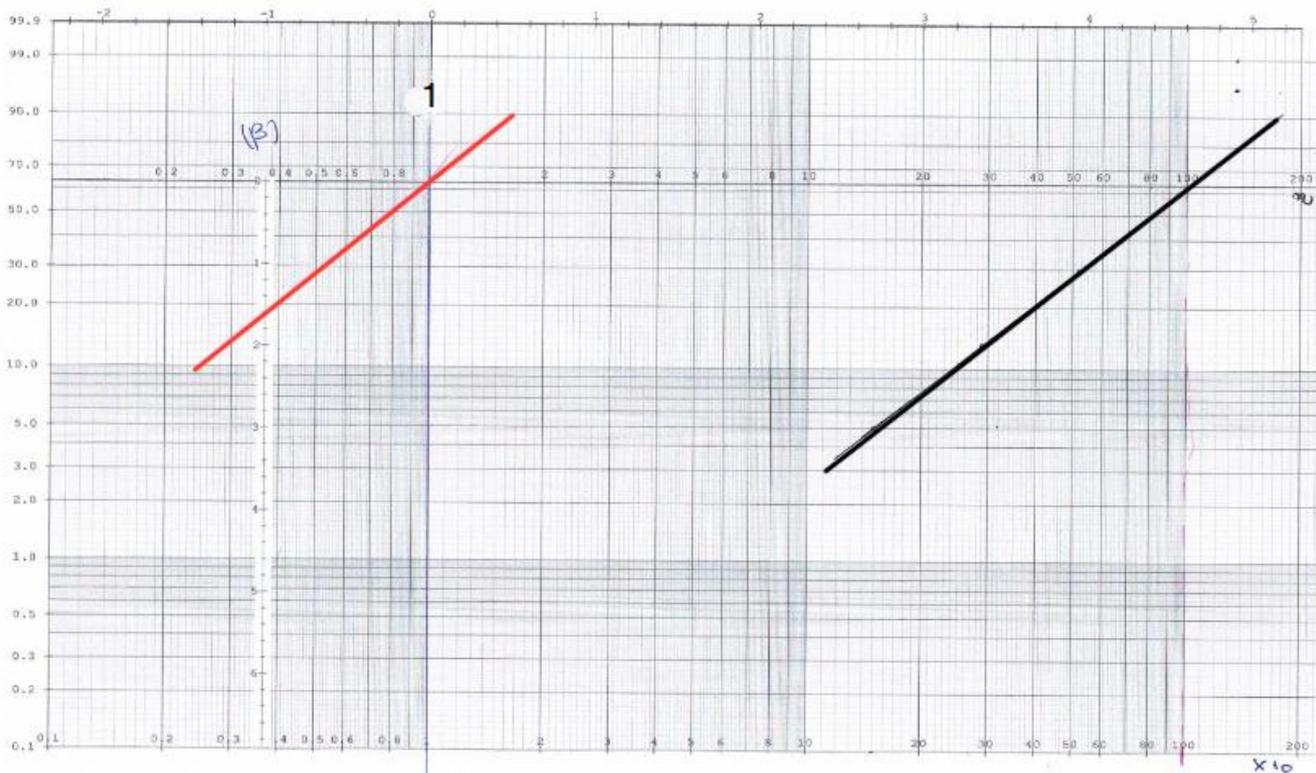
Un des problèmes essentiels rencontrés lors de l'application de ce modèle est l'estimation des paramètres  $(\beta, \eta, \gamma)$ . Pour cela nous utilisons la méthode graphique, c'est un méthode appliqué sur papier spécial dit papier de « WEIBULL » .[20]

### 4.2. Calcul des paramètres de « WEIBULL »

Ayant les TBF (temps de bon fonctionnement) de four cimenterie Elmalabiod Tébessa en suivant le modèle de Weibull, on obtient le tableau suivant :

**Tableau 08.** Préparation des données

Ordre i	TBF	Fi ( $\times 10$ )
1	155	$\frac{1-0.3}{12+0.4} = 0.5$
2	295	0.13
3	428	0.21
4	519	0.30
5	521	0.38
6	541	0.46
7	551	0.54
8	554	0.62
9	593	0.70
10	629	0.78
11	648	0.86
12	656	0.95



**Figure 22.** Détermination graphique des Paramètres de fiabilité  
Page | 50

On déduit alors les paramètres de Weibull qui sont comme suit :

$$\beta = 1.5 \quad \gamma = 0 \quad \eta = 1020 \text{ (h)} \quad A = 0.9027 \quad B = 0.613$$

L'on a la moyenne du temps de bon fonctionnement déterminé par la formule suivant :

$$MTBF = \gamma + \eta \cdot a \dots\dots (V-06)$$

$$MTBF = 0 + 1020 \times 0.9027$$

$$MTBF = 920 \text{ (h)}$$

**5.Étude de cas (four cimenterie Elmalabiod)**

A chaque instant (t) de TBF nous déterminons la fiabilité  $R(t)$ , la fonction  $F(t)$ , la densité de probabilité  $f(t)$ , et le taux de défaillance  $\lambda(t)$  que sont présentés sur le tableau n°9.

# **Exemple de calcul :**

Pour le rang (1):

1) La fiabilité  $R(t)$  :

$$R(t) = e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta} \dots (V-07)$$

$$= e^{-\left[\frac{155.49-0}{1020}\right]^{1.5}} = 0,9422 = 94.2\%$$

2) La fonction de réparation  $F(t)$  :

$$F(t) = 1 - e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta} \dots (V-08)$$

$$= 1 - R(t) = 0,0578 \approx 6\%$$

3) La densité de probabilité  $f(t)$  :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta-1} \cdot e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta} \dots\dots\dots (V-09)$$

$$= \frac{1.5}{1020} \left[\frac{155.49 - 0}{1020}\right]^{1.5-1} \cdot R(t)$$

$$f_1(t) = 0.00053694$$

4) Le taux de défaillance  $\lambda(t)$  :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta-1} \dots\dots\dots (V-10)$$

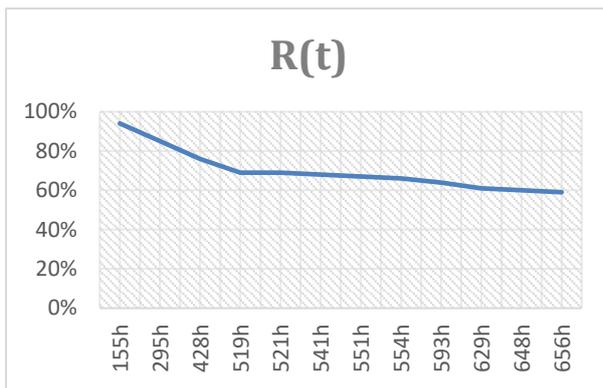
$$= \frac{1.5}{1020} \left[\frac{155.49 - 0}{1020}\right]^{1.5-1} = 0,00057$$

Les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessus :

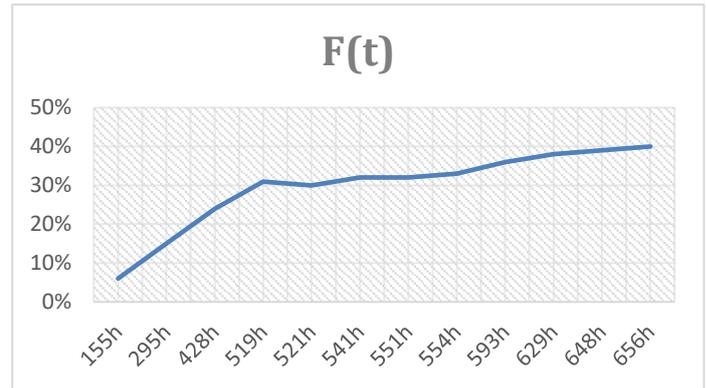
**Tableau 09.** Résultats de l'étude de fiabilité

Rang	TBF (heure)	R (t) %	F (t) %	Taux de défaillance $\lambda$	fonction de densité f
1	155	94.2	6	0.00057	0.00053694
2	295	85.5	15	0.00079	0.00067545
3	428	76.1	24	0.00095	0.00072295
4	519	69.5	31	0.0010	0.000695
5	521	69.3	30	0.0010	0.000693
6	541	67.9	32	0.0010	0.000679
7	551	67.1	32	0.0010	0.000671
8	554	66.9	33	0.0010	0.000669
9	593	64.1	36	0.0011	0.0007051
10	629	61.5	38	0.0011	0.0006765
11	648	60.2	39	0.0011	0.0006622
12	656	59.6	40	0.0011	0.0006556

En suite nous traçons les courbes de fiabilité R(t) et La fonction de réparation F(t) :



**Figure 23.** Fonction de fiabilité R(t)



**Figure 24.** Fonction La fonction de réparation F(t)

**❖ Interprétation de résultats**

D'après les résultats du tableau et les courbes, nous remarquons une diminution progressive de la fiabilité du four de 95% à 60%, accompagnée d'une augmentation du pourcentage de la fonction de réparation de 6% jusqu'à 40% et c'est normal, parce que notre équipement est en phase d'usure. D'autre part en 2018 notre four a été exposé à un accident lors de l'effondrement des supports de béton sous le four en raison de la faiblesse des supports et de la charge excessive sur l'équipement, cet incident a causé des gaves dommages au niveau de station de virole 1 et 2.

L'Equipment a été maintenu par le changement des viroles et la reconstitution des supports. Ce qui explique la diminution de fiabilité.

**6. Etude de maintenabilité**

**6.1. Calcul de maintenabilité**

La maintenabilité peut être calculée à partir du MTTR (moyenne des temps de réparation).

Selon l'expression suivante :

$$MTTR = \frac{\text{Temps de maintenance total}}{\text{nombre de reparation}} \dots\dots\dots (V-11)$$

$$MTTR = 155 (h)$$

$U = \text{taux de réparation}$

$$U = 1/mtrr = 1/155 = 0.006 \text{ Int / h (Intervention /h)}$$

**6.2. Représentation mathématique**

La maintenabilité d'un système, notre  $m(t)$  est donnée par la formule :

$$M(t) = 1 - e^{-\int_0^t u(x)dx} \dots\dots\dots (V-12)$$

Si  $u$  constant cela implique que :

$$M(t) = 1 - e^{-ut} \dots\dots\dots (V-13)$$

Ou  $u$  est le taux de réparation :

$$u = 1/MTTR \dots\dots\dots (V-14)$$

Donc l'équation de la maintenabilité est :

$$M(t) = 1 - e^{-0,006t}$$

- **Exemple :**

$$M(t) = 1 - e^{-0,006(625)} = 0.9764 = 97\%$$

Les résultats de lamaintenabilité sont représentés dans le tableau n°10 :

Tableau 10. La Maintenabilité

Rang	TTR	M (t)%
1	625	97%
2	435	92%
3	302	83%
4	211	71%
5	210	71%
6	172	64%
7	179	65%
8	148	58%
9	136	55%
10	101	45%
11	27	14%
12	75	36%

On trace la courbe de Maintenabilité M (t) :

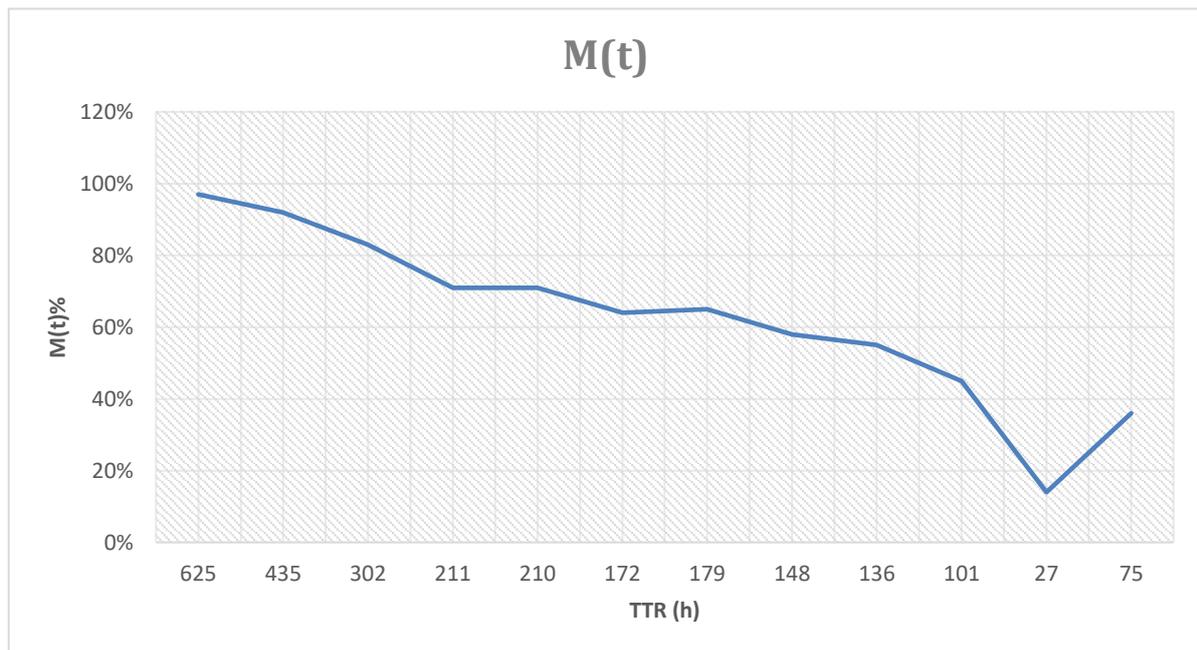


Figure 25. Fonction de Maintenabilité M(t)

**7. Etude de la disponibilité**

**7.1. Forme de disponibilité**

**a) Disponibilité intrinsèque (Di)**

Elle est évaluée, en prenant compte des moyens de réparation, ce qui donne :

$$(Di) = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \dots\dots (V-15)$$

$$D_i = \frac{920.75}{920.75+155} = 0.85$$

**Di= 85%**

**b) Disponibilité instantané :**

$$D(t) = \frac{u}{\tau+u} + \frac{\tau}{\tau+u} e^{-(\tau+u)t} \dots\dots (V-16)$$

On a :

$$\tau = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{920.75} = 0,0010$$

$$u = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{155.5} = 0,006$$

**Exemple :**

$$D(t) = \frac{0,006}{0,0010 + 0,006} + \frac{0,0010}{0,0010 + 0,006} e^{-(0,0010+0,006)t}$$

$$D(t) = 0.90 = 90\%$$

**Tableau 11. Disponibilité en fonction de TBF**

RANG	TBF	D(t)
1	155	90%
2	295	87%
3	428	86%
4	519	86%
5	521	86%
6	541	86%
7	551	86%
8	554	86%
9	593	85%
10	629	85%
11	648	85%
12	656	85%

On trace les courbes de disponibilité :

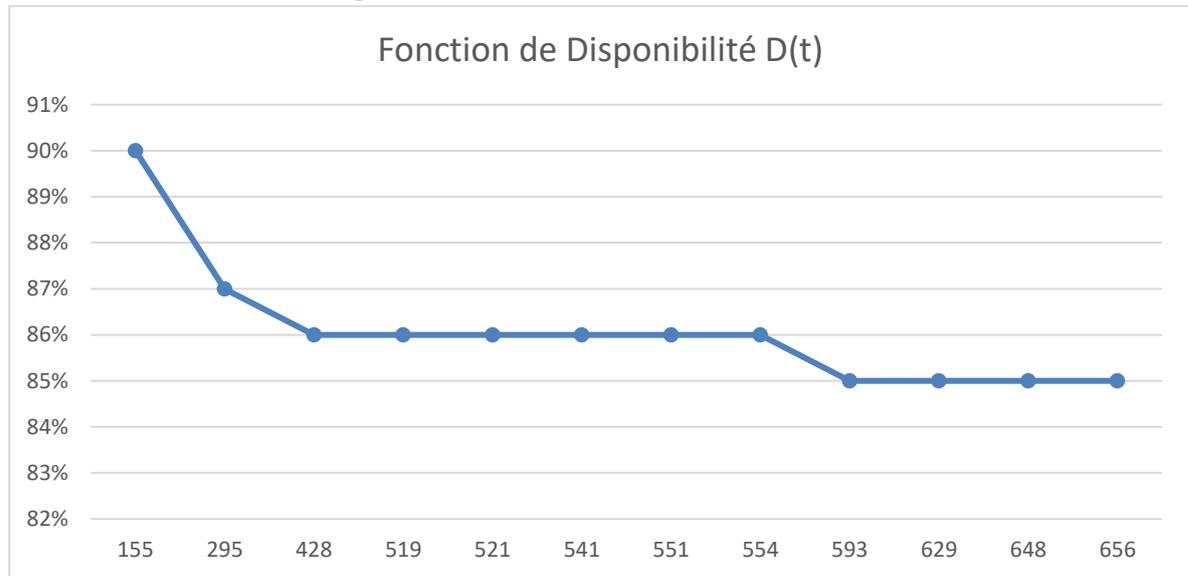


Figure 26. Fonction de Disponibilité

### ❖ Interprétation de résultats

En observant la courbe de la fonction Disponibilité, nous constatons une légère variation de ce paramètre, puis une stabilité de 85%. C'est un bon résultat vu le problème posé au niveau de la chaîne.

## 8. Recommandations

- Faire une inspection quotidienne du four :
  - Ya-t-il des différences notables depuis la dernière inspection ?
  - Ya-t-il des décolorations ou des taches rouge sur les viroles du four ?
  - Inspecter et enregistrer la température du corps du four et des Galets.
  - Écouter tous les sons inhabituels.
  - Vérifier l'état des joints d'extrémité de décharge et d'alimentation.
  - Y a-t-il des boulons d'ancrage desserrés sur le cadre de support ?
  - Le système de lubrification automatique des engrenages fonctionne-t-il correctement ?
- Fournir des pièces de rechange d'origine.
- Respecter les conditions de fonctionnement du four.
- Ne pas augmenter la charge du four pour augmenter la production.
- Respecter les calendriers d'entretien périodique, notamment ceux liés à la lubrification.
- Surveiller en permanence les niveaux de déformation des viroles.
- Automatiser un système de surveillance de la température extérieure du four et de les fuites de gaz d'allumage pour arrêter le fonctionnement du four en cas de température élevée ou des fuites gaz.
- Bien former la main-d'œuvre pour s'occuper du four.
- Poursuivre le plan actuel de maintenance conditionnelle (2 mois d'arrêt programmer à la fin de chaque année).
- Préparation du processus de changement des deux anciennes stations de virole.
- Respecter les conditions de sécurité.

### **9. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons identifié les défaillances de tous les composants du four, ensuite nous avons procédé au calcul des paramètres de la sûreté de fonctionnement à savoir la (Fiabilité, Disponibilité et Maintenabilité) en plus de l'application de l'AMDEC du four, tout en déterminant les éléments les plus critiques.

# **Conclusion Générale**

## 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 méthodes graphiques et numériques. Il n'y a pas des méthodes normalisées pour calculer la fiabilité des systèmes mécaniques, le choix de la méthode à appliquer dans ce domaine se fait en fonction des types d'équipement, de la grandeur des équipements, de la qualité de la production, 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 fiabilité qui caractérisent le degré de défaillance et permettent de bien suivre l'état des équipements afin de bien choisir correctement le type de la maintenance à appliquer. Les résultats de calcul de disponibilité et maintenabilité sont acceptables vu le problème touchant l'équipement étudié (four)

L'étude effectuée a montré l'Etat général de notre équipement et les éléments les plus critiques ce qui engendre l'arrêt du four, suite aux diagnostics effectués, on a déduit que le dysfonctionnement du four est causé principalement par la déformation (ovalisation) des viroles, et donc là l'incohérence des briques réfractaires à l'intérieur. La chute des briques provoque des températures très élevées des viroles, ainsi des taches rouges, ce qui influe sur l'état général de santé des viroles et par la suite leur détérioration. Une des causes principales de dysfonctionnement du four est sa surcharge, ce qui a touché les galets et la butée hydraulique.

Nous nous terminions notre travail par quelques recommandations pour améliorer la santé générale du four.

## BIBLIOGRAPHIE

- [2] MEVA' A.L, COURS DE MAINTENANCE ET FIABILITE INDUSTRIELLE, 4GIM,(2019) .
- [3] ARIF.A ,Cours maintenance et fiabilité, Plateforme des ressources pédagogiques et d'enseignement à distance Université de Biskra, (2020).
- [4] ISET, Introduction à la maintenance, l'organisation de la maintenance. Nabeul, A.U. (2014).
- [5] COUDRE.C ,Méthode de maintenance, Les différentes formes de Maintenance, TPM Attitude, (2011).
- [7] Aouad. R, Généralité sur la maintenance, Cours 2eme Année Acd , Chapitre 01/ Partie 01.
- [8] Zwingelstein, G.Maintenance based on reliability; La maintenance basée sur la fiabilité (1996).
- [9] BTS MI, STRATEGIES DE MAINTENANCE.
- [10] HERGON. E, CRESPEAU. H, ROUGER. Ph, Modes de défaillance du processus transfusionnel. Intérêt de l'analyse prévisionnelle de sureté de fonctionnement, Paris: Institut National de la Transfusion Sanguine.
- [11] Clarisse GUIGON, AMDEC : définition et mise en œuvre, (2021).
- [12] Kélada .J, L'AMDEC,école des HEC,(1998).
- [13] Anonyme, Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), AFREQEN ,(2019).
- [14] Debbah. Y, INTRODUCTION À LA FIABILITÉ , L'Institut des Sciences et Techniques Appliquées « ISTA » de l'université des Frères Mentouri Constantine 1,(2020).
- [15] Auberville. J.M, Maintenance industrielle, édition Marketing .Paris, page 216,(2004).
- [16] Nakajima. S, La maintenance productive Totale, Mise en œuvre, édition AFNOR,(1989).
- [17] KERBOUA .B , La maintenance et son application dans la protection des équipements ,La protection des équipements industriels et dans l'optimisation de la production,Editions universitaires européennes ,(2022).
- [18] O. Tebbi, Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés, thèse de doctorat, France, 09 mars ,(2005).
- [19] J. Bufferne, Fiabiliser les équipements industriels, Eyrolles ,(2008) .
- [20] BELLAOUAR.A , M.A. BELEULMI .S, FIABILITE MAINTENABILITE DISPONIBILITE , UNIVERSITE Constantine 1 ,(2013/2014) .
- [21] Claire Pagetti, Module de sureté de fonctionnement, ENSEEIHT 3ème TR - option SE ,(2012)
- [24] M. BIDEQ , K. I. JANATI , L.BOUSSHINE ,Etude de l'ovalisation d'un four rotatif de cimenterie , 13ème Congrès de Mécanique ,(Meknès, MAROC) ,(2017).
- [26] BASTIER.R , BOCAN.A ,Bernard .G et REGNAULT.A,Techniques de l'ingénieur ,(2000).

[27] Anonyme, La prévention des risques professionnels dans les cimenteries ,santé et décuriré au travail ,(2012).

[1] Anonyme, Fonction stratégique de la maintenance, GÉNIE INDUSTRIEL, Réf. Internet : 42137, 3em édition, Sur [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr) ,consulté le (25/03/2022, 21:50).

[6] Anonyme, (2020) Toutes les spécificités des niveaux de maintenance Afnor, sur site web : ([artis-groupe.fr/blog/niveau-de-maintenance-afnor](http://artis-groupe.fr/blog/niveau-de-maintenance-afnor)), consulté a (28/03/2022, 15:00).

[22] Anonyme , site web Lafraje algerie ([www.lafarge.dz](http://www.lafarge.dz)),Fabrication de ciment. Consulté a (31/05/2022 ,15 :00)

[23] Anonyme, tout sur le beton , site web (<https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/>). Consulté a (15/05/2022, 22:00)

[25] Anonyme, site web ([https://stringfixer.com/fr/Cement\\_kiln](https://stringfixer.com/fr/Cement_kiln)) Consulté a (17/05/2022, 21:00)

# ANNEXE

## Liste des annexes

### Annexe 01

Causes d'Arrêts	Types D'arrêts											
	MEC	ELECT	CMR	Arrêt prog	Briquetage	Bourrages	Délestage	Surtension	Coupure	Utilité	Chauffe	Manque farine
R A S												
R A S												
03h10': W1V01 Non prêt			3:10:00									
R A S												
01h01': ACM01 Non prêt			1:01:00									
R A S												
R A S												
R A S												
R A S												
01h57': Montée four 00h11': Four down (15mm)				2:08:00								
00h15': Retour de marche W1W0300h55': W1V01 L,Stop			0:55:00	0:15:00								
R A S												
R A S												
R A S												
00h45': Insuffisance d'air (Arrêt des compresseurs)(KK CRS)	0:45:00											
06h02': Arrêt pour entretien des ballonnets(KK CRS)				6:02:00								
24h00': Arrêt pour entretien des ballonnets				24:00:00								
24h00': Arrêt pour entretien des ballonnets + placard au 39 m				24:00:00								
24h00': Arrêt pour entretien des ballonnets + placard au 39 m				24:00:00								
08h00': Chauffe01h05': Bourrage gaine cyclone W1A54						1:05:00					8:00:00	
00h25': Arrêt pour intervention sur le joint-amont (Altération du débit par présence d'air fau	0:25:00											
R A S												
03h47': Arrêt pour intervention sur le joint-amont	3:47:00											
02h06': Formation d'anneau				2:06:00								
R A S												
R A S												
R A S												
(KK CRS de 09h00 à 15h00)												
R A S												
R A S												
R A S												
<b>Total</b>	<b>4:57:00</b>	<b>0:00:00</b>	<b>5:06:00</b>	<b>80:25:00</b>	<b>2:06:00</b>	<b>1:05:00</b>	<b>0:00:00</b>	<b>0:00:00</b>	<b>0:00:00</b>	<b>0:00:00</b>	<b>8:00:00</b>	<b>0:00:00</b>

## Annexe 02

### Excentrique ovalisation

Excentrique ovalisation est la combinaison des deux états géométriques ovalisés de la virole. De point de vue expérimental, il est difficile de dissocier ces deux phénomènes sans faire des traitements numériques. De point de vue mécanique. On note que leurs effets mécaniques sont tout à fait différents.

La tombée des briques réfractaire est due principalement aux phénomènes d'ovalisation de la virole et à la création des points chauds comme le montre la figure



Fig. .Virole ovalisée.

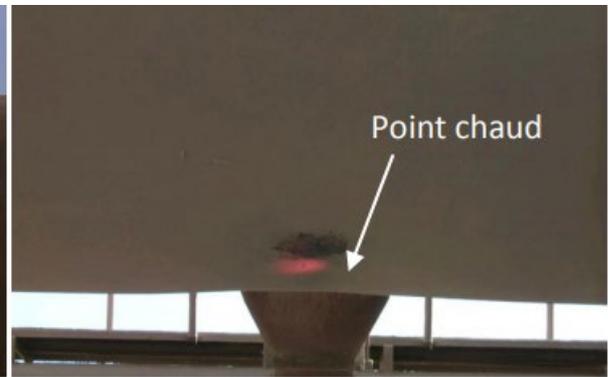


Fig. Apparition du point chaud.

### Vilebrequin mécanique du four

Ce phénomène est dû principalement à l'excentricité et à l'ovalisation provoquée par la chute des briques réfractaires et du croutage. Il peut provoquer une surcharge sur les galets.

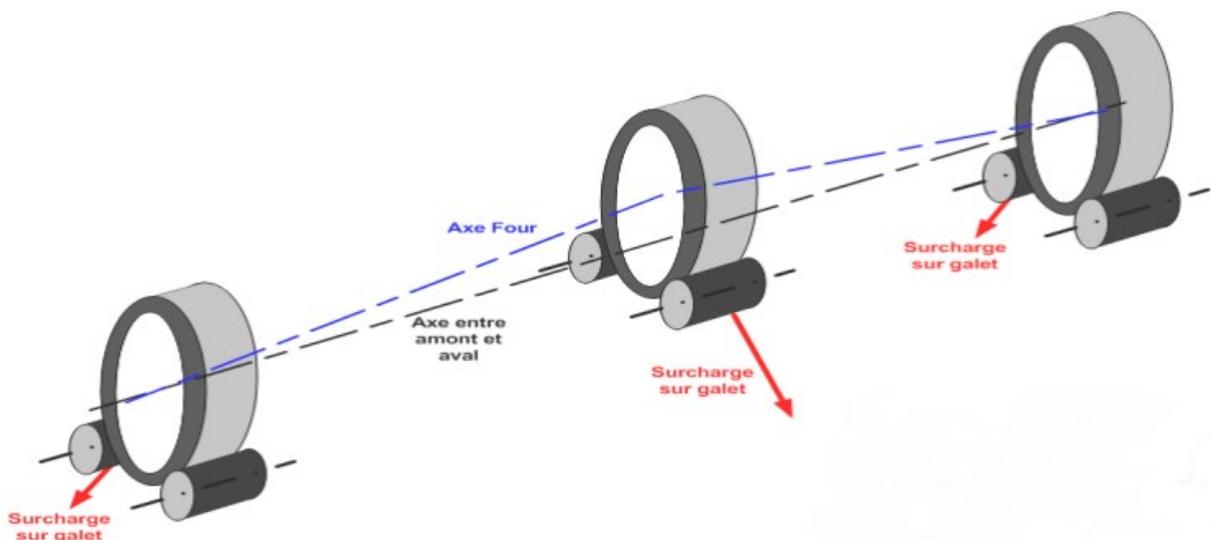


Fig . Variation de l'axe de rotation.

Si le vilebrequin est dû à un chauffage inégal du corps de four, le vilebrequin est appelé « vilebrequin thermique ».

Lorsque la déformation est permanente, le vilebrequin est appelé « vilebrequin mécanique ». Ce type de vilebrequin peut être provoqué, par exemple, par le soudage de viroles mal alignées.

### Annexe 03

#### Mesure de l'ovalisation

La mesure de la déformation de la virole du four se fait par un appareil spécial comportant un système de mesure pour relever les différents points de la virole, un PC portable pour l'acquisition des données et un trépied qui sert de support. Pour prendre les mesures, il est primordial de se situer à tout instant vis-à-vis du four, on doit alors définir un repère global. Le rôle de ce repère est de donner la position de la station de mesure par rapport au centre des noies ring du joint, utilisé comme étant le centre de la virole.

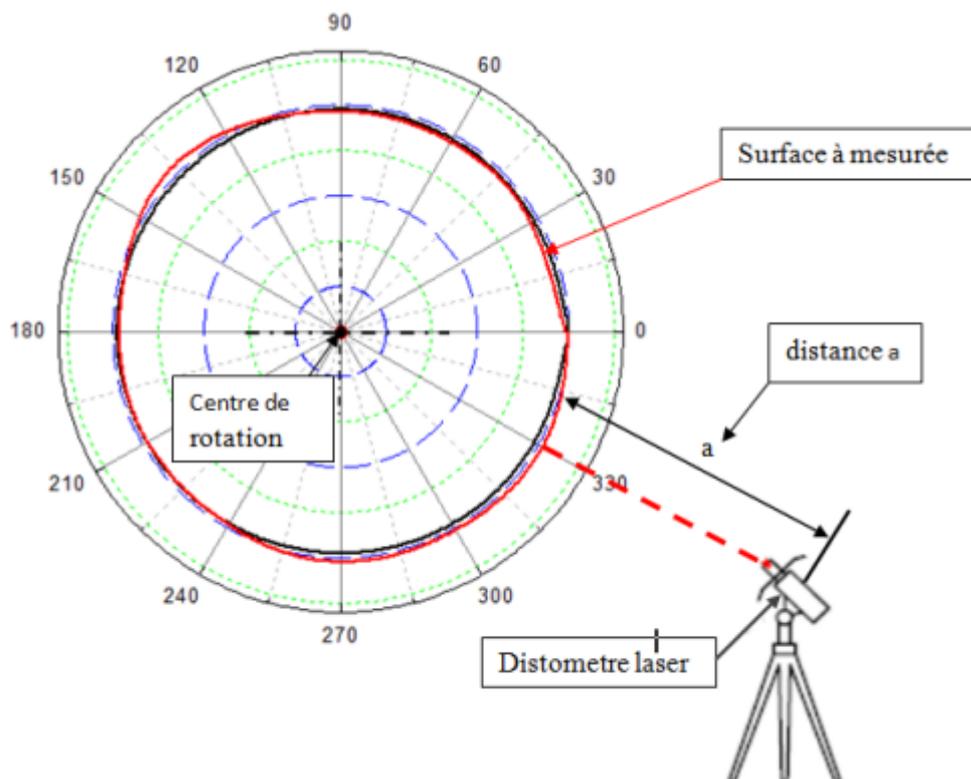


Fig.Station de mesure.

## Annexe 04

**Tableau. Les parametre A et B**

$\beta$	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B
0,05	2,43290E+18	9,03280E+23	1,75	0,89062	0,52523	3,45	0,89907	0,28822	5,15	0,91974	0,20505
0,1	3,62880E+06	1,55977E+09	1,8	0,88929	0,51123	3,5	0,89975	0,28473	5,2	0,92025	0,20336
0,15	2,59357E+03	1,21993E+05	1,85	0,88821	0,49811	3,55	0,90043	0,28133	5,25	0,92075	0,20170
0,2	1,20000E+02	1,90116E+03	1,9	0,88736	0,48579	3,6	0,90111	0,27802	5,3	0,92125	0,20006
0,25	2,40000E+01	1,99359E+02	1,95	0,88671	0,47419	3,65	0,90178	0,27479	5,35	0,92175	0,19846
0,3	9,26053E+00	5,00780E+01	2	0,88623	0,46325	3,7	0,90245	0,27164	5,4	0,92224	0,19688
0,35	5,02914E+00	1,99761E+01	2,05	0,88589	0,45291	3,75	0,90312	0,26857	5,45	0,92272	0,19532
0,4	3,32335E+00	1,04382E+01	2,1	0,88569	0,44310	3,8	0,90379	0,26558	5,5	0,92320	0,19379
0,45	2,47859E+00	6,46009E+00	2,15	0,88561	0,43380	3,85	0,90445	0,26266	5,55	0,92368	0,19229
0,5	2,00000E+00	4,47214E+00	2,2	0,88562	0,42495	3,9	0,90510	0,25980	5,6	0,92414	0,19081
0,55	1,70243E+00	3,34530E+00	2,25	0,88573	0,41652	3,95	0,90576	0,25701	5,65	0,92461	0,18935
0,6	1,50458E+00	2,64514E+00	2,3	0,88591	0,40848	4	0,90640	0,25429	5,7	0,92507	0,18792
0,65	1,36627E+00	2,17887E+00	2,35	0,88617	0,40080	4,05	0,90704	0,25162	5,75	0,92552	0,18651
0,7	1,26582E+00	1,85117E+00	2,4	0,88648	0,39345	4,1	0,90768	0,24902	5,8	0,92597	0,18512
0,75	1,19064	1,61077	2,45	0,88685	0,38642	4,15	0,90831	0,24647	5,85	0,92641	0,18375
0,8	1,13300	1,42816	2,5	0,88726	0,37967	4,2	0,90894	0,24398	5,9	0,92685	0,18240
0,85	1,08796	1,28542	2,55	0,88772	0,37319	4,25	0,90956	0,24154	5,95	0,92729	0,18107
0,9	1,05218	1,17111	2,6	0,88821	0,36696	4,3	0,91017	0,23915	6	0,92772	0,17977
0,95	1,02341	1,07769	2,65	0,88873	0,36097	4,35	0,91078	0,23682	6,05	0,92815	0,17848
1	1,00000	1,00000	2,7	0,88928	0,35520	4,4	0,91138	0,23453	6,1	0,92857	0,17721
1,05	0,98079	0,93440	2,75	0,88986	0,34963	4,45	0,91198	0,23229	6,15	0,92898	0,17596
1,1	0,96491	0,87828	2,8	0,89045	0,34427	4,5	0,91257	0,23009	6,2	0,92940	0,17473
1,15	0,95170	0,82971	2,85	0,89106	0,33909	4,55	0,91316	0,22793	6,25	0,92980	0,17351
1,2	0,94066	0,78724	2,9	0,89169	0,33408	4,6	0,91374	0,22582	6,3	0,93021	0,17232
1,25	0,93138	0,74977	2,95	0,89233	0,32924	4,65	0,91431	0,22375	6,35	0,93061	0,17113
1,3	0,92358	0,71644	3	0,89298	0,32455	4,7	0,91488	0,22172	6,4	0,93100	0,16997
1,35	0,91699	0,68657	3,05	0,89364	0,32001	4,75	0,91544	0,21973	6,45	0,93139	0,16882
1,4	0,91142	0,65964	3,1	0,89431	0,31561	4,8	0,91600	0,21778	6,5	0,93178	0,16769
1,45	0,90672	0,63522	3,15	0,89498	0,31135	4,85	0,91655	0,21586	6,55	0,93216	0,16657
1,5	0,90275	0,61294	3,2	0,89565	0,30721	4,9	0,91710	0,21397	6,6	0,93254	0,16547
1,55	0,89939	0,59252	3,25	0,89633	0,30319	4,95	0,91764	0,21212	6,65	0,93292	0,16439
1,6	0,89657	0,57372	3,3	0,89702	0,29929	5	0,91817	0,21031	6,7	0,93329	0,16332
1,65	0,89421	0,55635	3,35	0,89770	0,29550	5,05	0,91870	0,20853	6,75	0,93366	0,16226
1,7	0,89224	0,54024	3,4	0,89838	0,29181	5,1	0,91922	0,20677	6,8	0,93402	0,16121