



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCCEN
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de Magister

Spécialité : Génie Mécanique

Option :

Endommagement et fiabilité mécanique

Présenté par : Boumeddane Abdelkrim

THEME

**IMPACT DE LA FIABILITÉ SUR LES
ÉQUIPEMENTS INDUSTRIELS
(ÉTUDE DE CAS AU NIVEAU DENITEX)**

Soutenu : le mois de 2012

Devant le jury :

Président :	Mr. BOURDIME Abdelghafour	MCA	UABB-Tlemcen
Examineur :	Mr. HAMOU Said	Pr	UABB-Tlemcen
Examineur :	Mr. BOUCHAME Belhadj	MCA	UDL Sidi Belabbès
Encadreur :	Mr. KERBOUA Bachir	MCA	UABB-Tlemcen

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2011 - 2012

DÉDICACES

Je dédie ce travail à :

- ❖ *Ma femme et mes filles pour leur soutien et leur encouragement, qu'elles trouvent l'expression de mon grand amour.*
- ❖ *À mon fils Mohamed Younes né le 02/04/2010.*
- ❖ *À ma petite fille Amina née le 03/08/2011.*
- ❖ *À tous mes amis de la classe 3ASTM du lycée technique commandant Farradj "Tlemcen".Promotion 1978*

hadj Abdelkrim

REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie mon Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et le courage de reprendre les études à l'âge de cinquante ans et de réaliser ce modeste travail.

Je remercie très sincèrement Monsieur Kerboua Bachir maître de conférences, d'avoir proposé et encadré thèse, je tiens à lui exprimer mes profonds respects et mes respectueuses gratitudees pour sa patience, ses orientations et son suivi durant l'élaboration de ce Magister

Mes vifs remerciements aux membres du jury :

Mr : Mr. BOURDIME Abdelghafour

Mr : Mr. ADDA BEDIA El abbès

Mr : Mr. BOUCHAME Belhadj

Mr : Mr. ALAA Châteauneuf

Je remercie également tous mes enseignants de la première année du Magister.

hadj.Abelkrim

RESUME

Notre travail est consacré à l'étude théorique et pratique de la fiabilité, en l'occurrence la fiabilité industrielle basée sur le retour d'expérience et sur les modèles de fiabilité.

Car l'étude de fiabilité d'un équipement permet de le bien connaître durant sa période de fonctionnement et d'optimiser son exploitation afin d'augmenter la production.

Dans notre projet nous avons cité les lois de probabilité et les méthodes d'analyse (AMDEC et ABC) utilisées en fiabilité et en particulier la loi exponentielle et la loi de "Weibull".

Afin de concrétiser notre étude, nous avons défini les méthodes graphiques et analytiques pour déterminer les paramètres de fiabilité, qui sont utilisés pour l'évaluation du taux de défaillance et la période optimale de la maintenance préventive des équipements en exploitation.

Enfin, nous avons achevé notre mémoire par une étude de cas pratique, en choisissant les organes sensibles des équipements stratégiques de la chaufferie « Denitex.Sebdou ». Cette étude nous a permis de trouver des résultats en conformité avec la réalité pratique au niveau de l'entreprise.

Mots clés : Fiabilité, Probabilité ; Défaillance, Taux de défaillance, Optimisation

ABSTRACT

Our work is devoted to theoretical and practical study of reliability, namely reliability based on industrial experience feedback. Because the reliability study of equipment used to know well during its period of operation. In our project we cited the laws of probability and methods of analysis (AMDEC and ABC) used in reliability and especially the exponential and that of "Weibull".

And to conduct our study, we defined the analytical and graphical methods to determine the parameters of reliability, used for the evaluation of failure rates and the optimum preventive maintenance.

Finally we finished our thesis by a case study practice by choosing the sensitive organs of strategic equipment of the boiler room "Denitex.Sebdou". The study has allowed us to implement the reliability and measure its impact on industrial equipment.

Keywords: Reliability, Probability, failure, failure rate, Optimization

المخلص

نتناول في هذه الدراسة موضوع "النجاعة" من الناحية النظرية و التطبيقية وقد خصت " النجاعة " الصناعية المعتمدة على التجربة الميدانية.

إن دراسة "النجاعة" الخاصة بتجهيز بعينه تكمن في التعرف عليه خلال مدة تشغيله. ولقد تطرقنا أيضا في هذا المشروع إلى قوانين الاحتمالات وطرق التحليل المستعملة (ABC et AMDEC) في مجال "النجاعة" لاسيما قانون الأسية وقانون "weibull".

ولانجاز دراستنا عرفنا الطرق البيانية و التحليلية قصد تحديد معايير "النجاعة" المستعملة لمعرفة نسبة الخلل والمدة المثلى للصيانة الصناعية الوقائية.

وختمنا بحثنا بدراسة حالة ميدانية حيث قمنا باختيار الأعضاء الحساسة للتجهيزات الإستراتيجية للتسخين بمؤسسة "دنيتركس (Denitex) –سبدو" x ومن خلالها تمكنا من تطبيق "النجاعة" وقياس أثرها على التجهيزات الصناعية.

الكلمات المفتاحية : النجاعة – الاحتمال – الخلل – نسبة الخلل – الحد الأمثل

LISTES DES FIGURES

	Page
Figure 1.1. : Courbes des Fonctions de probabilité.....	08
Figure 1.2. : Courbes de la Fonction fiabilité.....	09
Figure1.3. : Courbe en baignoire du taux de défaillance.....	11
Figure 1.4. : Courbe du taux de défaillance en mécanique.....	12
Figure 1.5. : Écart entre la courbe réelle et théorique.....	14
Figure 2.1. : Courbe de dégradation du paramètre d'usure.....	20
Figure 3.1. : Propriété sans mémoire de la loi exponentielle.....	28
Figure 3.2. : Représentation graphique de la loi exponentielle.....	29
Figure 3.3. : Droite de linéarisation (méthode de Newton).....	30
Figure 3.4. : Droite de linéarisation par la méthode des moindres carrés.....	31
Figure 3.5. : Taux d'avarie de la loi de Duane	33
Figure 3.6. : Influence du facteur de forme β sur de densité probabilité.....	35
Figure3.7. : Influence du facteur de forme β sur la courbe de la fiabilité	36
Figure 3.8. : Influence du facteur de forme β sur la courbe du taux de défaillance	36
Figure 3.9. : Courbe de la densité en fonction du paramètre de position γ	37
Figure 3.10. : Représentation en échelle logarithmique.....	39
Figure 3.11. : Changement de graduation des abscisses.....	40
Figure 3.12. : Changement de graduation des ordonnées.....	40
Figure 3.13. : Redressement de la courbe convexe sur papier « Weibull ».....	41
Figure 3.14. : Détermination graphique du point ($\gamma= 0.001$) sur papier « Weibull »	41
Figure 3.15. : Détermination graphique sur papier à graduation linéaire	42
Figure 3.16. : Choix des trois points (sur une échelle linéaire : $d_1= d_2= \Delta$	42
Figure 3.17. : Redressement de la courbe concave ($\gamma < 0$)	43
Figure 3.18. : Choix des trois points ($a_1 a_2 = a_2 a_3$).....	43
Figure 3.19. : Conception du papier d'Allan plait.....	45
Figure 3.20. : Régression des nuages de points en une droite (D).....	46
Figure 4.1. : Système en série.....	51
Figure 4.2. : Système en parallèle.....	51
Figure 4.3. : Système parallèle-série.....	52
Figure 4.4. : Système série parallèle.....	53
Figure 4.5. : Système quelconque.....	53
Figure 4.6. : Système obtenu (avec S_3 fonctionne).....	54
Figure 4.7. : Système (S_3 ne fonctionne pas).....	54
Figure 4.8. : Durée de vie d'un système parallèle.....	56
Figure5.1. : Remplacement systématique.....	59
Figure5.2. : Remplacement à âge fixe.....	59
Figure 5.3. : Courbes représentantes de " y_1 " et " y_2 "	61
Figure 5.4. : Courbe représentante de la fonction C (t)	62
Figure 5.5. : L'allure de la courbe y(t)	62
Figure 5.6. : L'allure courbe de C(t) à âge fixe.....	63

Figure 5.6. : Abaque de Kelly.....	68
Figure 6.1. : Découpage de l'entreprise.....	72
Figure 6.2. : Découpage de l'atelier chaufferie.....	72
Figure 6.3. : Découpage fonctionnel de la chaudière à vapeur.....	73
Figure 6.4. : Découpage fonctionnel de la motopompe d'alimentation.....	74
Figure 6.5. : Décomposition fonctionnelle du brûleur à gaz.....	75
Figure 6.6. : Courbe ABC.....	79
Figure 6.7. : Détermination graphique des paramètres de fiabilité.....	85
Figure 6.8. : Courbes des fiabilités estimée et théorique du roulement à bille de la Pompe.....	87
Figure 6.9. : Taux de défaillance du roulement de la pompe.....	87
Figure 6.10. : Détermination graphique des paramètres de fiabilité.....	89
Figure 6.11. : Courbes des fiabilités estimée et théorique.....	90
Figure 6.12. :Taux de défaillance du joint torique.....	90
Figure 6.13 : Détermination graphique des paramètres de fiabilité.....	92
Figure 6.14. : Courbes des fiabilités estimée et théorique.....	93
Figure 6.15. : Représentation des fonctions de répartition estimée et théorique.....	94
Figure 6.16. :Taux de défaillance de la garniture mécanique.....	94
Figure 6.17. : Schéma bloc de principe de production de la vapeur.....	96
Figure 6.18. : Schéma bloc de principe de chauffage de l'huile thermo fluide.....	98

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1. Valeurs de "Kolmogorov Smirnov"	15
Tableau 2.1. Causes des différentes défaillances et leurs effets	21
Tableau 2.2. Indices de criticité	22
Tableau 3.1. Tableau de présentation des valeurs (x_i, y_i)	31
Tableau N°2. Valeurs des x et y	61
Tableau 5.1. Variation de la fonction $y_1(x)$	61
Tableau 5.2. Variation de la fonction C (t)	62
Tableau 5.3. Variation de la fonction y(t) pour $\beta < 1$	65
Tableau 5.4. Variation de la fonction y(t) pour $\beta > 1$	65
Tableau 6.1. Capacité de production (Denitex)	70
Tableau 6.2. Tableau récapitulatif des défaillances	76
Tableau 6.3. Tableau récapitulatif des défaillances	77
Tableau 6.4. Tableau récapitulatif des défaillances	77
Tableau 6.5. Tableau récapitulatif des défaillances	77
Tableau 6.6. Tableau récapitulatif des défaillances	78
Tableau 6.7. Tableau de classement des équipements	78
Tableau 6.8. AMDEC de la pompe d'alimentation	80
Tableau 6.9. AMDEC de la pompe de circulation d'huile thermofluide	82
Tableau 6.10. AMDEC du compresseur à deux étages	81
Tableau 6.11. Préparation des données historiques du roulement à billes	83
Tableau 6.12. Tableau des résultats théoriques	86
Tableau 6.13. Préparation des données et traitement des résultats	88
Tableau 6.14. Préparation des données et traitement des résultats	91

NOTATIONS UTILISÉES

$\{A\}$: Vecteur des résultats à déterminer par la méthode des moindres carrés
A_1	: Axe horizontal gradué en (t) [h]
A	: Paramètre de la loi exponentielle
a'	: Axe horizontal gradué en $\ln(t)$ du papier "d'Allen Plait"
a_1	: 1 ^{er} point choisi dans le cas $\gamma \neq 0$
a_2	: 2 ^{ème} point choisi dans le cas $\gamma \neq 0$
a_3	: 3 ^{ème} point choisi dans le cas $\gamma \neq 0$
AMDEC	: Analyse des modes de défaillances et études des criticités
ABC	: Méthode de " Pareto" d'analyse et de sélection
B1	: Axe vertical sur papier "d'Allen Plait" [%]
B	: Paramètre de la loi exponentielle
b'	: Axe vertical pour déterminer(β) sur papier "d'Allen Plait"
C(t)	: Coût en fonction du temps [DA/h]
C_1	: Coût d'intervention curative [DA]
C_2	: Coût de défaillance [DA]
c_i	: Inverse du taux de criticité économique
D	: Droite de régression des nuages de point
Dé	: Indice de détection(AMDEC)
$D_{N,\alpha}$: Coefficient de "Kolmogorov-Smirnov"
E(t)	: Espérance mathématique de la variable aléatoire T
ET	: Porte logique
ES	: Porte logique (sortie)
« ei »	: Erreur de modélisation dans la méthode des moindres carrés
Fr	: Indice de fréquence (AMDEC)
F (t)	: Fonction de répartition [%]
f(t)	: Fonction de distribution [%]
$f^*(x)$: Fonction proposée dans la méthode des moindres carrés
Gr	: Indice de gravité (AMDEC)
IPR	: Indice de priorité de risque (AMDEC)
K	: Constante représentant la complexité du matériel (loi de Duane)
K	: Nombre d'échantillons ou de groupes
MTBF	: Moyenne des temps entre défaillances[h]
m	: Indice
m^*	: Représente la pente de la droite $y = \beta X - \beta \log \eta$
N	: Nombre d'éléments à l'instant
N_0	: Nombre d'éléments à l'instant (t_0)
N°	: Numéro d'ordre dans la méthode « ABC»
n	: Taille de l'échantillon
OU	: Fonction logique
P(E)	: Probabilité d'avoir l'événement E [%]

p	: Pente de la tangente à la courbe($R(t) = \exp(-\lambda t)$)
R(t)	: Fiabilité au temps t [%]
r	: Taux de criticité économique
rt	: Retrait dans le cas des rangs corrigés
S	: Désigne le système
Se	: Indice de sécurité
Si	: Désigne le sous- système
T	: Variable aléatoire « durée de vie » [h]
Tr	: Période de remplacement [h]
T _C	: Temps cumulé [h]
T _s	: Durée de vie du système[h]
TBF	: Temps de bon fonctionnement avant la première défaillance[h]
t	: L'instant(t)
te	: Période optimale économique[h]
t _M	: Valeur de (t) abscisse du point maximum de la courbe y(t).
U	: Union fonction logique
[V]	: Matrice à calculer avec la fonction "f*" dans la méthode des moindres carrés
x _i	: Les mesures données
x ₀	: Abscisse de l'extremum de y ₁ (x)
x1	: Changement de variable $x1 = (\frac{t}{\eta})^\beta$
{Y}	: Vecteur d'erreur dans la méthode des moindres carrés
y	: Ordonnée sur la droite de régression
y _i	: Les valeurs données
\tilde{y}_i	: Ordonnée sur la droite d'ajustement
Z	: Quantité scalaire utilisée dans la méthode des moindres carrés
α (alpha)	: Seuil de risque [%]
α _c	: Paramètre de conception de l'équipement (loi de Duane)
β (béta)	: Paramètre de forme de la loi de "weibull"
η (êta)	: Paramètre d'échelle de la loi de "weibull"[h]
θ (téta)	: Période de temps [h]
λ(lambda)	: Taux de défaillance [nbr/h]
λ _c	: Taux de défaillance cumulé [nbr/h]
γ (gamma)	: Paramètre de position de la loi de "weibull"[h]
$\prod_{i=1}^n$ (pi majuscule)	: Produit de i=1 à n
σ(sigma minuscule)	: Écart type
$\sum_{i=1}^n$ (sigma majusc)	: Somme de i=1 à n

SOMMAIRE

	page
Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VI
Nomenclature.....	VII
Sommaire.....	IX

Introduction Générale et Etude Bibliographique.....	01
--	-----------

Chapitre 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LA FIABILITÉ

1.1. Introduction.....	06
1.2. Définition selon la norme AFNOR X 06-501.....	07
1.3. Fiabilité et qualité.....	07
1.4. Expressions mathématiques de la fiabilité.....	08
1.4.1. Fonction de distribution et de répartition.....	08
1.5. Estimation de la fiabilité.....	09
1.5.1. Taux de défaillance pour des composants mécaniques.....	11
1.6. Expression générale de la fiabilité.....	12
1.7. Expression de la MTBF.....	12
1.8. Essais de fiabilité.....	13
1.8.1. Essais accélérés.....	13
1.8.2. Définition des critères d'essai.....	13
1.8.3. Définition des conditions d'essai.....	13
1.9. Différentes formes d'essais.....	13
1.10. Test dans le domaine de la fiabilité.....	14
1.11. Tests paramétriques.....	16
1.12. Conclusion.....	16

Chapitre 2: LES DIFFÉRENTS MODES DE DÉFAILLANCES

2.1. Les différents modes de défaillances.....	18
2.2. Types de mécanismes de défaillances.....	18
2.3. Traitement d'une défaillance progressive.....	20
2.4. Analyse des défaillances.....	20
2.5. Effets des défaillances.....	21
2.5.1. Pour la sécurité.....	21
2.5.2. Pour la fiabilité.....	21
2.5.3. Pour la disponibilité.....	22
2.6. Arbre des défaillances.....	23
2.6.1. Objectifs.....	23
2.6.2. Principe.....	23
2.6.3. Construction de l'arborescence.....	24
2.6.4. Analyse qualitative.....	24

2.6.5. Méthode des coupes minimales.....	24
2.6.6. Quantification des coupes.....	24
2.6.6.1. Quantification au niveau événement redouté.....	24
2.6.6.2. Exploitation de l'arbre.....	25
2.7. Conclusion.....	26

Chapitre 3 : ÉTUDE ET ANALYSE DES LOIS DE LA FIABILITÉ

3.1. Introduction.....	28
3.1.1. Loi exponentielle.....	28
3.1.2. Représentation graphique de λ	29
3.1.3. Méthode analytique.....	30
3.1.4. Méthode des moindres carrés.....	31
3.1.5. Forme matricielle.....	32
3.2. Loi de Duane.....	33
3.3. La loi normale (Laplace-Gauss).....	34
3.4. Analyse de la fiabilité à partir du modèle de Weibull.....	34
3.4.1. Distribution de Weibull.....	34
3.4.2. Domaine d'utilisation.....	35
3.4.3. Fonction de distribution ($\gamma=0, \eta=1$).....	35
3.4.4. Courbes représentatives de $R(t), \lambda(t)$ pour une loi de Weibull ($\gamma=0, \eta=1$).....	36
3.4.5. Signification des paramètres.....	37
3.4.6. Expressions mathématiques.....	37
3.4.7. Etude du taux de défaillance.....	38
3.5. Détermination graphique des paramètres.....	38
3.5.1. Linéarisation de la loi de Weibull.....	38
3.6. Utilisation du papier graphique d'Allan plait.....	44
3.7. Détermination graphique des paramètres (η, β, γ).....	45
3.8. Méthode analytique pour déterminer les paramètres de Weibull.....	46
3.8.1. La méthode des moindres carrés.....	47
3.9. Conclusion.....	47

Chapitre 4 : FIABILITÉ DES SYSTÈMES : MODÉLISATION DE LA FIABILITÉ DES ÉQUIPEMENTS

4.1. Introduction.....	50
4.1.1. Fiabilité des systèmes.....	50
4.1.2. Système en série.....	50
4.1.3. Système en parallèle.....	51
4.1.4. Système à configuration (parallèle –série).....	52
4.1.5. Cas d'un système série- parallèle.....	53
4.1.6. Système quelconque.....	53
4.2 . Loi de durée de vie d'un système.....	54
4.2.1. Cas des défaillances primaires (système série).....	54
4.2.2. Cas de(n) sous systèmes.....	55
4.2.3. Système parallèle.....	55
4.2.3.1. Cas particulier $\lambda_i = \lambda \forall i = 1, \dots, n$	55
4.2.3.2. Cas d'une loi de "Weibull".....	55
4.3. Conclusion.....	58

Chapitre 5 : OPTIMISATION

5.1. Introduction	58
5.1.1. Les coûts de maintenance.....	58
5.1.2. Remplacement systématique au bout de temps T.....	58
5.1.3. Remplacement systématique à âge fixe du dispositif.....	59
5.2. Optimisation de remplacement systématique (1^{er} cas)	60
5.2.1. Etude de la fonction y(x).....	60
5.3. Optimisation du coût ($\gamma > 0$)	62
5.4. Cas de Remplacement à âge fixe	64
5.5. Utilisation de l'abaque de Kelly	67
5.6. Conclusion	68

Chapitre 6 : ÉTUDE DE CAS AU NIVEAU DE L'ENTREPRISE DENITEX

6.1. Introduction	70
6.2. Présentation de l'entreprise "Denitex"	70
6.3. Historique de l'entreprise	70
6.4. Détermination de la fiabilité à partir des historiques	71
6.4.1. Exploitation des historiques.....	71
6.5. Le principe de découpage de l'entreprise	72
6.6. Analyse du système	73
6.7. Décomposition du système d'alimentation d'eau	74
6.8. Décomposition du bruleur à gaz	74
6.9. Classification du matériel	75
6.9.1. Critères de classement.....	75
6.10. Application	75
6.10.1. Collecte des données.....	75
6.11. Analyse des données	76
6.11.1. Sélection de l'équipement.....	76
6.11.2. Principe de la méthode « ABC ».....	79
6.11.2.1. Tracé de la courbe ABC.....	79
6.12. Choix des organes	80
6.12.1. AMDEC de la pompe d'alimentation.....	80
6.12.2. AMDEC de la pompe de circulation de l'huile thermofluide.....	81
6.12.3. AMDEC du compresseur à deux étages.....	82
6.13. Détermination des paramètres de fiabilité des organes sélectionnés	82
6.13.1. Cas du roulement de la pompe d'alimentation.....	82
6.13.2. Préparation des données historiques.....	83
6.13.3. Analyse des résultats théoriques.....	86
6.13.4. Application du test de corrélation.....	86
6.14. Cas du joint torique du compresseur à deux étages	88
6.14.1. Préparation des données historiques et résultats théoriques.....	88

SOMMAIRE

XI

6.15. Cas de la garniture mécanique de la pompe de circulation de l'huile thermofluide.....	91
6.15.1. Préparation des données et traitement des résultats théoriques.....	91
6.16. Détermination de la période optimale.....	95
6.16.1. Calculs des coûts.....	95
6.16.2. Etude de cas de la durée de vie optimale du roulement à bille.....	95
6.16.3. Calcul des coûts.....	95
6.16.3.1. Utilisation de la méthode analytique (remplacement systématique).....	97
6.16.4. Cas de la garniture mécanique de la pompe de circulation.....	97
6.16.4.1 Utilisation de la méthode analytique (remplacement systématique)	98
6.17. Analyse des résultats trouvés.....	99
6.18. Conclusion finale.....	99
Conclusion générale et perspective.....	101
Bibliographie.....	102

XII

Introduction Générale et Étude Bibliographique

A travers l'histoire, l'homme a sans doute voulu construire des choses fiables, mais les résultats et les évaluations quantifiées ont vu le jour récemment. Les premières apparitions sont dans des grands systèmes militaires, spatial, nucléaire, puis l'automobile et les biens d'équipement. On peut citer que dès 1906 les constructeurs américains de tubes à vides électroniques se sont préoccupés de leur fiabilité. A cette même époque, les premières études sur les roulements à billes sont apparues. Puis plus tard Waloddi Weibull proposa son fameux modèle en 1937, Il écrit un article sur ce sujet en 1951 et l'US force reconnaît son mérite en 1975. Elle prédit à son modèle un grand succès, ce qui fut confirmé par la suite.

Après la seconde guerre mondiale, le département américain de la défense initie le développement d'études de fiabilité sur les tubes électroniques. En 1961, Bell telephon développe les arbres de défaillances, le groupe AGREE (Advising Group on reability of electronic equipement) s'intéresse aux composants électroniques. La fiabilité par logiciel voie le jour un peu plus tard vers les années1980.

Notons également qu'il y a plusieurs manifestations dans le domaine du génie mécanique qui consacre une rubrique à la fiabilité. Cette fiabilité est défini par l'ingénieur comme l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données et pour une période de temps donnée. Par contre le mathématicien transforme cette définition en parlant de probabilité d'accomplir une fonction requise.

Certains travaux concernant la fiabilité ont été développé en utilisant surtout la loi exponentielle pour des applications dans le domaine de la maintenance tel que l'ouvrage de Zwinglestein G.1996 « La maintenance basée sur la fiabilité, guide pratique de la RCM. 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 "RCM" (Reabilitycentered maintenance), elle est aujourd'hui utilisée par toutes les compagnies aériennes et dans les autres secteurs en quête de compétitivité. L'auteur précise l'importance des rôles de l'analyse fonctionnelle et du retour d'expérience.

✓ Les travaux de Patrick Lyonnet et son ouvrage « Ingénierie de la fiabilité » apparue en 2006, il fait le point sur les techniques de fiabilité des composants et systèmes (mécaniques, électromécaniques, informatiques) et sur leur mise en œuvre au cours du processus industriel. Les diverses formes de fiabilité sont développées : prévisionnelle,

opérationnelle et expérimentale, ainsi que leur adéquation aux divers cas rencontrés. L'aspect pratique y est, sans sacrifier les apports théoriques permettant de bien appréhender les concepts de la fiabilité.

✓ Les travaux de "JEAN BUFFERNE", intitulé "fiabilisation des équipements" (année 2008). Il met de façon accessible cet incontournable outil mathématique (fiabilité) à la disposition de ceux qui participent à l'élaboration des politiques de maintenance. Cet ouvrage s'inscrit dans le domaine de la maintenance industrielle, et il traite les bases essentielles de la fiabilité. L'auteur a traité un cas pratique de la détermination des paramètres de fiabilité des arbres de la poinçonneuse en utilisant le modèle de "Weibull" ($\gamma=0$) et en même temps il a utilisé des coûts de maintenance pour la détermination de la période de remplacement systématique. Les données relevées à partir des dossiers historiques bien renseignés de l'équipement en question avec les valeurs de « TBF », ce qui a simplifié la détermination des paramètres de fiabilité ainsi que la recherche de la période optimale de maintenance préventive.

✓ Les travaux de thèse de doctorat de Tebbi Ouahiba (année 2005) ayant pour thème « Estimation des lois de fiabilité en mécanique par des essais accélérés ». Dans ce travail, elle a estimé la fiabilité des systèmes soumis à des dégradations mécaniques dans les conditions normales d'utilisation et pour la première fois elle a démontré des modèles SAV (standard de vie accéléré) avec des données réelles des plans d'expérience dans le domaine mécanique.

✓ Les travaux publiés par les deux chercheurs Brahim Herrou et Mohamed El Ghorba, qui ont traité avec la méthode « AMDEC » l'optimisation de la maintenance d'un moto-compresseur et nous avons constaté que la fiabilité n'était pas abordée dans leur étude. Leur objectif est de réduire le temps d'indisponibilité dès la conception tout en identifiant les éléments les plus critiques de l'équipement, les deux auteurs ont axés leur travail sur le taux de criticité.

✓ Les travaux de Mathieu Glade (année 2005) sur « la modélisation des coûts de cycle de vie : prévision des coûts de maintenance et la fiabilité. Application à l'aéronautique », l'auteur traite la modélisation des éléments mécaniques d'hélicoptère en utilisant la méthode des réseaux de neurones.

Nous remarquons que les références citées traitent de la fiabilité des composants électroniques, électromécaniques, les systèmes à risques et un peu moins les secteurs de production manufacturière.

Dans la plupart des cas, une entreprise manufacturière de processus n'a pas les contraintes de fiabilité que peuvent avoir les sociétés d'aviation et les producteurs d'énergie nucléaire. La sécurité du grand public n'est pas en cause et un optimum économique de la sûreté de fonctionnement de l'outil de production est recherché plutôt qu'une fiabilité maximale.

A l'heure actuelle, la fiabilité n'est pas réservée aux industries de pointes. Des industries aéronautiques, nucléaires, spatiales, industries de l'automobile, de l'électroménager, du jouet et tout fabricant, doit prendre en compte la fiabilité de son produit, de sa conception à son exploitation. De plus, la qualité du produit fabriqué est elle-même tributaire de la fiabilité des équipements et des outillages avec lesquels il a été fabriqué.

En effet, la connaissance, des points faibles des équipements en service, acquise sur le terrain par le service maintenance, constitue une expérience précieuse lors de la conception ou du choix des équipements futurs. C'est en particulier ce qui prévoit la méthode de T.P.M. (maintenance productive totale), où l'on centralise dans une banque de données toutes les constatations faites concernant les défaillances, les anomalies, et les difficultés rencontrées.

La fiabilité intrinsèque dépend essentiellement de la qualité de la conception de l'équipement. Il faut connaître les caractéristiques de fiabilité des éléments critiques des équipements clés pour l'optimisation de la politique de la maintenance quels que soient les objectifs généraux retenus.

Le maintenancier est un gestionnaire des activités techniques et administratives (c'est un homme du terrain). Le fiabiliste est un scientifique concepteur des systèmes et des modèles mathématiques résultant des données expérimentales ou des données réelles. Le premier a toujours trop de pannes, le second n'en a jamais assez dans son retour d'expérience. Le maintenancier est spécialement concerné par la « disponibilité opérationnelle » des équipements; le fiabiliste est concerné par « la fiabilité prévisionnelle » des composants et systèmes. Pour combler le fossé qui les sépare trop souvent, on met à la disposition du premier quelques outils du second. Ces outils sont applicables sur le terrain pour justifier le bien fondé de leur mise en application.

Le sujet auquel nous nous intéressons dans ce mémoire de Magister « Impact de la fiabilité sur les équipements, étude de cas au niveau de « Denitex » consiste à la détermination des paramètres de fiabilité en utilisant le modèle de "Weibull". Les organes étudiés sont

sélectionnés par des méthodes d'analyse « ABC » et « AMDEC » à partir des dossiers historiques. Grâce aux paramètres de fiabilité en particulier, le paramètre de forme (β) et les coûts de maintenance directs et les coûts de défaillance, on essaie d'évaluer la période optimale économique, afin de choisir la politique de la maintenance à appliquer aux équipements en exploitation. Ces paramètres sont déterminés par des méthodes graphiques (utilisation du papier "Allen Plait") et analytiques surtout par la méthode des moindres carrés, en utilisant un programme numérique en langage "Matlab". La période optimale de maintenance préventive systématique ou de remplacement à âge fixe, est déterminée grâce à deux équations mathématiques élaborées à partir de la fiabilité et les coûts de maintenance. C'est pour la première fois que de telles démonstrations mathématiques sont soulevées de façon détaillée dans ce travail de magister.

Chapitre 1

Généralités sur la Fiabilité

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA FIABILITE

1.1. Introduction

La fiabilité d'un composant exprime la probabilité qu'il fonctionne correctement sans défaillance pendant un temps déterminé dans des conditions fixées de manière précise.

La définition de la fiabilité montre bien que son domaine englobe les probabilités, donc les statistiques et les mathématiques. Il faut avoir aussi conscience qu'un phénomène de fiabilité ne peut se réduire à l'application de lois statistiques. Une étude de fiabilité nécessite obligatoirement une expertise physique des organes ou des composants étudiés et elle peut être élargie à tous ceux qui leur sont liés [1].

Apprendre la fiabilité, c'est déjà comprendre le besoin de qualité de retour d'expérience et savoir organiser la collecte des informations.

On doit aussi garder à l'esprit que les statistiques ne s'appliquent qu'à des phénomènes aléatoires donc au hasard. Or un composant ou un équipement font partie d'un système qui est soumis à un grand nombre de contraintes dont les causes appartiennent à deux familles différentes [1].

- ✓ Causes communes ou aléatoires : dues au hasard, fréquentes et à effet individuel faible, elles sont d'origines nombreuses et variées, indépendantes les unes des autres et aucune d'entre elles n'étant prépondérante tel que le spectre des contraintes subies par un composant.
- ✓ Causes spéciales : elles sont soudaines, peu fréquentes, issues d'événements passagers peu nombreux et difficilement identifiables telles que : erreurs de manipulation, mauvais montages ou réglages et pièces de mauvaise qualité.

On ne peut faire des prévisions rationnelles relatives à la fiabilité d'un équipement que s'il est dans un état stable ou sous contrôle statistique lorsqu'on a supprimé dans celui-ci toutes les causes spéciales.

1.2. Définition selon la norme AFNOR X 06-501 :

La fiabilité est la caractéristique d'un dispositif, exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation données et pour une période déterminée [2]

- **Commentaire sur les quatre concepts de la définition :**

- Probabilité : c'est le rapport : $\frac{\text{nombre de cas favorables}}{\text{nombre de cas possibles}} < 1$ dans l'hypothèse d'équiprobabilité[3].

On notera $R(t)$ la probabilité de bon fonctionnement à l'instant (t) , le symbole "R" a pour origine le mot anglais (*reliability*).

On notera $F(t)$ la fonction définie par $F(t)=1-R(t)$ probabilité complémentaire (ou événement contraire). $F(t)$ est la probabilité de défaillance à l'instant (t) .

- Fonction requise : fonction requise pour un composant de « mission » ou « service attendu » pour un système.

La définition de la fonction requise implique la définition d'un seuil d'admissibilité au-delà duquel la fonction n'est plus remplie.

- Conditions d'utilisation : définir les conditions d'usage revient à définir l'environnement du système et ses variations, ainsi que les contraintes mécaniques, chimiques vibratoires, thermiques etc.... auxquelles il est soumis. Il est évident que le même matériel soumis à deux environnements différents n'aura pas la même fiabilité.

- Période temps : c'est la définition de la durée de mission "T", mais à chaque instant (t_i) est associée une valeur de fiabilité $R(t_i)$ décroissante.

1.3. Fiabilité et qualité [4]

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

Si la qualité est prise dans le sens « qualité initiale », nous pourrions dire que la qualité initiale garantit la conformité d'un produit à ses spécifications, alors que la fiabilité mesure son aptitude à y demeurer conforme le long de sa vie utile.

La fiabilité est l'extension de la qualité initiale dans le temps. Il n'y a pas de bonne fiabilité sans bonne qualité.

1.4. Expressions mathématiques de la fiabilité

1.4.1. Fonction de distribution et de répartition

a) Notion de variable aléatoire

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

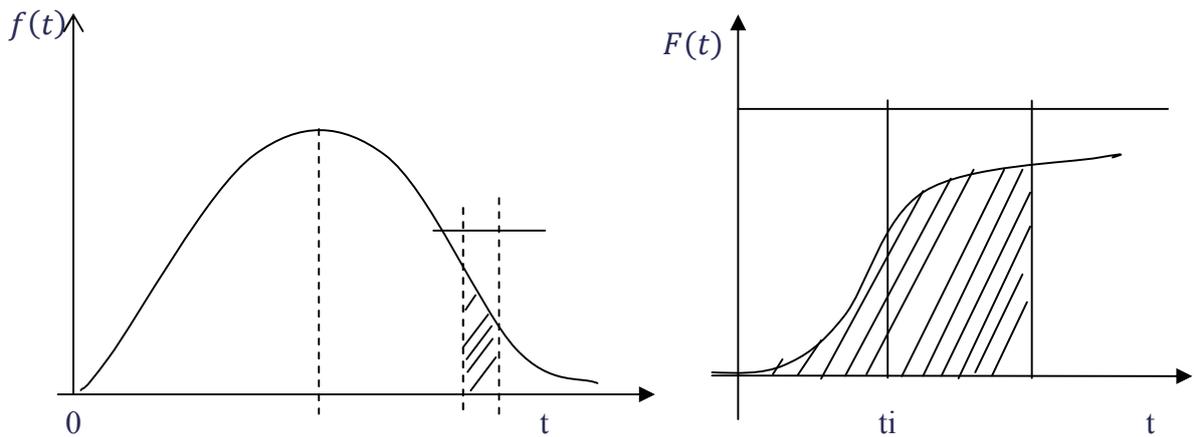
- Continue : intervalle de temps entre deux défaillances consécutives.
- Discrète : nombre de défaillances d'un composant sur un intervalle de temps.

b) Cas général d'une variable aléatoire continue

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

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lim_{dt \rightarrow \infty} \frac{prob(t < T < t+dt)}{dt} \tag{1.1}$$

La fonction de répartition "F(t)" représente la probabilité qu'un événement (une défaillance) [4] survient à l'instant (t) dans l'intervalle [0,t] ; $F(t)=P(T < t)$.



(a) Fonction de distribution

(b) Fonction de répartition

Figure 1.1. Courbes des fonctions de probabilité

c) Représentation graphique de $f(t)$ et $F(t)$.

$$f(t) dt = prob [t < T < t+dt][5]$$

$f(t)$ est une densité de probabilité.

$$F(t) = \int_{-\infty}^{t_i} f(t) dt = prob(T < t_i)$$

Si la variable aléatoire est discrète

$$F(t_n) = \sum_{i=1}^n f(t_i) = \text{prob}(T < t_n) \quad (1.2)$$

d) Application à la fiabilité

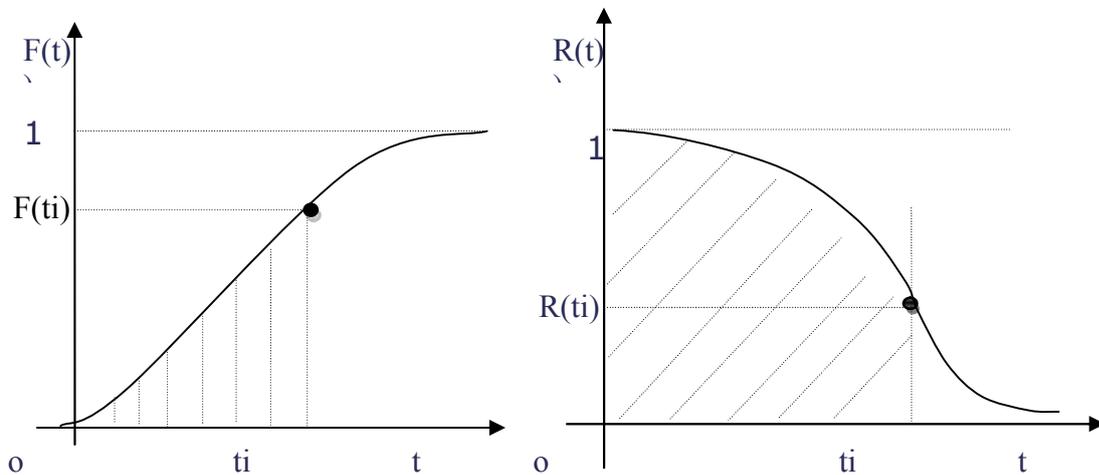
Un dispositif mis en marche pour la première fois à (t₀) tombera en panne à un instant non connu à priori "t" : date de la panne est une variable aléatoire de la fonction de répartition "F(t)".

F(t) est la probabilité d'une défaillance avant l'instant (t_i).

R(t) est la probabilité de bon fonctionnement à (t_i), c'est une fonction monotone décroissante.

R(t) et F(t) sont des probabilités complémentaires [5], telle que :

$$R(t)+F(t)= 1 \text{ ou } \int_0^t f(t)dt + \int_t^{+\infty} f(t)dt = 1 \quad (1.3)$$



(a) Fonction de Répartition

(b) Fonction de Fiabilité

Figure 1.2. Courbes paramétriques de la fiabilité

1.5. Estimation de la fiabilité

On a vu précédemment que la fiabilité (probabilité de bon fonctionnement)[1], s'exprimait généralement par la fonction "R(t)". La probabilité de défaillance est désignée par "F(t)" :(failure).

On utilise parfois le terme de "défaillance". Le système n'ayant que deux états possibles, on pourra écrire "F(t)" égale à (1-R(t)), le temps (t) doit être choisi comme l'unité d'œuvre la plus représentative de la durée de sollicitation du composant (dispositif).

Soit "N₀" le nombre de dispositifs fonctionnant à (t₀) et N(t) le nombre de dispositifs fonctionnant à l'instant (t), on définit :

a) La fiabilité du composant à l'instant t.

$N(t+ dt)$ le nombre de dispositifs (composants) fonctionnant à l'instant $(t+ dt)$.

$N(t)/N_0$ est un estimateur de fiabilité $R(t)$ avec $N(t)-N(t+ dt)=\Delta N > 0$

A l'instant $(t+ dt)$ il reste $N(t+ dt)-N(t)= - \Delta N$ dispositifs

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

$$\lambda(t) dt = -\frac{dN}{N(t)} \quad (1.4)$$

$\lambda(t) dt$ est une probabilité conditionnelle de défaillance sur l'intervalle $(t, t+dt)$ car elle ne s'applique qu'aux survivants à l'instant (t) .

Appliquons le théorème des probabilités conditionnelles

La Probabilité (d'avoir une panne entre t et dt) est égale probabilité de survie à t x $(\lambda(t).dt)$

$$(P(t \leq T \leq t+dt) = P(T \geq t) \lambda(t) dt = f(t).dt = R(t).\lambda(t).dt \quad (1.5)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.6)$$

b) Le taux d'avarie λ à l'instant (t)

$$\lambda(t) = \frac{N(t+dt)-N(t)}{N(t+dt)} \quad (1.7)$$

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

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

c) Allures typiques des taux de défaillance(λ)

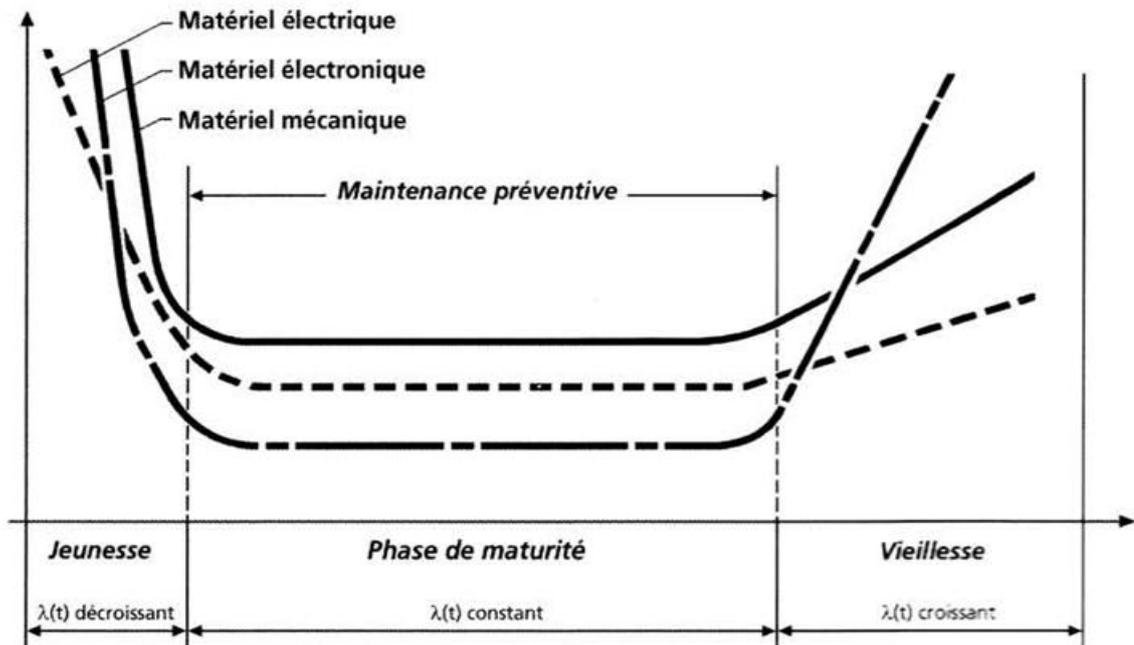


Figure 1.3. Courbe en baignoire du taux de défaillance [6]

L'allure générale des variations des taux de défaillance $\lambda(t)$ d'un équipement le long de sa durée de vie est représentée par la figure (1.3).

Cette géométrie de courbe a un caractère « universel », elle représente aussi bien des taux de défaillances « des organes des équipements et humaines »

Cette courbe met en évidence trois périodes distinctes :

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

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

Zone (2). Période de maturité (pleine activité).

Le taux de défaillance est constant. C'est la période de vie utile (ou période de pannes fortuites).

Zone (3). Période de vieillesse ou d'usure.

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

1.5.1. Taux de défaillance pour des composants mécaniques.

Les composants mécaniques sont soumis dès le début de leur vie au phénomène d'usure ou de vieillissement [7]. Si on trace la courbe du taux de défaillance en fonction du temps, on

obtient une courbe qui ne présente pas réellement le plateau de la figure (1.3) (courbe en baignoire). La période de vie utile (taux de défaillance constant) n'existe pas ou elle est réduite. Le taux de défaillance du dispositif est une fonction non linéaire du temps et ceci, dans chaque phase de sa vie (figure 1.4)

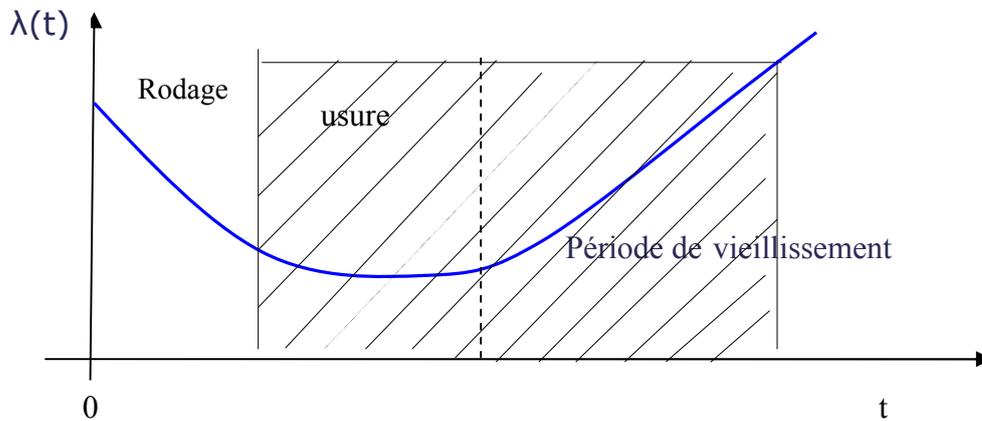


Figure 1.4. Courbe du taux de défaillance en mécanique

1.6. Expression générale de la fiabilité

Intégrons l'expression $\lambda(t)dt = -dN/N(t)$ entre (0 et t)

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = \ln N(t) + k \rightarrow N(t) = k e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (1.8)$$

Pour $t=0$, $N(t)=N_0$ d'où $k=N_0$

$$N(t) = N_0 e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \rightarrow \frac{N(t)}{N(0)} = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (1.9)$$

C'est la relation fondamentale de la fiabilité que nous retrouvons adoptée à la loi exponentielle avec un paramètre (λ), et à la loi de "Weibull" avec trois paramètres (γ, β, η).

1.7. Expression de la MTBF

La durée moyenne entre deux défaillances est l'espérance mathématique de la variable aléatoire "T" ;

$$MTBF = E(T) = \int_0^t t \cdot f(t)dt \quad [8] \quad (1.10)$$

1.8. Essais de fiabilité

Lorsque l'on désire évaluer la fiabilité d'un dispositif (module ou composant) on effectuera des essais sur des échantillons .

1.8.1. Essais accélérés

Les essais accélérés [9] sont réalisés sur des effectifs faibles, mais en lot homogène, en utilisant des techniques faisant apparaître les défauts plus rapidement que lors des conditions normales d'exploitation.

1.8.2. Définition des critères d'essai [9].

- La forme et la taille de l'échantillonnage.

Un lot (de N composants) à étudier est décomposé en (k) échantillons de taille (n).

- La durée de l'essai.
- Le niveau de confiance attendu.

Ces paramètres sont évidemment définis et souvent limités par le budget consacré à l'essai de fiabilité.

1.8.3. Définition des conditions d'essai.

- Recherche des processus de dégradation et des zones sensibles à ces dégradations (exemple zone d'usure ou de corrosion).

- Recherche des lois de dégradation (vitesse d'évolution de dégradation).

L'évaluation du facteur « d'accélération » est complexe car on n'applique jamais la totalité des contraintes.

- Les techniques d'accélération : les essais se font sous contraintes constantes ou échelonnées.
- Différents niveaux de contraintes sont appliqués aux (k) échantillons, chacun étant soumis à un niveau de contrainte constant.
- Contraintes échelonnées : on applique à chaque échantillon plusieurs niveaux d'une même contrainte.

1.9. Différentes formes d'essais [9]

- Essai complet : les essais durent jusqu'à la défaillance du dernier composant.
- Essai tronqué : l'essai est arrêté à une date prédéterminée de l'étude statistique d'un historique arrêté à la date de l'étude, donc tronqué par nature.
- Censure : l'essai est arrêté à un nombre prédéterminé de défaillances.
- Séquentielle : essai arrêté lorsque la fiabilité estimée est supérieure à un seuil prédéterminé.

- La mort soudaine: l'essai par mort soudaine présente la particularité d'être rapide. Il consiste à partager un lot de "N" composants qui sont évalués en (k) groupes de (n) composants ($N=k \times n$). On enregistre le temps de la première défaillance de chaque groupe et on arrête l'essai quand tous les groupes ont subi leur première défaillance.

1.10. Test dans le domaine de la fiabilité

Pour tester la loi de validité (théorique) de la loi de survie (réelle) on utilisera le « Test de Kolmogorov Smirnov [1] »

- Tracer la courbe des fréquences cumulées des observations effectuées ainsi que la courbe théorique de la loi supposée.

- Vérifier si les deux courbes sont significativement différentes. Pour cela :

Sélectionner l'écart maximum entre les deux courbes.

➤ Comparer cet écart avec le coefficient ($D_{N,\alpha}$) de "Kolmogorov-Smirnov". Ce coefficient est donné par la « table 1 page 14 » en fonction de la taille de l'échantillon et du risque (α) accepté.

Si l'écart ($e > D_{N,\alpha}$) le test est significatif. La loi théorique adoptée ne convient pas à l'échantillon.

Si écart ($e < D_{N,\alpha}$) le test est non significatif, on ne peut pas conclure sur la valeur du risque (α), il y a une différence non significative entre l'observation et la loi théorique.

Il est important, pour valider une loi de survie, de tester plusieurs hypothèses et de conserver provisoirement celles qui n'ont pas été rejetées, puis de faire un choix ultime en s'appuyant sur des considérations techniques [1] (voir détails dans le chapitre 6).

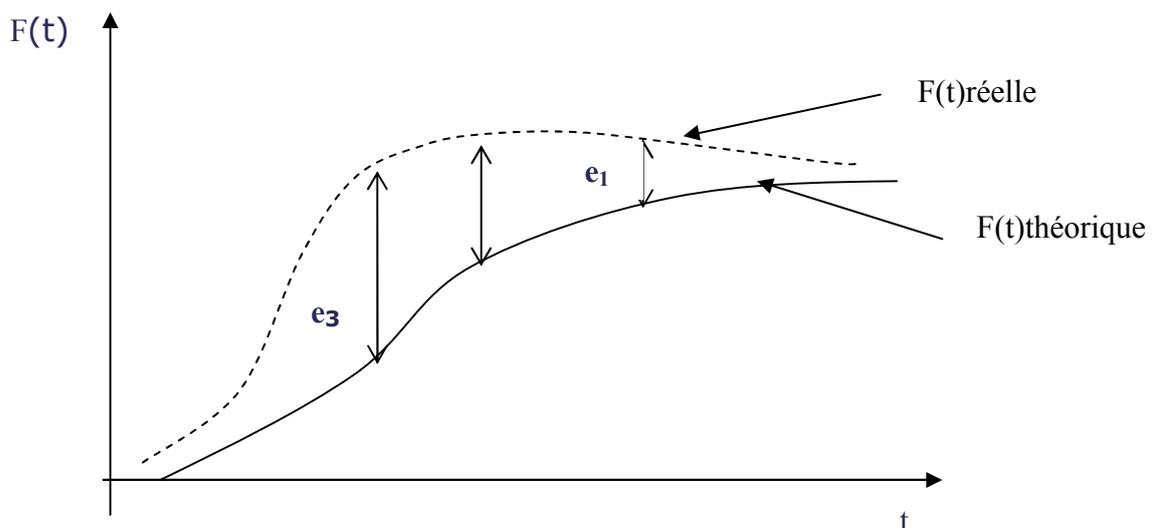


Figure 1.5. Écart entre la courbe réelle et théorique.

Soient t_1, \dots, t_n les durées de vie d'échantillon

Soit $\bar{F}(t)$ fonction de répartition correspondant au modèle expérimental $\bar{F}(t)=1-R(t)$

Soit $F(t)$ fonction de répartition correspondant au modèle mathématique

On a alors Probabilité $(\max_{1 \leq i \leq n} | \bar{F}(t_i) - F(t_i) | \leq D_{N,\alpha}) = 1-\alpha$ d'accorder le test.

N	Erreur de 1 ^{ère} espèce				
	0,20	0,15	0,10	0,05	0,01
1	0,900	0,925	0,950	0,975	0,995
2	0,684	0,725	0,776	0,842	0,929
3	0,565	0,597	0,642	0,708	0,828
4	0,494	0,525	0,564	0,624	0,733
5	0,446	0,474	0,510	0,565	0,669
6	0,410	0,436	0,470	0,521	0,618
7	0,381	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,457	0,543
9	0,339	0,360	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,410	0,490
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
16	0,258	0,274	0,295	0,328	0,392
17	0,250	0,266	0,286	0,318	0,381
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,371
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,363
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,356
25	0,210	0,220	0,240	0,270	0,320
30	0,190	0,200	0,220	0,240	0,290
35	0,180	0,190	0,210	0,230	0,270
>35	$\frac{1,07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,14}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{N}}$

Tableau 1.1. Des coefficients ($D_{N,\alpha}$) de "Kolmogorov Smirnov"[1]

Tests paramétriques [1]

Ils ont pour rôle de vérifier qu'une loi est applicable à un échantillon de valeur avec un risque (α) ou un niveau de confiance $(1-\alpha)$. Les deux tests d'adéquation les plus courants en fiabilité sont le test de χ^2 pour les échantillons ($N > 50$) et le test de "Kolmogorov-Smirnov pour les petits échantillons.

1.11. Conclusion

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

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

Chapitre 2

LES DIFFERENTS MODES DE DEFAILLANCES

Chapitre 2 : Les différents modes de défaillances

2.1 Les différents modes de défaillances

La norme X60-10 (AFNOR 88), stipule que c'est la cessation de l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise [10].

On classe les défaillances en fonction :

- Des causes (mauvais emploi, faiblesse inhérente, usure).
- De leur degré (partielle, complète, intermittente).
- De leur vitesse d'apparition (défaillance soudaine, progressive).
-

2.2 Types de mécanismes de défaillances

Les défaillances sont imputables en majorité à l'un des phénomènes chimique ou physique ci-après[11]

- Effet biologique : les moisissures et les insectes particulièrement présents sous les tropiques sont susceptibles de provoquer des défaillances notamment dans les dispositifs électroniques et les câbles.

- Changement électrolytique et chimique : la corrosion électrolytique là où il y a simultanément une différence de potentiel et un film ionisable. L'électrolyse provoque une interaction entre les ions salins et les surfaces métalliques agissant comme électrodes. Les changements physiques et chimiques des électrolytes et lubrifiants entraînent des défaillances par dégradation.

- Contamination : la poussière et plus particulièrement les particules de carbone ou de fer provoquent les défaillances électriques. Les particules carbonées qui se déposent sur l'isolant entre les conducteurs provoquent des pannes, les particules ferreuses provoquent des ruptures d'isolation et des courts-circuits directs.

Les matériaux non conducteurs tels que les cendres et les déchets fibreux peuvent entraîner des défaillances en circuit ouvert.

- Dépolymérisation : dégradation de la résistance d'isolation provoquée par un type de liquéfaction propre aux matériaux synthétiques.

- Défaillance des contacts électriques : les défaillances des contacts de relais ou des contacts d'interrupteurs peuvent avoir des causes diverses, faiblesse de ressort, formation d'un arc électrique sur les contacts, érosion par étincelage, usure de revêtement métallique, contamination. Les défaillances des connecteurs de circuits imprimés peuvent être dues à la

Chapitre 2 : Les différents modes de défaillances

perte de pression dans les contacts, à l'usure mécanique résultant d'insertion répétées et à la contamination.

- Évaporation : les dispositifs à filament vieillissent par évaporation des molécules composant le filament.
- Fatigue : la modification physique/cristalline des métaux provoque la défaillance des ressorts, fracture des membres structurels etc.
- Pelliculage : une pellicule d'oxyde faiblement conductrice peut se déposer sur les surfaces en métaux non précieux des prises, douilles, connecteurs et commutateurs provoquant des défaillances à haute résistance.
- Friction : la plupart des défaillances des moteurs, commutateurs, engrenages, courroies,...etc. , sont dues à des frictions.
- Ionisation des gaz : à la pression atmosphérique normale, un courant alternatif d'environ 300 V (200 V à basse pression) traversant des bulles de gaz dans des diélectriques provoquent une ionisation qui génère un bruit électrique et entraîne la rupture des éléments concernés.
- Dégradation magnétique : les matériaux magnétiques modernes sont plutôt stables, mais il arrive cependant que leurs propriétés magnétiques se dégradent sous l'effet de vibrations mécaniques ou de champs électriques alternatifs excessifs.
- Contraintes mécaniques : les contraintes de choc et de vibration dégradent les commutateurs, les isolants, les portes fusibles, les cosses des composants, les pistes de circuits imprimés,... etc.
- Variation du taux d'humidité : il suffit d'un trou d'épingle pour que l'humidité pénètre au cœur d'un équipement sous forme de vapeur en atmosphère très humide, l'incidence des cycles de température accélère le phénomène. La perte d'humidité par diffusion à travers les joints des condensateurs électrolytiques réduit leur capacité électrique.
- Réduction des contraintes : la tension à froid « fluage » survient dans des pièces métalliques et dans divers diélectriques sous contrainte mécanique engendrant des défaillances mécaniques. Ce phénomène se distingue de la fatigue causée par un mouvement répété (une déformation) du matériau.
- Variation cyclique de température : elle peut entraîner des fluctuations.
- Défaillance des composants semi-conducteurs : la défaillance des composants semi-conducteurs sont majoritairement imputables au procédé de fabrication en galettes. En effet, la réduction continue de la section des puces accroît la probabilité de défaillance par

détérioration de type Arrhenius [12] en multipliant les risques d'impuretés, de points de chaleur localisés, de défauts etc.

2.3 Traitement d'une défaillance progressive

Dans le cas d'une défaillance progressive on peut suivre la valeur d'un paramètre significatif de sa dégradation [11], et une maintenance de type préventive conditionnelle ou prévisionnelle peut être mise en place.

Si l'on connaît la courbe de dégradation du paramètre suivi, la maintenance de type prévisionnelle est applicable. La connaissance de la courbe permet d'estimer le temps idéal (t_d) où une intervention doit se produire pour optimiser la durée de fonctionnement de l'équipement.

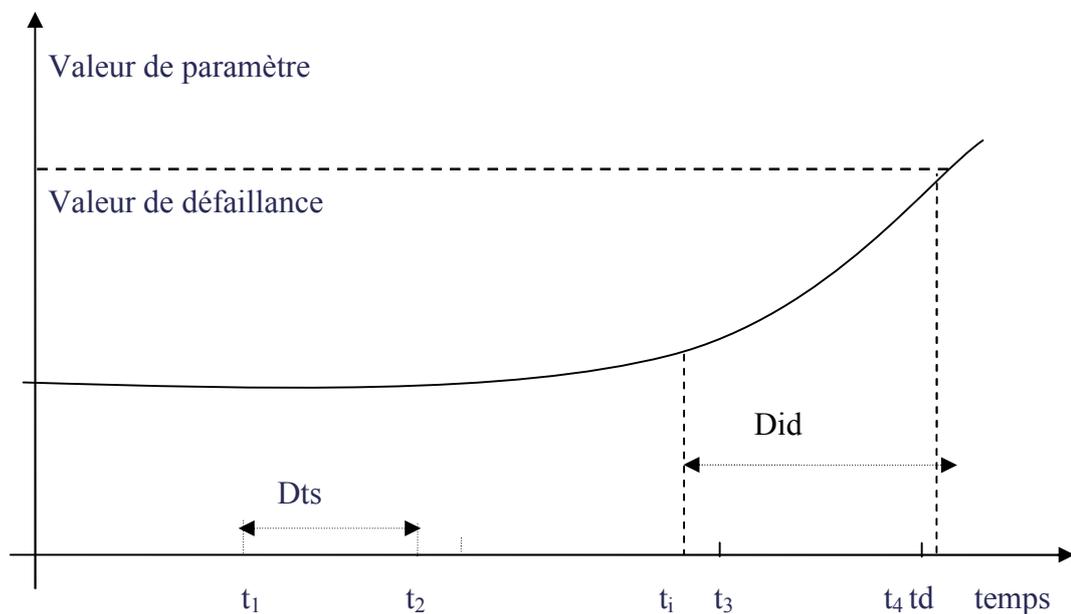


Figure 2.1. Courbe de dégradation du paramètre d'usure.

Did : intervalle de temps (durée) entre le (t_i) à partir duquel la défaillance est décelable.

t_d : temps auquel se produit la défaillance.

Dts : une durée égale à la moitié de la «Did »

2.4 Analyse des défaillances.

On utilise la méthode AMDEC. (Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité) [13]. Elle consiste à étudier et lister les différents modes, les causes et les effets des défaillances des équipements. Elle permet d'évaluer les conséquences de chaque mode de

Chapitre 2 : Les différents modes de défaillances

défaillance des composants sur les différentes fonctions d'un système. Elle sert à identifier les modes de défaillances ayant d'importants effets sur la fiabilité ou la sécurité du système.

2.5. Effets des défaillances

Les modes de défaillances fonctionnelles sont donc associés à chaque machine de production en spécifiant au mieux[13] :

- L'impact de la défaillance sur la sécurité, la production et la qualité.
- La fréquence des défaillances.
- Les défaillances non détectées ou ayant peu de chance d'être détectées pendant l'exploitation.
- Les effets induits, par exemple :
 - Influence sur la sécurité avec un effet significatif du point de vue économique.

Il est alors possible de décider de ne pas prendre en considération certaines défaillances. L'effet d'une défaillance est la concrétisation de la conséquence de cette défaillance sur l'équipement étudié. Cet effet peut être local ou agir sur l'environnement.

Nature	Électronique Électromécanique	Hydraulique	Mécanique
Causes internes au matériel	- Vieillessement - Composant MS (mort subite)	- Vieillessement - Composant (MS) - Colmatage - Fuite	- Contraintes - Fatigue - État de surface
Causes liées au milieu : à l'exploitation à l'environnement	- Poussière, huile, eaux - Chocs, vibrations - Échauffement local - Parasites, arc	- Températures - Eau, huile, poussière - Échauffement local - Chocs, vibrations	- Température - Eau, huile, poussière - Échauffement local - Chocs - Vibrations
Causes liées à : - La main d'œuvre - Aux outils	- Fabrication, montage - Contrôle - Manque énergie - Utilisation, outils	- Fabrication, montage - réglage - Contrôle - Manque énergie - Utilisation	- conception - Fabrication - montage, réglage - Contrôle - Utilisation, outils

Tableau2.1. Causes des différentes défaillances et leurs effets

En fonction de l'axe dans lequel est fait l'AMDEC, les effets peuvent être pris dans des domaines différents [12].

2.5.1. Effets sur la sécurité :

- 1- Sans influence (négligeable)
- 2- Influence mineure sans blessure
- 3- Influence majeure avec blessure
- 4- Influence importante, risque de mort.

2.5.2. Effets sur la fiabilité :

- 1- Mineures
- 2- Significatives
- 3- Critiques
- 4- Catastrophiques

2.5.3. Effets sur la disponibilité :

- 1- arrêt de fonctionnement $< T1$
- 2- arrêt de fonctionnement $> T1$ et $< T2$
- 3- arrêt de fonctionnement $> T2$ et $< T3$
- 4- arrêt de fonctionnement $> T3$

$T1, T2, T3$ seront fixés par l'utilisateur de l'équipement.

C'est au niveau de l'effet que se mesure la gravité de la défaillance de l'équipement [14]. On peut parler de criticité pour chaque triplet (cause-mode-effet) d'une défaillance en utilisant une matrice de criticité.

Indice de gravité	Critère Gr	Indice de fréquence	Critère Fr	Indice de détection	Critère Dé
1	Temps d'arrêt inférieur à 12 heures	1	Moins d'une fois/an	1	Signe avant défaillance
2	Temps d'arrêt inférieur à 24 heures	2	Moins d'une fois/mois	2	La défaillance. Sa cause est évidente
3	Temps d'arrêt inférieur à 1 semaine	3	Moins d'une fois/semaine	3	La défaillance se produit mais sa cause est
4	Temps d'arrêt supérieur à 1 semaine	4	Plus d'une fois/semaine	4	Défaillance non décelable

Tableau 2.2. Indices de criticité

Calcul de l'indice de priorité de risque (IPR) ou RPN (Risk priority number).

$$\text{IPR} = \text{Gr} \times \text{Fr} \times \text{Dé} = \text{Sé} \times \text{R} \times \text{Dis}$$

Fr= Fréquence (occurrence) ou probabilité d'occurrence

Gr= Gravité

Dé»= Facilité de diagnostic ou de détection

Sé= Sécurité

R= Fiabilité

Dis= Disponibilité

2.6. Arbre de défaillances

L'arbre de défaillance [15] se construit à partir de la situation jugée indésirable (défaillance) pour définir toutes les combinaisons d'événements qui conduisent à cette situation. Alors que l'arbre des causes représente les éléments ayant contribué à un incident avéré (exemple analyse d'accident) et que l'arbre des événements part d'un événement initiateur pour évaluer ses conséquences possibles.

2.6.1. Objectifs

- Déterminer les diverses combinaisons possibles d'événements qui entraînent la réalisation d'un événement redouté ou indésirable.
- Représenter graphiquement ces combinaisons au moyen d'une structure arborescente.
- Rechercher les éléments élémentaires qui peuvent conduire à un événement donné indésirable.
- Réduire la probabilité d'occurrence de cet événement.

2.6.2. Principe

C'est une démarche déductive (effets vers causes) qui part de l'événement indésirable (sommet de l'arbre) et qui permet par déduction de rechercher les causes immédiates pouvant produire cet événement. On procède ainsi de suite jusqu'aux composants élémentaires ou éléments de base.

Les éléments élémentaires sont indépendants entre eux ; ils ne sont pas décomposables en événements plus simples et ont des probabilités d'occurrence qui peuvent être estimées ou calculées.

Chapitre 2 : Les différents modes de défaillances

Pour l'étude d'un système, on décomposera celui-ci en éléments que l'on considèrera comme indésirables. La liste de ces éléments indésirables sera établie à partir d'une analyse des modes de défaillances.

L'arbre sera construit en reliant les éléments entre eux par les fonctions ET, OU, SI etc.

- Si l'événement donné a plusieurs causes indépendantes possibles, celles-ci sont reliées par un OU.
- Si plusieurs causes sont nécessaires simultanément pour produire l'événement, celles-ci sont liées par ET.

2.6.3. Construction de l'arborescence

Pour la construction de l'arbre on procède au recensement des événements redoutés

Il est fait à partir :

- d'une analyse préliminaire des risques (APR)
- d'une AMDEC.
- d'une recherche des combinaisons de défaillances conduisant à la réalisation des événements redoutés.
- d'une élaboration de l'arborescence.

En utilisant les symboles des portes logiques des événements.

2.6.4. Analyse qualitative

Application de l'algèbre de BOOLE [1].

-Un ordre de défaillance sera interprété comme une représentation de relations booléennes entre les événements qui entraînent l'événement redouté.

- A chaque événement de base sera associée une variable booléenne.
- L'événement de sortie d'une porte ET sera la variable booléenne égale au produit booléen des variables booléennes des événements d'entrée.

Les autres portes logiques se prêtent beaucoup plus difficilement à l'utilisation de l'algèbre de Boole.

2.6.5. Méthode des coupes minimales

On mettra en évidence les coupes qui composent l'arborescence et en particulier les coupes minimales.

Une coupe ou chemin est un ensemble d'événements entraînant l'événement redouté indésirable [1].

Une coupe minimale (ou chemin critique) est la plus petite combinaison d'événements entraînant l'événement redouté. Un arbre de défaillance a un nombre fini de coupes minimales car elles représentent le « maillon faible » du système.

- Une coupe minimale d'ordre 1 représente (si elle existe) les simples défaillances qui entraînent l'événement redouté.
- Une coupe minimale d'ordre 2 représente (si elle existe) les deux défaillances qui se produisant en même temps entraînant l'événement redouté.

2.6.6. Quantification des coupes

- la quantification des coupes s'effectue par la multiplication des probabilités de chaque événement.
- Les probabilités d'occurrence des différents événements sont déterminées en considérant le cas de phénomènes obéissants à des lois de fiabilité.
- La fiabilité de chaque composant peut être déterminée par expérience par essais ou à partir des bases de données.

2.6.6.1. Quantification au niveau événement redouté

La probabilité d'occurrence au sommet de l'événement est obtenue par application de la méthode de calcul de probabilité de Poincaré. En pratique, si les probabilités élémentaires sont faibles, il suffit de se contenter d'utiliser le premier terme de la forme appliquée aux probabilités d'occurrence des différentes coupes. Cette approximation donne une évaluation « majorant ».

a) Événements indépendants.

Porte ET : si événements $A_1, A_2 \dots A_n$ interviennent sur la sortie ES : $(P(ES)=P(A_1) \times P(A_2) \dots \times P(A_n))$, pour deux événements A et B : $P(A.B)=P(A) \times P(B)$.

Porte OU : si les n événements $A_1, A_2 \dots A_n$ interviennent sur la sortie ES, alors ils ont :

- des probabilités faibles $P(E)=P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n)$.
- des probabilités non négligeables :

$$1 - P(E) = [1 - P(A_1)] \times [1 - P(A_2)] \times \dots \times [1 - P(A_n)].$$

Pour $n=2$

$$P(E) = P(A) + P(B), \text{ si faibles probabilités.}$$

$$P(E) = P(A) + P(B) - P(A) \times P(B), \text{ si fortes probabilités.}$$

- Événements indépendants.

$$\text{Porte ET : } P(AB) = P(A) \times P(B/A) = P(B) \times P(A/B)$$

$$\text{Porte OU : } P(A+B) = P(A) + P(B) - P(A) \times P(B)$$

- Événements exclusifs

$$P(A+B) = P(A) + P(B)$$

2.6.6.2. Exploitation de l'arbre

Il est souvent difficile d'obtenir les probabilités des événements élémentaires, il est alors possible de classer ceux-ci par niveaux de probabilités de 1 à 6 [1] :

- niveau 1 : événement extrêmement rare : $\lambda < 10^{-6} / h$;
- niveau 2 : événement très rare : $\lambda = 10^{-6} / h$;
- niveau 3 : événement rare : $10^{-6} < \lambda < 10^{-5} / h$;
- niveau 4 : événement possible : $10^{-5} < \lambda < 10^{-4} / h$;
- niveau 5 : événement fréquent : $10^{-4} / h < \lambda$;
- niveau 6 : événement très fréquent : $10^{-3} / h < \lambda$;

On applique alors les règles suivantes :

- l'événement résultant d'une porte OU prendra le niveau de probabilité de l'événement immédiatement inférieur ayant la plus forte probabilité.
- l'événement résultant de deux événements réunis par une porte ET prendra un niveau de probabilité inférieur d'une unité au niveau de l'événement ayant la plus faible probabilité.
- S'il y a plus de deux événements réunis par une porte ET, on applique la règle précédente en assemblant deux par deux les événements antérieurs ou leur résultante.
- A noter qu'un équipement utilisé en continu travaille $365 \times 24 = 8760$ h, une panne par année représente un λ d'environ 10^{-4} panne/h.

2.7. Conclusion

Pour assurer la fonction maintenance, il faut savoir analyser les défaillances rencontrées, c'est-à-dire avoir un retour d'expérience complet et fidèle permettant de trouver la cause première de la défaillance. Il faut être capable de juger si la défaillance est due à la fiabilité intrinsèque d'un composant (c'est-à-dire à sa conception) ou si elle provient d'un non respect des conditions d'utilisation de maintenance ou d'une erreur humaine.

CHAPITRE 3
ETUDE ET ANALYSE DES LOIS DE LA
FIABILITE

Chapitre 3. Etude et Analyse des lois de la Fiabilité

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques lois de distributions qui interviennent dans l'analyse des données de vie utilisées dans une étude de fiabilité.

Nous citerons les principales propriétés de ces lois (densité, fonction fiabilité et taux de défaillance) ainsi que leur application en fiabilité, [1, 3, 5]

3.1.1. Loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. C'est une loi simple, très utilisée en fiabilité dont le taux de défaillance est constant. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales.

a) Propriétés sans mémoire de la loi exponentielle.

Une propriété principale de la loi exponentielle est d'être sans mémoire ou « *Memorylessproperty*[6] » comme l'indique la figure (3.1)

$$P(T > (t + \Delta t) | T > t) = \frac{e^{-\lambda(t+\Delta t)}}{e^{-\lambda t}} = e^{-\lambda \Delta t} = P(T \geq \Delta t); t > 0; \Delta t > 0 \quad (3.1)$$

Comme l'indique la figure (3.1), ce résultat montre que la loi conditionnelle de la durée de vie d'un dispositif qui a fonctionné sans tomber en panne jusqu'à l'instant (t) est identique à la loi de vie d'un nouveau dispositif. Ceci signifie qu'à l'instant (t), le dispositif est considéré comme neuf, avec une durée de vie exponentielle de paramètre λ [6].

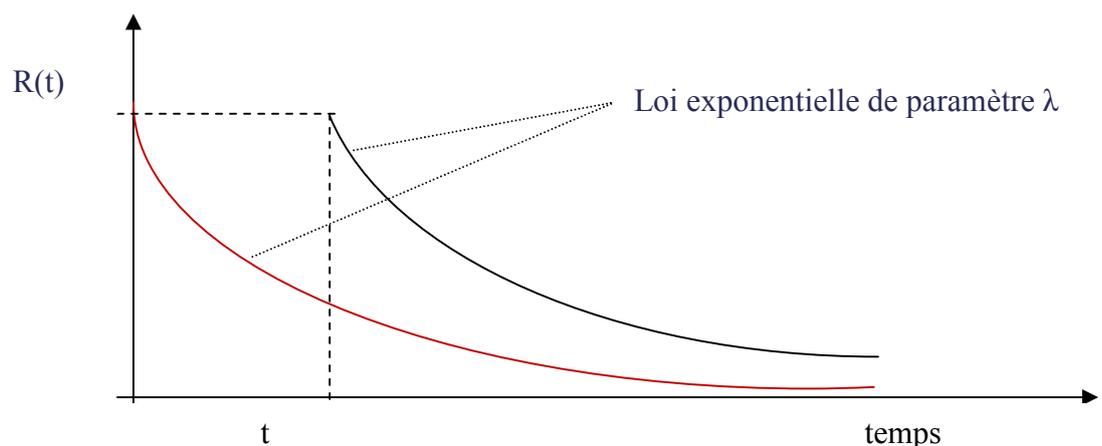


Figure 3.1. Propriétés sans mémoire de la loi exponentielle.

Elle se retrouve à partir de la loi fondamentale de la fiabilité avec (λ) constant. La probabilité de survie entre 0 et (t) devient $R(t) = e^{-\int \lambda(t) dt} = e^{-\lambda t}$

- Densité de probabilité : $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
- Fonction de répartition : $F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
- Espérance mathématique : $E(t) = 1/\lambda = \text{MTBF}$
- Écart type : $\sigma = 1/\lambda$.

Tirons (t) de la loi exponentielle.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \rightarrow -\lambda t = \text{Ln } R(t), \text{ soit } t = \frac{1}{\lambda} \text{Ln } \frac{1}{R(t)} \quad (3.2)$$

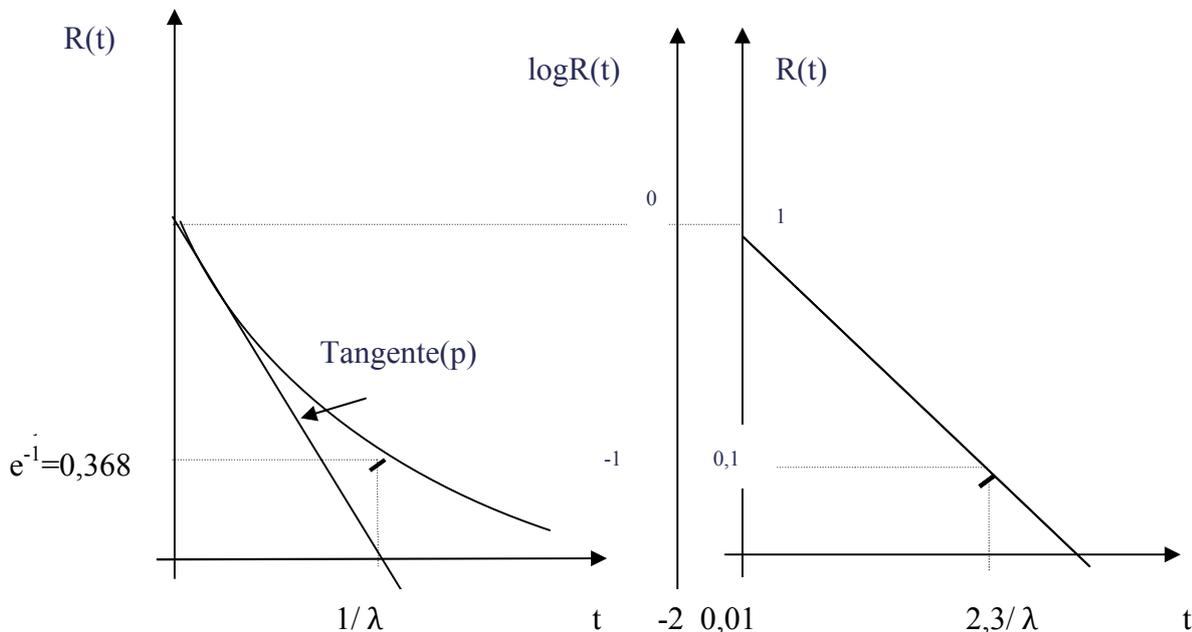
b) Domaine d'utilisation de la loi exponentielle.

La courbe en baignoire relative à la durée de vie d'un système fait apparaître une période de maturité plus ou moins longue pendant laquelle le taux de défaillance d'un système est sensiblement constant. C'est le champ d'application de la loi exponentielle qui repose sur l'hypothèse ($\lambda = \text{constante}$), donc ($\text{MTBF} = 1/\lambda$), les équipements électroniques se prêtent bien à l'utilisation de la loi exponentielle lorsque les composants sont déterminés.

3.1.2. Représentation graphique de λ

La relation linéaire de la loi exponentielle s'obtient sur un simple papier semi logarithmique. La droite ayant pour pente la valeur de $\lambda / 2,3$ ou la valeur $1/\lambda$.

Si $R(t) = e^{-\lambda t}$, alors $\text{Ln } R(t) = -\lambda t$ ou $\text{Log} R(t) = \frac{-\lambda}{2,3} t$, or ($\text{Ln}10 = 2.3$)



a) Échelle linéaire (p:pente)

(b) Échelle semi-logarithmique décimal

Figure 3.2. Représentation graphique de la loi exponentielle

3.1.3. Méthode analytique

Il existe plusieurs méthodes numériques pour linéariser cette équation $R(t) = e^{-\lambda t}$, à savoir : celle de la méthode de Newton et la méthode des moindres carrés [16]

On suppose donnés les points suivants : $(x_1, y_1) \dots\dots (x_n, y_n)$, on veut ajuster ces points par une droite " $\tilde{y}_i = ax+b$ ". On va calculer la droite de régression de "y" en fonction de "x". Pour cela, on va chercher les paramètres "a" et "b" pour que " $\sum_{i=1}^n e_i^2$ " soit minimale.

$$e_i = y_i - \tilde{y}_i = y_i - (ax_i + b) \tag{3.3}$$

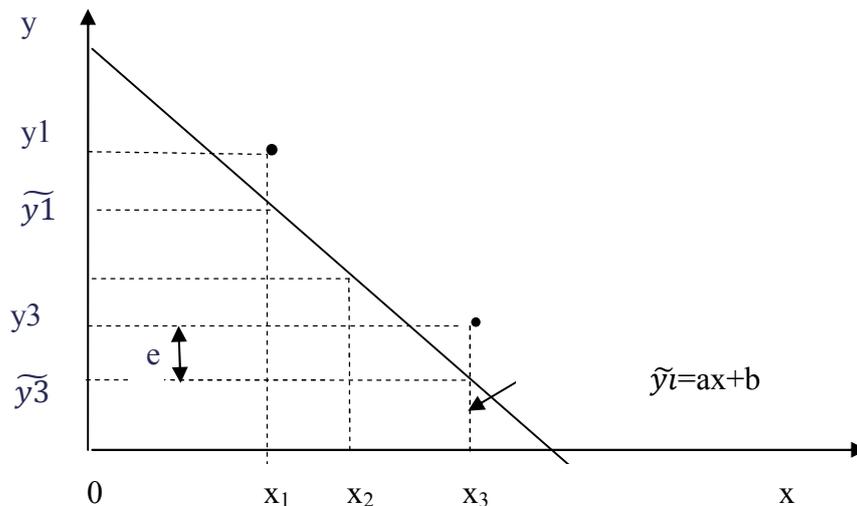


Figure 3.3. Droite de linéarisation

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 = \sum_{i=1}^n [y_i^2 + (ax_i)^2 + b^2 + 2ax_i b - 2ay_i x_i + 2y_i b] \tag{3.4}$$

On pose

$$A = \sum_{i=1}^n y_i^2 + \sum_{i=1}^n a^2 x_i^2 + nb^2 - 2a \sum_{i=1}^n x_i y_i - 2b \sum y_i + 2ab \sum x_i \tag{3.5}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A}{\partial a} = 0 \rightarrow 2a \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2 \sum_{i=1}^n x_i y_i + 2b \sum_{i=1}^n x_i = 0 \\ \frac{\partial A}{\partial b} = 0 \rightarrow 2bn - 2 \sum_{i=1}^n y_i + 2a \sum_{i=1}^n x_i = 0 \end{array} \right. \tag{3.6}$$

Divisons par (2n) les deux membres de ces équations, on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} a\bar{x}^2 - \bar{x}\bar{y} + b\bar{x} = 0 \\ b - \bar{y} + a\bar{x} = 0 \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} b = \bar{y} - a\bar{x} \\ a\bar{x}^2 - \bar{x}\bar{y} + \bar{x}(\bar{y} - a\bar{x}) = 0 \end{array} \right. \tag{3.8}$$

$$\rightarrow \begin{cases} b = \bar{y} - a\bar{x} \rightarrow & b = \frac{\bar{y}\bar{x}^2 - \bar{x}(\overline{xy})}{\bar{x}^2 - (\bar{x})^2} \\ a = (\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}) / (\bar{x}^2 - (\bar{x})^2) \end{cases} \quad (3.9)$$

Avec $\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad \overline{xy} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{n}$ (3.10)

Appliquons cette équation (3.9) à la loi exponentielle.

$$\begin{cases} R(t) = e^{-\lambda t} \rightarrow y = a x + b \text{ et } a = -\lambda \\ \text{Log}(R(t)) = -\lambda t \end{cases} \quad (3.11)$$

On va résoudre cette équation par le calcul numérique, en utilisant un programme en langage " Matlab " [17].

3.1.4. Méthode des moindres carrés

La problématique se pose comme suit [16] :

i	1 2 3 4 5 6.....n
xi	x1xn
yi	y1yn

Tableau3.1. Tableau de présentation des valeurs (xi, yi)

propose un modèle donné par l'équation (3.12)

$$y_i^* = f_i^*(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m) \quad (3.12)$$

On connaît la relation qui donne la fonction "f*" et on connaît les valeurs des "xi"(mesurées).

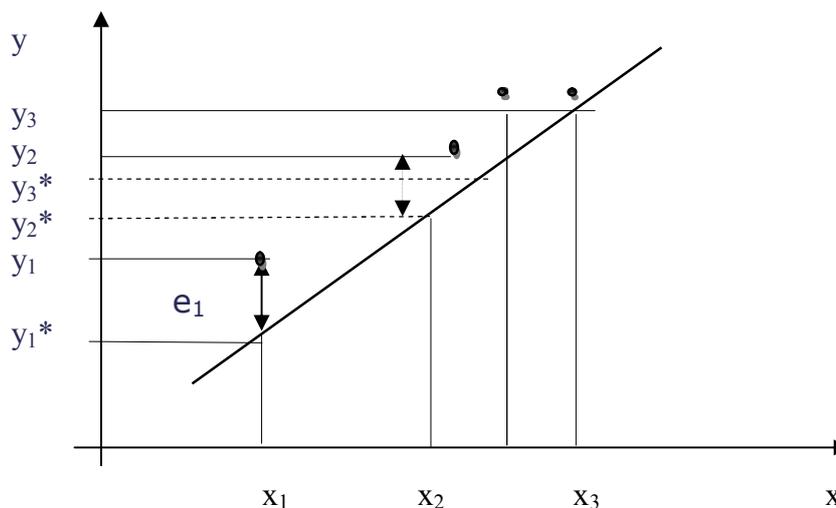


Figure 3.4. Droite de linéarisation par la méthode des moindres carrés

On propose le modèle suivant:

$$y_i^* = a_1 x_i + x_2 \quad (3.13)$$

On connaît les "xi" et on cherche à déterminer les valeurs des paramètres [a₁, a₂, a_n].

Appelons "ei" l'erreur de modélisation commise en approximant la valeur "yi" par "y*i";

"ei" = yi - y_i*". Supposons que le modèle est exact, alors on aura les équations :

$$e_i = 0 = y_i - y_i^* \quad (3.14)$$

$$y_i - f_i^*(x_i, a_1, \dots, a_m), \quad i = 1, n \quad (3.15)$$

Supposons que $f_i^*(x_i, a_1, \dots, a_m)$ est un modèle linéaire en fonction des paramètres inconnus "aj". Alors "ei" : c'est un système par hypothèse linéaire de (n) équations à (m) inconnues. On a trois cas de figures :

- ✓ m > n, le système n'a généralement pas de solution.
- ✓ m = n, le modèle est exact
- ✓ m < n, dans ce cas on commet nécessairement une erreur "ei" de modélisation non nulle.

On a donc aux points mesurés l'erreur "ei" = yi - f_i* (xi, ai,am) , i = 1, n ; c'est un système linéaire de (n) équations à (m) inconnues.

Ce système admet une infinité de solutions. Parmi cette infinité, on choisit la meilleure comme étant celle qui minimise la quantité scalaire "Z = Σ_{i=1}ⁿ (ei)²", dans ce cas, la méthode est dite des moindres carrés.

3.1.5. Forme matricielle de la méthode des moindres carrés[19]

➤ Cas de la loi exponentielle

$$R(t) = a e^{-\lambda t} \rightarrow \ln R(t) = \ln a - \lambda t \rightarrow \ln R = \ln a - b \cdot t \quad (3.16)$$

$$\begin{pmatrix} \ln R_1 \\ \ln R_2 \\ \dots \\ \dots \\ \ln R_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \\ & \dots \\ & \dots \\ 1 & t_n \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ln a \\ - b \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Où on écrit l'équation (3.17) sous forme matricielle [Y] = [V]*{A}.

{A} est le vecteur à déterminer, on va utiliser un programme en langage "Matlab"[17] pour déterminer "a" et "b".

$$\{A\} = [V' * V]^{-1} * [V]' * [Y] \quad (3.18)$$

$$a = \exp A(1,1) \quad ; \quad b = \lambda = A(2,1) \quad (3.19)$$

3.2. Loi de Duane

Cette loi permet de déterminer durant la période infantile de l'équipement, à partir d'une première évaluation du taux d'avarie, à quel moment on peut espérer atteindre une valeur donnée du taux d'avarie.

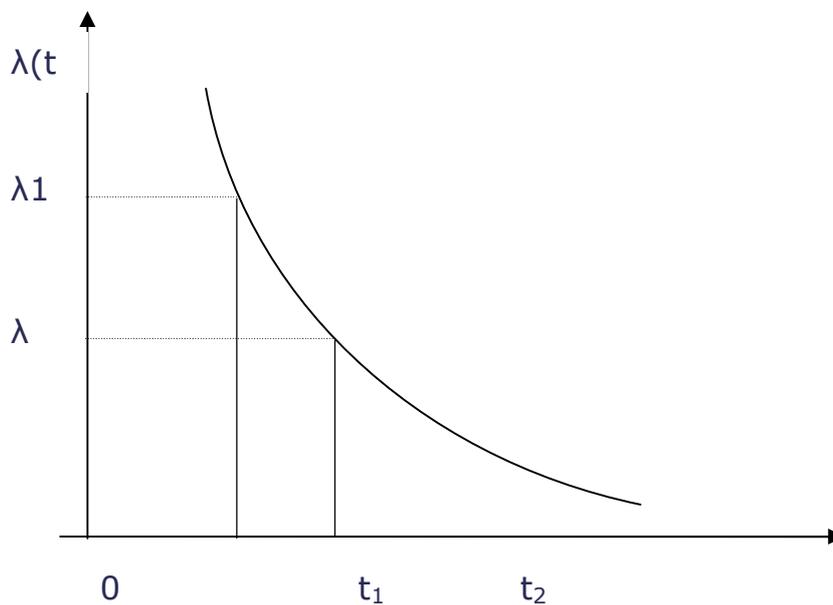


Figure 3.5. Taux d'avarie de la loi de Duane [1]

à t_1 : nombre de défaillances N_1 d'où

$$\lambda_1 = N_1 / t_1 \quad (3.20)$$

à t_2 : le taux d'avarie est :

$$\lambda_2 = K \cdot (t_2)^{-\alpha} \quad (3.21)$$

La mise au point de l'équipement correspond au déverminage et à l'amélioration de cet équipement ce qui donne un taux de défaillance (λ) décroissant dans le temps.

K : constante déterminée par la complexité du matériel, le niveau de fiabilité de ses composants et le degré de tolérance autorisé par la conception. La valeur du paramètre de conception de l'équipement (α_c) compris entre (0,15 et 1), (α_c) augmente avec :

- le degré de nouveauté du matériel (conception, technologie...).
- la performance de l'équipe de mise au point.
- la rapidité de mise en place des actions correctives.

Si on a une bonne équipe de maintenance, ($\alpha = 0,5$) ; le suivi du taux d'avarie dans le temps permettra de vérifier l'efficacité de l'équipe de maintenance.

Premières mesures lors de la mise en service :

N_1, t_1, λ_1 : permettent de déterminer :

$$K = \lambda_1 \cdot 1/t_1^{-\alpha} = \lambda_1 t_1^{\alpha} \quad (3.22)$$

à t_2 , on a :

$$\lambda_2 = K \cdot (t_2)^{-\alpha} = \lambda_1 \cdot (t_2/t_1)^{-\alpha} \quad (3.23)$$

3.3. La loi normale (Laplace-Gauss)

La loi normale [6] 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 densité de probabilité d'une loi normale de moyenne " μ " et d'écart type " σ " s'écrit :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.24)$$

La fonction de répartition s'écrit :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (3.25)$$

La fiabilité est donnée par $R(t) = 1 - F((t-\mu)/\sigma)$ où " F " est la fonction de répartition de la loi normale centrée ($\mu=0$) réduite ($\sigma=1$).

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (3.26)$$

3.4. Analyse de la fiabilité à partir du modèle de "Weibull"

3.4.1. Distribution de "Weibull".

Comme le montre la courbe «en baignoire», figure (1.3), le taux de défaillance évolue selon un cycle enchaînant un taux de défaillance décroissant, taux de défaillance constant puis

taux de défaillance croissant. Lorsque le taux de défaillance est variable, seuls la fiabilité et le "MTBF" sont significatifs et le taux de défaillance réel ne présente guère d'intérêt.

$$R(t)=\exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right)=e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.27)$$

3.4.2. Domaine d'utilisation

La loi de "Weibull" [6] à trois paramètres est très « souple », ce qui lui permet de s'ajuster à un grand nombre d'échantillons prélevés le long de la vie d'un équipement. Elle couvre le cas des taux de défaillance variables, décroissants (période de jeunesse) ou croissant (période de vieillesse). Cette loi est très utilisée en fiabilité [10], en particulier dans le domaine mécanique. Son exploitation fournit :

- Une estimation de la "MTBF" de la population.
- Les équations de $R(t)$ et de $\lambda(t)$, ainsi que leurs variations sous forme graphique.
- Le paramètre de forme β qui peut orienter un diagnostic, sa valeur étant caractéristique de certains modes de défaillance.

3.4.3. Fonction de distribution ($\gamma=0$, $\eta=1$)

Ces graphes montrent le polymorphisme de la loi de « Weibull » sous l'influence du paramètre de forme (β)[3].

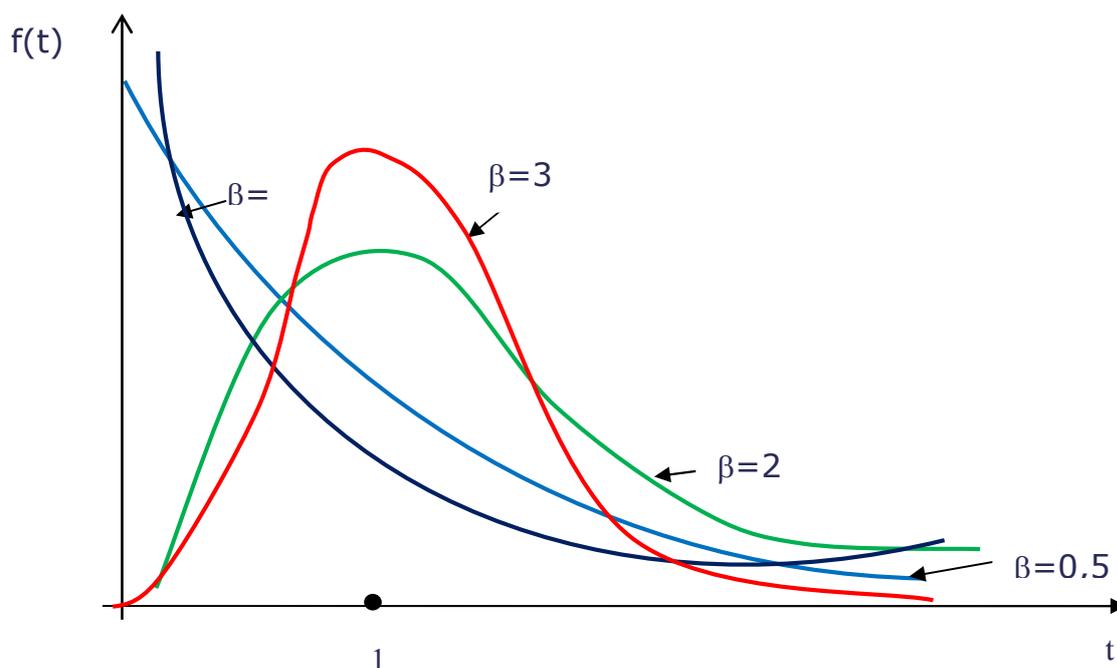


Figure 3.6. Influence du facteur de forme β sur la courbe de la densité probabilité

3.4.4. Courbes représentatives de $R(t)$, $\lambda(t)$ ($\gamma=0$, $\eta=1$)

La fiabilité $R(t)$ pour une loi de "Weibull" est représentée par différentes courbes selon la valeur de facteur de forme β .

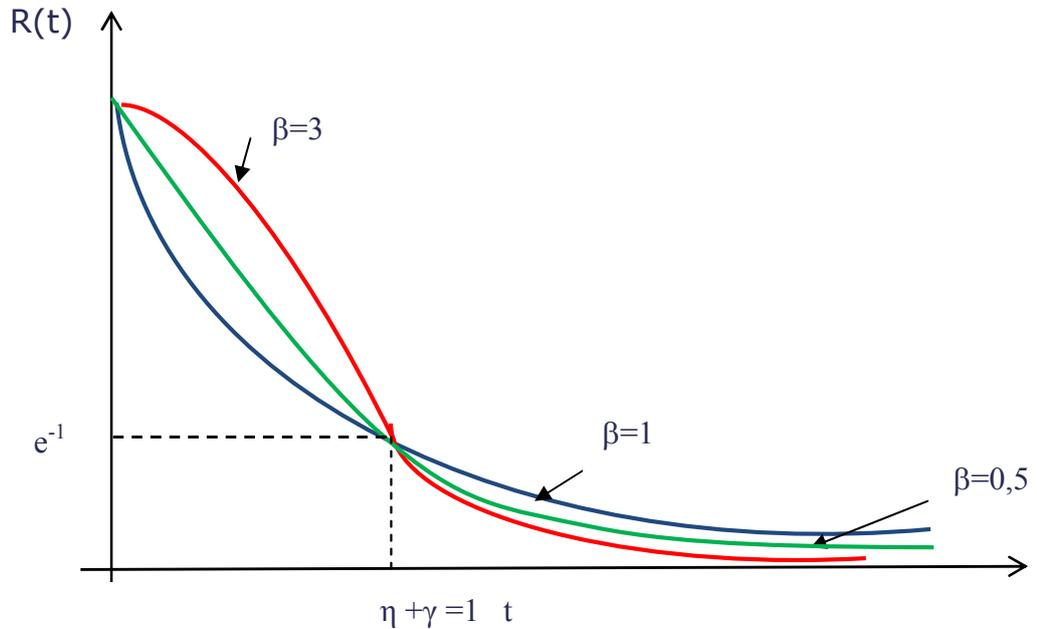


Figure 3.7. Influence du facteur de forme β sur la courbe de La fiabilité

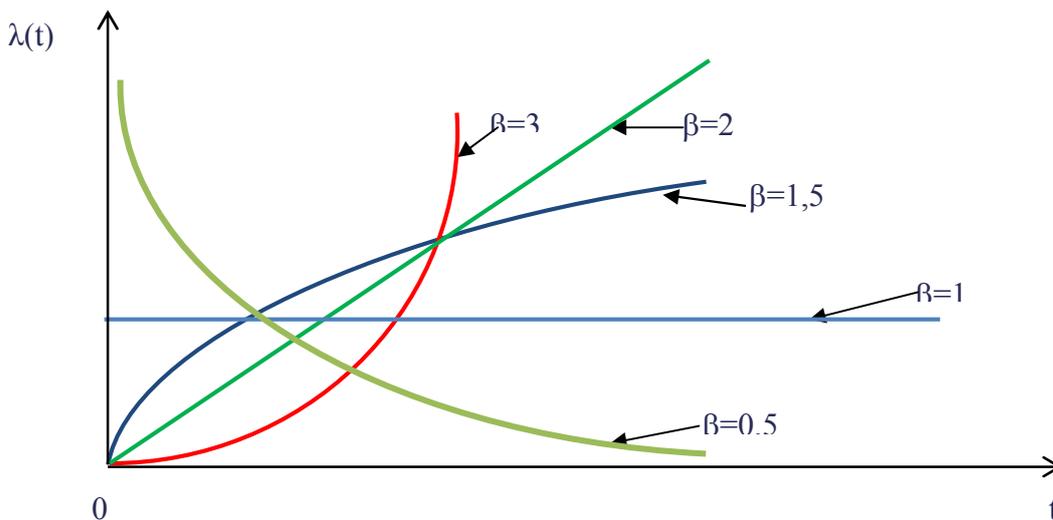


Figure 3.8. Influence du facteur de forme β sur la courbe du taux de défaillance

3.4.5. Signification des paramètres de fiabilité de "Weibull" [20]

β : appelé paramètre de forme ($\beta > 0$), souvent il est égal, inférieur ou supérieur à 1. La loi de "Weibull" correspond à un taux de défaillance instantané, constant, décroissant ou croissant.

η : est appelé paramètre d'échelle ($\eta > 0$) parfois nommé « caractéristique de vie » c'est un simple paramètre de temps.

γ : est appelé paramètre de position ($-\infty < \gamma < +\infty$) il définit un changement d'origine dans l'échelle de temps.

Par exemple ($\gamma > 0$) ; il y a une survie totale (pas de défaillance entre 0 et γ).

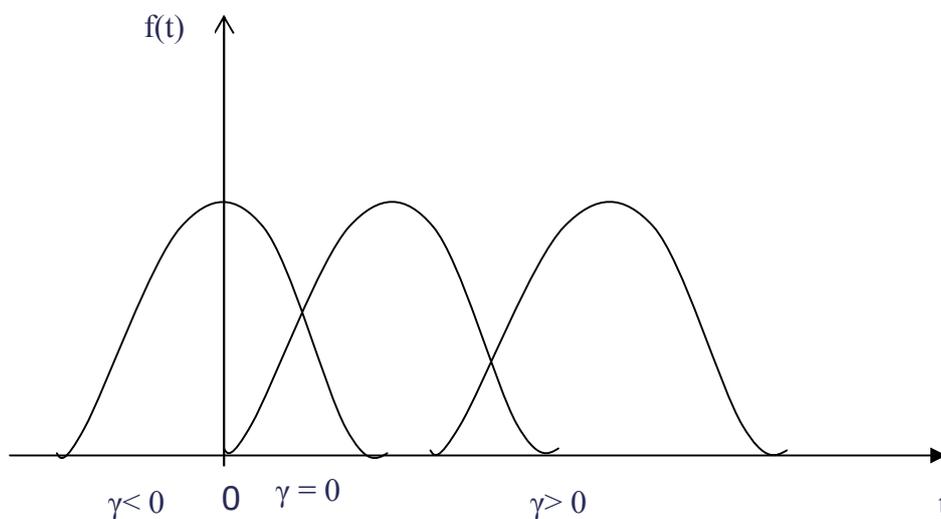


Figure 3.9. Courbe de la densité en fonction du paramètre de position (γ)

3.4.6. Expressions mathématiques

a) Densité de probabilité $f(t)$:

$$\begin{cases} f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} & \text{avec } t \geq \gamma \\ f(t) = 0 & t < \gamma \end{cases} \quad (3.28)$$

b) Fonctions de fiabilité $R(t)$:

$$\begin{cases} R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, & t \geq \gamma \\ R(t) = 1, & t < \gamma \end{cases} \quad (3.29)$$

$$R(t) = 1, \quad t < \gamma \quad (3.30)$$

c) La "MTBF" espérance mathématique

$$E(t) = \gamma + \eta \Gamma(1 + 1/\beta) = \text{MTBF} \quad (3.31)$$

$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$, c'est la loi gamma qui est une fonction eulérienne de second espèce. λ

d) La variance mathématique

$$\text{Var}(T) = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] \quad (3.32)$$

La recherche numérique de la (MTBF = $x\eta + \gamma$, l'écart type $\sigma = \eta y$) ; x et y sont donnés par la table (N° 2) ci-jointe.

e) Taux de défaillance

$$\lambda(t) = \beta/\eta \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3.33)$$

f) Taux cumulé de défaillance

$$\lambda_c(t) = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta} \quad (3.34)$$

3.4.7. Etude du taux de défaillance

a) Si $0 < \beta < 1$

Le taux de défaillance est décroissant. Pour améliorer la fiabilité, on procède à un prévieillissement (rodage).

b) Si $\beta = 1$, $\lambda(t) = 1/\eta$, c'est le cas de la loi exponentielle de MTBF = η .

c) Si $\beta > 1$, le taux de défaillance est croissant. Pour améliorer la fiabilité on procède à des améliorations de construction ou on pratique une politique de maintenance préventive plus rigoureuse.

d) Si $1 < \beta < 2$, le taux de défaillance fort au début et faible ensuite.

e) Si $\beta > 2$ le taux de défaillance croît faiblement au départ mais plus fortement à la fin.

f) Si $\beta = 2$ le taux de défaillance est linéaire.

3.5. Détermination graphique des paramètres

3.5.1. Linéarisation de la loi de "Weibull"

Afin de simplifier l'utilisation de la loi de "Weibull", on va la linéariser

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} ; R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (3.35)$$

$$\text{Log}(1 - F(t)) = -\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta} \Rightarrow \log\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta} \quad (3.36)$$

a) Ajustement du nuage des points par une droite ($\gamma=0$)

$$\log \left(\log \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right) = \beta \log t - \beta \log \eta \quad (3.37)$$

Si on pose « $y = \log \log \left(\frac{1}{1-F(t)} \right)$ » et « $x = \log t^x$ » avec « $t^x = t - \gamma$ » et ($m^* =$) on obtient alors l'équation d'une droite de la forme « $y = \beta X - \beta \log \eta$ » ou « $y = m^*x - m^* \log$ ».

($m^* =$) étant la pente de la droite si $y=0 \Rightarrow \log \log \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) = 0$

On déduit « $\beta \log t^x = \beta \log \eta$ » et « $t^x = \eta$ ».

Or pour ($t^x = \eta$), il faut que $\log \log \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) = 0 \Rightarrow \log \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) = 1$, on déduit « $\frac{1}{1-F(t)} = e$ » et donc **F(t)=0,63**.

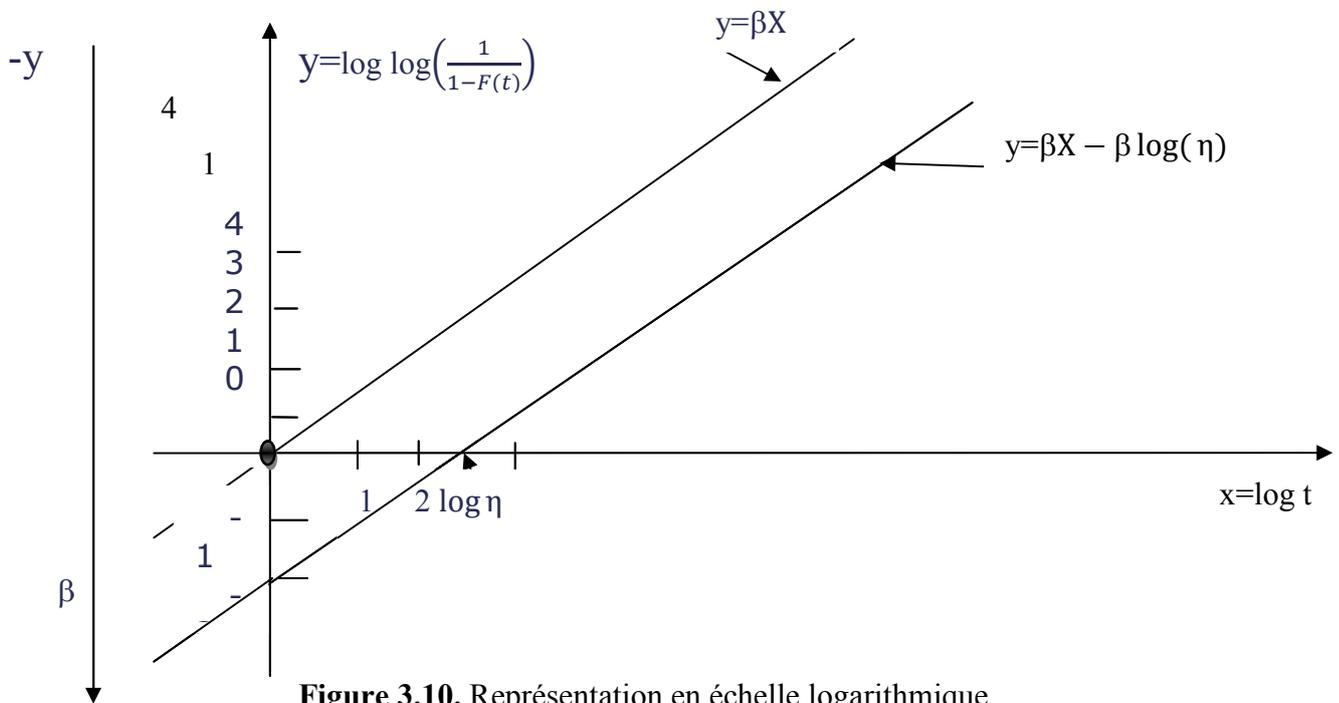


Figure 3.10. Représentation en échelle logarithmique

$$y=0 \Rightarrow x = \log(\eta)$$

On considère la droite « $y = \beta x$ » avec « $x = \log t$ ».

$$x = -1 \Rightarrow y = -\beta$$

Connaissant le paramètre (t) et la fonction $F(t)$, et étant donné que la variable (T) suit une loi de « Weibull », on calcule « $\log t$ » et « $\log \log \left(\frac{1}{1-F(t)} \right)$ ».

Chapitre3. Etude et Analyse des lois de la Fiabilité

Pour éviter ces calculs, on change la graduation de l'axe des abscisses et des ordonnées.

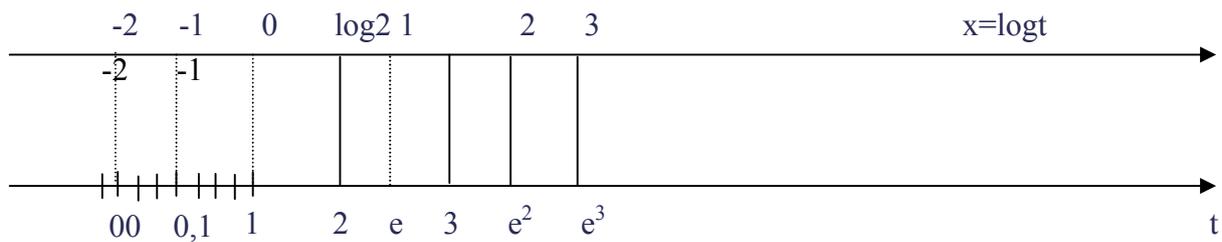


Figure 3.11. Changement de graduation des abscisses

Ce changement de graduation permet le processus suivant :

Placer (t) sur l'axe des abscisses avec la nouvelle graduation c'est placer $\log(t)$ sur l'axe gradué linéairement, avec en ordonnée " $\log(\log(\frac{1}{1-F(t)}))$ ".

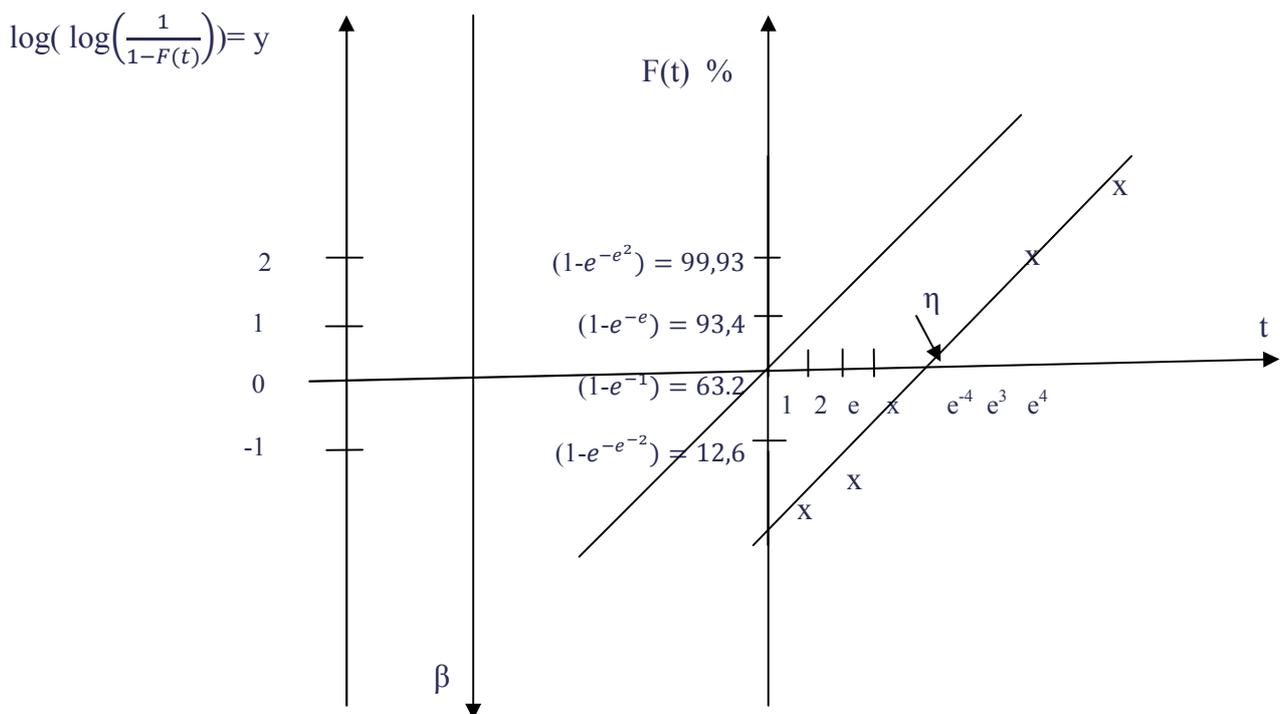


Figure 3.12. Changement de graduation des ordonnées

b) Distribution non linéaire : cas de $\gamma \neq 0$

La linéarisation du modèle de "Weibull" donne l'équation :

$$\text{Log}\left[\text{Log}\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right] = \beta \text{Log}(t-\gamma) - \beta \text{Log}(\eta). \quad (3.38)$$

La relation entre " $\text{Log}\left[\text{Log}\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$ " et " $\text{Log}(t)$ " n'est plus linéaire sur papier « weibull » on obtient une courbe concave ou convexe.

c) Ajustement du nuage de points par une courbe convexe ($\gamma > 0$)

On obtient une courbe qui a sa concavité dirigée vers le bas.

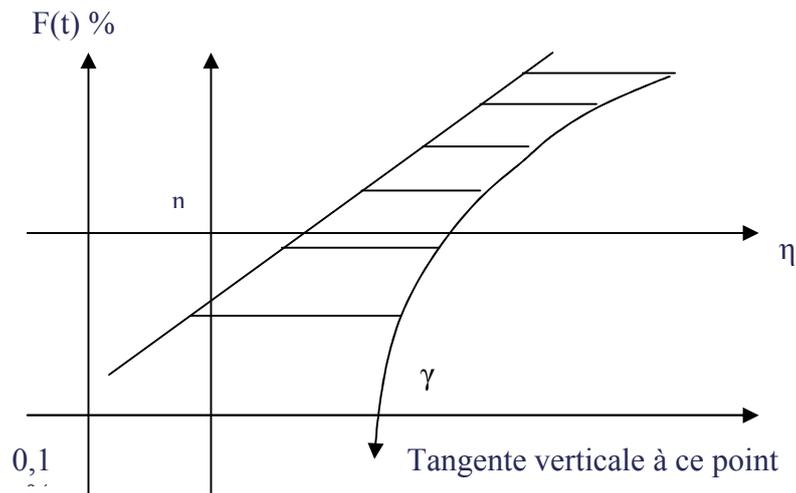


Figure 3.13. Redressement de la courbe convexe sur papier « Weibull »

En posant ($t^x = t - \gamma$), alors $F(t) = F_1(t^x)$, ainsi les relations $\text{Log}\left[\text{Log}\left(\frac{1}{1-F_1(t^x)}\right)\right]$ et " $\text{Log}t^x$ " sont linéaires. Ceci signifie qu'en faisant une translation vers la gauche de (γ), on redresse la courbe afin de déterminer les autres paramètres (η) puis (β).

➤ **Détermination de (γ).**

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \text{ pour } "t = \gamma" ; "F(t)=0"$$

L'ordonnée au point d'intersection avec l'axe « A » noté (t) sur papier « Weibull » est donné par " $F(t)=0,001$ " donc l'abscisse de ce point sera très proche de (γ).

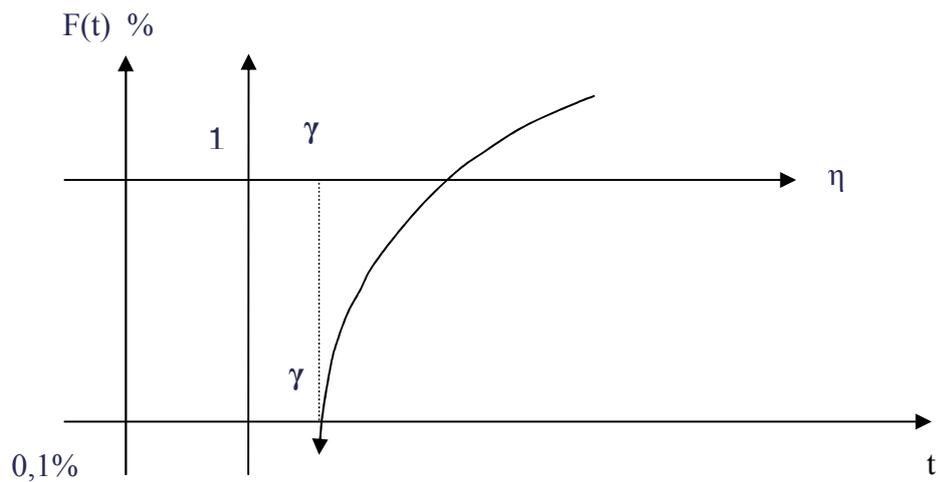


Figure 3.14. Détermination graphique du point $(\gamma, 0.001)$ sur papier « Weibull »

En posant $x = \text{Log} t$, l'équation (3.38) deviendra : $y = \beta \text{Log} (e^x - \gamma) - \beta \text{Log} \eta$; (Log : log népérien).

$y' = \frac{\beta e^x}{e^x - \gamma}$, $x = \text{Log}(\gamma) \Rightarrow y'_x$ tend vers l'infini ceci implique qu'on aura une demie tangente verticale au point $x = \text{Log}(\gamma)$.

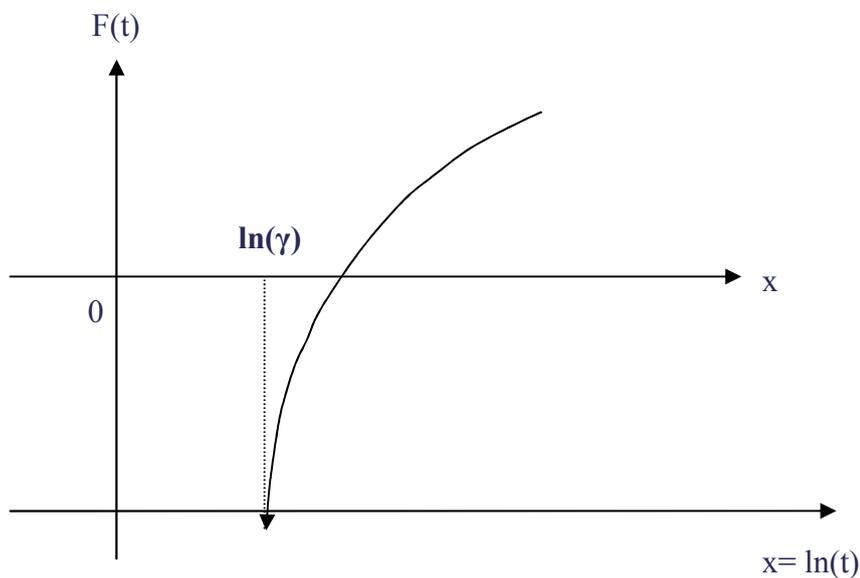


Figure 3.15. Détermination graphique sur papier à graduation linéaire

➤ Redressement de la courbe

On utilise la formule (3.39)

$$\gamma = \frac{t_2^2 - t_1 t_3}{2t_2 - t_1 - t_3} \quad (3.39)$$

On choisit arbitrairement les points (a_1, a_2, a_3) tel que " $a_1 a_2 = a_2 a_3 = \Delta$ " sur une échelle linéaire et non sur une échelle $\ln(\ln)$ du papier « d'Allan plait ».

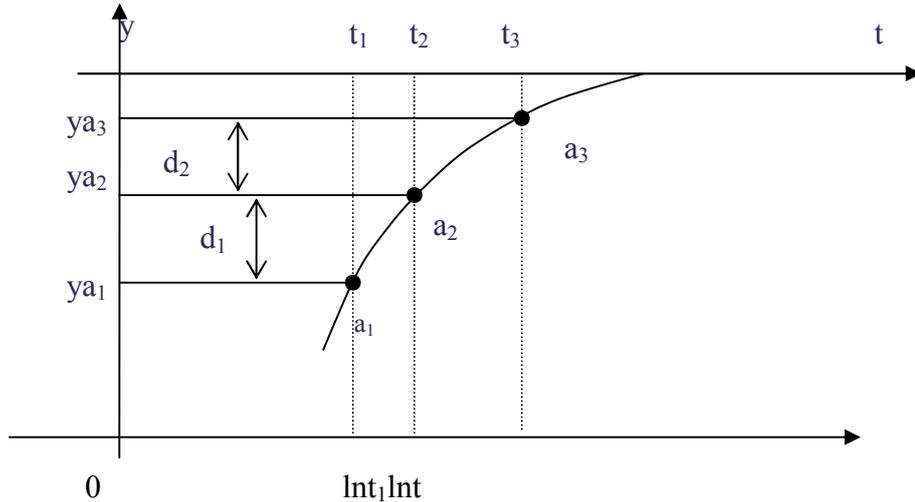


Figure3.16. Choix des trois points (sur une échelle linéaire : $d_1 = d_2 = \Delta$)

d) Ajustement du nuage de points par une courbe concave ($\gamma < 0$)

On obtient sur papier de "Weibull" une courbe tournée vers le haut. Une translation des points de la courbe d'une valeur de (γ) vers la droite redresse la courbe.

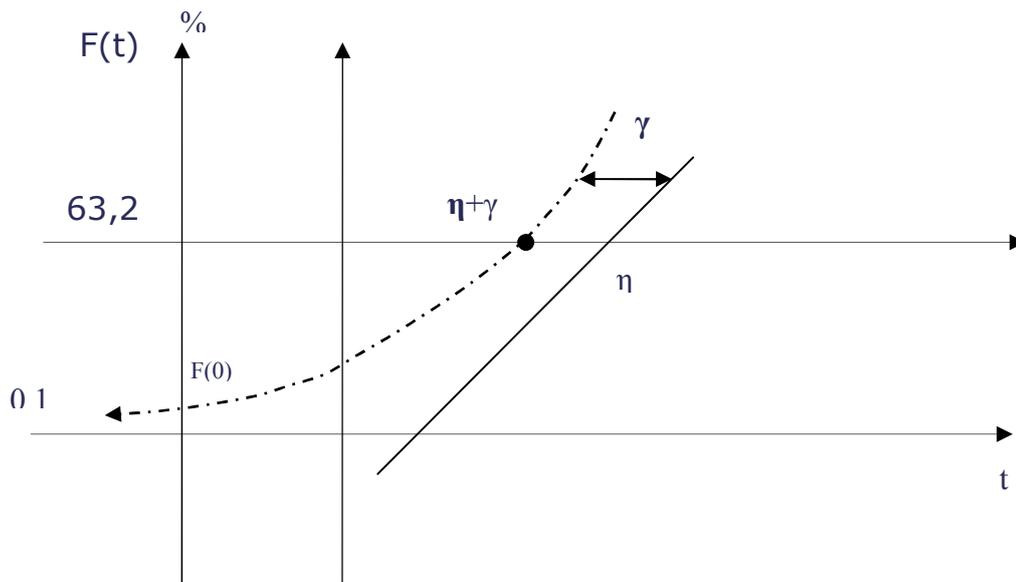


Figure 3.16. Redressement de la courbe concave ($\gamma < 0$)

➤ Détermination des paramètres

a) 1^{er} méthode :

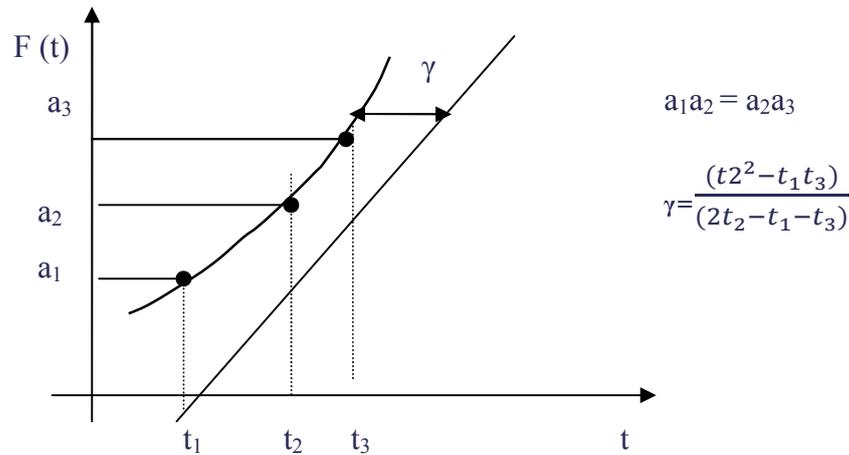


Figure 3.18. Choix des trois points ($a_1a_2=a_2a_3$)

b) 2^{ème} méthode

Il faut translater tous les points de la courbe d'une même valeur (γ) dont on augmente la valeur de proche en proche. La concavité ou convexité diminue progressivement jusqu'à l'obtention d'une droite. La valeur finale est " γ ".

3.6. Utilisation du papier graphique d'Allan plait

Ce papier porte quatre axes :

- L'axe horizontal « A1 » est l'axe des temps sur lequel on porte les valeurs (t_i) des durées de fonctionnement.
- L'axe vertical « B1 » sur lequel on porte les valeurs "F(t)" calculées par approximation. Avec n : la taille de l'échantillon.

$$\left. \begin{aligned}
 F(t) &= \frac{i}{n+1}, \quad n < 50 \\
 F(t) &= \frac{i}{n+1}, \quad 20 < n < 50 \text{ (rang médian)} \\
 F(t) &= \frac{i-0,3}{n+0,4}, \quad n < 20 \\
 F(t) &= \frac{i}{n}, \quad n > 50
 \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

- L'axe « a' » correspond à "ln t" (horizontal) partie supérieure.
- L'axe « b' » correspond à l'axe « B1 » correspond " $\ln\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)$ ". Cet axe permettra d'évaluer la valeur de (β) .

3.7. Détermination graphique des paramètres (η , β , γ)

Au point " $t=\eta=1$ " qui est l'origine du repère (X,Y), alors " $\ln\eta=0$ ", et la droite (D₂) parallèle à (D₁) passe par l'origine (X,Y) et aura pour équation " $y=\beta X$ ". Elle permet de déterminer la valeur (β) sur l'axe "b".

a) Cas d'une droite ($\gamma = 0$)

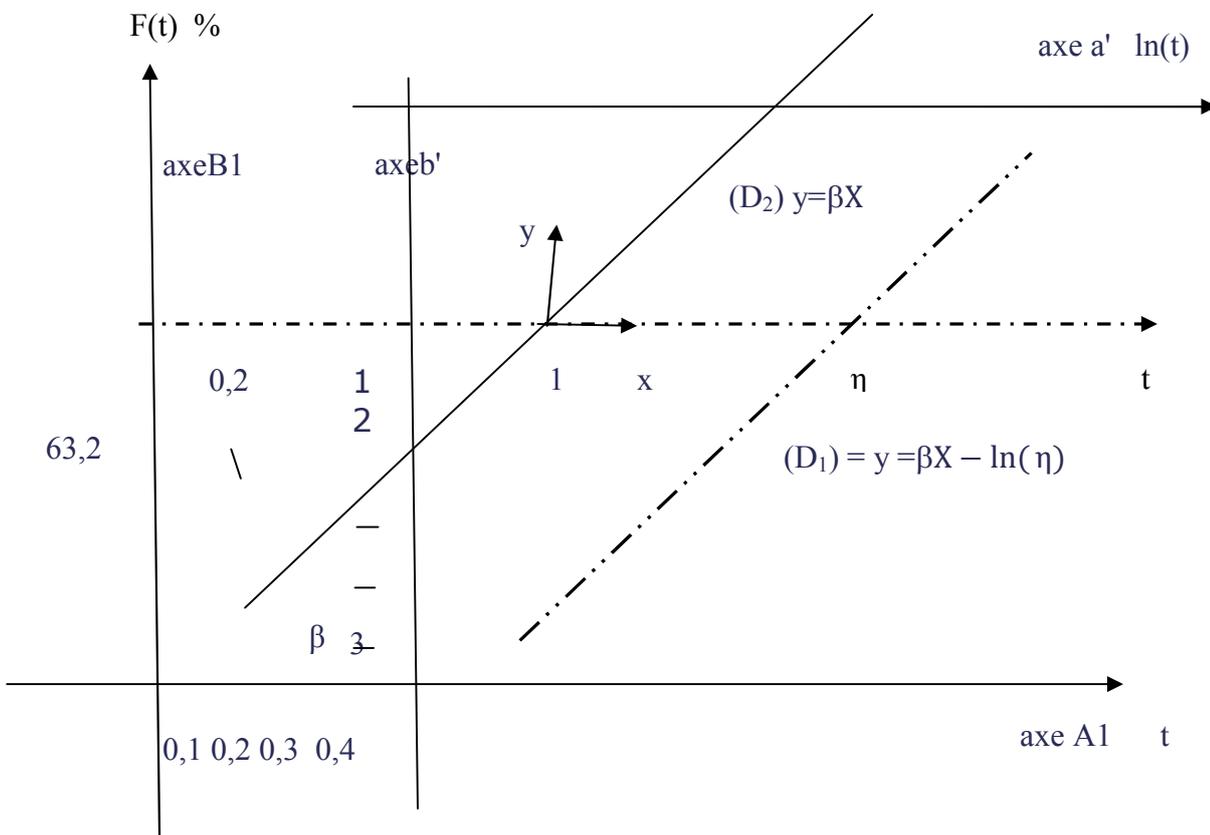


Figure 3.19. Conception du papier d'Allan plait.

b) Méthodologie de l'analyse de fiabilité

- 1- Préparation des données
- 2- Tracé du nuage des points ($t_i, F_i(t_i)$).
- 3- Tracé de la droite dite de " Weibull" (D1)

- 4- Déterminations des valeurs des trois paramètres β, η, γ .
- 5- Équation de la loi de "Weibull" (représentation graphique)
- 6- Détermination de la " M.T.B.F" en utilisant la table N°2 des valeurs x et y ;

$$x = \Gamma(1 + 1/\beta) \text{ et } y = \sqrt{\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2} \quad (3.41)$$

7- Exploitation des résultats.

c) Structure de tableau de valeurs

Les (n) valeurs de données de bon fonctionnement « TBF » obtenues en exploitation et enregistrées dans les données historiques des équipements. Ces valeurs (n) seront classées par valeurs selon un ordre (i) allant de (i=1 à i=n).

F(i) est la probabilité consultative de défaillance sur (o, t) suivant la taille(n) de l'échantillon.

Si $n > 50$; $F(i) = i/n$ formule de "weibull"

Si $20 < n < 50$; $F(i) = i/n + 1$ formule des rangs moyens

Si $n < 20$; $F(i) = \frac{i-0,3}{n+0,4}$ formule des rangs médians.

➤ Ajustements graphiques

Les ajustements graphiques se font sur des papiers à échelles fonctionnelles qui sont conçus pour linéariser la fonction de répartition "F(t)" à partir du nuage des points (ti, F(i)) représentant les données obtenues en exploitation.

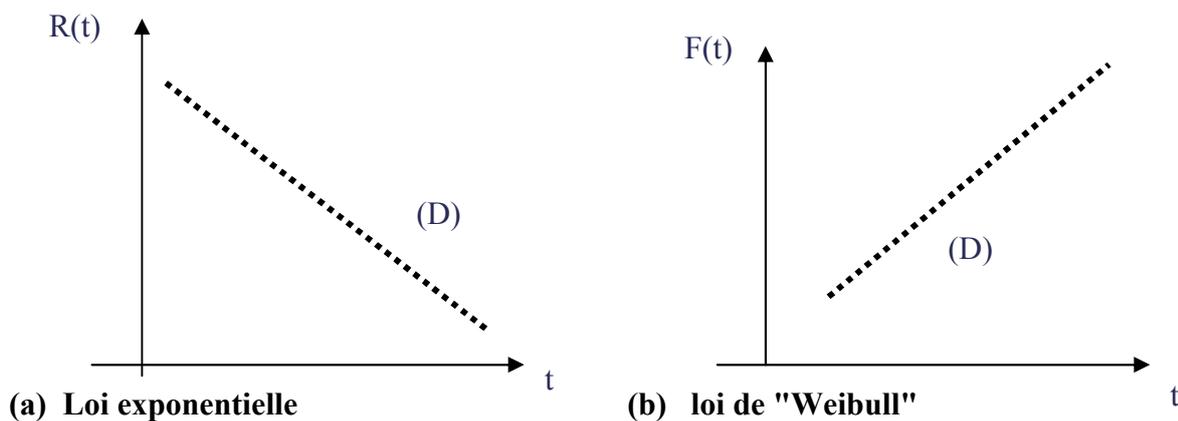


Figure 3.20. Régression des nuages de point en une droite (D)

Pour la loi exponentielle, on obtient le paramètre (λ) sur le papier semi-logarithmique, qui représente la pente de la droite.

Pour la loi de "Weibull", les trois paramètres (β , γ et η) sont obtenus sur le papier d'Allan Plait. La régression de ces nuages de point en une droite(D) permet d'affirmer si le test paramétrique est positif. (Cas du Test de Kolmogorov Smirnov) pour obtenir la meilleure droite ajustant le nuage de points, on utilise la méthode des moindres carrés

3.8. Méthode analytique pour déterminer les paramètres de "Weibull".

Pour estimer les paramètres de "Weibull" à partir des temps de bon fonctionnement « TBF », on utilise entre autres, la méthode des moindres carrés [12].

3.8.1. La méthode des moindres carrés.

Elle consiste à chercher la droite pour minimiser la somme des carrés des distances horizontales des divers points à la droite et donne les paramètres de "Weibull" (β et η). On estime la valeur de ces paramètres par la méthode des moindres carrés en utilisant les expressions suivantes:

$$\beta = \frac{\sum_1 x_i y_i - \bar{Y} \sum x_i}{\sum (x_i)^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \quad , \quad \eta = \exp(\bar{X} - \bar{Y}/\beta) \quad , \quad \gamma = 0 \quad (3.42)$$

Avec $Y_i = \ln[\ln(1/(1 - F(t_i)))]$, $X_i = \ln(t_i)$; $\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}$; $\bar{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n}$; et (t_i) représente le temps. On utilise un programme en langage " Matlab" [17] pour déterminer les paramètres de fiabilité à partir de l'équation (3.42).

3.8. Conclusion

Dans ce chapitre on a traité les différentes lois de probabilité utilisées en fiabilité et en particulier :

- ✓ la loi exponentielle (taux de défaillance constant), cette loi est le modèle de base privilégié des composants électroniques.
- ✓ la loi de "Weibull" (taux de défaillance décroissant, constant, croissant), cette loi est générale du fait des deux ou trois paramètres qui lui donnent une grande souplesse d'adaptation aux différents cas rencontrés. Elle représente bien la fiabilité des composants mécaniques dans les diverses période de fonctionnement.

C'est cette dernière qu'on a développée vu qu'elle est universellement utilisée. Ses paramètres en particulier (η et β) sont déterminés graphiquement à l'aide du papier de "Weibull" ou " Allan Plait" ; ou analytiquement par la méthode des moindres carrés dont le calcul est exécuté automatiquement par un programme numérique.

Table des valeurs x et y N°2

TABLE N°02

TABLE DES VALEURS x et y

$$M.T.B.F = E(T) = \gamma + \eta x$$

$$\text{Ecart - type } \sigma = \eta \cdot y$$

$$x = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

$$y = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2}$$

β	x	y	β	x	y	β	x	y
0.20	120.0000	1901.2	1.50	0.9027	0.6129	4.00	0.9064	0.2543
0.25	24.0000	199.36	1.55	0.8994	0.5925	4.10	0.9077	0.2490
0.30	9.2605	50.078	1.60	0.8966	0.5737	4.20	0.9089	0.2440
0.35	5.0291	19.976	1.65	0.8942	0.5564	4.30	0.9102	0.2392
0.40	3.3234	10.438	1.70	0.8922	0.5402	4.40	0.9114	0.2345
0.45	2.4786	6.4601	1.75	0.8906	0.5252	4.50	0.9126	0.2301
0.50	2.0000	4.4721	1.80	0.8893	0.5112	4.60	0.9137	0.2258
0.53	1.7024	3.3453	1.85	0.8882	0.4981	4.70	0.9147	0.2217
0.60	1.5046	2.6451	1.90	0.8874	0.4858	4.80	0.9160	0.2178
0.65	1.3663	2.1789	1.95	0.8867	0.4742	4.90	0.9171	0.2140
0.70	1.2658	1.8512	2.00	0.8862	0.4633	5.00	0.9182	0.2103
0.75	1.1906	1.6108	2.10	0.8857	0.4431	5.10	0.9192	0.2068
0.80	1.1330	1.4282	2.20	0.8856	0.4249	5.20	0.9202	0.2034
0.85	1.0880	1.2834	2.30	0.8859	0.4085	5.30	0.9213	0.2001
0.90	1.0522	1.1711	2.40	0.8865	0.3935	5.40	0.9222	0.1969
0.95	1.0234	1.0777	2.50	0.8873	0.3797	5.50	0.9252	0.1938
1.00	1.0000	1.0000	2.60	0.8882	0.3670	5.60	0.9241	0.1908
1.05	0.9808	0.9344	2.70	0.8893	0.3552	5.70	0.9251	0.1879
1.10	0.9649	0.8783	2.80	0.8905	0.3443	5.80	0.9260	0.1851
1.15	0.9517	0.8297	2.90	0.8917	0.3341	5.90	0.9269	0.1824
1.20	0.9407	0.7872	3.00	0.8930	0.3245	6.00	0.9277	0.1798
1.25	0.9314	0.7498	3.10	0.8943	0.3156	6.10	0.9286	0.1772
1.30	0.9236	0.7164	3.20	0.8957	0.3072	6.20	0.9294	0.1747
1.35	0.9190	0.6866	3.30	0.8970	0.2993	6.30	0.9302	0.1723
1.40	0.9174	0.6596	3.40	0.8984	0.2918	6.40	0.9310	0.1700
1.45	0.9067	0.6352	3.50	0.8997	0.2780	6.50	0.9318	0.1677
			3.60	0.9011	0.2817	6.60	0.9325	0.1655
			3.70	0.9025	0.2710	6.70	0.9333	0.1633
			3.80	0.9038	0.2656	6.80	0.9340	0.1612
			3.90	0.9031	0.2358	6.90	0.9347	0.1592

CHAPITRE 4
Fiabilité des systèmes :
Modélisation de la fiabilité des équipements

CHAPITRE 4 : Fiabilité des systèmes

4.1. Introduction

La détermination de la fiabilité d'un système électronique, mécanique ou autre, nécessite tout d'abord de connaître la loi de fiabilité (ou loi de défaillance) de chacun de composants intervenants dans le système. Ceci est simple pour certains types de systèmes électroniques or ce n'est pas le cas pour des systèmes mécaniques à cause de la complexité de la structure du système étudié.

Les systèmes mécaniques sont des ensembles d'éléments technologiques liés par des relations statiques et dynamiques assez complexes. Pour un système électronique, chaque composant a un poids important dans la fiabilité du système et donc il est calculé en fonction de la fiabilité de tous ses composants [21].

La fiabilité d'un système mécanique, contrairement à l'électronique, repose sur la fiabilité de quelques composants élémentaires responsables de son dysfonctionnement, dits composants « responsables » ou « critiques » (parfois un seul composant contribue totalement sur la probabilité de défaillance de l'ensemble). Les autres composants peuvent avoir de probabilités de défaillance pratiquement nulle. L'indentification de ces composants se fait en effectuant des analyses qualitatives telles que « l'AMDEC » (Analyse de mode de défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), et des analyses quantitatives par ordre de défaillance, ensuite, nous créerons un modèle à partir d'un diagramme de fiabilité (schéma bloc)le plus souvent, les systèmes mécaniques sont considérés comme une configuration en série.

4.1.1. Fiabilité des systèmes

L'objet de cette étude est la détermination de la fiabilité d'un appareillage complexe à partir de la fiabilité de ses composants [22].

- Défaillances primaires

On appelle défaillance primaire d'un composant, une défaillance qui est indépendante de la défaillance d'un autre élément ou composant.

4.1.2. Système en série

On considère un système complexe constitué de un ou de plusieurs sous ensembles de ce système.

On dit que le système est en série si la défaillance d'un seul de sous ensemble entraîne la défaillance du système totale.



Figure 4.1. Système en série

a) Cas des défaillances primaires

Les événements $\{ t < Ts_1 \text{ et } t < Tsi \}$ sont indépendants.

$$P(t < Ts) = \prod_{i=1}^n P(t < Tsi).$$

$$P(t < Ts) = \prod_{i=1}^n (1 - P(Tsi \leq t)) = \prod_{i=1}^n (1 - Fsi(t)) \tag{4.2}$$

Hypothèse d'indépendance des défaillances.

$$P(t < Ts) = 1 - \sum_{i=1}^n Fsi(t) \rightarrow R(t) = \prod_{i=1}^n Ri(t) \tag{4.3}$$

b) Cas des défaillances non primaires

$$P(t < Ts) = P(t < Ts_1, \dots, t < Tsn) \tag{4.4}$$

$$= P(t < Ts_1) \cdot P(t < Ts_2 / t < Ts_1) \dots P(t < Tsn / t < Ts_1 \cap t < Ts_2 \dots \cap t < Tsn) \tag{4.5}$$

4.1.3. Système en parallèle

On considère un système complexe de(n) sous ensembles. On dit que le système est en parallèle si la défaillance de (n-1) sous ensembles n'entraîne pas la défaillance totale.

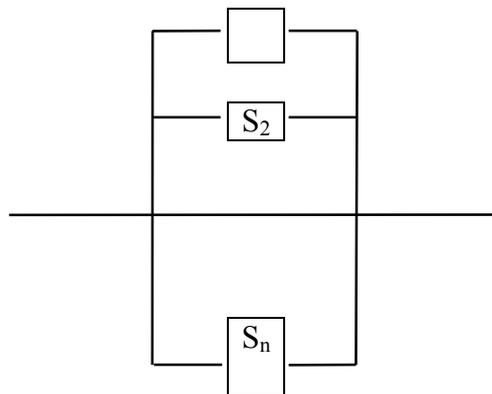


Figure 4.2. Système en parallèle

$$P(t < Ts) = P(t < Ts_1 \cup t < Ts_2 \dots \cup t < Tsn) \tag{4.6}$$

a) Cas des défaillances primaires

On a $Fs(t) = Fs_1(t) \times Fs_2(t) \dots \times Fsn(t)$

➤ Démonstration pour n=2

$$P(t < Ts) = P(t < Ts_1 \cup t < Ts_2) \tag{4.7}$$

$$P(t < Ts) = P(t < Ts_1) + P(t < Ts_2) - P(t < Ts_1 \cap t < Ts_2) \tag{4.8}$$

$$= P(t < Ts_1) + P(t < Ts_2) - P(t < Ts_1) \times P(t < Ts_2) \quad (4.10)$$

$$1 - P(t < Ts) = 1 - P(t < Ts_1) - P(t < Ts_2) + P(t < Ts_1) \times P(t < Ts_2) \quad (4.11)$$

$$F(t) = [1 - P(t < Ts_1)] [1 - P(t < Ts_2)] \quad (4.12)$$

$$F(t) = F_{s_1}(t) \times F_{s_2}(t) \quad (4.13)$$

On suppose $F(t) = F_{s_1}(t) \times F_{s_2}(t) \dots \times F_{s_n}(t)$ alors on démontre la relation pour (n) sous systèmes.

$$P(t < Ts) = P(t < Ts_1 \cup t < Ts_2 \dots \cup t < Ts_n) \quad (4.14)$$

$$P(t < Ts) = P(A) + P(t < Ts_n) - P(A \cap t < Ts_n) \quad (4.15)$$

$$F(t) = 1 - P(t < Ts) = 1 - P(A) - P(t < Ts_n) + P(A) \times P(t < Ts_n) \quad (4.16)$$

$$F(t) = [1 - P(A)][1 - P(t < Ts_n)] \quad (4.17)$$

$$F(t) = F_{s_1}(t) \times F_{s_2}(t) \dots \times F_{s_n}(t) \quad (4.18)$$

$$F(t) = \prod_{i=1}^n F_{s_i}(t) \Rightarrow R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (4.18)$$

4.1.4. Système à configuration (parallèle – série)

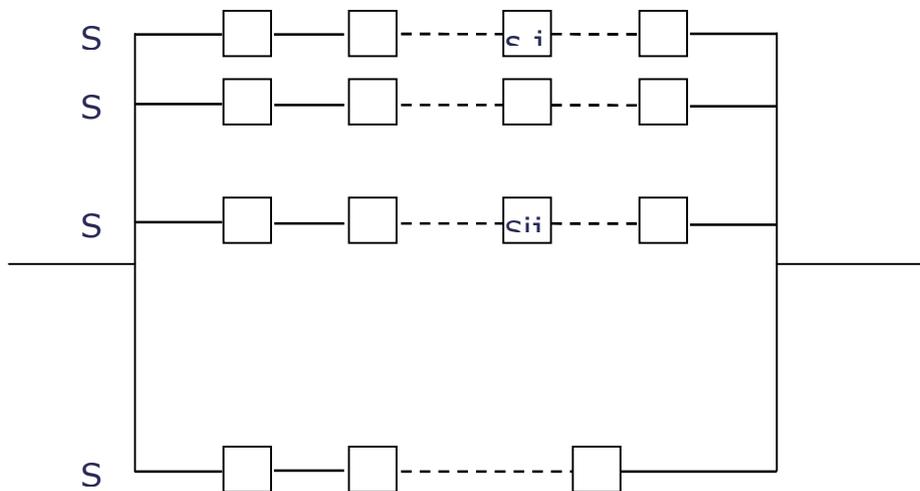


Figure 4.3. Système parallèle-série

a) Cas des défaillances primaires

$$P(t < Ts) = P(t < Ts_1 \cup t < Ts_2 \cup \dots \cup t < Ts_n) \quad (4.19)$$

On aura : $F(t) = F_{s_1}(t) \times F_{s_2}(t) \dots \times F_{s_n}(t)$

$$F_{s_i}(t) = 1 - P(t < T_{s_i}) \quad (4.20)$$

$$P(t < T_{s_i}) = P(t < T_{s_{i1}} \cap t < T_{s_{i2}} \dots \cap t < T_{s_{im}}) \quad (4.21)$$

$$P(t < T_{s_i}) = \prod_{j=1}^m P(t < T_{s_{ij}}) \quad (4.22)$$

$$R_i(t) = \prod_{j=1}^m R_{ij}(t) \quad (4.23)$$

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - \prod_{j=1}^m R_{ij}(t)] \quad (4.24)$$

4.1.5. Cas d'un système série- parallèle

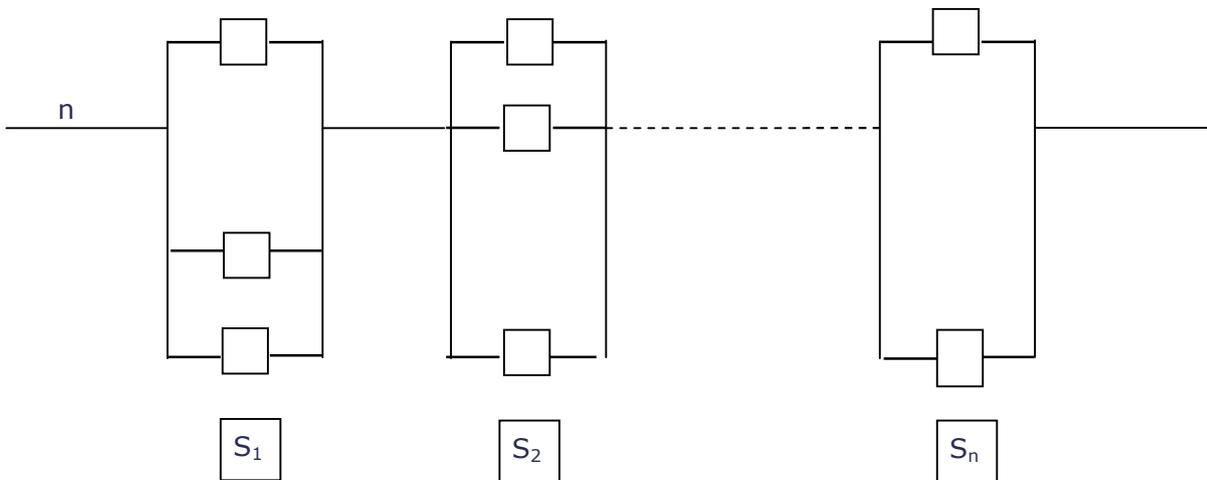


Figure 4.4 .Système série parallèle

a) cas des défaillances primaires

$$P(t < T_s) = P(t < T_{s1} \cap t < T_{s2} \cap \dots \cap t < T_{sn}) \tag{4.25}$$

$$P = \prod_{j=1}^n P(t < T_{sij}) \tag{4.26}$$

$$1 - P(t < T_{sj}) = \prod_{i=1}^m F_{sij}(t) \tag{4.27}$$

$$R(t) = \prod_{j=1}^m (1 - \prod_{i=1}^n F_{sij}(t)) \tag{4.28}$$

4.1.6. Système quelconque [23]

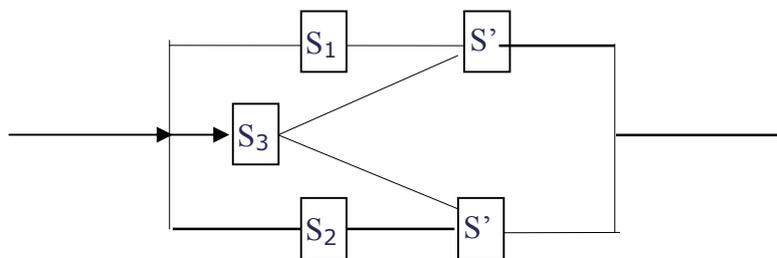


Figure 4.5. Système quelconque

On désigne par : $R_1(t)$ la fiabilité au temps(t) de « S_1 »

$F_1(t)$ la répartition au temps (t) de « S_1 »

$R'_1(t)$ la fiabilité au temps (t) de « S'_1 »

$F'_1(t)$ la répartition au temps (t) de « S'_1 »

Et ainsi on aura.

$$P(t < T_s) = P [(t < T_s) \cap (t < T_{s3} \cup T_{s3} < t)] \tag{4.29}$$

$$P(t < T_s) = P \left[\underbrace{(t < T_s \cap t < T_{S_3}) \cup (t < T_s \cap T_{S_3} \leq t)} \right] \quad (4.30)$$

Événements incompatibles (ne sont pas réalisables en même temps)

$$P(t < T_s) = P(t < T_s / t < T_{S_3}) \cdot P(t < T_{S_3}) + P(t < T_{S_3} / T_{S_3} < t) \cdot P(T_{S_3} < t) \quad (4.31)$$

Le composant « S₃ » rend le système complexe ainsi on décompose le système en deux :

✓ P (t < T_s/t < T_{S₃}) le système « S₃ » fonctionne.

On aura :

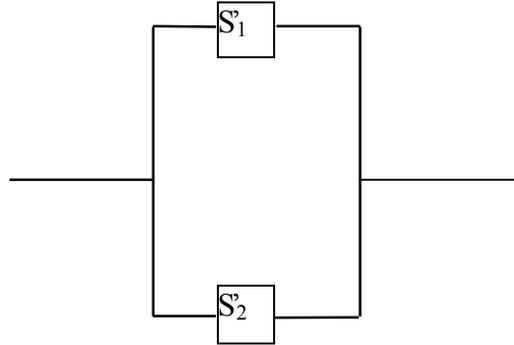


Figure 4.6. Système obtenu (avec S₃ fonctionne)

$$F_{S'1S'2}(t) = F_{S'1}(t) \cdot F_{S'2}(t) \quad (4.32)$$

$$P(t < T_s / t < T_{S_3}) = 1 - F_{S'1} \cdot F_{S'2}(t) \quad (4.33)$$

✓ P (t < T_s / T_{S₃} ≤ t) le système « S₃ » ne fonctionne pas, on aura :

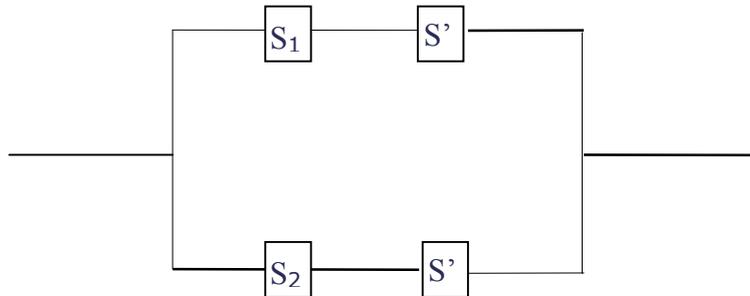


Figure 4.7. Système (S₃ ne fonctionne pas)

$$F_{S'1, S'1, S'2}(t) = (1 - R_{S1} \cdot R_{S'1}) (1 - R_{S2} \cdot R_{S'2}) \quad (4.34)$$

$$P(t < T_s / t < T_{S_3}) = (1 - F_{S'1}(t) F_{S'2}(t)) (R_{S3}(t) + (1 - (1 - R_{S1} \cdot R_{S'1}) (1 - R_{S2} \cdot R_{S'2}))) \quad (4.35)$$

$$F(t) = (1 - P(t < T) = F_{S'1}(t)) \cdot F_{S'2}(t) \cdot R_{S3}(t) + (1 - R_{S1} \cdot R_{S'1}) (1 - R_{S2} \cdot R_{S'2}) \quad (4.36)$$

4.2 .Loi de durée de vie d'un système [24]

4.2.1. Cas des défaillances primaires (système série)

On considère (n) sous systèmes « Si » avec (1 ≤ i ≤ n), de durée de vie "Tsi" et tel que pour chaque « Si » "Tsi " suit une loi exponentielle on aura :

$$P(t < T_{si}) = e^{-\lambda_i t} \quad (4.37)$$

$$P(t < T_s) = \prod_{i=1}^n P(t < T_{si}) = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t} \quad (4.38)$$

$$\text{MTBF du système} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (4.39)$$

4.2.2. Cas de (n) sous systèmes

On considère (n) sous systèmes « Si » avec (1 ≤ i ≤ n), de durée de vie "Tsi" et tel que pour chaque « Si » "Tsi " suit une loi de "Weibull" alors on aura :

$$P(t < T_s) = \prod_{i=1}^n P(t < T_{si}) = e^{-\left(\frac{t-\gamma_i}{\eta_i}\right)^{\beta_i}} \quad (4.40)$$

$$P(t < T_s) = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t} \quad (4.41)$$

Cas particulier :

$$\gamma_i = \gamma \quad \forall i \quad \text{et} \quad \beta_i = \beta \quad \forall i, \quad P(t < T_s) = e^{-\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{(\eta_i)^\beta} (t-\gamma)^\beta\right)} = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (4.42)$$

Avec $\eta = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{(\eta_i)^\beta}\right]^{1/\beta}}$

Dans ce cas particulier :

$$\text{MTBF} = \gamma + \eta \Gamma(1+1/\beta) \quad (4.43)$$

4.2.3. Système parallèle

Les (n) sous systèmes sont placés en parallèle et ont une durée de vie qui suit une loi exponentielle.

$$R(t) = P(t < T_s) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (4.44)$$

$$R(t) = \sum_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} - \sum_{i \leq i \leq j \leq n} e^{-(\lambda_i + \lambda_j)t} + \sum_{i \leq i \leq j \leq k \leq n} e^{-(\lambda_i + \lambda_j + \lambda_k)t} + \dots + (-1)^{n+1} \prod_{i=1}^n (e^{-\lambda_i t}) \quad (4.45)$$

$$\text{MTBF} = \int_0^t t f(t) dt = \int -t R'(t) dt = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} - \sum \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} + \frac{1}{\sum \lambda_i + \lambda_j + \lambda_k} + \dots + (-1)^{n+1} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (4.46)$$

4.2.3.1. Cas particulier $\lambda_i = \lambda \quad \forall i = 1, \dots, n$

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda t}) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n \quad (4.47)$$

$$R(t) = \sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} C_n^k e^{-k\lambda t} \quad (\text{binôme de Newton})$$

$$\text{TBF} = \sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} C_n^k \frac{1}{k\lambda} = \frac{1}{\lambda} \left[\sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \frac{C_n^k}{k} \right] \quad (4.48)$$

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \quad (4.49)$$

4.2.3.2. Cas d'une loi de "Weibull"

Si on note "Ti "la durée de vie de sous système « Si » et "Ti "suit une loi de "weibull" de paramètres ($\gamma_i, \beta_i, \eta_i$).

$$R_i(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma_i}{\eta_i}\right)^{\beta_i}} \quad (4.50)$$

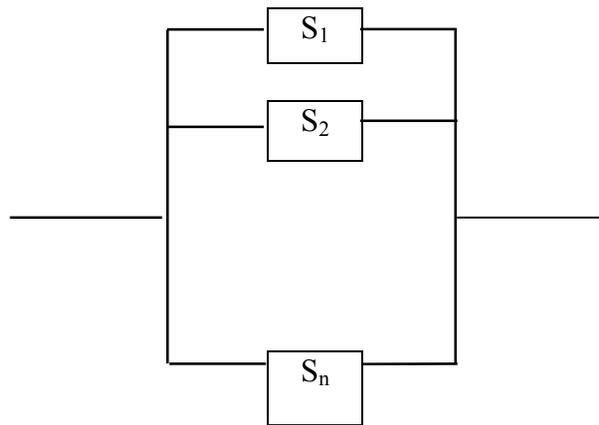


Figure 4.8. Durée de vie d'un système parallèle

La loi de la durée de vie du système est donnée par :

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) = \sum_{i=1}^n R_i(t) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} R_i(t)R_j(t) + \dots + (-1)^n \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

Détermination de la MTBF :

$$\gamma_i = \gamma, \eta_i = \eta, \beta_i = \beta, \forall i = 1, n.$$

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) = 1 - \left[1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \right]^n \quad (4.51)$$

$$R(t) = \sum_{k=1}^n C_n^k (-1)^{k+1} e^{-k\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (4.52)$$

$$MTBF = \sum_{k=1}^n C_n^k (-1)^{k+1} \left(\gamma + \frac{\eta}{k^\beta} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right) \quad (4.53)$$

4.3. Conclusion

Lors de l'élaboration d'un système complexe un des paramètres fixé au départ consiste à déterminer sa fiabilité. Il se pose le problème suivant : quelle doit être la fiabilité des sous systèmes pour que le système complexe ait une fiabilité fixée au temps(t).

L'étude générale est très complexe, on obtient des résultats simples, uniquement dans le cas de système série.

La fiabilité d'un système mécanique dépend principalement de la fiabilité d'un ou de deux composants. Ainsi, la fiabilité mécanique d'un consiste principalement à étudier ses composants.

CHAPITRE 5

OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE

Chapitre 5 : Optimisation de la maintenance

5.1. Introduction

L'un des problèmes économiques qui peut être résolu par la connaissance de la fiabilité est la détermination de la période optimale de la maintenance préventive.

Il sera commode, de considérer ici qu'une machine (ou un système) qui comporte un organe défaillant d'étudier quelles sont les conséquences des décisions que l'on peut prendre au sujet du remplacement de cet organe. On peut, soit attendre la rupture de cet organe et subir, de ce fait, une panne coûteuse, soit envisager de le remplacer à une période " T_r " (à déterminer), de manière à éviter, dans certaines mesures, une interruption intempestive du service. [25,26].

5.1.1. Coûts de la maintenance [27,28]

Les coûts de la maintenance représentent l'ensemble des dépenses engagées pour maintenir en état de fonctionnement un système ou un équipement. Il existe trois types de coûts :

- ✓ Le coût de maintenance direct qui comprend : le prix de la pièce de rechange et la main d'œuvre.
- ✓ Le coût de maintenance indirect qui comprend : le coût du personnel non imputable avec certitude à une tâche de maintenance, les dépenses d'entretien, de réparation des outillages spécifiques ou non, les dépenses d'infrastructure.
- ✓ Le coût d'indisponibilité ou de défaillance lié à l'action de la maintenance à effectuer, ce dernier correspond à une perte sèche d'exploitation

5.1.2. Remplacement systématique au bout du temps T_r [29].

La maintenance préventive de type systématique consiste à faire des remplacements périodiques. Ces remplacements sont effectués à des intervalles de temps fixes et prédéterminés, si entre les périodes de remplacement une défaillance se produit, on procède alors à une maintenance corrective. Cette politique de maintenance présente des défauts dans son principe puisqu'elle permet un gaspillage de pièces de rechange. Ainsi, on pourra changer une pièce ou un organe qui vient d'être remplacé dans l'intervention d'une opération curative. On peut alors rencontrer le cas limite d'un organe changé à " $T_r - \epsilon$ " au cours d'une maintenance corrective et à " T_r " pour une maintenance préventive.

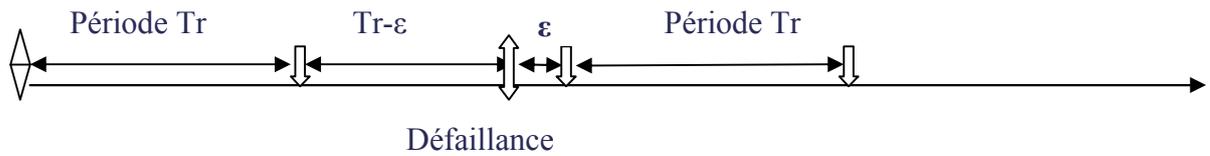


Figure 5.1. Remplacement systématique

Le coût par unité de temps et par matériel est donné par :

$$C = \frac{C_1 + (1 - R(T_r))C_2}{T_r} \quad (5.1)$$

C_1 : Coût de remplacement de l'organe (ou dispositif).

C_2 : Coût d'une défaillance imprévisible ($C_2 > C_1$)

T_r : périodicité de remplacement

$R(t)$: fiabilité du dispositif

$f(t)$: densité de probabilité

$r = C_2/C_1$: le rapport de criticité économique de défaillance compris entre 2 et 100.

5.1.3. Remplacement systématique à âge fixe [30].

La maintenance préventive de type âge fixe consiste à faire des remplacements d'éléments suivant un intervalle d'âge fixe. Si une défaillance se produit dans cette période de la maintenance, une intervention curative est effectuée et, alors l'âge de l'élément sera remis à zéro. Une nouvelle période préventive commence et ainsi de suite la maintenance sera assurée. La détermination de la période de remplacement sera faite selon un compromis entre le coût de panne et celui de la maintenance préventive.

Ce second cas est caractérisé par une surveillance continue de l'âge du dispositif ou de l'organe, dès que la durée atteindra la période " T_r ", un remplacement sera effectué.

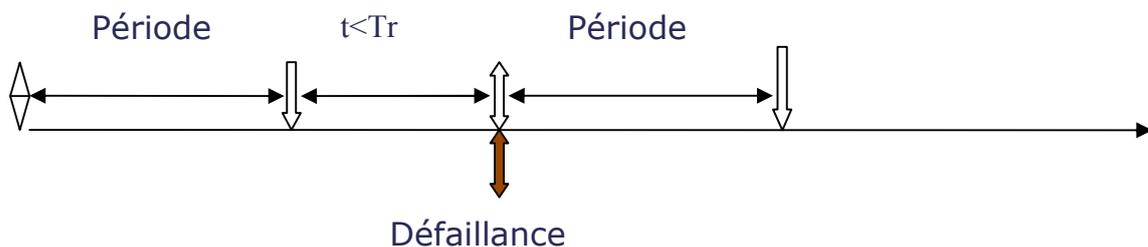


Figure 5.2. Remplacement à âge fixe

Considérons un organe remplacé à un instant " T_r ", il le sera de nouveau soit à ($t < T_r$) pour défaillance imprévue, soit à " T_r " pour un changement préventif.

L'espérance de fonctionnement est donnée par :

$E(Tr) = \int_0^{Tr} R(t)dt$ dans le cas de Weibull.

Certains organes sont remplacés au coût ($C1$) et d'autres au coût ($C2$). Les proportions de la fiabilité sont $R(Tr)$ et $(1-R(Tr))$. [1, 3]

Le coût de remplacement systématique sera : $C1 * R(Tr) + C2(1 - R(Tr))$.

Le coût par unité de temps et par dispositif (organe) est donné par [25] :

$$C = \frac{C2 - (C2 - C1)R(Tr)}{E(Tr)} \quad (5.2)$$

Pour minimiser ce coût, il suffit d'annuler la dérivée du rapport C .

5.2. Optimisation de remplacement systématique (1^{er} cas)

La périodicité (t_e) optimale qui minimisera le coût $C = \frac{C1 + (1-R(t))C2}{t}$:

D'où $\frac{dC}{dt} = 0 = \frac{(f(t)C2.t - C1 - (1-R(t))C2)}{t^2}$

Après dérivation de l'équation (5.1) on trouve :

$$t. f(t) + R(t) = 1 + \frac{C1}{C2} \quad (5.3)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \text{ avec } \gamma=0.$$

L'équation (5.3) devient :

$$t. \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} + e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} = 1 + \frac{C1}{C2} \quad (5.4)$$

$$\text{Posons } x = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \Rightarrow \beta. x e^{-x} + e^{-x} = 1 + \frac{C1}{C2} \quad (5.5)$$

$$e^{-x}(\beta x + 1) - 1 = \frac{C1}{C2} = y_2(x) \text{ avec } \frac{C1}{C2} < 1 \quad (5.6)$$

On pose la fonction $y_1(x)$

$$y_1(x) = t.f(t) + R(t) - 1 = e^{-x}(\beta x + 1) - 1 \quad (5.7)$$

5.2.1. Etude de la fonction $y_1(x)$

$$y_1(0) = 0 ; \quad y_1(+\infty) = -1 \quad (5.8)$$

$$y_1'(x) = -e^{-x}(\beta x + 1) + \beta e^{-x} = e^{-x}(-\beta x - 1 + \beta) \quad (5.9)$$

$$y_1'(x) = 0 \Rightarrow x_0 = \frac{\beta-1}{\beta} \quad (5.10)$$

a) $0 < \beta < 1$

L'équation $y_2(x) = \frac{C1}{C2} > 0$

D'où, on peut déduire que l'équation « $y_1(x)$ » n'admet pas de solution, car " $x_0 = \frac{\beta-1}{\beta}$ " est négative or $0 < x < +\infty$ donc c'est incompatible.

b) $\beta = 1$

Dans le cas d'une loi exponentielle, c'est-à-dire pour un matériel de fatigue, ce type de maintenance préventive n'a pas d'intérêt ; car la seule solution de $y_2(x) = \frac{C1}{C2}$ est $C1 = 0$ et $x_0 = 0$.

c) $\beta > 1$

Etude de la fonction $y_1(x)$ pour $\beta > 1$

x	0	$(\beta-1)/\beta$	
y'	+ + + + +		0 - -
y ₁			
	0		-1

Tableau 5.1. Variation de la fonction y₁(x)

La fonction y₁(x) pour $\beta > 1$ a un maximum de valeur $(\beta e^{-\frac{\beta-1}{\beta}} - 1)$ voir figure(5.3)

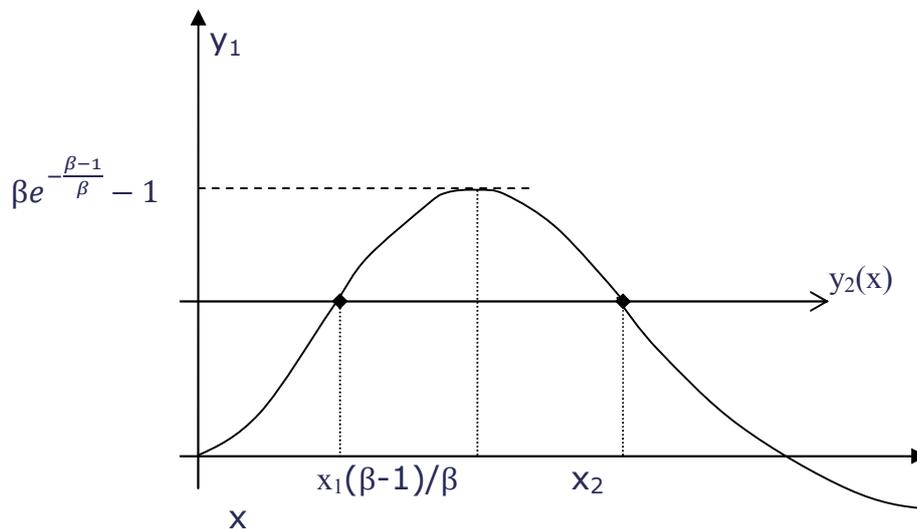


Figure 5.3. Courbes représentatives des fonctions (y₁ et y₂)

d) Etude de l'équation du coût de remplacement systématique

$$C(t) = \frac{C1 + (1 - R(t))C2}{t}$$

Sa dérivée $C'(t) = \frac{C2(tf(t)+R(t)-(C1+C2))}{t^2}$

$$C'(t) = \frac{C2(tf(t)+R(t)-1-\frac{C1}{C2})}{t^2} = \frac{C2(y1(x)-y2(x))}{t^2} \tag{5.11}$$

Utilisant la figure (5.3), on étudie la variation du C'(t)

$$0 < x < x_1 \Rightarrow y_2(x) > y_1(x) \Rightarrow c'(t) < 0 \tag{5.12}$$

$$x_1 < x < x_2 \Rightarrow y_1(x) > y_2(x) \Rightarrow c'(t) > 0 \tag{5.13}$$

$$x > x_2 \Rightarrow y_2(x) > y_1(x) \Rightarrow c'(t) < 0 \tag{5.14}$$

x	0	x ₁	x ₂
C'(t)	- -	+ + + + +	--- - -
C(t)			

Tableau 5.2. Variation de la fonction C (t)

D'où l'allure de la courbe C(t), (figure 5.4)

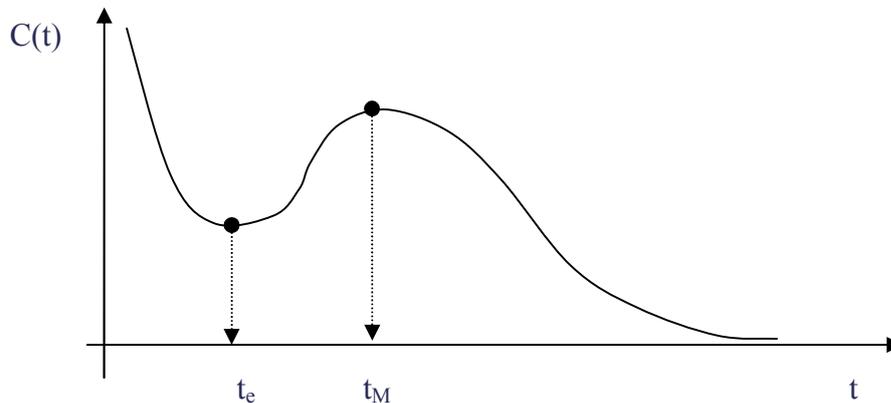


Figure 5.4. Courbe représentative de la fonction C (t)

t_e : période optimale

$$x_1 = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \Rightarrow t_e = \eta (x_1)^{1/\beta} \tag{5.15}$$

a) 5.3. Optimisation du coût de remplacement systématique (5.11)

$$y(t) = tf(t) + R(t) - c = 0 \text{ et } c = \frac{c_1 + c_2}{c_2} \tag{5.16}$$

Avec $f(t) = \beta/\eta \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$ et $R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$

Dans le cas où $\gamma > 0$ et $\beta > 1$

à $t = \gamma$, $f(t) = 0$, $y(t) = 1 - c$

Cherchons le maximum de y(t) :

$$y'(t) = t \cdot f'(t) \text{ avec } f'(t) = \beta \eta^2 e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-2} \left[\beta - 1 - \beta \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta \right] \quad (5.17)$$

$$f'(t) = 0 \Rightarrow \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta = \frac{\beta-1}{\beta} \Rightarrow t_M = \gamma + \eta \sqrt[\beta]{\frac{\beta-1}{\beta}} \quad (5.18)$$

t_M : Valeur de (t) abscisse du point maximum de la courbe $y(t)$.

$$t_M = \gamma + \eta \left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)^{1/\beta}$$

Les expressions de $R(t_M)$ et $f(t_M)$ deviennent, voir les équations (5.19) et (5.20)

$$R(t_M) = e^{-\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)}; \quad f(t_M) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)^{\frac{\beta-1}{\beta}} \cdot e^{-\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)} \quad (5.19)$$

$$y(t_M) = \left[\frac{\beta \cdot \gamma}{\eta} \left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)^{\frac{\beta-1}{\beta}} + (\beta - 1) + 1 \right] e^{-\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)} - c \quad (5.20)$$

Etude de la variation de la fonction $y(t)$

Si $t \rightarrow \infty$ $y(t) = -c$

Pour connaître le nombre de racines de $y(t)=0$ on calcule :

$y(\gamma)$, $y(\infty)$, $y(t_M)$

On a :

$y(\gamma) = 1-c$, $y(\infty) = -c$,

$$y(t_M) = e^{-\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)} \left[\frac{\beta \cdot \gamma}{\eta} \left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)^{\frac{\beta-1}{\beta}} + (\beta - 1) + 1 \right] - c > 0 \quad (5.21)$$

Si $(1-c) y(t_M) < 0 \Rightarrow$ on aura une racine de $y(t)=0$ entre γ et t_M .

Si $(-c) y(t_M) < 0 \Rightarrow$ on aura une racine de $y(t)=0$ entre t_M et $+\infty$

Dans notre cas la condition suivante est vérifiée pour les deux racines

$$c < \left[\frac{\beta \cdot \gamma}{\eta} \left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)^{\frac{\beta-1}{\beta}} + \beta \right] e^{-\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)} \quad (5.22)$$

L'allure de la courbe $y(t)$ montre graphiquement la valeur maximale (t_M)

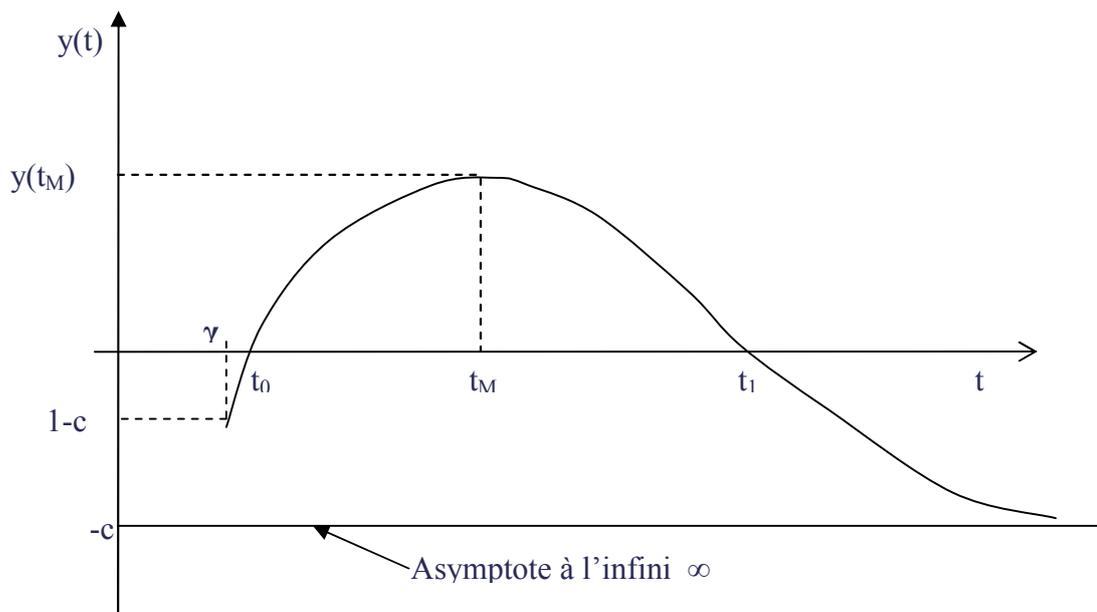


Figure 5.5. Allure de la courbe $y(t)$

D'après l'allure de la courbe, on peut déduire que la méthode de "Newton Raphson" ne s'applique pas, d'où on utilise la méthode par substitution successives ($x_n = y(x_{n+1})$) pour déterminer les racines " t_0 " et " t_1 " [16].

La résolution de telle équation est faite par calcul numérique.

Dans le cas où $\beta > 1$ et $\gamma = 0$, à condition que la relation « $c < \beta e^{\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)}$ » soit vérifiée, en posant $x = (t/\eta)^\beta$ alors on aura : $y(t) = 0 \Rightarrow e^{-x}(\beta x + 1) - 1 = c_i$

Avec $c_i = \frac{c_1}{c_2} = 1/r < 1$, on aura : $\log(e^{-x}) + \log(\beta x + 1) = \log(c_i + 1)$

D'où on aura : $-x + \ln(\beta x + 1) = \log(c_i + 1)$

Alors, $x = \ln\left(\frac{\beta x + 1}{c_i + 1}\right)$

On pose $x_{n+1} = \ln\left(\frac{\beta x_n + 1}{c_i + 1}\right)$

Après itération on aura une valeur constante de " x_{n+1} " d'où on déduit la période optimale (t_e):

$$t_e = \eta (x_{n+1})^{1/\beta} \tag{5.23}$$

Dans notre étude de cas, on va choisir les organes dont le paramètre de forme est supérieur à un ($\beta > 1$) et la relation " $1 + \frac{c_1}{c_2} = 1 + \frac{1}{r}$ " doit être inférieure à " $\beta e^{-\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)}$ "

5.4. Cas de remplacement à âge fixe [29].

Le coût moyen par unité de temps et par dispositif est donné par :

$$C = \frac{C_2 - (C_2 - C_1)R(T_r)}{\int_0^{T_r} R(T_r) dt} \tag{5.24}$$

Certains dispositifs sont remplacés au coût " C_1 " et d'autres au coût " C_2 ". Les proportions respectives sont " $R(T_r)$ et $(1 - R(T_r))$ ".

L'espérance du coût remplacement d'un dispositif est donc : $R(T_r) C_1 + (1 - R(T_r)) C_2$ ou $C_2 - (C_2 - C_1) R(T_r)$, d'où le coût par unité de temps est " C ".

La valeur (t_e) égale à la période optimale économique, c'est celle qui minimise $C(t)$.

$$C(t) = \frac{C_2(1 - R(t)) + C_1 R(t)}{\int_0^t R(t) dt} \tag{5.25}$$

$$\frac{dc}{dt} = c'(t) = \frac{[c_2 f(t) - c_1 f(t)] \int_0^t R(t) dt - [C_2(1 - R(t)) + C_1 R(t)] R(t)}{\left[\int_0^t R(t) dt\right]^2} \tag{5.26}$$

$$C'(t) = 0 \Rightarrow \frac{C_2}{C_2 - C_1} = \lambda(t) \int_0^t R(t) dt + R(t) = \frac{1}{1 - \frac{C_1}{C_2}} \tag{5.27}$$

Considérons le cas d'une loi de "Weibul" ($\gamma=0$) à deux paramètres ($\gamma=0, \beta$)

On aura : $R(t)=e^{-(t/\eta)^\beta}$

$$y(t) = \frac{1}{1-\frac{c_2}{c_1}} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} + e \int_0^t e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} dt \quad (5.28)$$

$$y'(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \frac{\beta-1}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-2} \int_0^t e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} dt + \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot \frac{\beta}{\eta} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (5.29)$$

$$y'(t) = \frac{\beta(\beta-1)}{\eta^2} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-2} \int_0^t e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} dt \quad (5.30)$$

a) $0 < \beta < 1$

Etude de la fonction $y(t)$ pour $\beta < 1$; $y'(t) < 0$ pour $t > 0$

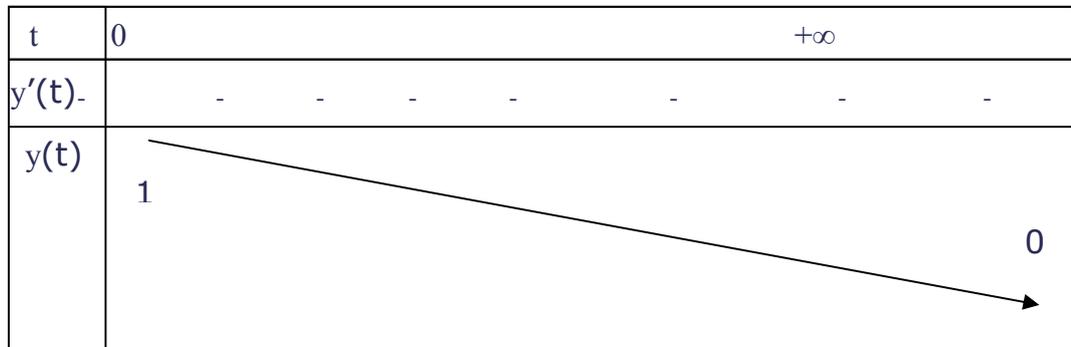


Tableau 5.3. Variation de la fonction $y(t)$ pour $\beta < 1$

$0 < y(t) < 1$ et l'équation " $\frac{1}{1-\frac{c_1}{c_2}} > 1$ " n'a pas de solution car " $\frac{c_1}{c_2} \in]0, 1[$ " et

$$y'(t) = \frac{\beta(\beta-1)}{\eta^2} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-2} \int_0^t e^{-\left(\frac{u}{\eta}\right)^\beta} du < 0, \text{ d'où la fonction } y(t) \text{ n'admet pas de solution.}$$

Pour un matériel en période de jeunesse ce type de maintenance n'a pas d'intérêt.

b) $\beta > 1$

Etude de la fonction $y(t)$ pour $\beta > 1$; $y'(t) > 0$ pour $t > 0$

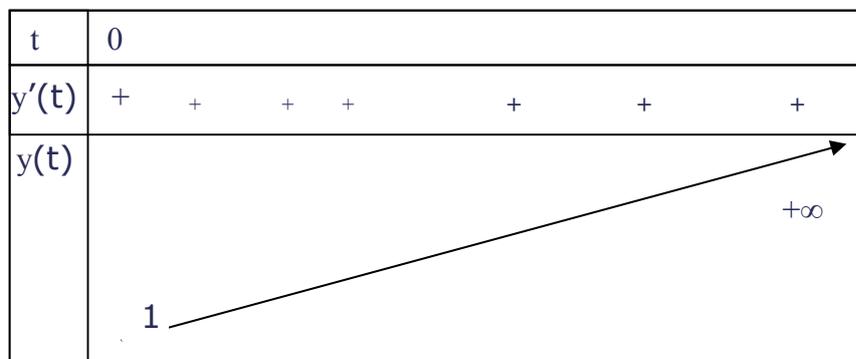


Tableau 5.4. Variation de la fonction $y(t)$ pour $\beta > 1$

L'équation $y(t) = \frac{1}{1-\frac{C1}{C2}} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \int_0^t e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} du + e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$ a une solution unique pour
 " $0 < \frac{C1}{C2} < 1$ "

Vérifions que la solution de l'équation correspond à un coût minimum.

On étudie la limite de C(t) quand $t \rightarrow 0$ et $\lim_{t \rightarrow +\infty} C(t)$

$$\lim_{t \rightarrow 0} C(t) = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{C2(1-R(t))}{\int_0^t R(t)dt} + \frac{C1R(t)}{\int_0^t R(t)dt} \right] = +\infty \tag{5.32}$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} C(t) = \lim_{t \rightarrow +\infty} \left[\frac{C2(1-R(t))}{\int_0^t R(t)dt} + \frac{C1R(t)}{\int_0^t R(t)dt} \right] \tag{5.33}$$

$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx$ et $x = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta$ on aura :

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} C2 \left[\frac{1-R(t)}{\int_0^t R(t)dt} \right] = \frac{C2}{\eta \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})} \tag{5.34}$$

Démonstration (déjà vu au paragraphe 1.17) :

$$E(t) = \int_0^{+\infty} t f(t) dt = [-tR(t)]_0^{+\infty} + \int_0^{+\infty} R(t) dt = \int_0^{+\infty} R(t) dt \tag{5.35}$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \left[\frac{R(t)}{\int_0^t R(t)dt} \right] = 0 \tag{5.36}$$

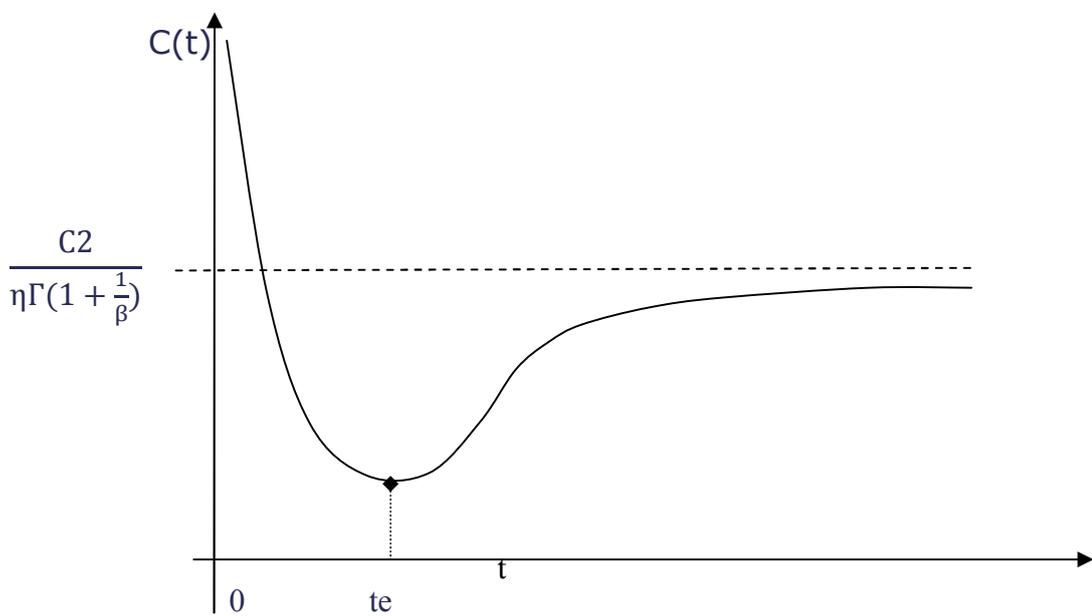


Figure 5.6. Courbe représentative de C(t)

$$\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{te}{\eta}\right)^{\beta-1} \int_0^{te} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} dt + e^{-\left(\frac{te}{\eta}\right)^{\beta}} = \frac{1}{1-\frac{C_1}{C_2}} \quad (5.37)$$

Dans le cas d'un matériel d'usure ($\beta > 1$ et $r > 2$), ce type de **remplacement à âge fixe** aura un intérêt économique.

5.5. Utilisation de l'abaque de Kelly [3,31]

L'intérêt de cet outil réside dans sa grande rapidité d'utilisation de « r » et « β » pour déterminer graphiquement les coordonnées du point « mini » à l'intersection de ces deux courbes, de « r » et de « β ».

Connaissant l'ordonné $(C_p(\theta)/C_r)$ et l'abscisse "x₀" et utilisant la formule de changement de variable ($x = \theta/\eta$), on obtient la période ($te = \theta_0 = \eta \cdot x_0$).

L'abaque de Kelly est élaboré à partir de l'équation $(C_p(\theta)/C_r) < 1$ d'où :

$$C_p(\theta) = \frac{C_1 + C_2(1 - R(t))}{E(\theta)} \quad (5.38)$$

$C_p(\theta)$: Coût d'une intervention préventive systématique par unité d'usage, avec $E(\theta)$ la durée de vie moyenne des composants ne dépassant pas (θ), puisqu'ils ont été changés à cette date

$E(\theta) = \int_0^{\theta} R(t) dt$ (l'espérance de fonctionnement).

$$C_r = \frac{C_1 + C_2}{MTBF} \quad (5.39)$$

C_r : Coût moyen d'une intervention curative par unité d'usage.

➤ Critères de choix :

Le systématique sera choisi s'il existe une période (θ), telle que $(C_p(\theta)/C_r) < 1$

On forme le rapport $(C_p(\theta)/C_r) = \frac{C_1 + C_2(1 - R(\theta)) \cdot MTBF}{E(\theta)(C_1 + C_2)}$

$R(\theta)$ est modélisable par une loi de "Weibull" à deux paramètres (β, η) ;

$R(\theta) = e^{-\left(\frac{\theta}{\eta}\right)^{\beta}}$, on pose ($x = \theta/\eta$) et $r = C_2/C_1$, alors $C_p(\theta)/C_r$ devient :

$$C_p(x)/C_r = \frac{1 + r(1 - e^{-x^{\beta}})}{\int_0^x e^{-t^{\beta}} dt (1+r)} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (5.40)$$

➤ Exploitation du rapport $C_p(x)/C_r$.

En plus des deux paramètres cités précédemment le rapport fait aussi intervenir le temps. On trace alors sur un graphique une série de courbes $(C_p(x)/C_r)$, pour des valeurs successives « r » et « β ». On obtient alors l'abaque de Kelly.

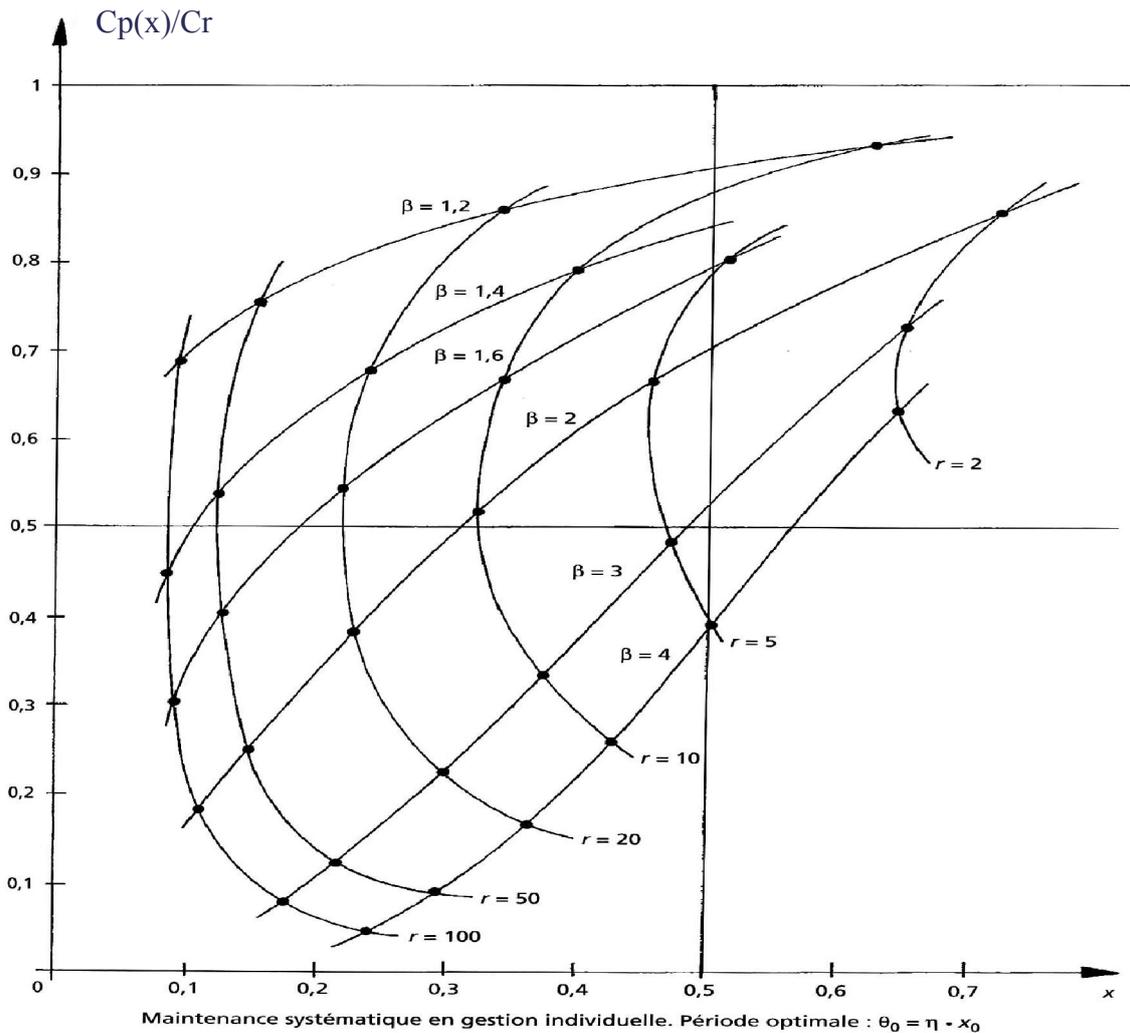


Figure 5.7.ABAQUE DE KELLY

5.6. Conclusion

Grâce à la connaissance de la loi de fiabilité d'un composant (organe), en particulier son paramètre de forme (β) et ses coûts de maintenance engendrés lors de sa défaillance qui sont évalués par le rapport de criticité économique, « r » dont la valeur doit être comprise entre 2 et 100 ($2 < r < 100$). Ces données sont nécessaires à la détermination de la période optimale économique de remplacement. Seul un écart significatif du paramètre (β) de forme par rapport à ($\beta=1$) justifie un éventuel changement. Si ($\beta \leq 1$) aucun remplacement ni même aucun entretien courant n'est justifié. Par contre si ($\beta > 1$ et $r > 2$) on pourra envisager un entretien préventif ou systématique et ceci après une étude d'optimisation.

CHAPITRE 6
ETUDE DE CAS AU NIVEAU DE L'ENTREPRISE
DENITEX-SEBDOU-TLEMCEN

CHAPITRE 6 : ETUDE DE CAS AU NIVEAU DE L'ENTREPRISE

DENITEX-SEBDOU-TLEMCEN

6.1. Introduction

Un bon fonctionnement est demandé, en particulier, pour les composants mécaniques stratégiques, c'est l'objet de notre étude de cas.

Dans cette partie nous allons utiliser les résultats d'exploitation à partir des données réelles. En pratique on utilise souvent des bases de données connues, mais il est préférable, quand cela est possible, de recueillir les données d'expériences au près des fabricants des composants que l'on utilise [7]. Cependant ces données sont difficiles à obtenir pour des composants mécaniques.

Les constructeurs ne s'efforcent pas de les collecter de façon systématique ; du fait qu'il est difficile de trouver une métrique de sûreté de fonctionnement. Dans le cas où elles existeraient, elles sont conservées confidentiellement [7]. Dans la majorité des recueils, les données de fiabilité sont fournies sous forme de taux de défaillance ou sous forme de durée de vie moyenne, ou de probabilité d'équipements sélectionnés pour appliquer réellement la théorie déjà citée en particulier celle de la fiabilité.

Pour mieux cerner le problème on va situer le lieu de l'équipement étudié.

6.2. Présentation de l'entreprise "Denitex"

DENITEX SEBDOU est une société des produits textiles, elle est située à 37 Km au sud ouest du chef lieu de Tlemcen.

Elle possède un potentiel humain et matériel important. Le potentiel industriel et la plupart des équipements ainsi que les installations ont été mises en place comme suit :

Ateliers de production (filature, préparation tissage, tissage finissage).

Laboratoires de contrôle (physique et chimique).

Réseaux d'énergie (électricité, gaz, eau, vapeur, air comprimé etc...)

Installations d'utilités (chaufferie, climatisation, station dépuración des eaux).

6.3. Historique de l'entreprise

La société de produits textiles "Denitex a été créée après le découpage de la société mère "Cotitex", le trois février 1998.

Le complexe est mis en service le premier juin 1979, ses activités bien définies telles que :

Filature-Préparation tissage -Tissage -Finissage –Annexes

Sa capacité de production est comme suit:

Produits	Objectifs
Filés	1400.000, TONNES
Tissus écrus	6.000.000 Mètres
Tissu finis	6.000.000 Mètres

Tableau 6.1. Capacité de production (Denitex)

6.4. Détermination de la fiabilité à partir des données historiques

6.4.1. Exploitation des données historiques

Un équipement étant composé d'un grand nombre d'organes, le "MTBF" de l'équipement a une signification au niveau de la disponibilité de l'équipement à condition de rester dans le domaine des évènements aléatoires[1].

Le « MTBF" d'un équipement dépend de la connaissance de la fiabilité de ses composants ce qui permet de définir une politique de maintenance. La fiabilité doit être déterminée pour chaque composant constituant l'intégralité de l'équipement.

L'exploitation des données historiques doit tenir compte :

- ✓ Du nombre des équipements étudiés, de leurs conditions de travail et des temps d'utilisation respectifs.
- ✓ Du nombre des composants installés par équipement.
- ✓ Du temps de fonctionnement de chaque composant par rapport au temps de marche de l'équipement.
- ✓ De la politique de la maintenance appliquée à ces équipements
 - Maintenance corrective.
 - Remplacement systématique.
 - Maintenance conditionnelle.

Dans le cas de plusieurs équipements installés, il faudrait en toute logique vérifier que les conditions d'utilisation et les temps de sollicitation sont identiques.

Nous avons vu dans le (chapitre1) que l'utilisation des méthodes statistiques ou mathématiques n'étaient pas suffisantes pour faire une analyse de fiabilité.

Il est indispensable de pouvoir analyser les causes de défaillances survenant pour chaque organe et s'assurer que la population étudiée est homogène.

Il faut chercher s'il s'agit d'une défaillance fortuite (vie utile), d'une panne due au vieillissement, d'une détérioration due à une mauvaise utilisation de l'équipement, d'une mauvaise réparation ou d'un mauvais montage.

6.5. Principe de découpage de l'entreprise

Le problème qui se pose alors est comment de découper l'ensemble de l'équipement à des niveaux plus fins pour atteindre l'élément que l'on veut étudier.

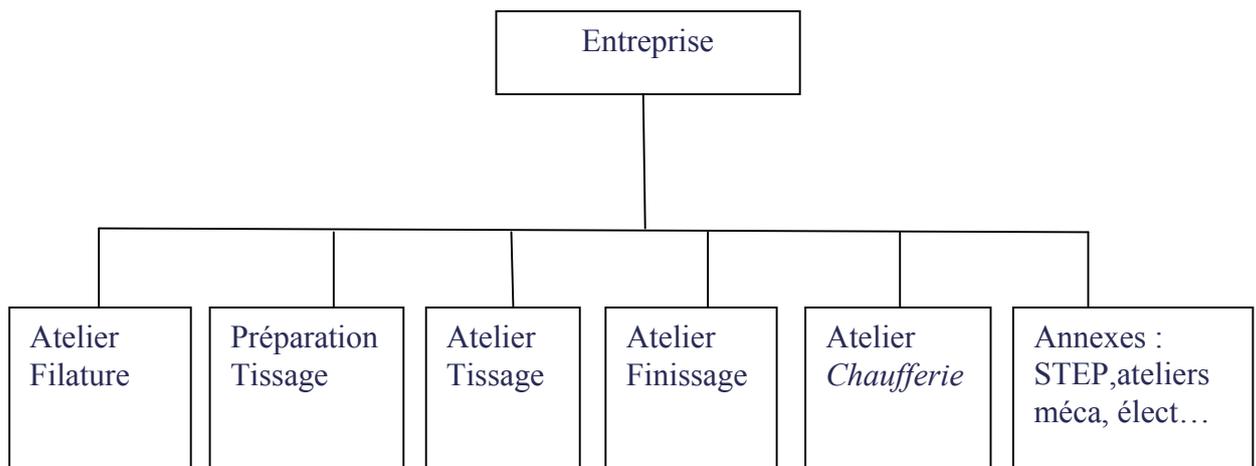


Figure 6.1. Découpage de l'entreprise

Ce premier découpage sera suivi par un second qui permet de descendre au niveau de l'équipement, afin d'être simplement isolé [11].

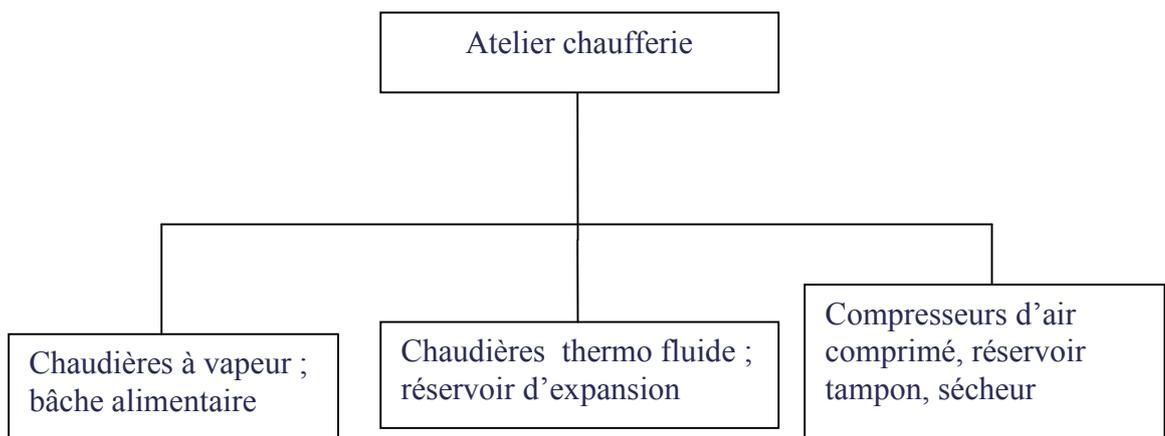


Figure 6.2. Découpage de l'atelier chaufferie

L'atelier chaufferie comprend :

- ✓ Quatre chaudières à vapeur montées en parallèle et alimentant le réseau de vapeur, chaque chaudière est équipée de deux pompes multicellulaires montées en parallèle.
- ✓ Trois chaudières thermo fluide équipées de trois pompes de circulation d'huile.
- ✓ Deux compresseurs à palettes à deux étages.
- ✓ Un compresseur à palettes à un seul étage.
- ✓ Un compresseur à vis.

Ces compresseurs sont montés en parallèle et alimentant le réseau d'air comprimé qui assure le fonctionnement des appareillages des équipements de production.

Dans le cas des équipements complexes et intégrés, il est nécessaire de recourir à un découpage de type matriciel.

6.6. Analyse du système

Dans un premier temps on va décomposer fonctionnellement une chaudière à vapeur.

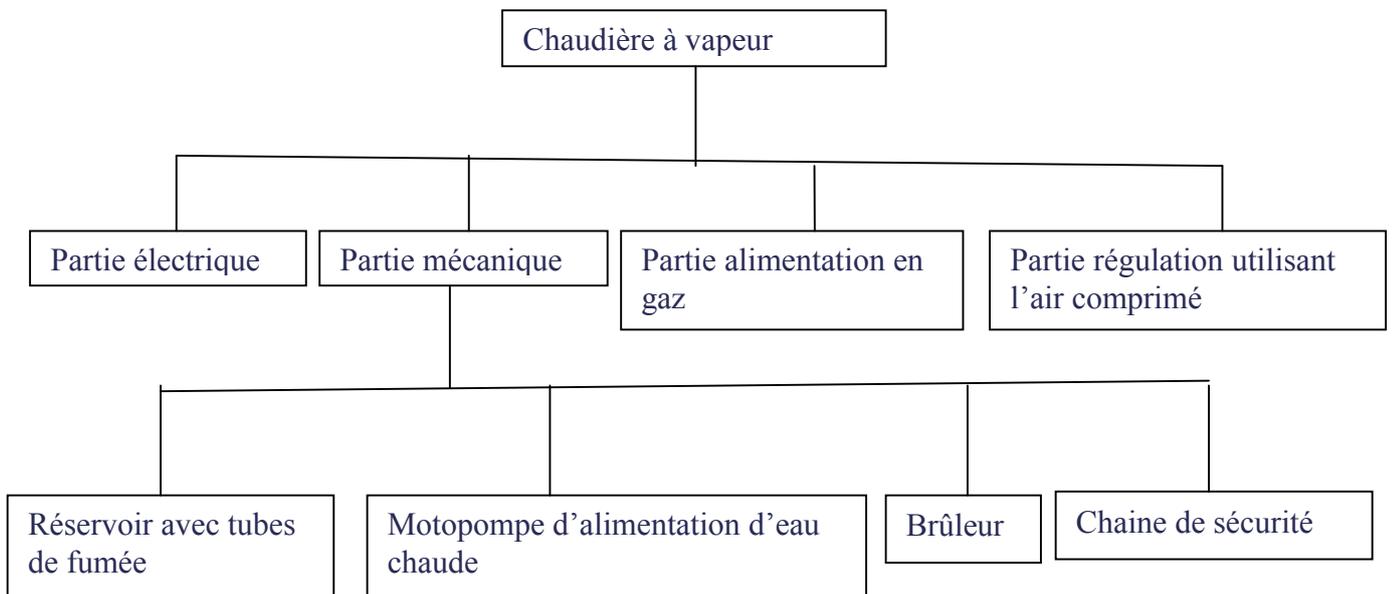


Figure 6.3. Découpage fonctionnel de la chaudière à vapeur

6.7. Décomposition du sous système d'alimentation d'eau

Pour cela on utilise la méthode "AMDEC" [13] qui est une méthode de réflexion créative et repose sur la décomposition fonctionnelle du système en éléments simples jusqu'au niveau des composants les plus élémentaires.

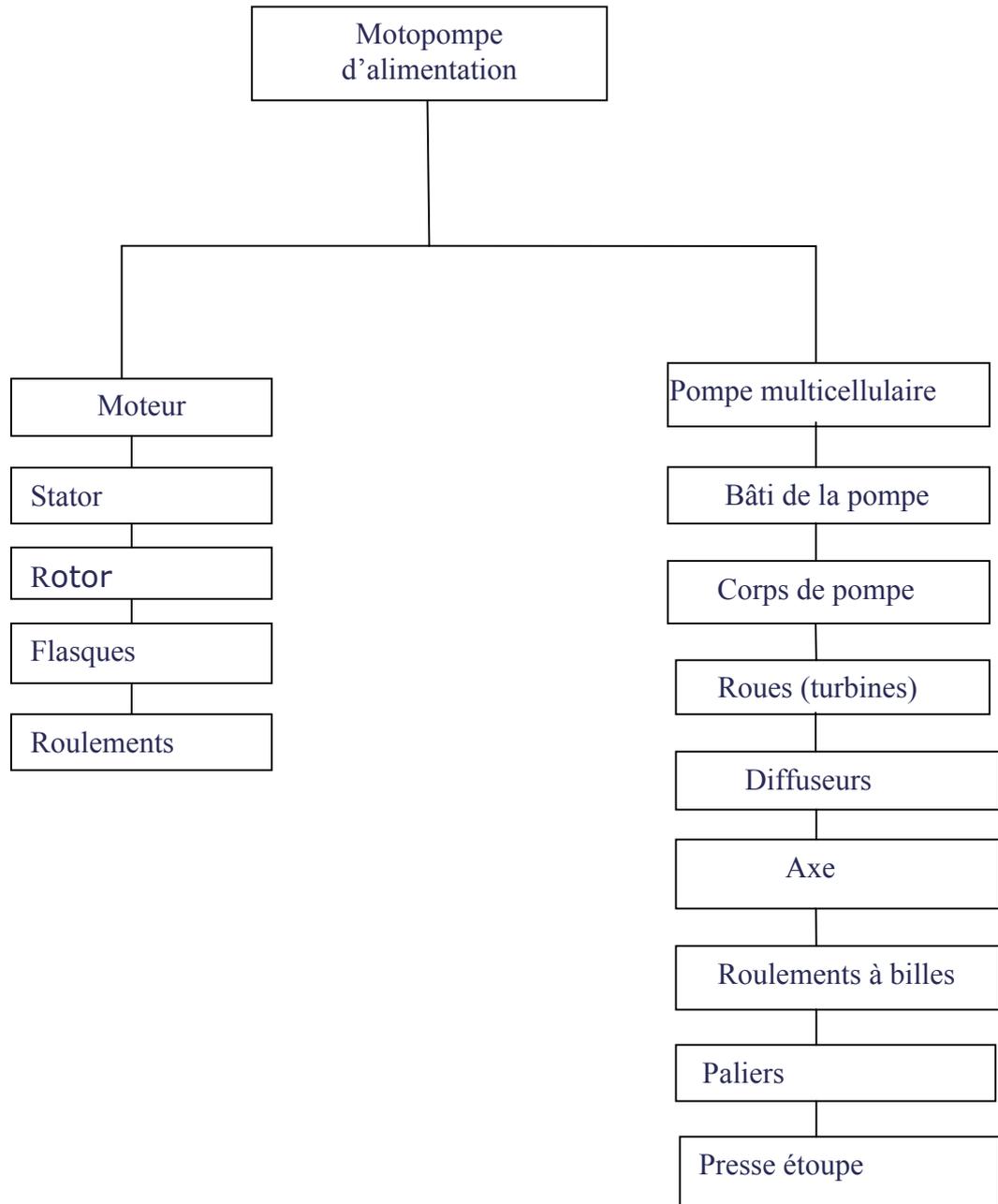


Figure 6.4. Découpage fonctionnel de la motopompe d'alimentation

6.8. Décomposition du sous système du bruleur à gaz

La chaudière thermo fluide est composée de deux sous systèmes ; à savoir le bruleur et, la pompe de circulation d'huile qui permet de maintenir la pression d'huile constante dans la chaudière et dans le réseau de distribution.

Le bruleur à gaz est décomposé fonctionnellement en sous ensembles de la manière suivante :

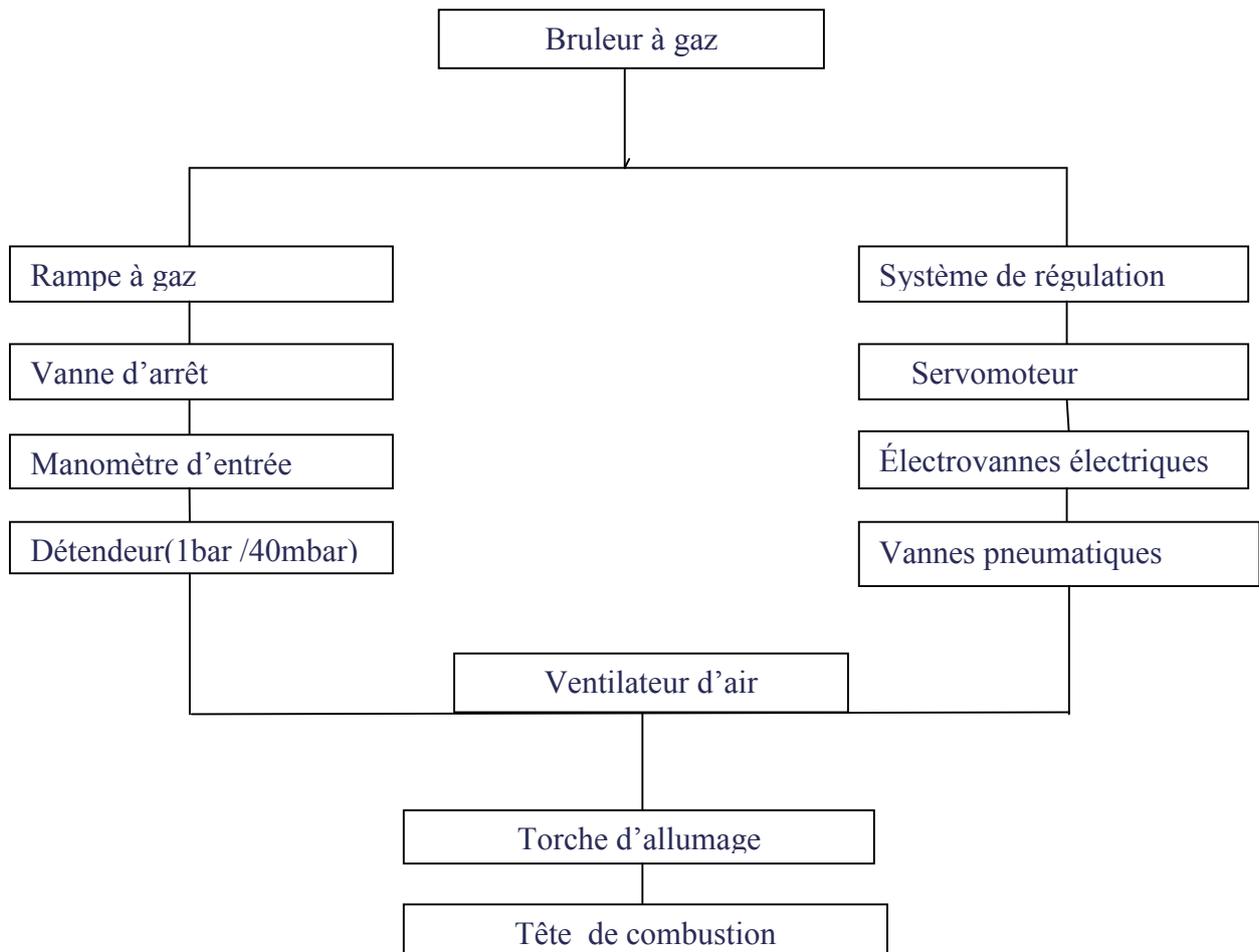


Figure 6.5. Décomposition fonctionnelle du brûleur à gaz

6.9. Classification du matériel

La classification est principalement utilisée comme une base d'établissement d'un programme de maintenance préventive ou pour mesurer les effets de cette maintenance. Elle consiste en pratique à ne pas traiter le matériel sur un même pied d'égalité, mais selon des critères [32].

6.9.1. Critères de classement

On trouve deux critères possibles pour le classement.

a) Suivant les conditions de travail.

Le matériel peut être classé en deux catégories :

- Matériel très sollicité, c'est le cas des équipements qui fonctionnent en régime continu (3x8).
- Matériel moyennement sollicité, c'est le cas des équipements qui fonctionnent par intermittence.

b) Suivant l'état du matériel.

Le critère de cette classification consiste à comparer l'état du matériel avec les besoins de l'exploitation : Cela veut dire qu'un équipement peut être employé pour réaliser certaines opérations bien que son état général soit plutôt dégradé par rapport à celui d'un équipement neuf.

NOTA : Trois classes sont considérées en utilisant la méthode « ABC » ou " Pareto".

6.10. Application

Dans cette partie nous allons utiliser les résultats d'exploitation des équipements afin d'appliquer réellement la théorie déjà citée auparavant, en particulier celle de la fiabilité.

Les données pour cette application sont relevées à partir des dossiers historiques de chaque équipement. Notre choix est porté sur l'atelier chaufferie à cause des dossiers historiques, tenus à jour depuis 2009. Afin de bien mener cette étude on a procédé de la façon suivante :

6.10.1. Collecte des données

Pour faire une bonne étude de fiabilité, on a intérêt à relever le nombre de défaillances de chaque organe à partir du dossier historique de chaque équipement (2009-2010).

N°	Désignation des organes	Nombre de défaillance	N°	Désignation des organes	Nombre de défaillance
1	Roulement à billes de la pompe	29	13	Ressort de soupape de sécurité	01
2	Roulement à rouleau de la pompe	09	14	Pressostat d'air	01
3	vanne de purge d'eau chaude	03	15	Vanne électromagnétique	01
4	Vanne d'aération	04	16	Dérivateur de niveau d'eau	01
5	Indicateur de niveau d'eau	04	17	Trou d'homme d'entretien	02

Conclusion générale et perspective,

6	Presse étoupe de la pompe	05	18	Ventilateur principal	01
7	Conduite d'alimentation d'eau chaude	03	19	Flotteur interne de niveau d'eau	02
8	Bâti de la pompe (goujons) d'alimentation	03			
9	Clapet anti-retour de la pompe	02			
10	Joint torique de la pompe	04			
11	Moteur électrique de la pompe	05			
12	Accouplement entre la pompe et le moteur	04			
	Nombre total	84			

Tableau 6.2. Tableau récapitulatif des défaillances

a) Compresseurs d'air comprimé à palettes et à deux étages

N	Désignation des organes	Nombre de défaillance
1	Joint torique du corps du compresseur	06
2	Joint tournant ou garniture mécanique	03
3	Pompe d'huile de lubrification	02
4	Élément d'accouplement	02
5	Flexible d'huile principal	03
6	Séparateur d'huile	01
	Total	17

Tableau 6.3. Tableau récapitulatif des défaillances

b) Compresseur d'air comprimé à palettes à un seul étage

N	Désignation des organes	Nombre de défaillance
1	Pompe d'huile de lubrification	02
2	Filtre à huile	01
3	Séparateur d'huile	01
4	Élément d'accouplement	01
5	Palettes	01
6	Roulement à rouleau	01
7	Joint torique	01
8	Entretoise	01
	Nombre total	09

Tableau 6.4. Tableau récapitulatif des défaillances

c) Compresseur d'air comprimé à vis

N	Désignation des organes	Nombre de défaillance
1	Filtre à air	01
2	Filtre à huile	01
3	Séparateur d'huile	01
4	Bague anti-fuite	01
5	Moteur électrique	06
6	Flexible d'huile	01
7	Pompe à huile	01
8	Thermostat	01
9	Élément d'accouplement	01
	Nombre total	14

Tableau 6.5. Tableau récapitulatif des défaillances

d) Chaudières thermo fluide

N	Désignation des organes	Nombre de défaillance
1	Photo cellule	01
2	Électrode d'allumage	01
3	Électrovanne de gaz	01
4	Servomoteur	01
5	Accouplement magnétique	01
6	Garniture mécanique (pompe)	10
7	Roulements (pompe)	14
8	Moteur de la pompe	02
9	Accouplements de la pompe de circulation d'huile	1
	Nombre total	32

Tableau 6.6. Tableau récapitulatif des défaillances

6.11. Analyse des données

Les données sont relevées à partir des dossiers historiques des équipements de l'atelier de chaufferie qui constitue le cœur de la production et donc le cœur du complexe, selon le classement suivant :

- ✓ Historique des défaillances durant (2009/2010).
- ✓ Les chaudières à vapeur ont subi 84 défaillances
- ✓ Les chaudières thermo fluide ont subi 32 défaillances
- ✓ Les compresseurs à palettes à deux étages ont subi 17 défaillances
- ✓ Le compresseur à palettes à un seul étage a subi 09 défaillances
- ✓ Le compresseur d'air comprimé à vis a subi 14 défaillances

6.11.1. Sélection de l'équipement

En utilisant la courbe « ABC » ou « Pareto » on peut sélectionner l'équipement ou l'organe à prendre en considération dans notre étude.

Dans notre cas le nombre d'équipement est égal à 5.

Désignation	N° d'ordre	% de classement	Fréquence	Cumul	% du cumul
Chaudière à vapeur	1	20	84	84	54
Chaudière thermo fluide	2	40	32	116	74
Compresseur à deux étages	3	60	17	133	85
Compresseur à vis	4	80	14	147	94
Compresseur à un seul étage	5	100	09	156	100

Tableau 6.7. Tableau de classement des équipements

6.11.2. Principe de la méthode « ABC »

Cette méthode consiste à classer les problèmes par ordre d'importance en trois catégories afin de traiter chacune d'elles d'une manière différente. Elle permet donc au gestionnaire d'identifier les cibles d'actions prioritaires [3,33].

Description de l'analyse:

- ✓ Recensement des pannes à partir de la date de mise en place du dossier historique.
- ✓ Classement des nombres de pannes par ordre décroissant.
- ✓ Calcul du cumul de ces valeurs à partir du plus haut.
- ✓ Calcul pour chaque valeur cumulée la valeur en %.
- ✓ Le rang relatif % des différentes pannes.
- ✓ Tracer la courbe correspondante aux couples de points ci-dessus sur un graphique à deux dimensions, abscisses et ordonnées en pourcentage(%) à la même échelle.

Déterminer les zones ABC : il s'agit de délimiter sur la courbe des zones à partir de l'allure de la courbe. En général la courbe possède deux cassures ce qui permet de définir 3 zones.

On obtient le classement en trois catégories.

A : les plus défaillants

B : les moyennement défaillants

C : les moins défaillants

Ce classement s'applique lorsqu'on veut faire apparaître les éléments les plus défaillants

6.11.2.1. Tracé de la courbe ABC

La courbe ABC permet de classer les équipements par ordre de priorité.

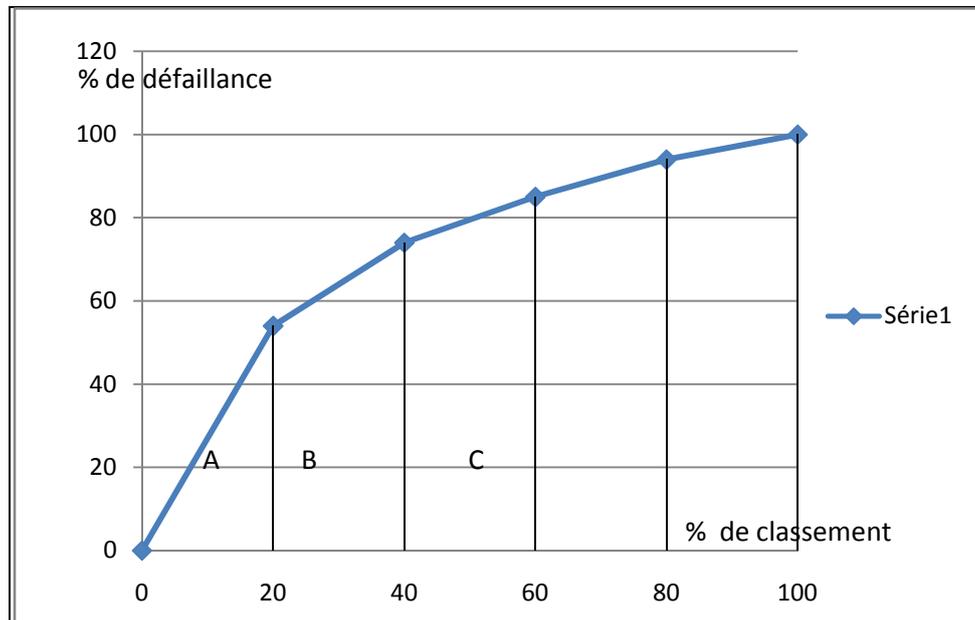


Figure 6.6. Courbe ABC

Ainsi la courbe « ABC » nous a permis de classer les équipements de la chaufferie en trois catégories (A, B et C).

Vu les résultats obtenus par la courbe ABC, on doit opter pour un suivi particulier des sous ensembles de la classe « A » et un suivi spécifique pour les sous ensembles des classes « B » et « C ». L'analyse de la fiabilité, seule, nous permet de bien fixer le type de la maintenance à appliquer pour ces équipements.

6.12. Choix des organes

Afin de sélectionner l'organe ou dispositif à étudier ; on va utiliser la méthode « AMDEC » [13] (**Analyse des modes de défaillance, leurs effets et leurs criticités**). AMDEC, est une méthode de la fiabilité, mais elle n'est pas la seule d'après la norme NFX60-510. Elle est développée à partir de « l'AMDE » qui a été publiée en Décembre 1986, elle a été définie comme un moyen d'identifier les modes de défaillances en vue de les éliminer ou de minimiser leurs conséquences. Dans le domaine industriel, on utilise « l'AMDEC » à cause du système de notation et le calcul de la criticité qui est plus rigoureux, il est basé sur un traitement numérique.

6.12.1. AMDEC de la pompe d'alimentation

L'analyse « AMDEC » de la pompe d'alimentation permet de déterminer l'élément critique de l'équipement.

Système : chaudière à vapeur					sous système : pompe d'alimentation				Action à engager
Organe	Fonction d'état	Mode de défaillance	Cause	Effet sur le système	Criticité				
					Fr	Gr	Dé	IPR	
bâti	Support de la pompe	déformation	vibration	Détérioration des paliers	1	2	2	4	À réparer
Corps de pompe	renferme les roues	ovalisation d'alésage	usure, corrosion	mauvais fonctionnement	1	4	1	4	À réparer
Roues	augmente la vitesse du fluide	Bruit anormal	usure, corrosion	diminution du débit	1	3	3	9	changement
Diffuseurs	canalise l'eau dans les roues	déformation	usure, corrosion	mauvais fonctionnement	1	1	3	3	changement
Axe	transmet le mouvement de rotation	cassure, déformation	usure, corrosion mauvais alignement	arrêt de la pompe	1	4	1	4	changement
Paliers	support de l'axe	usure cassure	vibration usure	échauffement blocage	1	4	1	4	changement
Roulement à billes	guidage de l'axe	cassure, blocage	vibration usure	arrêt de la pompe	3	4	1	12	Changement
Presse étoupe	assure l'étanchéité	Fuite d'eau	usure, corrosion	diminution du débit	3	3	1	9	remplacer

Tableau 6.8. AMDEC de la pompe d'alimentation

Résultat : L'organe possédant le plus grand IPR est le roulement à billes.

6.12.2. AMDEC de la pompe de circulation d'huile thermo fluide

L'analyse « AMDEC » de la pompe de circulation d'huile thermo fluide permet de déterminer l'élément critique de la pompe.

Système : chaudière thermo fluide					sous système : pompe de circulation d'huile				Action à engager
Organe	Fonction d'état	Mode de défaillance	Cause	Effet sur le système	Criticité				
					Fr	Gr	Dé	IPR	
bâti	Support de la pompe	déformation	vibration	Détérioration des paliers	1	3	2	6	À réparer

Conclusion générale et perspective,

Corps de pompe	renferme la roue	ovalisation d'alésage, fissure	usure, corrosion, choc thermique	mauvais fonctionnement, fuite	1	4	1	4	À réparer
Roue	augmente la vitesse du fluide	Bruit anormal	usure, corrosion	Diminution du débit, chute de pression	1	4	1	4	changement
Axe	transmet le mouvement de rotation	cassure, déformation	usure, corrosion mauvais alignement	arrêt de la pompe	1	4	1	4	changement
Paliers	support de l'axe	usure cassure	vibration usure	échauffement blocage	1	4	1	4	changement
Roulement à billes	guidage de l'axe	cassure, blocage	vibration usure	arrêt de la pompe	2	4	1	8	Changement
Garniture mécanique	assure l'étanchéité	Fuite d'huile	usure, corrosion	diminution du débit et chute de pression	2	4	2	16	remplacer

Tableau 6.9. AMDEC de la pompe de circulation d'huile thermofluide

Résultat : L'organe possédant le plus grand « IPR » est la garniture mécanique.

6.12.3. AMDEC du compresseur à deux étages

L'analyse « AMDEC » du compresseur à deux étages permet de déterminer l'élément critique du compresseur.

Système : compresseur à palettes					sous système : partie mécanique				
Organe	Fonction d'état	Mode de défaillance	Cause	Effet sur le système	Criticité				Action à engager
					Fr	Gr	Dé	IPR	
corps	renferme les rotors et les palettes	ovalisation d'alésage	usure	chute de pression	1	2	2	4	à réparer
pompe à huile	lubrification des rotors	bruit anormal	usure des pignons	échauffement	1	3	1	3	à réparer
séparateur d'huile	sépare l'huile de	présence d'huile dans	vieillessement	consommation	1	3	1	3	changement

Conclusion générale et perspective,

	l'air	l'air		d'huile					
élément d'accouplement	liaison du compresseur avec le moteur	usure	mauvais alignement	arrêt du compresseur	2	3	1	6	changement
flexible d'huile	transporte l'huile vers le radiateur	fuite d'huile	vieillessement	arrêt du compresseur	1	3	1	3	changement
joint tournant	assure l'étanchéité	fuite coté moteur	usure	arrêt du compresseur	3	3	1	9	changement
joint torique	assure l'étanchéité entre les étages	fuite sur le corps	vieillessement	consommation d'huile	3	3	1	9	changement

Tableau 6.10. AMDEC du compresseur à deux étages

Résultat : Les organes les plus critiques sont : le joint tournant et le joint torique

6.13. Détermination des paramètres de fiabilité des organes sélectionnés

6.13.1. Cas du roulement de la pompe d'alimentation

Le calcul des paramètres de fiabilité dépend en premier lieu de la fraction (fonction de répartition estimée) définie par l'équation (6.1).

$$F_{\text{est}}(t) = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (6.1)$$

Cette formule représente les rangs médians où (n) définit la taille de l'échantillon et "i" définit le rang de l'élément défaillant ; (n ≤ 20), sans oublier d'introduire la notion de retrait, qui est défini selon la formulation (6.2).

On appelle retrait (rt) tout élément encore en vie au moment de l'arrêt du test ou de l'étude. Pour tenir compte de ces éléments on va éliminer les rangs des retraits et corriger les rangs de défaillance, par la formule (6.2), [12] :

$$\Delta i = \frac{(n+1) - \text{rang corrigé précédent}}{1 + \text{nombre d'éléments restants après ce retrait dans } n} \quad (6.2)$$

Cet accroissement : "Δi" sera ajouté au rang qui précède le retrait pour obtenir le rang corrigé de la défaillance suivante, il reste constant jusqu'au prochain retrait. Cette méthode consiste à modifier le rang après censure, on les appelle censures aléatoires, c'est une des méthodes les plus connues de "Jonhson" 1964 [12]

$$J(i) = J(i-1) + \frac{n+1-j(i-1)}{n+1 - (\text{nombre d'éléments précédent})} \quad (6.3)$$

6.13.2. Préparation des données historiques

Traçage des points(t_i, F_i) sur le papier de " WEIBULL" ou "ALLEN PLAIT », voir tableau (6.11),pour déterminer les paramètres de "Weibull".A partir des données on a obtenu deux droites "D₁"et "D₂" qui représentent deux échantillons de tailles différentes. Vu qu'on a une différence de durée de vie suffisamment grande entre les rangs sept(7)"t₇" et huit (8)" t₈", alors on observe une variation dans la loi de durée de vie "T" (passage de $\beta_1=1.2$; $\eta_1=580$ heures à $\beta_2=1.5$; $\eta_2=2500$ heures).

$$F_{est}(t) = \frac{i-0.3}{n+0.4} \tag{6.4}$$

ti	Rang brut	Rang Corrigé	F estimée	R estimée
64	1	1	0.006	0.94
144	2	2	0.15	0.85
160	3	3	0.24	0.76
224	4	4	0.32	0.68
352	5	5	0.41	0.59
496	6	6	0.50	0.50
608	7	7	0.59	0.41
2544	8	8	0.68	0.32
3520	9	9	0.76	0.24
3872	10	10	0.85	0.15
5280	11	11	0.94	0.06

Tableau 6.11. Préparation des données historiques du roulement à billes

L'obtention sur le graphe de "Weibull", de plusieurs segments avec différentes valeurs de "β" doit entraîner un questionnement relatif à la qualité des organes ou des interventions [12]. En effet, cette hypothèse est vérifiée dans notre cas, car dans la pratique on a constaté le phénomène qui est dû au changement des roulements, en utilisant deux marques différentes. A cela s'ajoute la déformation du bâti, ceci mène à un problème de qualité des roulements et de l'intervention, donc on a un mélange de lois de "Weibull"[1,12]. Pour traiter ce cas, on sépare les sous-populations "pi" puis on traite chaque population d'une façon indépendante. Le modèle global tient compte des proportions de chaque partie.

La détermination de la fiabilité de la population sera donnée par l'équation (6 .6).

Alors on aura : $R1 = e^{-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1}}$ avec $t \leq t_7$ et $R2 = e^{-\left(t/\eta_2\right)^{\beta_2}}$ avec $t \geq t_8$

$$\lambda_1 = \frac{\beta_1}{\eta_1} \left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{(\beta_1-1)} \text{ et } \lambda_2 = \frac{\beta_2}{\eta_2} \left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{(\beta_2-1)} \tag{6 .5}$$

Conclusion générale et perspective,

Avec $p_1 = \frac{n_1}{n_1+n_2} = 7/11 = 0.64$ et $p_2 = 0.36$

$R(t) = p_1 * R_1(t) + p_2 * R_2(t)$ (6.6)

Tracé sur le papier d'ALLEN PLAIT

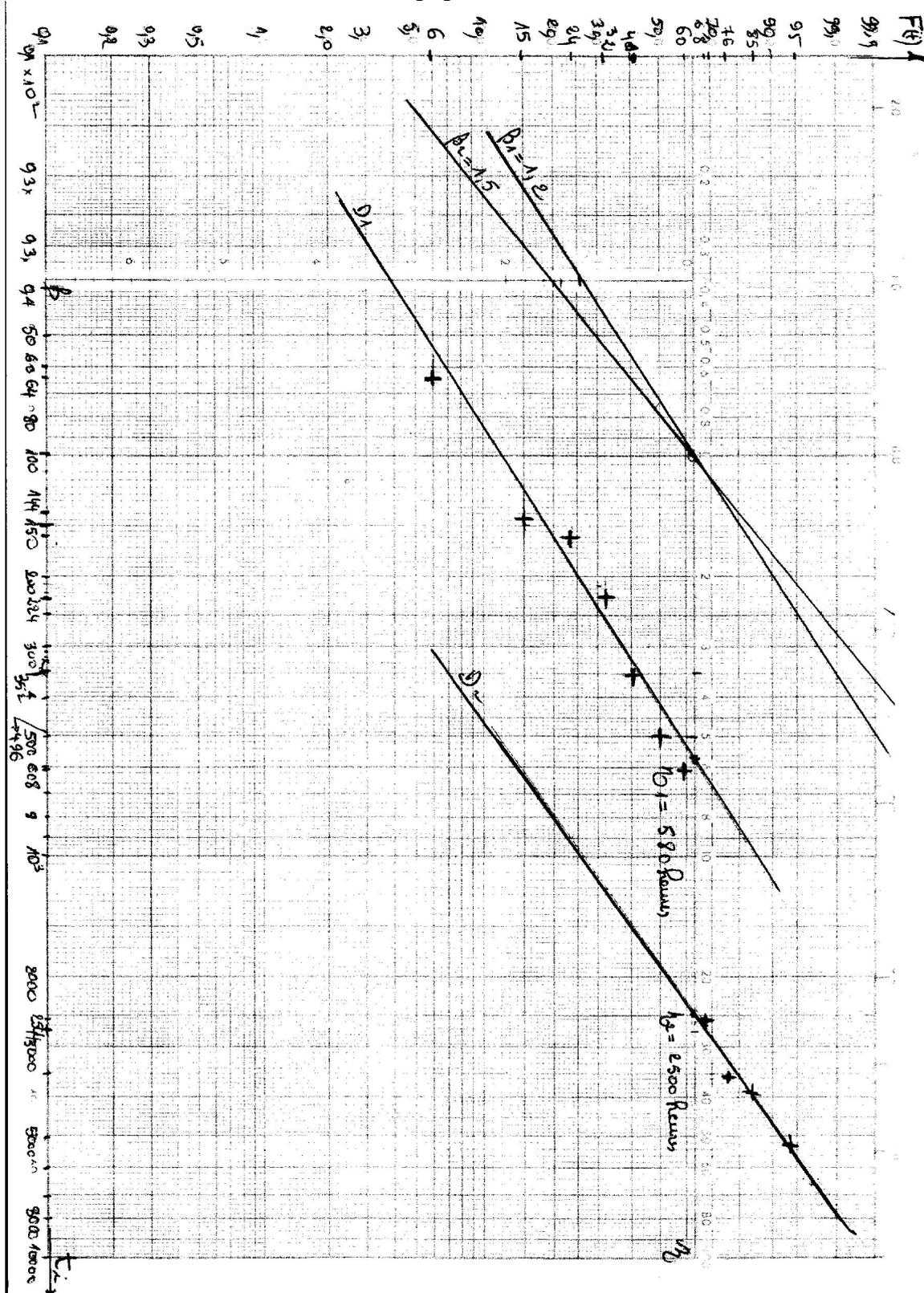


Figure 6.7. Détermination graphique des paramètres de fiabilité.

En conclusion, l'étude du roulement à billes de la pompe d'alimentation de la chaudière nous confirme la mise en place de la fiabilité à partir du retour d'expérience.

6.13.3 Analyse des résultats théoriques

Ci-joint le tableau récapitulatif et comparatif des résultats déterminés par calcul à l'aide de la loi de fiabilité.

ti	Rang brut	Rang Corrigé	F Théorique	R Théorique	Taux de défaillance $\lambda(t)$	$D_{\alpha= F_{th} - F_{est} }$
64	1	1	0.07	0.93	1.33	0.01
144	2	2	0.17	0.83	1.57	0.02
160	3	3	0.19	0.81	1.6	0.05
224	4	4	0.27	0.73	1.71	0.05
352	5	5	0.42	0.58	1.87	0.01
496	6	6	0.56	0.44	2.01	0.06
608	7	7	0.65	0.35	2.09	0.06
2544	8	8	0.64	0.36	0.605	0.04
3520	9	9	0.81	0.19	0.712	0.05
3872	10	10	0.85	0.15	0.747	0.00
5280	11	11	0.95	0.05	0.872	0.01

Tableau 6.12. Tableau des résultats théoriques

6.13.4. Application des tests de corrélation

Le test de "kolmogorv Smirnov" est vérifié en tout point, donc on peut conclure que la loi théorique coïncide avec celle de l'échantillon, on a un risque (5%) de se tromper entre les deux lois. La valeur $D_{0.05}=(0.391)$ est prise de la table N°1 des valeurs de "kolmogorvSmirnov"(voir paragraphe 1.10).

Le calcul du MTBF global est comme suit :

$$MTBF_{global}=p_1*MTBF_1+p_2*MTBF_2 \quad (6.7)$$

Les valeurs " x_1 " et " x_2 " sont relevées de la table N°2 (chapitre 3).

$$MTBF_1 =x_1 \eta_1=0.9407*580=545.60 \text{heures}$$

$$MTBF_2=x_2 \eta_2=0.9027*2500=2256.75 \text{heures}$$

$MTBF_{global}=0.64*545.6+0.36*2256.75=1161.61$ heures, soit 72.6 jours (3 mois et demi), pour un régime de fonctionnement de 16 heures par jour et vingt deux jours ouvrables par mois.

$$R_1(MTBF_1) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1}} = e^{-\left(\frac{545.6}{580}\right)^{1.2}} = 0.39$$

$$R_2(MTBF_2) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{\beta_2}} = e^{-\left(\frac{2256.75}{2500}\right)^{1.5}} = 0.42$$

$$R_{global} = 0.64 * 0.39 + 0.36 * 0.42 = 0.40$$

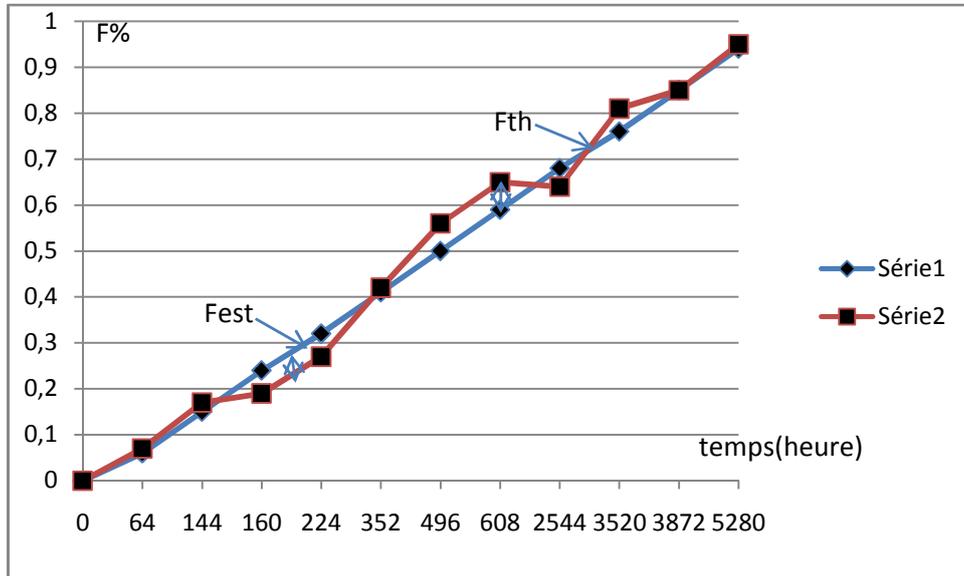


Figure 6.8. Courbes de répartition estimée et théorique du roulement à bille de la pompe

On remarque sur la figure (6.8) que le test de "Kolmogorov Smirnov" est vérifié, vu que les courbes de (Fest et Fth) sont très proches l'une de l'autre.

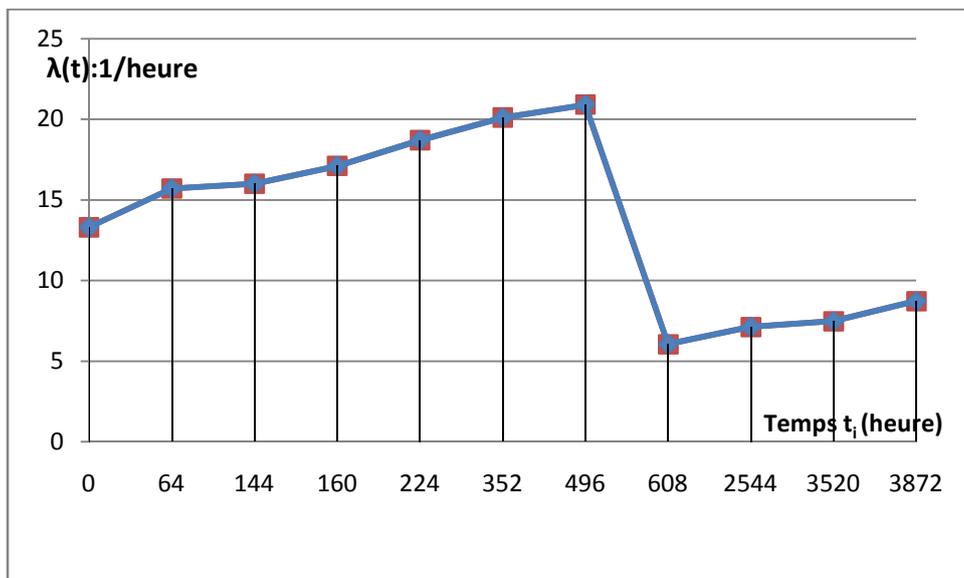


Figure 6.9. Taux de défaillance du roulement de la pompe

Le taux de défaillance est représenté par deux tronçons distincts sur la figure (6.9) comme ceux du tracé sur le papier "d'ALLEN PLAITS" et, montre bien que l'organe étudié est une

pièce d'usure car les paramètres de forme $\beta_1=1.2$ et $\beta_2=1.5$ sont supérieurs à un, ce qui nécessite un entretien préventif. D'où la détermination de la période optimale économique est nécessaire.

6.14. Cas du joint torique du compresseur à deux étages

6.14.1 Préparation des données et traitements des résultats théoriques

Le calcul de la fonction de répartition estimée est déterminé par la formule empirique des rangs médians (6.1) suivante :

$$F_{\text{est}}(t) = \frac{i-0.3}{n+0.4}$$

$$R_{\text{th}} = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}; \quad \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (6.8)$$

ti	Rang brut	Rang corrigé	F estimée	R estimée	F théorique	R théorique	$\lambda(t)$ *0.001	$D_{N,\alpha=}$ Fest - Fth
112	1	1	0.11	0.89	0.11	0.89	1	0.00
368	2	2	0.27	0.73	0.31	0.69	1	0.04
528	3	3	0.42	0.58	0.41	0.59	1	0.01
1632	4	4	0.58	0.43	0.57	0.43	1	0.01
1762	5	rt	-----	----	-----	----	1	-----
2032	6	5.5	0.95	0.05	0.87	0.13	1	0.08

Tableau 6.13.Préparation des données et traitement des résultats

rt : retrait.

Calcul l'accroissement $\Delta_1 = \frac{7-4}{1+1} = 1.5$

Tracé sur le papier « d'ALLEN PLAIT » suivant :

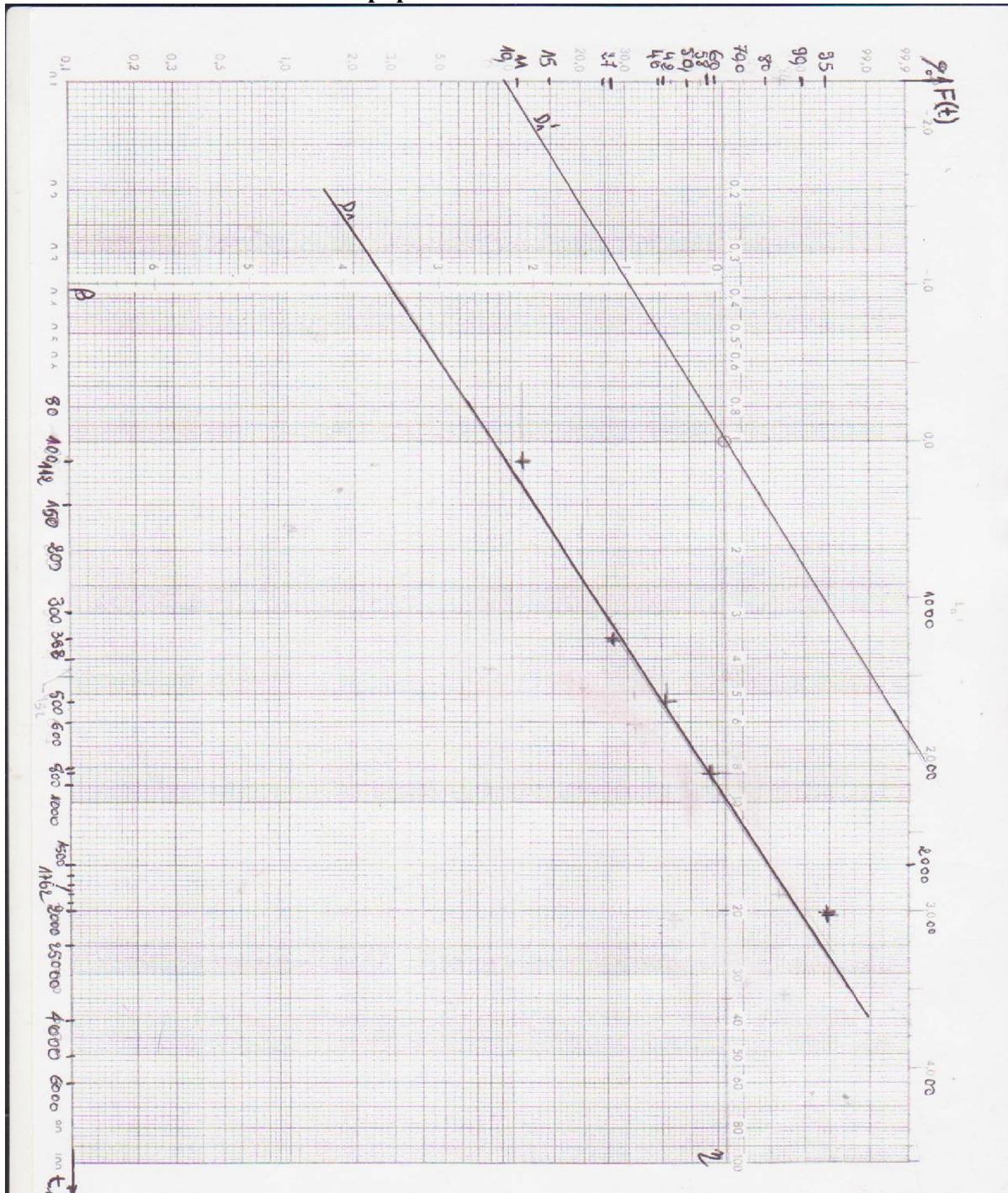


Figure 6.10. Détermination graphique des paramètres de fiabilité du joint torique

La détermination graphique des paramètres de la fiabilité nous donne $\gamma=0$; $\beta =1$; $\eta=1000$ heures.

- ✓ MTBF= $\eta=1000$ heures (car $\beta =1$, c'est une loi exponentielle)
- ✓ σ (écart type)= $\eta=1000$ heures
- ✓ $D_{0.05}=0.521$ (d'après la table des valeurs "Kolmogorov Smirnov")

Conclusion générale et perspective,

Après avoir effectué le test de "Kolmogorov Smirnov", on peut déduire que la loi théorique concorde avec celle de l'échantillon. Le calcul numérique par programmation avec la méthode de régression linéaire, nous donne : ($\beta = 0.9737; \eta = 1061$ heures). Les résultats sont très proches de celles trouvées graphiquement.

A partir de ces résultats on peut conclure que ($\beta = 1$) correspond à la période de vie utile. La fiabilité est indépendante de l'âge de l'organe tant que l'on n'a pas atteint la période de vieillissement[34]. Durant cette période de vie utile l'organe n'a que **36,8%** de chance de fonctionner correctement durant une période égale à son « MTB ». Durant cette période le taux d'avarie est alors constant, on a le phénomène de défaillance dû à une cause spéciale (dans notre cas c'est l'échauffement excessif qui est la cause principale, surtout durant la période estivale), à un mauvais montage ou une mauvaise qualité de l'organe (joint torique du compresseur à deux étages). Durant cette période de vie utile la défaillance de l'organe (joint torique) survient de façon fortuite, irrégulière, inattendue, imprévisible (franche et complète). L'entretien préventif n'a pas d'intérêt et la maintenance corrective est appliquée pour ce type de composant dont sa fiabilité suit la loi exponentielle, très connue pour la gestion de maintenance des équipements durant leur vie utile et permet une optimisation de l'exploitation et du temps d'intervention.

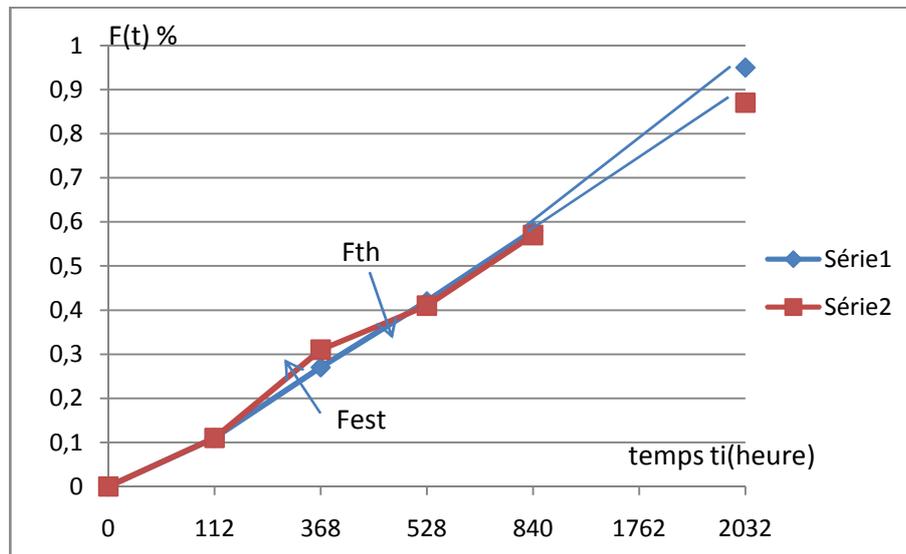


Figure 6.11. Courbes de répartition estimée et théorique

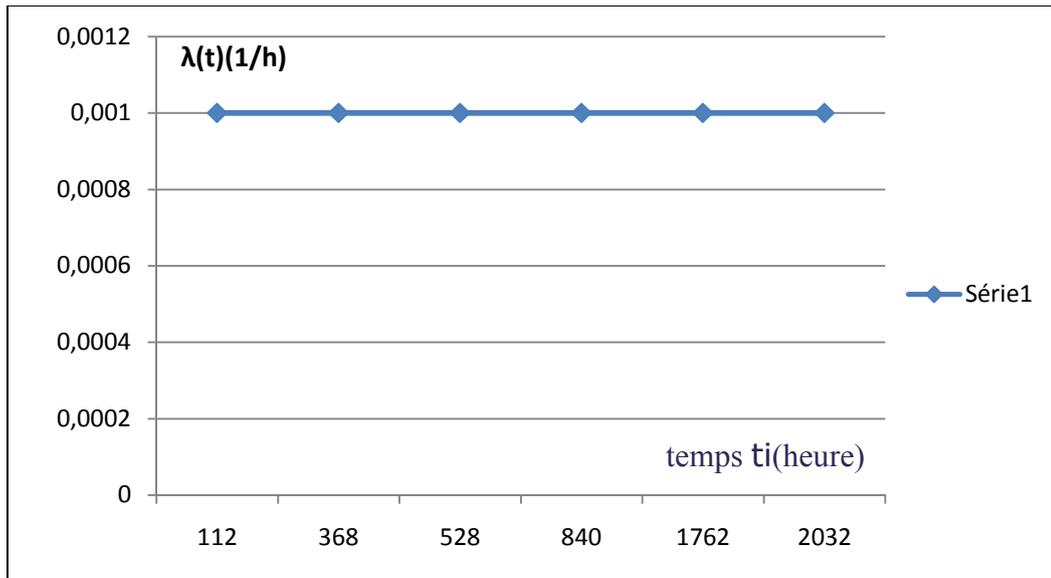


Figure 6.12. Taux de défaillance du joint torique

6.15. Cas de la garniture mécanique de la pompe de circulation de l'huile thermo fluide

6.15 .1. Préparation des données et traitement des résultats théoriques

Ci-joint le tableau récapitulatif et comparatif des résultats calculés par la loi de fiabilité.

t_i	Rang brut	Rang corrigé	F estimée	R estimée	F théorique	R théorique	$\lambda(t) * 0.001$	$D_{\sigma} = F_{est} - F_{th} $
164	1	1	0.091	0.91	0.129	0.871	0.965	0.038
192	2	2	0.23	0.77	0.152	0.848	0.988	0.078
656	3	3	0.36	0.64	0.492	0.508	1.188	0.132
688	4	4	0.50	0.50	0.511	0.489	1.197	0.011
752	5	5	0.64	0.36	0.548	0.452	1.123	0.092
1248	6	6	0.77	0.23	0.758	0.242	1.309	0.012
1888	7	7	0.91	0.09	0.898	0.102	1.392	0.012

Tableau 6.14. Préparation des données et traitement des résultats

Le tracé du nuage de points sur le papier « d'ALLEN PLAIT » suivant :

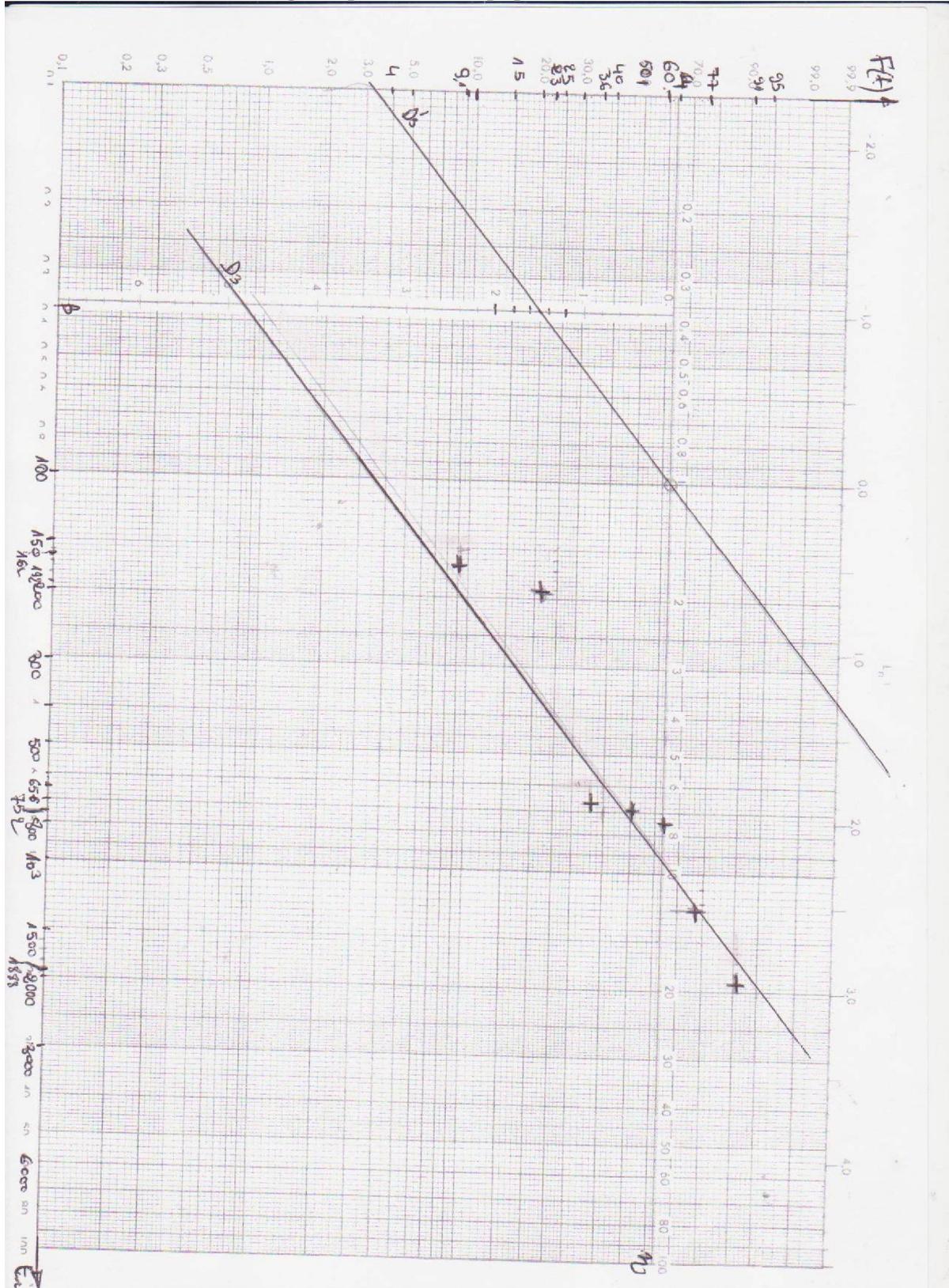


Figure (6.13) : Détermination graphique des paramètres de fiabilité de la garniture mécanique

La détermination graphique des paramètres de fiabilité permet de trouver:

$$\gamma = 0 \quad ; \quad \beta = 1.15 \quad ; \quad \eta = 920 \text{heures}$$

Le calcul de MTBF et de l'écart type nous donne :

✓ $MTBF = x * \eta = 0.951 * 920 = 874.92 \text{ heures}$

✓ $\sigma = y * \eta = 0.830 * 920 = 763.6 \text{ heures}$

$D_{N,\alpha} = D_{0.05} = 0.486$ donné par la table N°1 de "Kolmogorov Smirnov" (chapitre 1, paragraphe 1.10). Après avoir effectué le test de "Kolmogorov Smirnov", $D_{N,\alpha} \leq |F_{est} - F_{th}|$ est toujours vérifié, cela signifie qu'on a une probabilité de (5%) de se tromper entre les deux lois théorique et estimée.

Le calcul numérique des paramètres par la méthode de la régression linéaire (chapitre 3, paragraphe 3.1.3) donne :

$$\gamma = 0 \quad ; \quad \beta = 1.145 \quad ; \quad \eta = 921 \text{heures}$$

Ce qui donne une bonne corrélation des résultats.

A partir des résultats graphiques et numériques on trouve la valeur ($\beta > 1$), d'où on peut conclure que l'entretien préventif a un intérêt pour la maintenance de cet équipement.

Cet organe est considéré comme une pièce d'usure, ce qui est conforme avec la réalité. La pièce (garniture mécanique) est fabriquée à partir de deux matériaux différents, l'acier et le graphite. Ces deux matériaux s'usent durant le fonctionnement de la pompe en assurant en même temps l'étanchéité du mécanisme qui se dégrade selon la loi d'usure normale.

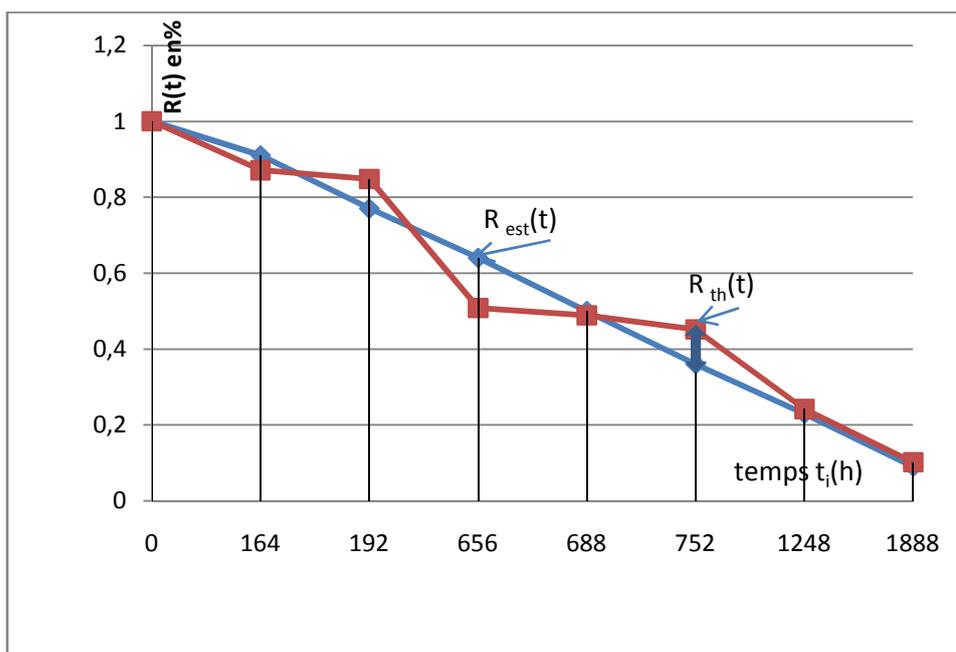


Figure 6.14. Courbes des fiabilités estimées et théoriques de la garniture mécanique

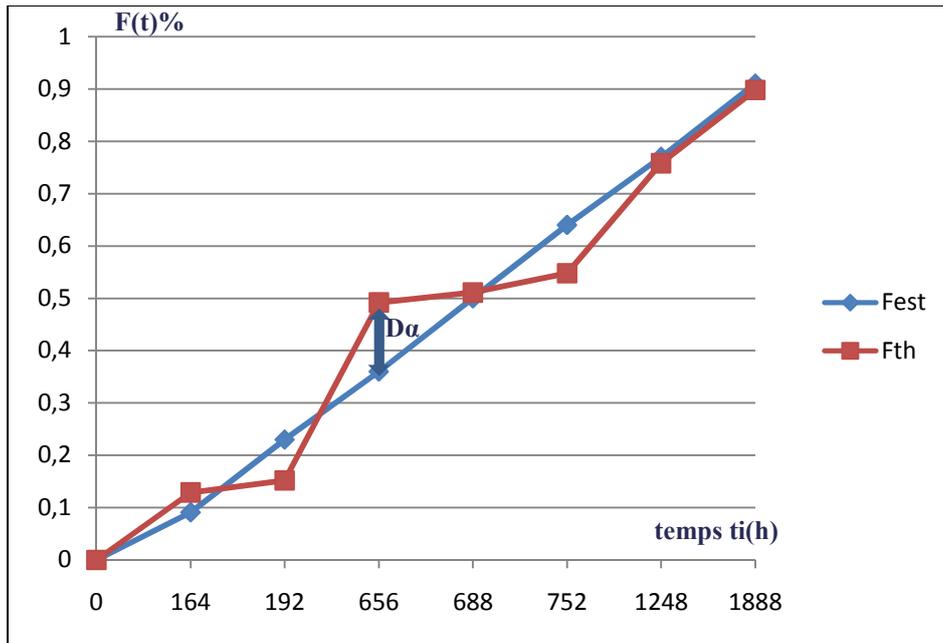


Figure 6.15. Représentation des fonctions de répartition estimée et théorique

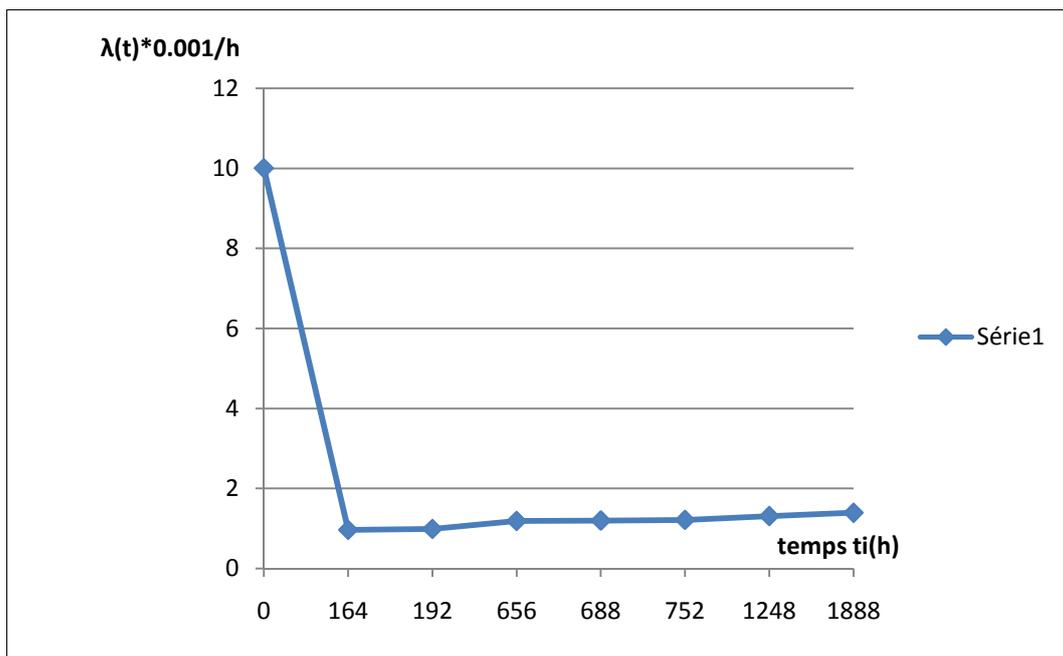


Figure 6.16. Taux de défaillance de la garniture mécanique

6.16. Détermination de la période optimale de fonctionnement

6.16.1. Calculs des coûts

Pour effectuer l'optimisation des coûts de maintenance des organes on doit calculer les coûts nécessaires d'exploitation.

C_1 : coût de remplacement de l'organe (ou dispositif).

C_2 : coût de défaillance imprévisible ($C_2 > C_1$).

- ✓ C_1 : est le coût de la main d'œuvre plus le coût de l'organe ($C_{mo} + C_o$), dans notre cas le coût de la main d'œuvre toute charges comprise est évaluée à (500DA).
- ✓ Estimation du coût de défaillance : le coût de défaillance « C_2 » n'est généralement pas relevé par la comptabilité analytique, il est souvent estimé directement. Il peut résulter de :
 - Des pertes dues à l'arrêt de l'équipement.
 - Des coûts moyens éventuels mis en œuvre pour la réparation (pièces de rechange et main d'œuvre).
- ✓ Une estimation précise du coût « C_2 » n'est pas indispensable, l'essentiel est de le surestimer supérieur à « C_1 ».

$$C_2 = r.C_1 \quad (6.9)$$

On appelle « r » le ratio de criticité économique de la défaillance. Le domaine de la validité est limité par l'intervalle ($2 < r < 100$).

6.16.2. Etude de cas de la durée de vie optimale du roulement à bille

Les paramètres de la fiabilité du roulement à bille de la pompe d'alimentation sont déjà déterminés au paragraphe (6.13.2)

- β global = $0,64 * 1,2 + 0,36 * 1,5 = 1,3$.
- η global = $0,64 * 580 + 0,36 * 2500 = 1271$ heures.
- MTBF global = 1161 heures.
- R (MTBF global) = 40%.

6.16.3. Calcul des coûts

C_1 : coût de remplacement curatif (prix de roulement plus le coût de la main d'œuvre).

$$C_1: 2h * 500DA + 4000DA = 5000DA.$$

C_2 : coût de défaillance (coût de réparation plus le manque à gagner). La chute de production où le manque à gagner est estimée à 50.000DA par heure pour chaque équipement du finissage (c'est la phase finale de processus de fabrication du tissu).

Conclusion générale et perspective,

Vu qu'on a deux pompes montées en parallèles sur chaque chaudière à vapeur, la production n'est pas perturbée durant la réparation de l'une des pompes.

✓ On va prendre le cas défavorable pour les deux chaudières qui sont en service afin d'assurer la production, tandis que les autres chaudières sont en révision annuelle.

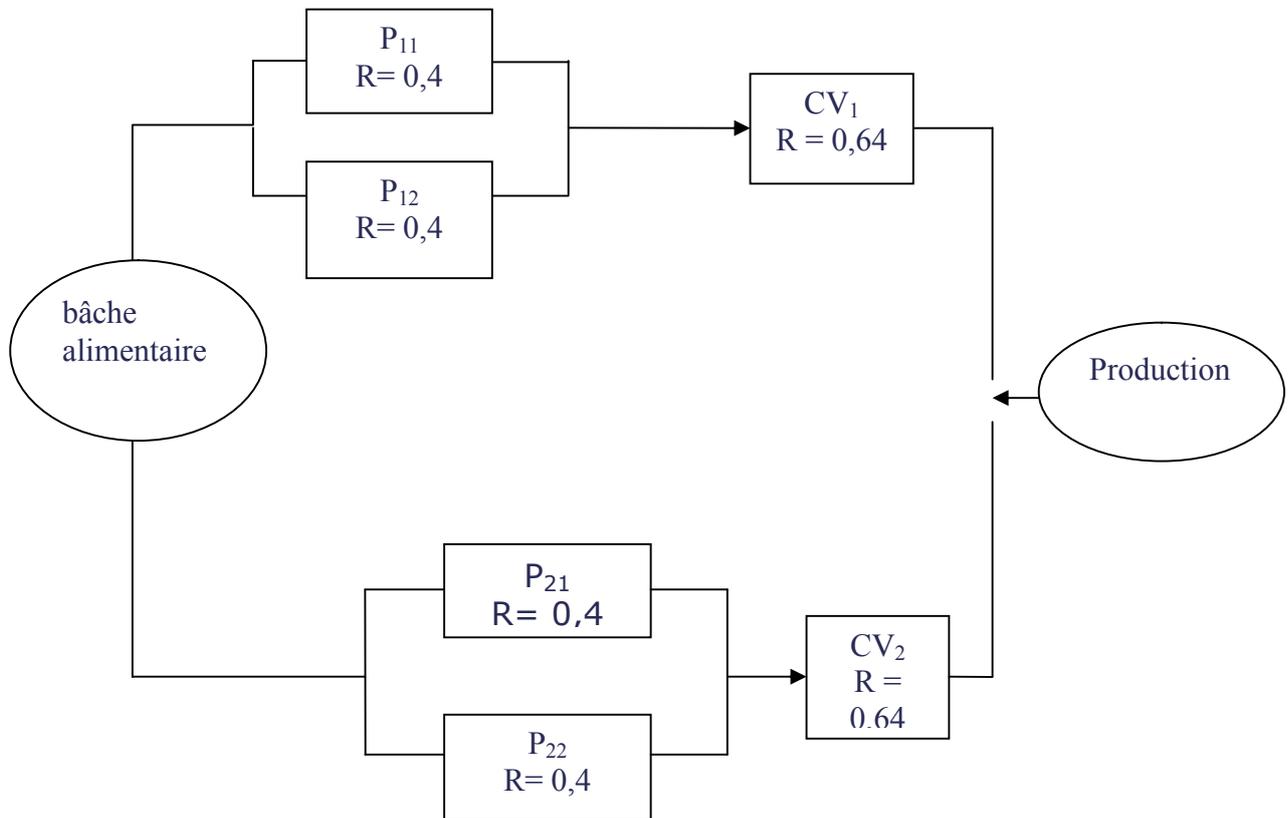


Figure 6. 17. Schéma bloc de principe de production de vapeur

CV₁ : Chaudière à Vapeur N°1.

CV₂ : Chaudière à Vapeur N°2.

P₁₁ : Pompe d'alimentation N°1 Pour CV₁.

P₂₁ : Pompe d'alimentation N°2 Pour CV₂.

P₁₂ : Pompe d'alimentation N°2 Pour CV₁.

P₂₁ : Pompe d'alimentation N°1 Pour CV₂.

- En appliquant la théorie de la fiabilité des systèmes (chapitre 4) on aura les résultats suivants :

La fiabilité de production de la vapeur pour alimenter le réseau est :

$$R_{\text{réseau}} = (1 - (1 - 0.4)^2) = 0.87.$$

Le coût de défaillance à prendre est (13%) du coût C₂ (50.000DA) en se référant au chapitre (5), et en prenant la proportion $(1 - R_{\text{réseau}}) \cdot C_2$

- Le ratio « r » = $C_2 / C_1 = 6500 / 5000 = 1,3$.

Le ratio « r » = $C_2/C_1 = 1,3 < 2$, on peut déduire que l'utilisation de l'abaque de KELLY (voir paragraphe 5.5) n'est pas nécessaire car le rapport « r » de criticité est exclu du domaine de validité.

6.16.3.1. Utilisation de la méthode analytique : cas de remplacement systématique

En utilisant l'équation (5.3) donnée par l'expression :

$$t \cdot f(t) + R(t) = 1 + \frac{C_1}{C_2}$$

Selon le cas $\beta > 1$ et $t_e = \eta(x1)^{1/\beta}$ et pour qu'il y ait des racines de l'équation (5.3) il faut que la condition $(1+1/r) < \beta e^{-(\frac{\beta-1}{\beta})}$ soit vérifiée

Pour le cas de roulement à bille traité au paragraphe (6.16.2) :

$$\gamma = 0, \quad \beta = 1,3 \text{ et } \eta = 1271 \text{ heures}$$

Cette condition n'est pas vérifiée, car $1,77 > 1,03$, d'où on peut déduire que l'échange systématique du roulement n'a pas d'intérêt.

a) Remplacement à âge fixe

En utilisant les équations (5.2) et (5.37) on aura :

$$C = \frac{C_2 - (C_2 - C_1)R(T_0)}{\int_0^T R(T) dt}$$

Selon le cas $\beta > 1$ on a $\frac{1}{r} = 0,77 < 1$

$$\frac{1}{1-\frac{1}{r}} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \int_0^t e^{-(t/\eta)^\beta} dt + e^{-(t_0/\eta)^\beta} \text{ (paragraphe 5.4).}$$

Vu les résultats trouvés précédemment, il est inutile de résoudre cette équation

6.16.4 Etude de cas de la durée de vie optimale de la garniture mécanique de la pompe de circulation :

Les paramètres de fiabilité déjà déterminés au paragraphe (6.15) ($\gamma = 0, \beta = 1.15, \eta = 920 \text{ heures}$)

MTBF = 874,92 heures ; $R(\text{MTBF}) = 0,39$

C_1 : coût moyen d'intervention curative estimé à $(2h * 500\text{DA} + 19000\text{DA} = 20000\text{DA})$

(Ces données sont relevées du dossier historique de l'équipement)

C_2 : coût de défaillance.

On a trois chaudières thermo fluide en parallèle, alimentant le réseau d'huile thermo fluide. La production peut être assurée par deux chaudières thermo fluides seulement, ce qui permet de réparer l'une des trois pompes en cas de défaillance, sans perturber l'exploitation.

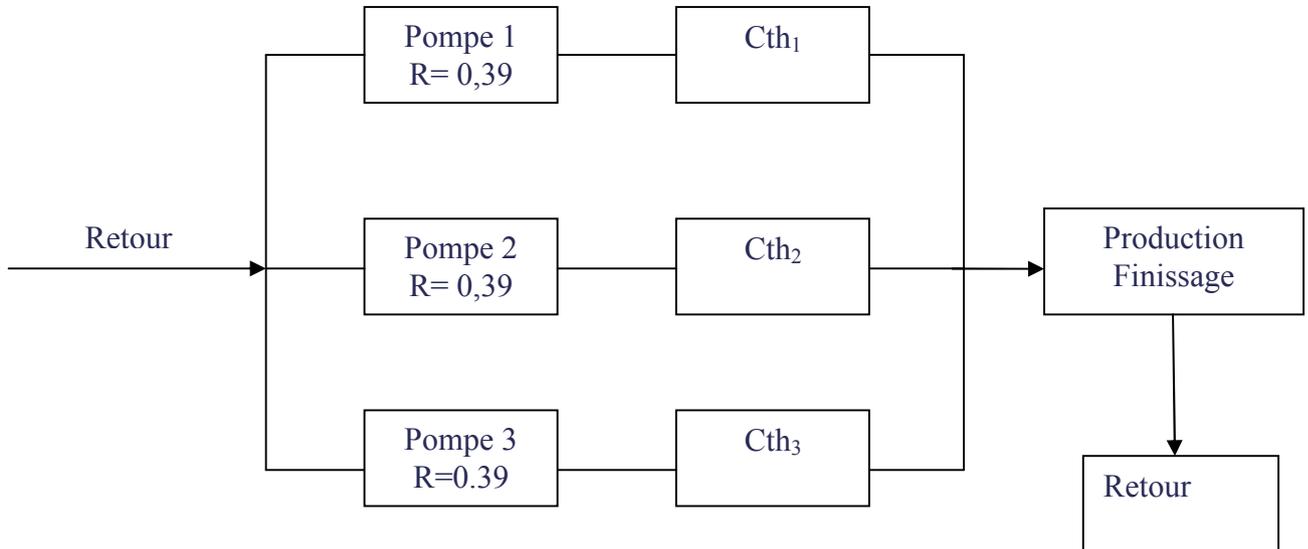


Figure 6. 18. Schéma bloc de principe de chauffage de l'huile thermo fluide

- Cth₁: Chaudière thermofluide N°1.
- Cth₂: Chaudière thermofluide N°2.
- P1 : Pompe de circulation N°1 Pour Cth₁.
- P2 : Pompe de circulation N°2 Pour Cth₂.
- Cth₃: Chaudière thermofluide N°3.
- P3 : Pompe de circulation N°3 Pour Cth₃

La fiabilité du réseau thermo fluide est déterminée comme suit :

$$R_{TH} = (1 - (1 - 0.39)^2) = 0.63 \text{ (système en parallèle).}$$

On prend le cas défavorable (deux pompes de circulation en service pour la production), donc le coût de défaillance partiel est de (37% = 1 - R_{TH}) du coût de défaillance total (C₂ = 1000000 DA/h).

Le ratio « r » = C₂/C₁ = 1.85 < 2, on peut déduire que l'utilisation de l'abaque de KELLY n'est pas nécessaire car le rapport « r » de criticité est exclu du domaine de validité.

6.16.4.1 Utilisation de la méthode analytique (cas de remplacement systématique)

En utilisant l'équation (5.3) donnée par l'expression :

$$t \cdot f(t) + R(t) = 1 + \frac{C_1}{C_2}$$

a) Selon le cas de $\beta > 1$ et $t_e = \eta(x1)^{1/\beta}$ et pour qu'il y ait des racines de

l'équation (5.3) il faut que la condition $(1 + 1/r) < \beta e^{-\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)}$ soit vérifiée

Pour le cas de la garniture mécanique de la pompe de circulation traité au paragraphe (6.15).

$$\gamma = 0, \quad \beta = 1,15 \text{ et } \eta = 920 \text{ heures}$$

La condition n'est pas vérifiée car $1,54 > 1,01$

D'où on peut déduire que l'échange systématique de la garniture mécanique de la pompe de circulation n'a pas d'intérêt.

b) Remplacement à âge fixe :

En utilisant les équations (5.2) et (5.37) on aura :

$$C = \frac{C_2 - (C_2 - C_1)R(T_0)}{\int_0^T R(T) dt}$$

Pour le cas $\beta > 1$ on a $\frac{1}{r} = 0,54 < 1$

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{r}} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \int_0^t e^{-(t/\eta)^\beta} dt + e^{-(t_0/\eta)^\beta} \quad (\text{paragraphe 5.4})$$

Vu les résultats trouvés précédemment, il est inutile de résoudre cette équation.

6.17. Analyse des résultats trouvés

L'étude de fiabilité menée sur ces organes vitaux sélectionnés par les méthodes « AMDEC » et « ABC » ; nous a permis de déterminer les paramètres de fiabilité (γ ; β ; η ; λ) de chaque organe et de faire un choix de la politique de la maintenance à appliquer. Dans notre cas il faut assurer une maintenance corrective pour éliminer toutes les causes spéciales et une maintenance préventive basée sur des contrôles et des inspections périodiques, avec un suivi rigoureux des ces organes sensibles qui peuvent provoquer l'arrêt des équipements et une perte de production importante et coûteuse au niveau de tous les ateliers de production, en particulier au niveau de l'atelier de finissage, qui revient très à l'entreprise en cas de défaillance. Dans ce sixième chapitre on a mis en application la théorie citée dans les parties précédentes. Cette partie est importante et délicate vu qu'elle est d'une grande importance pour la maintenance dans le domaine manufacturier (textile) a beaucoup de difficultés malgré que l'entreprise « **Denitex** » est certifiée par « **ISO 9001** ».

6.18. Conclusion

A cet effet on a constaté durant le premier semestre de l'année 2011 aucune défaillance n'a été enregistrée à cause de ce travail de Magister qui nous a permis de diagnostiquer les équipements en fonctionnement et de faire des contrôles périodiques qui ont permis de trouver des erreurs d'exploitation et un mauvais suivi des équipements. Ceci montre donc l'impact de l'analyse de la fiabilité sur ce type d'équipement choisi sur la base

de la stratégie optée par l'entreprise. La préparation de ce travail de magister dans le cadre pratique des équipements en exploitation a des résultats positifs et a permis d'éviter plus de 80% de défaillance par rapport aux années précédentes.

Le choix de notre étude s'est porté sur l'atelier de chaufferie qui constitue un goulot d'étranglement, car l'arrêt de l'un de ses équipements perturbe la production, surtout celle de l'atelier du finissage. La mise en application de la fiabilité opérationnelle à partir d'un retour d'expérience est primordiale pour le choix d'une politique de la maintenance préventive ou curative, grâce à la détermination des paramètres de fiabilité des organes sélectionnés par les méthodes d'analyse utilisées en fiabilité à savoir la méthode : « ABC » et l'analyse par « l'AMDEC ». La direction de maintenance au niveau « Denitex » aura donc un outil très efficace pour maintenir les équipements de la chaufferie selon notre analyse de la fiabilité appliquée, et de justifier l'installation des compresseurs et des chaudières en parallèles, ceci dans le but d'augmenter la fiabilité totale de ces équipements.

L'avantage de la fiabilité opérationnelle à partir de retour d'expérience est le coût de l'étude qui est moins cher par rapport à la fiabilité expérimentale qui demande des laboratoires sophistiqués et un personnel hautement qualifié.

Conclusion générale et perspective

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE

On conclut après cette recherche dans le cadre de la préparation de ce mémoire de magister que l'évaluation de la fiabilité des équipements industriels est indispensable pour leur optimisation. Il n'y a pas de méthode unique ou normalisée pour calculer la fiabilité des systèmes mécaniques comme c'est le cas pour les systèmes électroniques qui se caractérisent dans la majorité des cas par un taux de défaillance constant. Le choix de la méthode à appliquer dans ce type d'équipement mécanique se fait en fonction des données recueillies.

Dans notre travail, nous avons étudié les principales lois utilisées en fiabilité ainsi que les différentes méthodes de détermination des paramètres de fiabilité qui caractérisent le degré de défaillance et permettent de bien suivre l'état des équipements et de choisir le type de la maintenance à appliquer.

Après une étude bibliographique, nous avons constaté que le calcul de la fiabilité mécanique dépend de cinq facteurs essentiels :

1. la notion du taux de défaillance constant n'existe pas ; car en mécanique le taux de défaillance est une fonction non linéaire du temps dans chaque phase de la vie de l'équipement.
2. Le recueil des données de fiabilité est difficile : Il dépend essentiellement de l'organisation et la gestion de la maintenance ; afin de bien exploiter les données historiques des équipements.
3. Les défaillances ont des origines particulières ; ceci a fait l'objet du deuxième chapitre.
4. La méthode d'analyse des défaillances ; car les systèmes mécaniques sont de plus en plus complexes et performants.
5. Le choix de la méthode pour l'évaluation de la fiabilité dépendra des objectifs fixés et des outils disponibles.

On constate que les équipements de la chaudière sont les plus sensibles et influent directement sur le coût de la maintenance et sur les ateliers de la production en générale. Comme conclusion sur ce type d'équipement, on a déduit que cette étude de magister nous a permis de remédier à plus de 50% du temps d'indisponibilité, ceci à cause de nos visites périodiques établies tout le long de l'élaboration de ce magister.

En terme de perspective, nous envisageons la détermination des paramètres de fiabilité et la période optimale de maintenance préventive par simulation numérique afin de pouvoir traiter beaucoup plus de données dans un délai très court et de mettre en place une maintenance prévisionnelle gérer par modélisation et simulation numérique par les modèles déterministes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Jean Bufferne « Fiabiliser les équipements industriels » édition Eyrolles, 2008
- [2] AFNOR : Recueil des normes françaises .X06, X05, X60. AFNOR 1998
- [3] François Monchy « Maintenance, méthode et Organisation » édition "Usine Nouvelle", Paris, 2004
- [4] Bernard Guy Peret « La Fiabilité Industrielle » édition " Eyrolles" ; 1969
- [5] P.Chapouille « Fiabilité et maintenabilité. Les techniques de l'ingénieur ; traité de l'entreprise industrielle » Edition 1999.
- [6] Jean Heng « Pratique de la Maintenance préventive » édition " Dunod", Paris, 2002
- [7] Tebbi Ouahiba « Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés » Thèse de doctorat. École Doctorale , Angers ,2005
- [8] ADE La Villeguerin « Etude comparative des différentes définitions du MTBF et MTTF » Publication centre de recherche EADS Aout 1999.
- [9] David Smith « Fiabilité et risque en maintenance » édition "Usine nouvelle", Paris, 2006
- [10] Norme AFNOR X60-10 ; 1988.
- [11] Daniel Richet « Maintenance basée sur la Fiabilité » édition, "Masson", 1996
- [12] Patrick Lyonnet « Ingénierie sur la fiabilité » édition "Lavoisier", 2006
- [13] Jean Foucher « Pratique de l'AMDEC » Edition, "Dunod", Paris, 2004
- [14] Brahim Herrou et Mohamed Elchorba « AMDEC un outil puissant d'optimisation ».Ecole supérieur de technologie de Fès et école nationale supérieur d'électricité et de mécanique Casablanca MAROC ; CPT ; 2005
- [15] Blain,C,BarrosA,Grall,A. « Modelling of stress corrosion cracking with stchastic processus ».Proceeding of Esrel conference, Norvege, Juin 2007
- [16] M .Boumahrat et A .Gourdin « Méthodes Numériques » OPU.Alger,1983
- [17] Jean Lonis Merrier « Analyse Numérique avec Matlab » édition "Dunod",Paris, 2007
- [18] Mustapha Lakrib « Cours d'analyse numérique » OPU ; Alger ; 2008
- [19] Patrick Lyonnet « La qualité, outils et méthodes » édition "Lavoisier";Paris ,1993
- [20] Jean Bufferne « Revue Techno-méca » Avril 2009.
- [21] A Villemeur « Sureté de fonctionnement des systèmes industriels ; Fiabilité facteur humain » édition "Eyrolles";Paris ,1987.

BIBLIOGRAPHIE

- [22] Villemeur, A. « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels » édition "Eyrolles", 1997
- [23] Monin, M. « Approche unifiée défaillance, dommage dans la sûreté de fonctionnement » Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, 2007.
- [24] Despujols, A. « Optimisation de la maintenance par la fiabilité » Technique de l'ingénieur, dossier MT9310, 2004.
- [25] Haviland « Technique de fiabilité et de durée de vie des équipements » édition "Eyrolles", 1969.
- [26] J. Ligeron, A. Delage, M. Neff « Fiabilité en exploitation » édition "Lavoisier", 1994.
- [27] B. SDHILLON « life cycle costing, techniques models and applications » University Ottawa, Gordon and Breach science Publishers New York 1989
- [28] Y. Martin, N. Guirago, J. Faucher, P. Lyonnet « Détermination par simulation d'une politique de maintenance » Paris ISDF 1994.
- [29] Mathieu Glade « Modélisation des coûts de cycle de vie : prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité. Application à l'aéronautique » Thèse de doctorat. École centrale de Lyon, 2005.
- [30] Robert Faure et Jean Lois Laurier « Fiabilité et renouvellement des équipements » Édition "Gauthier Villars", 1974.
- [31] Stratégie de maintenance « la fiabilité des systèmes de production » BTSMI. Internet 2011.
- [32] Jean Claude Ligeronet, Patrick Lyonnet « La fiabilité en exploitation ; organisation et traitement des données » Édition Lavoisier Paris, 1993.
- [33] Pareto « Cours d'économie politique » Lausanne, Switzerland ; 1896
- [34] R.E. Barlow and F. Proschan « Mathematical theory of reliability » Wiley. New York 1965.

Sites internet

www.jean-bufferne.com

<http://p:chahmann.free.fr>

www.management.free.fr

<http://www.numdam.org/>