



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
Faculté des Sciences et de la Technologie



Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences
Spécialité : Génie Électrique

Étude et application des techniques de l'intelligence artificielle
d'optimisation pour la maintenance des réseaux électriques
dans le cadre de la MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité)

Présentée par :

BOUZOUADA Abdallah

Soutenue publiquement le : **18/07/2021**

Devant le jury composé de :

GHOMRI Leila	MCA	Présidente	Université de Mostaganem
YSSAAD Benyssaad	MCA	Directeur de thèse	Université de Relizane
BEKKOUCHE Benaissa	Professeur	Co-directeur de thèse	Université de Mostaganem
LOUNIS Mourad	Professeur	Examineur	Université de Relizane
CHAOUCH Abdallah	MCA	Examineur	Université de Mostaganem
MELIANI Bouziane	MCA	Examineur	Université de Relizane

Remerciements

Je remercie très sincèrement Mr YSSAAD Benyssaad, Professeur à l'université de Relizane de m'avoir dirigé tout au long de ce travail, et pour l'aide précieux qu'il m'a apporté dans l'élaboration de cette thèse malgré ses engagements professionnels et familiaux.

Je tiens aussi à remercier Mr BEKKOUCHE Benaissa, Professeur à l'université de Mostaganem pour sa disponibilité et sa qualité humaine.

Sans oublier de remercier messieurs les membres de jury qui ont accepté d'examiner ce travail.

Un grand merci à tous qui ont contribué de près ou de loin à la finalisation de ce travail.

SOMMAIRE

Liste des figures	i
Liste des tableaux	ii
Glossaire des notations et abréviations	iii
Résumé	iv
Introduction générale	1
1 Chapitre 1. Généralité sur la maintenance et la sureté de fonctionnement	3
1.1 Introduction	3
1.2 La maintenance	4
1.2.1 Les différentes formes de maintenance	5
1.2.1. 1 La maintenance corrective	5
1.2.1. 2 La maintenance préventive	6
1.2.1. 3 Maintenance améliorative	8
1.2.2 Niveaux de la maintenance	8
1.2.3 Les métiers de la maintenance	9
1.2.4 Les objectifs de la maintenance	9
1.2.5 Choix de politique de maintenance d'un système	10
1.2.6 Position du service maintenance au sein de l'entreprise	11
1.2.7 Les Outils de Gestion Standards du service maintenance	12
1.2.8 Processus de gestion de la maintenance	14
1.2.9 La sous-traitance	16
1.2.10 Différents systèmes informatiques en maintenance	17
1.2.10. 1 Informatisation des procédures de maintenance	17
1.2.10. 2 Evolution du domaine technique	18
1.2.10. 3 Intégration de modules intelligents en architectures de maintenance	18
1.2.10. 4 Développement des NTIC	18
1.3 la sureté de fonctionnement	18
1.3.1 Définitions de base de la sûreté de fonctionnement	19
1.3.2 Analyses de sûreté de fonctionnement	19
1.3.2. 1 Analyse technique et fonctionnelle	20
1.3.2. 2 Analyse qualitative	20
1.3.2. 3 Analyse quantitative	20
1.3.2. 4 Amélioration techniques	21
1.3.3 L'arbre de la sûreté de fonctionnement	21
1.3.3. 1 Attributs de la sûreté de fonctionnement	21
1.3.3. 2 Moyens pour la sûreté de fonctionnement	22
1.3.3. 3 Entraves à la sûreté de fonctionnement	22
1.4 Conclusion	22

2	Chapitre 2. Modélisation de la maintenance et l'analyse de la fiabilité	23
2.1	Introduction	23
2.2	Modélisation mathématique de la fiabilité	24
2.2.1	La fonction cumulée de défaillance	24
2.2.2	La fonction de fiabilité	24
2.2.3	Taux de défaillance	24
2.2.4	Exemple	26
2.3	Estimation des paramètres du modèle	28
2.3.1	Distribution Identique et Indépendante	28
2.3.1.1	1. Test de tendance	28
2.3.1.2	2. Test de corrélation sérielle	29
2.3.2	Méthode des moindres carrées	29
2.3.3	Méthode du maximum de vraisemblance	30
2.3.4	Exemple	32
2.4	Tests d'adéquation	34
2.4.1	Test de Khideux (χ^2)	34
2.4.2	Test de Kolmogorov-Smirnov	35
2.4.3	Test d'Anderson-Darling	35
2.4.4	Exemple	36
2.5	Coût de la maintenance	37
2.6	L'effet de la maintenance sur la fiabilité	37
2.6.1	Évolution de la fonction de taux de défaillance	38
2.6.2	Détermination de la longueur du ième intervalle PM	40
2.7	Le taux du coût cumulé attendu pour le cycle de vie	41
2.7.1	Exemple	42
2.8	Approche par blocs diagrammes de fiabilité	42
2.8.1	Modèle série	42
2.8.2	Modèle parallèle	43
2.8.3	Modèle k/n	43
2.8.4	Modèle complexe	44
2.9	Approche par Arbres de défaillances Add	46
2.9.1	Définition	46
2.9.2	Conduite de la méthode	46
2.9.3	Exemple	47
2.10	Approche par AMDEC	48
2.10.1	Définition	48
2.10.2	Terminologie	48
2.10.3	Exemple	51
2.11	Conclusion	53

3	Chapitre 3. Techniques d'optimisation par les méta-heuristiques	54
3.1	Introduction	54
3.2	L'algorithme du recuit simulé (RS)	54
3.2.1	Description	54
3.2.2	Algorithme	54
3.3	L'algorithme génétique (AG)	56
3.3.1	Description	56
3.3.2	Algorithme	58
3.4	L'optimisation par essaim particulaire (OEP)	58
3.4.1	Description	58
3.4.2	Modélisation du mouvement	59
3.4.3	Algorithme	60
3.5	L'algorithme des lucioles (FA)	61
3.5.1	Description	61
3.5.2	Modélisation du mouvement	61
3.6	L'algorithme LFA (LFA : Lévy-flight firefly algorithm)	62
3.6.1	Vol de Lévy (Lévy-flight)	62
3.6.2	Modélisation du mouvement	64
3.6.3	Algorithme (LFA)	64
3.7	Conclusion	65
4	Chapitre 4. Sûreté de fonctionnement des réseaux électriques	66
4.1	Introduction	66
4.2	Les phases chronologiques de réalisation d'une étude de la SdF	66
4.2.1	Expression et analyse du besoin	67
4.2.2	Analyse fonctionnelle du réseau de transport	67
4.2.2.1	Analyse externe ou approche fonctionnelle	68
4.2.2.2	Analyse fonctionnelle interne	68
4.3	Le risque	68
4.3.1	Comportement des réseaux électriques	69
4.3.2	Les problèmes requérant la sûreté de fonctionnement	70
4.3.3	Modes de dégradation de la sûreté	71
4.4	Simulation Monte Carlo séquentielle des réseaux électriques	73
4.5	Expérimentation de la MBF des réseaux de transport dans le monde	76
4.5.1	Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (O.M.F.), EDF France	76
4.5.2	Stratégies et gestion de la maintenance par la fiabilité, RED ELECTRICA	77
4.5.3	Présentation générale de la MBF du service d'électricité au Canada	78
4.5.4	Politique d'optimisation de la maintenance par la fiabilité GRTE	79
4.6	Exemples d'application	80

4.6.1	Exemple 1	80
4.6.2	Exemple 2	82
4.6.3	Exemple 3.....	84
4.6.4	Exemple 4	85
4.6.5	Résultat et discussion.....	88
4.7	Conclusion	90
5	Chapitre 5. Les méta-heuristiques dans l'optimisation de la maintenance	91
5.1.	Introduction	91
5.2.	Description du réseau SONLGAZ.....	92
5.2.1.	Exploitation du système électrique en Algérie	93
5.2.2.	Description du post MT de la station de Relizane	94
5.3.	Présentation de la nouvelle approche : MBF rationnelle	96
5.4.	Les démarches de l'analyse de fiabilité	98
5.4.1.	Collection de données.....	98
5.4.2.	Test de tendance.....	98
5.4.3.	Test de corrélation sérielle.....	100
5.4.4.	L'analyse des données.....	102
5.5.	Evaluation des risques des réseaux de distribution électrique	102
5.5.1	Estimation des risques.....	102
5.5.2	Détermination des équipements les plus critiques.....	108
5.6	Blocs diagramme de fiabilité du système.....	108
5.7	Arbre de défaillance dynamique AdD.....	109
5.8	Approche d'optimisation par les méta-heuristiques	110
5.8.1	Formulation du problème et méthodologie proposée	110
5.8.2	Coût total de la maintenance	112
5.8.3	Les résultats d'optimisation	112
5.8.3. 1.	Les résultats de l'algorithme SA	113
5.8.3. 2.	Les résultats de l'algorithme GA.....	114
5.8.3. 3.	Les résultats de l'algorithme OEP.....	115
5.8.3. 4.	Les résultats de l'algorithme LFA.....	115
5.8.3. 5.	Les résultats de l'ensemble SA, GA, PSO et LFA.....	116
5.9.	Plan de maintenance adopté.....	117
5.10	Interprétation du résultat	119
5.11	Conclusion	120
6.	Conclusion générale.....	121
7.	Références	123
8.	Annexes	132

Liste des figures

	Page
Figure. 1.1. Les types de maintenance	5
Figure. 1.2. Organigramme du choix de la méthode d'entretien	11
Figure. 1.3. Positionnement du service maintenance dans l'entreprise.....	12
Figure. 1.4. Système de gestion de maintenance	15
Figure. 1.5. Processus général de maintenance	16
Figure. 1.6. Coopération des différents systèmes informatiques.....	18
Figure. 1.7. Les étapes principales d'analyse de SdF	20
Figure. 1.8. L'arbre de la sûreté de fonctionnement.....	21
Figure. 2.1. La fiabilité / la dé-fiabilité vs le temps	26
Figure. 2.2. La fonction densité de probabilité vs le temps.....	26
Figure. 2.3. Le taux de défaillance vs le temps	27
Figure. 2.4. Évolution du taux de défaillance en courbe « baignoire »	27
Figure. 2.5. Allures caractéristiques du taux de défaillance	27
Figure. 2.6. Diagramme de distribution empirique	32
Figure. 2.7. Ajustement d'un modèle de type $y = a x + b$	33
Figure. 2.8. Comparaison entre les méthodes d'ajustement.....	33
Figure. 2.9. Comparaison des modèles de PM imparfait	38
Figure. 2.10. L'allure du taux de défaillance avec le modèle hybride	39
Figure. 2.11. L'allure de fiabilité avec le modèle hybride	40
Figure. 2.12. ECC v.s le nombre n de PM.....	41
Figure. 2.13. Modèle série.....	42
Figure. 2.14. Modèle parallèle.....	43
Figure. 2.15. Modèle k/n	44
Figure. 2.16. Modèle complexe	44
Figure. 2.17. Modèle complexe 1	45
Figure. 2.18. Modèle complexe 2	45
Figure. 2.19. Blocs diagramme de fiabilité	47
Figure. 2.20. Arbre de défaillance	48
Figure. 2.21. Déroulement de l'AMDEC	50
Figure. 3.1. Exemple d'une fonction a optimisée.....	55
Figure. 3.2. Population d'individus	58

Figure. 3.3. Une volée d'oiseaux dans la nature	59
Figure. 3.4. Principe de déplacement d'une particule	59
Figure. 3.5. Lucioles dans la nature.....	61
Figure. 3.6. Marche aléatoire a 2D avec 100 pas	63
Figure. 3.7. Marche aléatoire de Lévy a 2D avec 100 pas	63
Figure. 4.1. Les phases chronologiques de réalisation d'une étude de la SdF.....	67
Figure. 4.2. Courbe de risque	69
Figure. 4.3. Algorithme simulation Monte Carlo développé.....	73
Figure. 4.4. Exemple de BDF.....	80
Figure. 4.5. Schéma d'une alimentation électrique	82
Figure. 4.6. BDF de cette alimentation électrique.....	82
Figure. 4.7. BDF de cette alimentation électrique (chemin de succès)	83
Figure. 4.8. AdD de cette alimentation électrique.....	83
Figure. 4.9. Travée ligne.....	84
Figure. 4.10. SADT Niveau 0 la tâche A0	85
Figure. 4.11. SADT Niveau 1 décomposition de la tâche A0	85
Figure. 4.12. Réseau de distribution électrique	86
Figure. 5.1. Réseau d'électricité d'Algérie.....	93
Figure. 5.2. Exploitation du système électrique	94
Figure. 5.3. Poste HT/MT.....	94
Figure. 5.4. Poste MT 60 KV	96
Figure. 5.5. Démarche MBF rationnelle.....	97
Figure. 5.6. Fréquence de défaillance des principaux composants du système.....	98
Figure. 5.7. Test de tendance pour TBF	100
Figure. 5.8. Test de corrélation sérielle pour TBF	101
Figure. 5.9. Les équipements critiques	108
Figure. 5.10. Blocs diagrammes de fiabilité BDF	109
Figure. 5.11. Arbre de défaillance AdD	109
Figure. 5.12. La méthodologie proposée dans cette étude.....	111
Figure. 5.13. Variation du coût de maintenance	114
Figure. 5.14. Variation du coût de maintenance.....	114
Figure. 5.15. Variation du coût de maintenance.....	115
Figure. 5.16. Variation du coût de maintenance.....	115
Figure. 5.17. Variation du coût de maintenance.....	116

Figure. 5.18. ECC v.s composants	117
Figure. 5.19. La fiabilité avant et après l'optimisation	118
Figure. 5.20. La dé-fiabilité avant et après l'optimisation	118

Liste des tableaux

.....	Page
Tableau. 1.1. Les niveaux de la maintenance	8
Tableau. 1.2. Métiers de la maintenance	9
Tableau. 1.3. Le processus de la maintenance selon les quatre types de maintenance	16
Tableau. 1.4. La sous-traitance: raisons et limites.....	17
Tableau. 2.1. Causes & Remèdes	28
Tableau. 2.2. Exemple	32
Tableau. 2.3. Résultats des tests	36
Tableau. 2.4. ECC en fonction de la combinaison (n , R_{th}).....	42
Tableau. 2.5. PM intervalle correspondant et temps optimal de remplacement.....	42
Tableau. 2.6. Exemple de cotation de G, D et O	51
Tableau. 2.7. Exemple AMDEC.....	51
Tableau. 2.8. Classification des composants selon sa criticité	53
Tableau. 4.1. Table de vérité d'un système de maintenance préventive.....	80
Tableau. 4.2. Table de vérité du système	83
Tableau. 4.3. Classification des pannes et coût de remplacement estimatif.....	87
Tableau. 4.4. Données de fiabilité	87
Tableau. 4.5. AMDEC des indices de fiabilité	89
Tableau. 5.1. Résulta d'estimation et de validation.....	102
Tableau. 5.2. Fréquence O : probabilité d'occurrence (<i>Sécurité</i>)	103
Tableau. 5.3. Gravité G (<i>Disponibilité</i>).....	103
Tableau. 5.4. Probabilité de non détection D (<i>Maintenabilité</i>)	103
Tableau. 5.5. Partition des équipements et plan d'action	104
Tableau. 5.6. Résultat de l'analyse AMDEC	105
Tableau. 5.7. Coûts des différents types de maintenance	113
Tableau. 5.8. Coût optimal obtenu	116
Tableau. 5.9. Résultats optimaux obtenus par l'algorithme LFA	117
Tableau. 5.10. Résultat de calcule de disponibilité	118

Glossaire des notations et abréviations

Notation	Signification
$F(t)$	Fonction de répartition (fonction cumulée de défaillances ou fonction de dé- fiabilité)
$f(t)$	Fonction densité de probabilité
$h(t)=\lambda(t)$	Fonction hasard ou Taux de défaillance
μ	Taux de réparation
$A(t)$	Disponibilité
$R(t)$	Fiabilité
$M(t)$	Maintenabilité
TBF	Temps entre les défaillances (Time between failures)
CTBF	Temps cumulé entre les défaillances (Cumulative TBF)
MTBF	Temps moyen de bon fonctionnement (mean time between failures)
TTR	Temps de réparation (Time To Repair)
MTTR	Temps moyen de réparation (Mean Time To Repair)
FMDS	Fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité
iid	Distribution identique et indépendante (Identically and Independently Distribution)
MV	Maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood Estimation, MLE)
C_{UM}	Coût total de la maintenance non planifiée ou corrective (Total Unscheduled Maintenance cost)
C_{PM}	Coût total de la maintenance préventive
C_{RM}	Coût de remplacement ou de rénovation rationnelle des éléments de système.
RS	Algorithmes du recuit simulé (Simulated Annealing, SA)
GA	Algorithme génétique
OEP	Optimisation par Essaim Particulaire (Particle Swarm Optimization PSO)
FA	Algorithme des lucioles (firefly algorithm)
LFA	Lévy-flight firefly algorithm (Vol de Lévy)
T_{mis}	Temps de mission
R_{th}^j	Seuil de fiabilité du $j^{ième}$ composant j
R_d	Fiabilité désirée

R_M	Fiabilité moyenne du système pendant T_{mis}
T_i^j	$i^{\text{ème}}$ interval de la $j^{\text{ème}}$ composant du système
R_s	La fiabilité du système
ECC	Le taux du coût cumulé attendu pour le cycle de vie du composant
N_{PM}^j	Nombre de l'action PM sur le j^{th} composant pour T_{mis}
Cp^j	Coût moyen de la maintenance préventive de $j^{\text{ème}}$ composant
N_{RM}^j	Nombre de l'action RM sur le j^{th} composant pour T_{mis} .
Cr^j	Coût moyen de remplacement de $j^{\text{ème}}$ composant
Cu^j	Coût moyen de la maintenance corrective de $j^{\text{ème}}$ composant
θ^j	Paramètre de forme de la loi de Weibull
η^j	Paramètre d'échelle de la loi de Weibull
Total Cost	Coût totale de la maintenance.
MP	Maintenance préventive
MC	Maintenance corrective
MBF	Maintenance basée sur la fiabilité
RCM	Reliability centered maintenance
REX	Retour d'expérience
MBAF	Maintenance basée sur les actifs de la fiabilité
RCAM	Reliability centered asset maintenance
AMDEC	Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité
ACV	Analyse du cycle de vie
ACCV	Analyse du cycle de coût de vie
L	Ligne électrique (Electrical line)
PL	Parafoudre (Para Lightning)
DS	Sectionneur (Sectionalizes)
CB	Disjoncteur (Circuit Breaker)
SB	Jeu de Barre (Set of Bar or Busbar)
CT	Transformateur de courant (Current Transformer)
PT	Transformateur de puissance (Power Transformer)
VT	Transformateur de tension (Voltage Transformer)
IS	Isolateur (Insulator)
FUS	Fusible
G	Mise à la terre (Ground)

NPR ou C	Criticité
O	Indice de fréquence ou probabilité d'occurrence
G	Indice de gravité
D	Indice de détectabilité

Résumé

Notre travail a pour objectif d'optimiser la fonction de maintenance associée aux réseaux électriques dans le contexte de la maintenance basée sur la fiabilité (MBF). La démarche suivie dans cette thèse commence par la collection des données sur l'historique des composants dans l'objectif d'estimer les paramètres du modèle de fiabilité adopté et pour faire la modélisation du système à l'aide des méthodes de modélisation tels que les blocs diagramme de fiabilité (BDF) , puis nous utilisons les algorithmes méta-heuristiques pour faire l'optimisation de la fonction du coût de maintenance qui se traduit par la suite en un plan de maintenances préventives appliquées aux différents composants du système. Le choix du plan de maintenance prendre en considération les coûts de maintenance de chaque composant, sa fiabilité et sa position et dans le système. Une étude comparative introduite pour évaluer la performance de chaque algorithme. Le résultat obtenu a permis de proposer des recommandations à mettre à la disposition du service de maintenance au sein de l'entreprise d'électricité.

Mots clés : réseaux électriques, maintenance, modélisation, MBF, optimisation, Algorithmes méta-heuristiques

Abstract

Our work aims to optimize the maintenance function associated with electrical networks in the context of reliability centered maintenance (RCM). The approach followed in this thesis begins with the collection of data on the history of the components in order to estimate the parameters of the adopted reliability model and to model the system using modeling methods such as reliability block diagram (BDF), then we use meta-heuristic algorithms to optimize the maintenance cost function which subsequently translates into a preventive maintenance plan applied to the various components of the system. The choice of the maintenance plan takes into consideration the maintenance costs of each component, its reliability and its position in the system. A comparative study introduced to evaluate the performance of each algorithm. The result obtained made it possible to propose recommendations to be made available to the maintenance department within the electricity company.

Keywords: electrical networks, RCM, maintenance, modelization, optimization, Meta-heuristic algorithms

الخلاصة

يهدف عملنا إلى تحسين وظيفة الصيانة المرتبطة بالشبكات الكهربائية في سياق الصيانة القائمة على الموثوقية (MBF). يبدأ النهج المنبع في هذه الأطروحة بجمع البيانات حول تاريخ المكونات من أجل تقدير معلمات نموذج الموثوقية المعتمد ونمذجة النظام باستخدام طرق النمذجة مثل مخطط كتلة الموثوقية (BDF) ، ثم نستخدم الخوارزميات الاستكشافية لتحسين وظيفة تكلفة الصيانة والتي تترجم لاحقاً إلى خطة صيانة وقائية مطبقة على المكونات المختلفة للنظام. يأخذ اختيار خطة الصيانة في الاعتبار تكاليف صيانة كل مكون وموثوقيته وموقعه في النظام. تم تقديم دراسة مقارنة لتقييم أداء كل خوارزمية. أتاحت النتيجة التي تم الحصول عليها اقتراح التوصيات التي سيتم إتاحتها لقسم الصيانة داخل شركة الكهرباء.

الكلمات المفتاحية:

الشبكات الكهربائية، التحسين، النمذجة، الصيانة، الصيانة المرتكزة على الموثوقية، الخوارزميات الاستكشافية.

Introduction générale

Vu les défis techno-économiques, les entreprises manufacturées doivent élaborer des stratégies de gestion solide basée sur des données claires et méthodes scientifiques afin de renforcer sa place compétitive dans un environnement très concurrentiel. L'aspect le plus important de cette stratégie réside peut-être dans le développement d'une politique de maintenance efficace associée aux moyens de production. La complexité croissante des systèmes, la réduction de leurs coûts de conception et d'exploitation, leur utilisation de plus en plus importante dans la vie quotidienne font que la sûreté de fonctionnement est devenue inévitable dans le développement de tout système industriel notamment le réseau électrique en Algérie.

Actuellement, la vie quotidienne s'appuie sur l'énergie électrique qui doit être extrêmement fiable pour garantir aux clients une alimentation continue, stable et disponible.

Ce défi a incité les responsables de l'entreprise à changer leur vision autour de la fonction de maintenance du centre de coûts à centre de profit et d'investir dans ce domaine.

Notre but principal est de déterminer et d'optimiser la politique de maintenance associée aux systèmes électriques et mettre en place un plan de maintenance efficace et moins coûteux. Grâce à sa flexibilité et son efficacité les méta-heuristiques font le bon choix, dans la recherche des solutions optimales qui se résument à des intervalles de temps d'intervention préventive appliqués aux éléments du système électrique.

Les algorithmes méta-heuristiques sont des techniques de recherche stochastique dans l'espace de recherche afin de trouver ou d'approcher à l'optimum global. Son efficacité apparaît dans l'optimisation (minimisation ou maximisation) d'une fonction objectif complexe, multi dimensionnelle permettant l'obtention des résultats d'optimisation satisfaisants dans un temps raisonnable. Les algorithmes méta-heuristiques ont prouvé leur puissance en optimisation dans plusieurs domaines de recherche à savoir la communication, la mécanique, le traitement d'image, l'aérospatiale, le contrôle, ..., ainsi que la maintenance.

Les algorithmes méta-heuristiques sont nombreux, dans ce travail, nous avons utilisé l'algorithme LFA pour trouver la solution optimale. Pour montrer sa performance, il est nécessaire de comparer à d'autres comme PSO et GA, SA.

L'estimation des paramètres du modèle de fiabilité est réalisée par les méthodes d'estimation tels que la méthode des moindres carrés (MC) et la méthode du maximum de vraisemblance (MV).

En outre, et parallèlement avec la modélisation nous étudions les divers coûts de maintenance tels que le coût de maintenance préventive, corrective et de remplacement et estimer le cycle de vie de chaque élément qui se termine par le remplacement.

En fin notre travail est complété par l'optimisation du coût total de maintenance sur un horizon donné dans le but de dresser des recommandations pour guider le service maintenance afin de conserver et bien maintenir le système électrique.

Le travail effectué dans cette thèse est reparti en cinq chapitres distincts, en plus d'une annexe.

Le premier chapitre de cette thèse a pour but de décrire d'une façon générale, la notion de maintenance industrielle à savoir ces différentes formes, la politique de gestion et qu'elles sont les outils informatiques utilisés pour la gérer afin de maintenir les entreprises manufacturées puis les différentes définitions de la sûreté de fonctionnement et les différentes phases utilisées pour son implantation.

Le second chapitre présente quelques approches utilisées pour la modélisation de la maintenance et l'estimation de la fiabilité dont le but de l'insérer dans notre recherche.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des techniques d'optimisation par les algorithmes méta-heuristique où certains d'entre eux sont inspirés de la nature, comme le processus génétique ou le mouvement des oiseaux et des insectes lors de la recherche de nourriture, et d'autres de l'industrie comme le traitement thermique des métaux.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de la sûreté de fonctionnement et la notion de risque des réseaux électriques en détaillant ces phases chronologiques pour la réaliser et la façon dont on peut la simuler par l'utilisation d'un outil de simulation. Puis on termine ce chapitre par des exemples d'applications de modélisation et de simulation.

Le dernier chapitre est consacré à la validation de notre contribution dans l'optimisation de la maintenance des réseaux de distribution d'électricité. Une comparaison a été introduite pour évaluer la performance des algorithmes indiqués au troisième chapitre et particulièrement à celle basée sur le vol de Lévy.

Et en fin, nous terminons par une conclusion générale et les perspectives.

Chapitre 1

Généralité sur la maintenance et la sureté de fonctionnement

1.1. Introduction

Depuis le début de l'ère industrielle, la fonction maintenance n'a cessé de se structurer et de se développer. D'un simple entretien où l'on attendait la panne pour agir, elle s'est transformée en un facteur important de qualité, de sécurité, de respect des délais et de productivité voire de compétitivité d'une entreprise évoluée [01-04]. Par ailleurs, il faut constater que la maintenance a connu tout au long de cette évolution d'important développement dont l'objectif est de la rendre aussi bien optimale qu'efficace. Dans ce contexte, on peut citer : la maintenance préventive systématique, la maintenance préventive conditionnelle, la maintenance prédictive, la maintenance intégrée à la conception, le coût global de cycle de vie, la totale productive maintenance, la maintenance basée sur la fiabilité, la maintenance assistée par ordinateur, les systèmes experts d'aide au diagnostic, ou encore l'audit de la maintenance, etc. La maintenance a longtemps joué un rôle curatif dont l'unique objectif était de réduire la durée d'immobilisation des machines. Cette maintenance curative était axée sur le court terme et ne résolvait en rien les problèmes liés aux dégradations inévitables [05, 06, 08].

La concurrence effrénée et la course à la compétitivité incitent l'entreprise de rechercher la qualité totale et surtout la réduction des coûts. La maintenance est ainsi devenue l'une des fonctions stratégiques de l'entreprise. Elle vise donc moins à remettre en état l'outil de travail qu'à anticiper ses dysfonctionnements. L'arrêt ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le non-respect des délais qui s'en suivent, engendrent des surcoûts que les entreprises ne sont plus en état de supporter. L'entreprise ne doit plus subir les événements, elle doit les prévoir et analyser leurs effets sur le long terme. Autrefois curative, la maintenance devient préventive et contribue à améliorer la fiabilité des équipements et la qualité des produits. Cette maintenance préventive se traduit par la définition de plans d'actions et d'interventions sur l'équipement, par le remplacement de certaines pièces en voie de dégradation afin d'en limiter l'usure, par le graissage ou le nettoyage régulier de certains ensembles [05, 07, 08, 09]. Ces actions préventives étaient dans un premier temps effectuées de façon systématique selon des calendriers prédéfinis. Elles permettaient d'anticiper les pannes, mais au prix d'un alourdissement importants des coûts de maintenance. Grâce à l'évolution des méthodes de diagnostic et de contrôle, une nouvelle maintenance commence à voir le jour. Elle utilise des techniques de prévisions de pannes comme l'analyse des vibrations ou des huiles. Cette maintenance dite " *préventive*

conditionnelle " permet de remplacer des pièces juste avant leur rupture. Le choix entre les différents aspects de la maintenance se fait principalement au regard des coûts économiques, mais aussi des aptitudes et compétences du personnel de maintenance, et de la position concurrentielle sur le marché.

La mise en place ou l'amélioration d'un système d'entretien préventif et prédictif doit être vue comme un effort visant à augmenter la disponibilité et la fiabilité des équipements de procédé par la prévention et la détection des problèmes et par le remplacement des composantes avant les arrêts imprévus d'équipement. La maintenance prédictive est tout d'abord un outil de gestion. Elle fournit des données sur la condition d'un équipement. On utilise ces données par la suite pour déterminer si des activités de maintenance corrective sont requises sur l'équipement. La maintenance prédictive est privilégiée parce que, si bien utilisée, elle peut réduire de façon significative les coûts du programme de maintenance préventive [04, 09,10].

La sûreté de fonctionnement est définie comme « *la propriété d'un système qui permet de placer une confiance justifiée dans le service qu'il délivre* ». D'autre part la sûreté de fonctionnement est « *un ensemble d'aptitudes nécessaires à un bien à être disponible aux différents moments de son cycle de vie, en offrant les performances requises, soit : fiabilité (ou probabilité pour que le bien accomplisse sa fonction), maintenabilité (ou aptitude à être maintenu), sécurité pour les biens eux-mêmes, le personnel et leur environnement)* » [11]. Ainsi, La maintenance apporte une contribution essentielle à la sûreté de fonctionnement d'un bien.

Notre objectif dans ce chapitre est de définir ce que sont une fonction et un service de maintenance et le rôle qui doit jouer cette maintenance dans la sûreté de fonctionnement pour pouvoir proposer ce service ou cet ensemble de services à travers une plateforme de maintenance optimisée.

1.2. La maintenance

Le rôle principal d'un service maintenance est de maintenir les capacités opérationnelles des moyens de production, ainsi que leur valeur patrimoniale. Les capacités opérationnelles sont nécessaires pour servir une commande lorsque le client l'exige, et non quand l'entreprise pourra la servir. La valeur patrimoniale peut s'envisager comme l'allongement de la durée de vie utile des machines et équipements, ce qui repousse ou annule la nécessité d'un nouvel investissement, où en facilite la revente.

Formulé ainsi, il apparaît évident que ce rôle ne peut s'envisager que de manière dynamique et proactive [07].

Si l'on attend une panne pour réagir, la capacité opérationnelle n'est plus maintenue.

Si l'on attend une dégradation pour réagir, la valeur patrimoniale est déjà amoindrie.

Selon la définition de l'AFNOR [106], la maintenance vise à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé. Elle est définie comme étant « *l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié, ou en mesure d'assurer un service déterminé* ».

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

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

1.2.1. Les différentes formes de maintenance

On distingue différents types de maintenance appelée parfois stratégies de maintenance résumées dans la figure 1.1. [05, 06, 08, 09, 10, 11, 13, 14, 15]

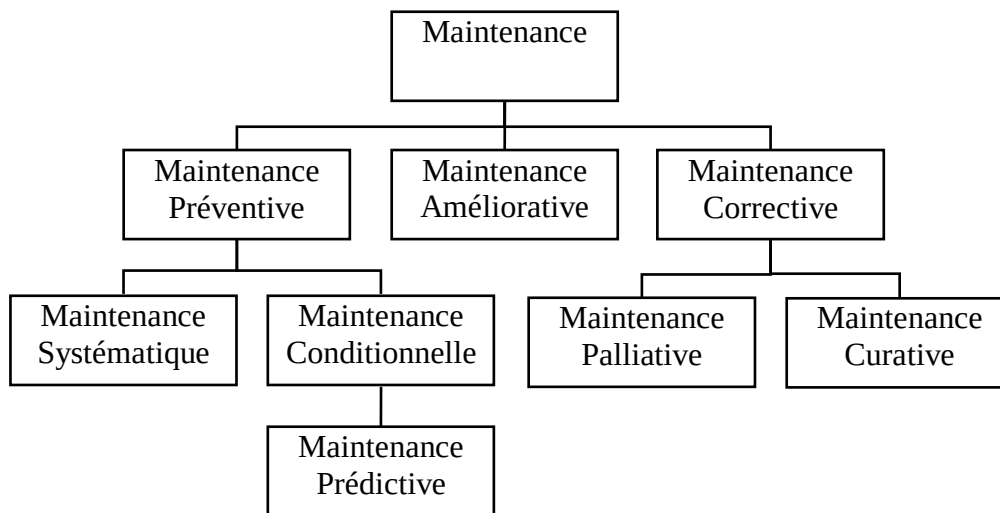


Fig. 1.1. Les types de maintenance

1.2.1.1. Maintenance corrective

Maintenance exécutée après détection d'une panne. Destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Elle s'exécute sous deux formes :

a- Maintenance curative

C'est une forme d'entretien visant à rétablir l'opération normale d'un objet, en réparant les composants qui font défaut soit par : bris, panne, etc. C'est un cas particulier de réparation. Les signalements en service génèrent de l'entretien et la remise en état

déclenché par une panne. Elle s'effectue après une défaillance par dépannage ou réparation.

b- Maintenance palliative

Maintenance exécutée d'une manière provisoire après détection d'une panne (*dépannage provisoire en attendant*) ;

c- Avantages et inconvénients de la maintenance corrective

Avantages :

- faible coût de maintenance.

Inconvénients :

- bris intempestif ;
- coût de réparation important ;
- peu de sécurité des travailleurs ;
- stockage important des pièces ;
- temps de réparation élevé ;
- perte de production élevée.

1.2.1.2. Maintenance préventive

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance du fonctionnement d'un bien. Elle s'exécute sous deux formes :

a- Maintenance systématique

Entretien programmé selon une périodicité définie sur instruction du constructeur, en fonction de la durée de vie statistique des pièces d'usure et de la fiabilité d'exploitation théorique recherchée afin d'en réduire le coût.

a-1 Avantages et inconvénients de la maintenance préventive systématique

Avantages :

- réduction des coûts (30 %) et des durées de maintenance par rapport à l'entretien curatif ;
- bonne planification des opérations et des ressources ;
- contrôle du niveau de stockage des pièces de rechange ;
- généralement, peu de catastrophes ;
- sécurité accrue.

Inconvénients :

- révisions non nécessaires (*l'entretien n'est pas fonction de l'état de la machine, mais plutôt de la durée d'utilisation*) ;
- emplacement de pièces en bon état ;
- création de défauts lors du remontage (*si les procédures ne sont pas claires et contrôlées*).

b- Maintenance conditionnelle

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent.

b-1 Maintenance prédictive

C'est un entretien programmé suite à l'évolution d'indicateurs de surveillance en établissant un référentiel lors de la première mise en service de l'équipement à l'état neuf (*Relevés des paramètres de fonctionnement, réalisation d'essais électriques, analyses des huiles diélectriques et chromatographiques des gaz dissous dans l'huile, contrôles thermographiques et mise en œuvre des signatures vibratoire et acoustique*), diagnostic de l'état de l'équipement.

Dans cette forme de maintenance, on prévoit les dates d'intervention sûre (*avant la panne*) pour la mise en place des solutions techniques visant à éliminer des problèmes; et à améliorer le rendement de l'entreprise industrielle.

b-2 Avantages et inconvénients de la maintenance préventive conditionnelle

Avantages :

- amélioration de la sécurité.
- prolongation de la vie des équipements ;
- diminution des arrêts et augmentation de la production ;
- diminution du nombre de travaux urgents et augmentation du nombre de travaux planifiés ;
- meilleure utilisation de la main d'œuvre ;
- contrôles des pièces de rechange ;
- réduction des coûts (*30% par an*) ;
- amélioration de la fiabilité.

Inconvénients :

- nécessite une équipe de maintenance formée en analyse vibratoire et en essais non destructifs. Niveau technologique plus élevé.

1.2.1.3. Maintenance améliorative

La maintenance améliorative a pour but d'optimiser le rendement des équipements industriels par la maîtrise totale des performances. Les activités conduites dans ce cadre permettent d'anticiper les défaillances et les incidents et de réduire les temps techniques de réparation. Elles amènent aussi à des modifications permettant d'améliorer la sécurité des biens et des personnes. (*Optimiser les coûts liés à la maintenance*) [09].

1.2.2. Niveaux de la maintenance

Les interventions de maintenance peuvent être classées par ordre croissant de complexité, elles sont appliquées au sein des entreprises suivant cinq niveaux selon le tableau 1.1 suivant :

Tab. 1.1. Les niveaux de la maintenance

Niveaux	Personnel d'intervention	Moyens	Intervention
1 ^{er}	Exploitant sur place	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation.	Régler simple prévu par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun montage d'équipement ou échange d'équipements accessibles en toute sécurité.
2 ^{eme}	Technicien habilité sur place.	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation, plus pièces de rechange trouvées à proximité, sans délai.	Dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet ou d'opérations mineures de maintenance préventive.
3 ^{eme}	Technicien spécialisé, sur place ou en local de maintenance.	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, contrôle, etc.	Identification et diagnostic de pannes, réparation par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures.
4 ^{eme}	Équipe encadrée par un technicien spécialisé, en atelier central	Outillage général plus spécialisé, matériel d'essai, de contrôle, etc.	Travaux importants de maintenance corrective ou préventive
5 ^{eme}	Équipe complète, polyvalente en atelier central	Moyens proches de la fabrication par le constructeur.	Travaux de rénovation, de reconstruction ou réparations importantes confiées à un atelier central

1.2.3. Les métiers de la maintenance

Le domaine de la maintenance ne se développe jamais s'il n'existe pas de personnel qui prend en charge cette immense discipline dont l'objectif est d'investir ces compétences pour garantir la sauvegarde de l'entreprise.

En effet, les métiers de la maintenance industrielle se transforment, se spécialisent et sont confrontés à des évolutions technologiques permanentes. Dans un contexte de recherche d'efficacité globale du système de production, le développement des compétences des techniciens de maintenance représente un enjeu important pour les entreprises manufacturées. Dans les années qui viennent, il s'agira également de répondre aux difficultés que rencontrent les entreprises pour recruter des profils adaptés.

Les différents profils de métiers de maintenance peuvent être résumés dans le tableau 1.2 [13, 15]

Tab. 1.2. Métiers de la maintenance

Dénomination	Rôle	Formation
L'agent de maintenance	Maintenance curative (<i>problème de dysfonctionnement imprévisible / identifier des défaillances</i>) Préventive (<i>assurer le contrôle et le changement des pièces, actions programmées</i>) Consignation (suivi des méthodes)	Doit acquérir des compétences dans tous les domaines technologiques, relationnelles et organisationnelles.
Le technicien d'intervention	Maintenance prédictive (<i>mise en place de solutions techniques visant à éliminer des problèmes et à améliorer le rendement</i>) Analyse de la fiabilité "gammes opératoires"	- Doit acquérir des performances de plus en plus pointues - Participe à la
Ingénieur généraliste où technicien de méthode	Améliorer les modalités d'intervention (<i>optimisation du coût</i>) Cahier des charges	formation des techniciens non qualifiés

1.2.4. Les objectifs de la maintenance

Tous les programmes de maintenance s'appuient sur la concrétisation des objectifs tracés et prédéterminés avant.

Ces objectifs sont doubles : réduire les dépenses de maintenance et diminuer les capitaux fixés.

Le premier objectif de la maintenance concerne :

- les dépenses du personnel interne : salaires, charges patronales, frais liés à la formation,... Elles dépendent du métier et du niveau hiérarchique mais ces coûts doivent être majorés de la perte de temps occasionnée par l'opération de maintenance (*préparation, coordination, ...*). La distinction entre les activités à valeur ajoutée et celles à non-valeur ajoutée permet de définir des axes d'amélioration au cours de réunion avec les différents métiers concernés ;
- l'analyse de compression de temps de cycle concerne plus particulièrement les causes de non-valeur ajoutées durant l'intervention: en effet, ces dernières empêchent le redémarrage de la production sans améliorer l'installation. L'organisation des tâches de maintenance en parallèle permet de réduire la durée de l'intervention et la complexité des corps de métiers impose une planification plus efficace pour ce qui ne touche pas à la maintenance curative ;
- la consommation de fournitures industrielles : les pièces de rechanges, Il faut définir et prendre les mesures nécessaires pour réduire l'usure de ces pièces (*Type de fonctionnement,...*) ;
- la vérification du respect des conditions de stockage ;
- la limitation du nombre de fournisseurs ;

Le second objectif de la maintenance vise à :

- diminuer des stocks de fournitures industrielles ;
- garder les pièces nécessaires au bon fonctionnement de l'outil industriel, tout en minimisant la valeur ainsi immobiliser ;
- reporter des investissements ;
- améliorer la maintenance et la fiabilité de l'outil de production avant d'investir dans de nouvelles installations [06].

1.2.5. Choix de politique de maintenance d'un système

Tous les équipements d'un système sont soumis à des mécanismes de dégradation dus aux conditions de fonctionnement et/ou d'environnement tels que les usures, fatigue, vieillissement, détériorations physico-chimiques diverses. Que recouvre le terme (*Politique de maintenance d'un système*) ! L'intérêt économique d'une telle définition s'impose à tous les partenaires de la fonction maintenance, de comprendre parfaitement les différentes étapes de la démarche de choix d'une politique de maintenance d'un matériel permettant de pointer à un coût global de maintenance minimal de leur matériel. [15, 16, 17, 18] Définir la politique de maintenance d'un système consiste à décider de façon volontaire de:

- Quelle méthode de maintenance à mettre en œuvre ? Préventive ou corrective ? Quel niveau de maintenance préventive ? Quelle forme de maintenance préventive ? Et à quelle périodicité doit-on intervenir ?

- Quels sont les moyens économiquement rentables pour minimiser les coûts de défaillance de la maintenance curative ?

- Comment introduire une politique de maintenance efficace ?

Une politique de maintenance permet de couvrir en même temps les différents aspects qui sont :

- accroître la disponibilité des équipements ;
- réduire les coûts de maintenance ;
- augmenter la productivité du personnel de maintenance ;
- réduire les stocks liés à la maintenance ;
- améliorer l'efficacité de l'ordonnancement ;
- définir une politique d'approvisionnement ;
- définir les conditions de renouvellement ou d'investissement ;
- définir une politique de recours à des entreprises extérieures ;
- choisir la méthode de maintenance la mieux adaptée à un système donné.

A cet effet, toute intervention de maintenance a besoin d'être pensée avant d'être réalisée, l'entité maintenance doit impérativement solliciter une organisation des moyens à mettre en œuvre pour la réussite de ses tâches afin de pratiquer harmonieusement les différents types d'entretien des équipements.

Dans l'organigramme de la figure 1.2, nous présentons la manière dont on peut adapter le type de maintenance pour entretenir un système.

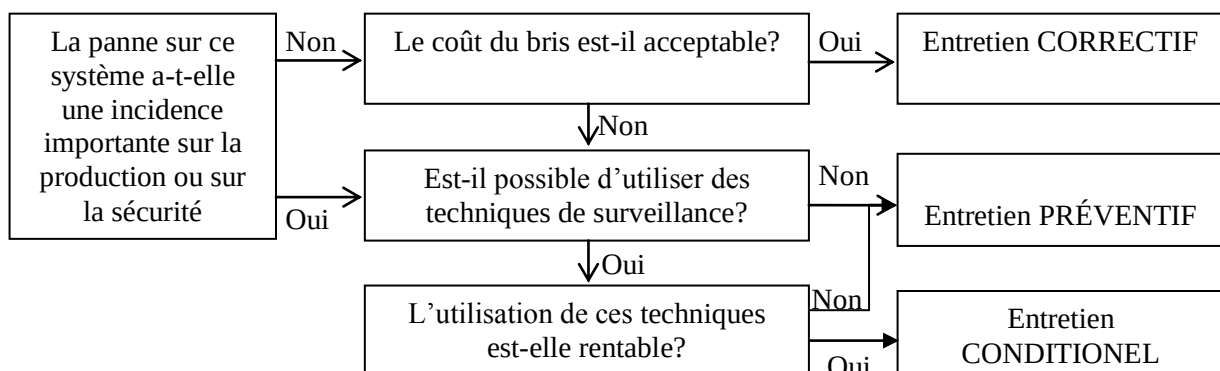


Fig. 1.2. Organigramme du choix de la méthode d'entretien

1.2.6. Position du service maintenance au sein de l'entreprise

La relation entre le service maintenance et les autres services est bien estimée. Elle est centrée au sein de l'entreprise. Dans la figure 1.3, nous présentons la position du service maintenance dans une entreprise industrielle.

Pour analyser le système de maintenance, nous allons étudier le contenu de la fonction maintenance (figure 1.3) présentée dans [19] comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : - les activités relatives à ses aspects techniques,

- les activités relatives à la gestion et à l'organisation de la maintenance.

Le champ à dominante technique représente les tâches industrielles primaires d'entretien et souvent englobées dans la supervision notamment quand il s'agit de traiter des systèmes complexes tels que des centrales nucléaires [20]. Le champ des activités à dominante gestionnelle représente les tâches de gestion du parc d'équipements, les ressources humaines et matérielles, la documentation et l'organisation des activités correspondantes. Dans l'analyse du système de maintenance nous nous intéressons à l'échange d'informations.

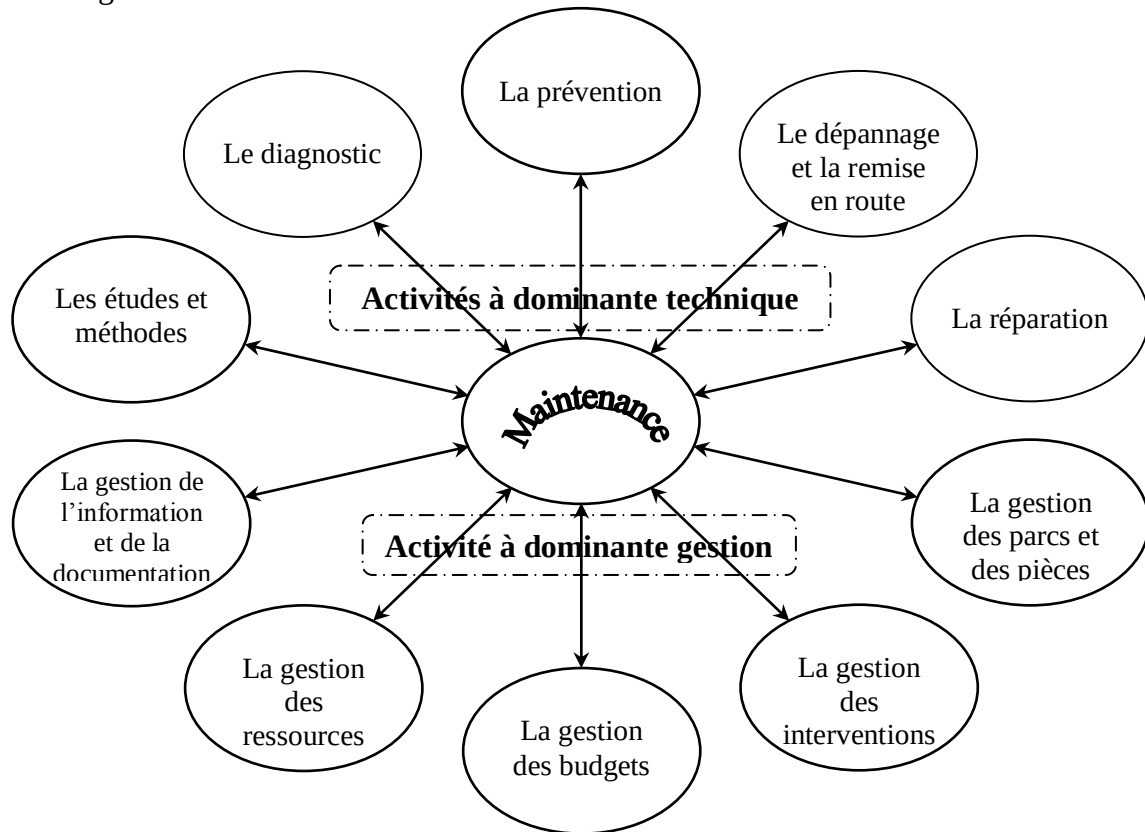


Fig. 1.3. Positionnement du service maintenance dans l'entreprise

1.2.7. Les Outils de Gestion Standards du service maintenance

La maintenance se repose sur 11 outils standards de gestion afin de rendre le service maintenance efficace dans une entreprise industrielle, qui sont: [04, 05, 07, 08, 09, 21]

a. La maîtrise de la documentation

Le service maintenance a besoins d'un fond documentaire puissant pour lui permettre de gérer la documentation, d'assurer la qualité et de classer le matériel.

b. Le bon de travail

C'est la demande que fait l'opération pour un équipement donné. C'est un moyen très simple de communication qui contient les informations requises pour la maintenance :

- identification de l'équipement et sa localisation ;
- problème ou trouble rencontré / catégorie de panne ;
- le nom du demandeur ;
- le département de maintenance concerné et le payant ;
- le métier requis pour l'intervention ;
- la priorité de l'intervention ;
- les dates importantes ;
- peut être utilisé pour gérer les demandes (*planification*).

c. Dossier technique d'équipement

La conduite des activités de maintenance demande un accès à des données techniques et de l'information sur l'historique. Le dossier d'équipement est un document dans lequel sont consignées toutes les données techniques relatives à un équipement.

d. Évaluation du besoin en main d'œuvre

L'exécution du travail sur le terrain et l'évaluation juste des besoins en ressources humaines nécessitent :

- des compétences spécifiques à la tâche ;
- une meilleure expertise disponible rapidement ;
- des besoins en main d'œuvre ;
- un nombre d'employé qui dépend de la taille de l'organisation et par équipement à gérer ;
- une banque d'heures « *Backlog* » est un bon indice pour évaluer la charge ou l'accumulation de travail ;
- un historique des travaux et des documentations technique.

e. Formation

Les nouveaux contextes technologiques en entreprise et la complexité actuelle des équipements (*Intégration de l'informatique et automatisation*), imposent une formation continue de personnel du service maintenance.

f. La gestion du temps

La connaissance des temps passés (*historique*) et l'évaluation des temps à venir sont des incontournables en gestion de la maintenance. La gestion du temps intervient à tout les niveaux notamment la préparation, les ordonnancements (*programmation*) les interventions et les bureaux du planificateur et superviseur.

g. Pièces de rechange

La gestion de la *PDR* est très nécessaire pour le service maintenance. Elle permet de classer le matériel, commander les achats et réceptionner le matériel.

h. Gestion des Garanties

Les équipements et matériaux en milieux industriels sont onéreux et souvent utilisés de façon « *intensive* ». C'est pourquoi les garanties offertes par les manufacturiers doivent bien suivies car les « *mauvais achats* » sont des choses courantes. Les types de garanties sont les performances, la longévité et le service après vente.

i. Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur

L'outil informatique sert à la maîtrise technique, administrative et budgétaire (*coûts*) de la maintenance: gestion des stocks, budget prévisionnel. Ce logiciel doit être choisi en fonction d'un cahier des charges très précis reflétant les attentes et les besoins de l'entreprise. [22, 25]

Le service maintenance implique les opérateurs de maintenance pour renseigner une base de données enregistrant tous les problèmes survenus dans l'installation, leur durée et leurs causes. La gestion de la maintenance par la *GMAO* s'appui sur 7 concepts :

- | | |
|------------------------------|-------------------------|
| 1. Suivi des équipements. | 2. Gestion des travaux. |
| 2. Gestion des intervenants. | 3. Gestion budgétaire. |
| 3. Analyse. | 4. Gestion des achats. |
| | 5. Gestion des stocks. |

1.2.8. Processus de gestion de la maintenance

Le cadre de référence du système de gestion de la maintenance que nous présentons dans la figure I.4 comporte quatre étapes aussi importantes les unes que les autres :

La première étape concerne la réception du matériel et la documentation.

La deuxième est relative au choix du type de maintenance à effectuer en fonction des paramètres choisis (*préventive conditionnelle, systématique, corrective ou améliorative*).

Dans la troisième étape nous précisons les étapes du processus de maintenance telles que la planification des interventions et les procédures de détection des défaillances.

La dernière étape concerne la réalisation et le suivi de l'opération de la maintenance.

[07, 23, 24]

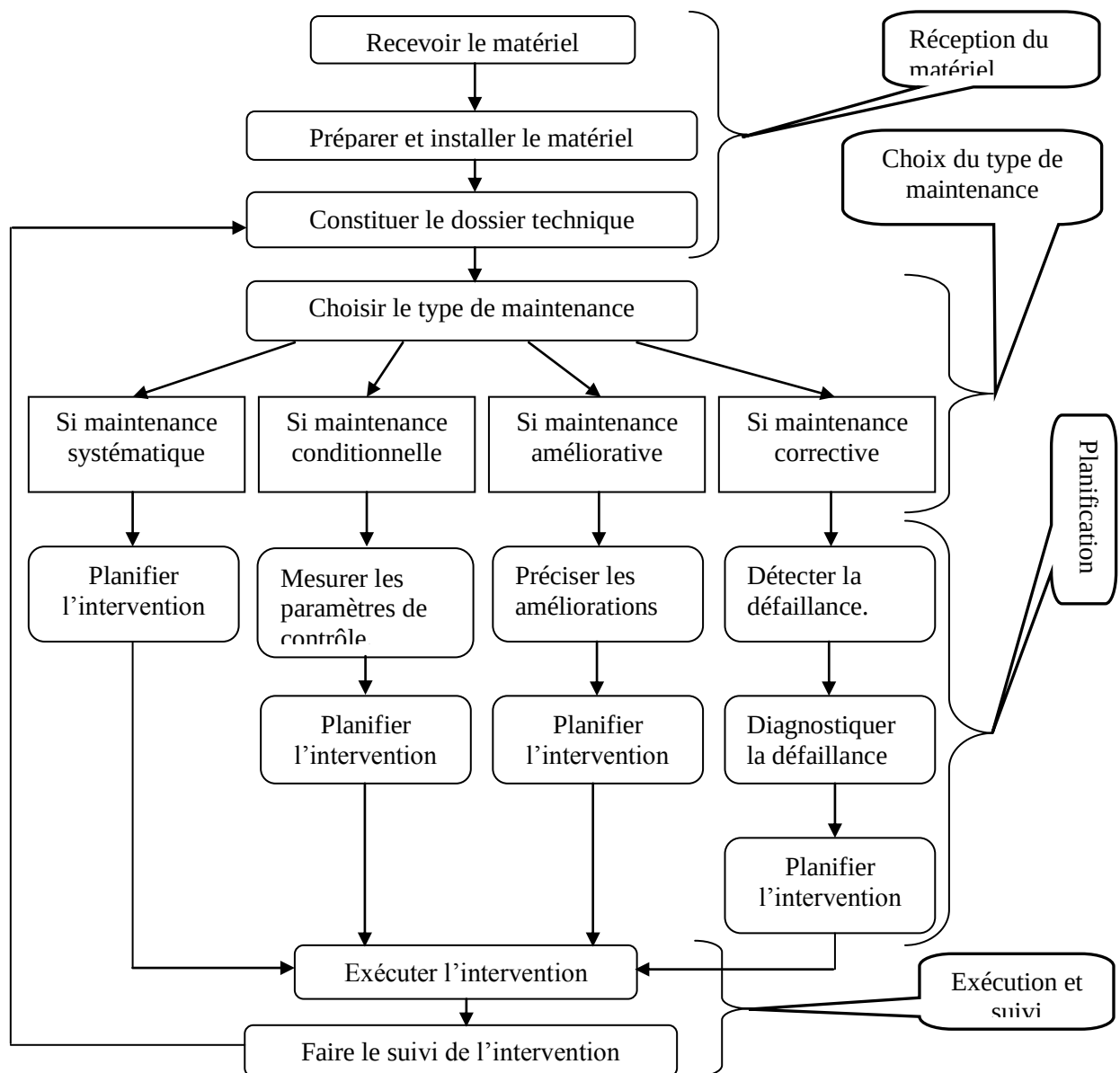


Fig. 1.4. Système de gestion de maintenance [07]

Ce processus de maintenance est présenté comme une suite logique et récurrente d'opérations techniques et gestionnaires, décrite dans la figure 1.5, et valide pour tout type de maintenance. [27]

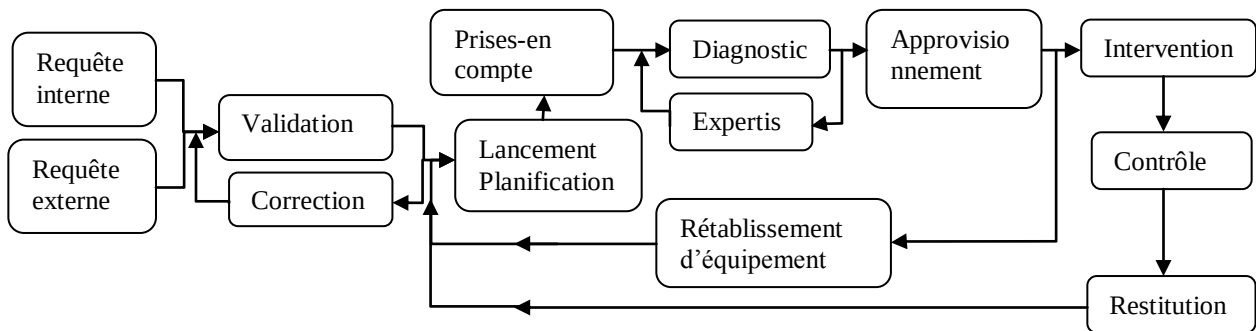


Fig. 1.5. Processus général de maintenance

Cet enchaînement d'activités sera plus détaillé dans le tableau 1.3 où les quatre types de maintenance, à savoir la maintenance corrective, préventive, proactive et enfin la maintenance améliorative sont prises en compte.

Tab. 1.3. Le processus de la maintenance selon les quatre types de maintenance

Type de maintenance	Corrective	Préventive	Proactive	Améliorative
Demande	Client	Client	Client	Client
Déclenchement	Requête Interne Requête externe	Requête Interne	Requête des capteurs	
Préparation		✓	✓	✓
Validation et correction	✓	✓	✓	✓
Lancement planification	✓	✓	✓	✓
Ordonnancement		✓	✓	✓
Prise en compte	✓	✓	✓	✓
Diagnostic Expertise	✓		✓	
Approvisionnement	✓		✓	✓
Intervention	✓	✓	✓	✓
Contrôle et restitution d'équipement	✓	✓	✓	✓

1.2.9. La sous-traitance

La sous-traitance offre à l'entreprise la possibilité de maîtriser les coûts tout en bénéficiant des services d'un prestataire spécialisé, qui lui donnera accès aux dernières innovations technologiques. Plusieurs facteurs expliquent ce développement de la sous-traitance voir tableau 1.4.

D'un point de vue organisationnel, les entreprises ont tendance à se recentrer sur leur fonction principale, et à déléguer ce qui ne relève pas de leur métier.

L'externalisation minimise les coûts de la maintenance : l'entreprise paye au " service " et n'a donc pas à supporter le coût lié à la présence permanente d'un service maintenance très important. La sous-traitance offre à l'entreprise la

possibilité de maîtriser les coûts tout en bénéficiant des services d'un prestataire spécialisé, qui lui donnera accès aux dernières innovations technologiques. Le personnel de maintenance doit participer à l'établissement des budgets techniques prévisionnels de l'activité de maintenance (*charges et investissements*), chiffrer une intervention de maintenance, négocier des prix, faire des appels d'offres, mettre en œuvre un suivi comptable et avoir une démarche active participant à la réduction des coûts de l'entreprise. [06, 07]

Tab. 1.4. La sous-traitance: raisons et limites

Aspects	Raisons	limites
Technique	Gage de qualité technique, au fait de l'innovation	Perte de savoirs (<i>évolution des technologies</i>), tributaire du sous-traitant, forte dépendance.
Financier	Maîtrise voire minimisation des coûts (<i>suppression de la présence permanente d'une équipe</i>)	Manque d'appréciation des interventions de maintenance et de leurs coûts
Stratégique	Recentrage de l'entreprise sur sa fonction principale	Problèmes si: - connaissance approximative de l'entreprise (<i>solution mal adaptée</i>) - mauvaise "santé" du sous-traitant (<i>suivi obligatoire</i>)

1.2.10. Différents systèmes informatiques en maintenance

Le développement des systèmes informatiques dans le domaine de la maintenance industrielle a commencé lorsque la maintenance a été reconnue comme fonction fondamentale dans l'entreprise et un accent particulier a été mis sur l'étude approfondie et le développement des procédures de cette fonction. [26, 27]

1.2.10.1. Informatisation des procédures de maintenance

L'informatisation et l'automatisation de la gestion des entreprises a permis d'informatiser plusieurs procédures de maintenance. Des fichiers informatiques des équipements, des interventions, des stocks, des plans et schémas etc. ont ainsi été créés. L'intégration de ces fichiers et l'automatisation des activités de la maintenance ont été possibles grâce aux progiciels de GMAO (*Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur*). Les événements quotidiens de la maintenance ont été traités : la panne, l'exécution du préventif, la gestion des stocks. Interfaçage avec des progiciels

1.2.10.2. Evolution du domaine technique

L'informatique a aussi progressé dans le domaine technique de la maintenance. Les techniques modernes d'analyse de maintenance et de contrôle ont vu le jour parallèlement à l'informatique: analyse vibratoire, analyse d'huile, thermographie *IR*, ultrasons à chaud, etc. Parmi ces systèmes on peut distinguer deux grands groupes : les systèmes d'analyse *TMAO* (*techniques de maintenance assistées par ordinateur*) et les systèmes d'acquisition et de contrôle *SCADA* (*système de contrôle et d'acquisition des données*)

1.2.10.3. Intégration de modules intelligents en architectures de maintenance

La présence de ces différents modules intelligents de maintenance nous amène à les faire communiquer et collaborer entre eux comme indique la figure. 1.6.

Cette construction de modules ou briques intelligentes doit concourir à donner des indicateurs pour prendre la bonne décision en matière de stratégie et de politique de maintenance.

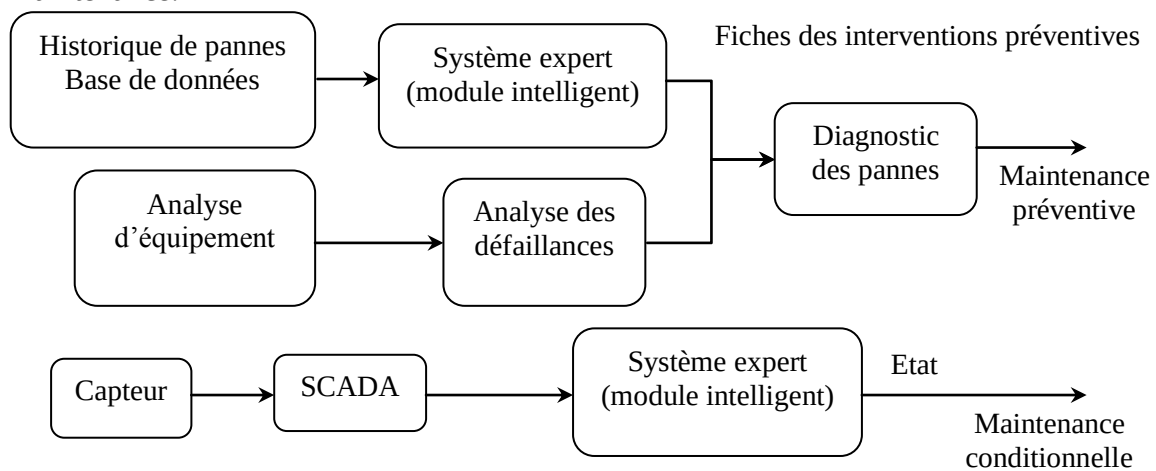


Fig. 1.6. Coopération des différents systèmes informatiques

1.2.10.4. Développement des NTIC

Le développement de nouvelles technologies de l'information et des communications (*NTIC*), l'extension d'Internet dans l'entreprise, l'intégration des applications, l'émergence de nouvelles politiques de maintenance (*RCM*, *RCAM*, *TPM*, *MCO*, etc.) indiquent une nouvelle période pour l'informatisation de la maintenance, celle que certains appellent la « *maintenance intelligente* ».

1.3. Sûreté de Fonctionnement

Le but de la sûreté de fonctionnement (*SdF*) est d'évaluer les risques potentiels, prévoir l'occurrence des défaillances et tenter de minimiser les conséquences des situations catastrophiques lorsqu'elles se présentent.

Partant de ces premières approches probabilistes, diverses méthodes ont été mise au point afin d'analyser les risques potentiel d'un système, de recenser les éventuelles séquences d'événements qui mènent à une défaillance d'un système et de quantifier sa

performance en terme de fiabilité. Les études de sûreté ont pris un grand essor à partir des années 60 et 70. La sûreté de fonctionnement c'est ainsi développée comme une discipline multi outils. [28]

- Méthodes d'analyse des risques.
- Méthodes de calculs prévisionnelles de la sûreté de fonctionnement des systèmes.
- Outils logiciels dédiés à la sûreté.
- Constitutions de bases de données statistiques sur la fiabilité des composants.

1.3.1. Définitions de base de la sûreté de fonctionnement

Dans cette partie nous allons introduire les concepts et les définitions de base du processus de sûreté de fonctionnement suivant les normes [106]. Ce processus d'étude de sûreté de fonctionnement, souvent appelé étude *FDMS*, est accés autour de quatre points principaux d'étude :

- **l'étude de la fiabilité**, qui est « *une aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné* ». Elle permet de déterminer au système/équipement concerné, une durée de fonctionnement garantie avant l'apparition d'une défaillance (*MTTF*). Cette durée de fonctionnement doit être la plus proche possible de la réalité. La fiabilité est déterminée de façon prévisionnelle, et s'appuie le plus souvent sur des valeurs issues du retour d'expérience *REX*,
- **L'étude de la disponibilité**, qui est « *une aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée* ». Elle permet de déterminer, en fonction des résultats de fiabilité, la qualité du service rendu par le système/équipement,
- **L'étude de la maintenabilité**, qui est « *dans des conditions données d'utilisation, une aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits* ». . Elle permet de déterminer la capacité du système à être remis en état de fonctionnement,
- **L'étude de la sécurité**, qui est « *un ensemble des propriétés qui décrivent la disponibilité et les facteurs qui la conditionnent : fiabilité, maintenabilité, et logistique de maintenance* ». Elle permet de définir l'aptitude d'un système/équipement à garantir, tout au long de sa durée d'exploitation, une fréquence constante d'apparition d'un événement identifié comme redouté, c'est-à-dire un évènement qui pourrait causer la blessure voir même la mort d'une ou plusieurs personnes.

1.3.2. Analyses de sûreté de fonctionnement

Les analyses de sûreté de fonctionnement (*SdF*) d'un système permettent de garantir l'adéquation des caractéristiques techniques et fonctionnelles d'un système et son utilisation prévue et ce au moindre coût. Ceci se fait par la mise en place d'un processus intégré aux phases du cycle de vie du produit. La figure 1.7 présente les étapes principales d'analyse de *SdF*. [29]

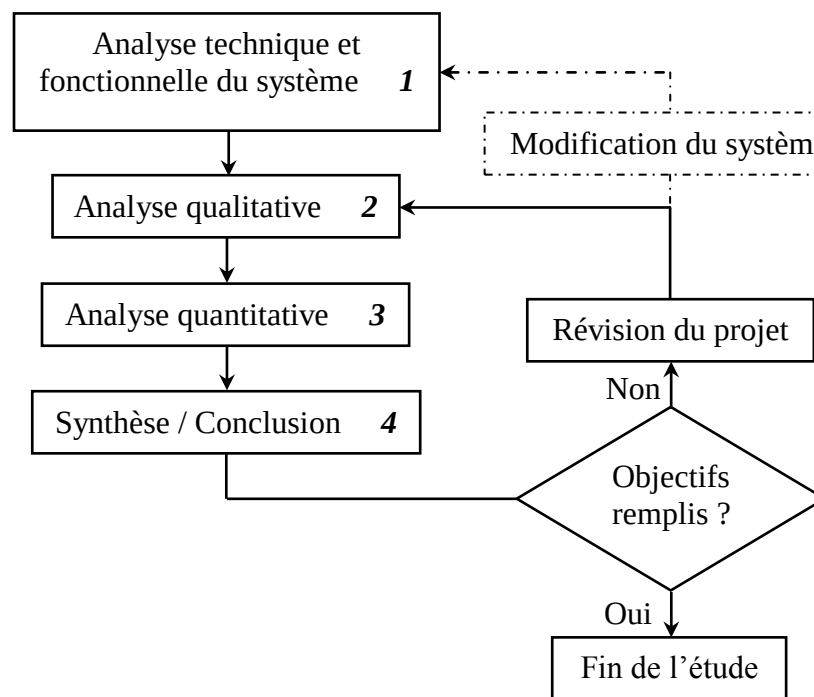


Fig. 1.7. Les étapes principales d'analyse de *SdF*

1.3.2.1. Analyse technique et fonctionnelle

Dans cette analyse on doit définir le système étudié, son environnement et ses limites extérieures afin d'analyser ses caractéristiques techniques et fonctionnelles.

1.3.2.2. Analyse qualitative

Après le fixage et la définition des objectifs globales de l'analyse de sûreté de fonctionnement du système en le décomposant par l'utilisation d'une méthode d'analyse qualitative et en se basant sur :

- la définition des limites de résolution de l'analyse du système (*A quel niveau de détail faut-il descendre?*)
- les méthodes d'analyse prévisionnelle de la *SdF* (*choix d'une ou plusieurs méthodes*)

1.3.2.3. Analyse quantitative

Dans cette analyse on doit réaliser :

- une évaluation d'une mesure de la sûreté de fonctionnement (*étude probabiliste*)

- une étude de la sensibilité (*marges d'incertitude relatives aux données et aux hypothèses*)

1.3.2.4 Amélioration techniques

Dans la synthèse on doit prévoir l'amélioration de la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité, et la sécurité.

Si les objectifs fixés sont atteints, alors l'étude est finit si non on doit passer à nouveau par une révision du projet.

1.3.3. L'arbre de la sûreté de fonctionnement

La décomposition systématique des concepts de la sûreté de fonctionnement comporte trois parties : attributs, moyens et entraves par lesquelles la sûreté est atteinte [30, 31, 32] Cette décomposition est schématisée par l'arbre de la figure 1.8.

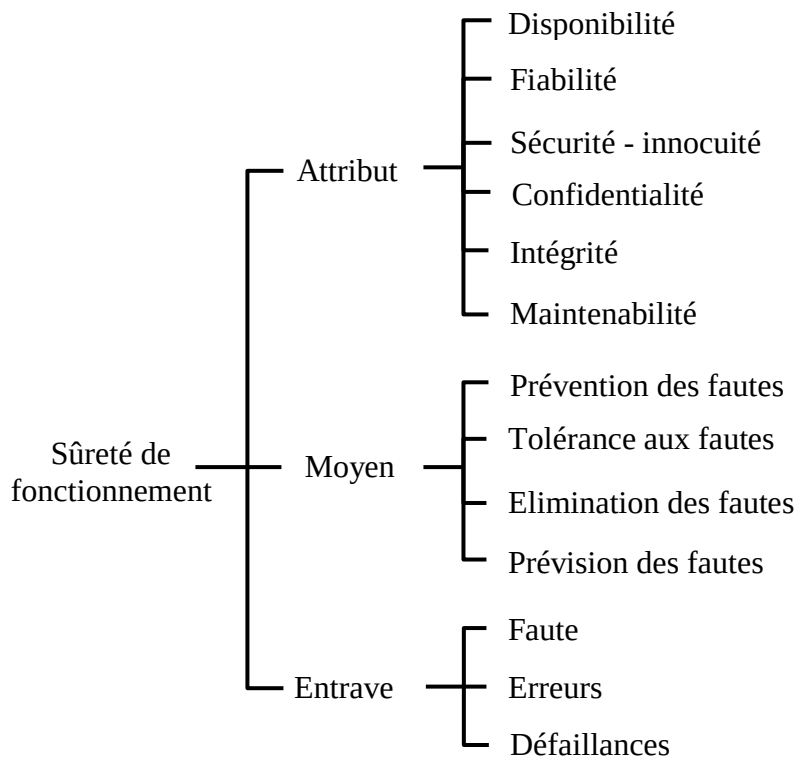


Fig. 1.8. L'arbre de la sûreté de fonctionnement

1.3.3.1. Attributs de la sûreté de fonctionnement

Selon la ou les applications auxquelles le système est destiné, l'accent peut être mis sur différentes facettes de la sûreté de fonctionnement, ce qui revient à dire que la sûreté de fonctionnement peut être vue selon les propriétés différentes, mais complémentaires, qui permettent de définir ses attributs ou caractéristiques:

- le fait d'être prêt à l'utilisation conduit à la disponibilité (*availability*) ;
- l'absence de conséquences catastrophiques pour l'environnement conduit à la sécurité-innocuité (*safety*) ;
- l'absence de divulgations non-autorisées de l'information conduit à la confidentialité (*confidentiality*) ;
- l'absence d'altérations inappropriées de l'information conduit à l'intégrité (*integrity*) ;
- l'aptitude aux réparations et aux évolutions conduit à la maintenabilité (*maintenability*).

1.3.3.2. Moyens pour la sûreté de fonctionnement

Le développement d'un système sûr de fonctionnement passe par l'utilisation combinée d'un ensemble de méthodes qui peuvent être classées en :

- prévention des fautes : comment empêcher l'occurrence ou l'introduction de fautes ;
- tolérance aux fautes : comment fournir un service à même de remplir la fonction du système en dépit des fautes ;
- élimination des fautes : comment réduire la présence (nombre, sévérité) des fautes ;
- prévision des fautes : comment estimer la présence, le taux futur, et les possibles conséquences des fautes.

1.3.3.3. Entraves à la sûreté de fonctionnement

Le service délivré étant une séquence d'états externes, une défaillance du service signifie qu'au moins un état externe dévie du service correct. La déviation est une erreur. La cause adjugée ou supposée d'une erreur est une faute. Les fautes peuvent être internes ou externes au système. La présence antérieure d'une vulnérabilité, c'est-à-dire d'une faute interne qui permet à une faute externe de causer des dommages au système, est nécessaire pour qu'une faute externe entraîne une erreur et, éventuellement, une défaillance.

1.4. Conclusion

Le domaine de la maintenance et de la sûreté de fonctionnement représente actuellement une discipline plus intéressante et inévitable pour les entreprises manufacturières pour des raisons de contrôle de risques, d'amélioration de la disponibilité des systèmes et de réduction de coûts tout en garantissant un niveau tolérable de fiabilité. De ce fait nous avons rappelé les notions de base liées à la maintenance, à savoir les différents types de maintenance qui existent actuellement ainsi que les différentes formes de sa gestion et nous avons décrit d'une manière générale les étapes principales de l'analyse de sûreté de fonctionnement.

Chapitre 2

Modélisation de la maintenance et l'analyse de la fiabilité

2.1. Introduction

La modélisation d'un système de maintenance constitue en général l'étape la plus délicate, le reste de la méthode repose grandement sur la pertinence de la représentation adoptée. Il s'agit d'expliquer au mieux les mécanismes d'évolution des différents états de fonctionnement du système. La présence d'un retour d'expérience REX facilite la compréhension des processus de dégradation des composants du système et de leurs interactions et l'exploitation des connaissances, en outre l'avantage de fournir une représentation relativement proche de la réalité. En revanche, s'il n'y a pas ou peu de données (REX) exploitables, il survient aux experts de proposer leur modèle ce qui conduit parfois à l'introduction de biais importants.

La description des procédures de maintenance est souvent moins complexe. Il est en effet courant de disposer de référentiels décrivant les différentes actions d'entretien et de réparation possibles et leurs effets sur le système. Cette étape consiste alors à traduire mathématiquement ces référentiels.

La fonction d'utilité retenue permet enfin de quantifier la pertinence d'une politique de maintenance donnée. Le choix de la fonction d'utilité dépend du système représenté et du problème considéré. Cette dernière doit à la fois prendre en compte les contraintes économiques et les exigences de sûreté de fonctionnement. L'objectif principal est d'adopter une approche de modélisation à savoir la MBF qui est formidable pour maximiser la fonction d'utilité en ajustant les paramètres de maintenance afin de réaliser le meilleur compromis entre coûts d'entretien et la disponibilité du système.

Actuellement les experts en maintenance des réseaux électriques s'entendent pour privilégier cette approche comme méthode de référence afin d'améliorer le rendement d'électricité et diminuer les coûts liés à la maintenance [58, 59, 60].

Cette méthode qui a été nommée auparavant RCM (Reliability Centred Maintenance), et développée en 1973 dans le domaine militaire aux Etats-Unis. Elle est appliquée aussi en France par EDF/RTE (Réseau de Transport de l'Electricité d'EDF) sous le nom OMF (Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité) à partir de 2000 sur les équipements postes et 2002 sur les lignes aériennes haute et très haute tension.

Dans ce chapitre, on présente les modèles et les approches de modélisation de la maintenance et la fiabilité. La modélisation mathématique de la fiabilité d'un système est indispensable pour la concrétisation de l'approche expérimentale nommée MBF qui est elle-même basée l'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité AMDEC, les blocs diagramme de fiabilité RBD et les arbres de défaillance Add.

2.2. Modélisation mathématique de la fiabilité

La fiabilité est la caractéristique d'un système exprimée par la probabilité qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et pendant une durée donnée [04, 31, 33, 106]. Ainsi, la durée de vie d'un système est utilisée pour mesurer la quantité de service rendu.

D'une manière générale, on mesure la durée de vie d'un système par le nombre d'unité du temps durant lesquelles il a effectivement fonctionné [92].

2.2. 1. La fonction cumulée de défaillance

C'est la probabilité qu'un dispositif prélevé au hasard dans la population considérée ait une défaillance avant l'instant t [04, 92, 106], La fonction de défaillance est définie par :

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u) du \quad (2.1)$$

T est une variable aléatoire continue à valeurs positives et possédant une densité de probabilité f . On définit la densité de défaillance comme le taux de variation de la fonction de défaillance F

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{d}{dt} F(t) \quad (2.2)$$

On note deux méthodes d'estimation non paramétrique de la fonction de répartition $F(t)$:

Méthode des rangs médians $(t_i) = \frac{n_i - 0.3}{N + 0.4}$, pour les échantillons de petite taille $N \leq 30$

Méthode des rangs moyens $F(t_i) = \frac{n_i}{N + 1}$, pour les échantillons $N > 30$

2.2. 2. La fonction de fiabilité :

La fonction de fiabilité est définie par:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t) \text{ Pour } t \geq 0 \quad (2.3)$$

2.2. 3. Taux de défaillance:

Ou c'est la probabilité pour qu'un dispositif en état de marche à l'instant t , tombe en panne entre les instants t et $t + \Delta t$. [9, 12, 19] Donc :

$$\frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (2.4)$$

Taux de défaillance instantané $h(t)$:

On divise par Δt

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t}$$

$$h(t) = \frac{-R'(t)}{R(t)}$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.5)$$

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t h(u)du\right) \quad (2.6)$$

Moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF) c'est l'espérance mathématique de la variable aléatoire T définie au départ

$$MTBF = E(T) = \int_0^{+\infty} tf(t)dt \quad (2.7)$$

Parmi les lois de distribution les plus populaire, on a choisir la loi de Weibull pour la modélisation de la fiabilité grâce à sa flexibilité de couvrir toute une famille de lois (Annexe A)

La fonction de fiabilité à trois paramètres de Weibull est donnée par la formule :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\theta} \quad (2.8)$$

Ou:

γ : Paramètre de position, θ : Paramètre de forme et η : Paramètre d'échelle

Le PDF ou la fonction densité de probabilité:

$$f(t) = \frac{\theta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\theta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\theta} \quad (2.9)$$

La fonction du taux de défaillance:

$$h(t) = \frac{\theta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\theta-1} \quad (2.10)$$

Le CDF ou la fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2.11)$$

Le temps moyen de bon fonctionnement ou l'espérance mathématique :

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R(t)dt = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\theta}\right) \quad (2.12)$$

Où la fonction gamma est défini par l'intégral suivant :

$$\Gamma(n) = \int_0^{+\infty} e^{-x} x^{n-1} dx \quad (2.13)$$

2.2.4. Exemple

Dans les figures 2.1 2.2 2.3 l'allure de la fiabilité $R(t)$, de la fonction défaillance $F(t)$, la fonction densité de probabilité $f(t)$ et la fonction taux de défaillance $h(t)$ suivant la distribution Weibull a trois paramètres $\eta = 100$, $\theta = 2.5$ et $\gamma = 0$, le $MTBF=88.7264$

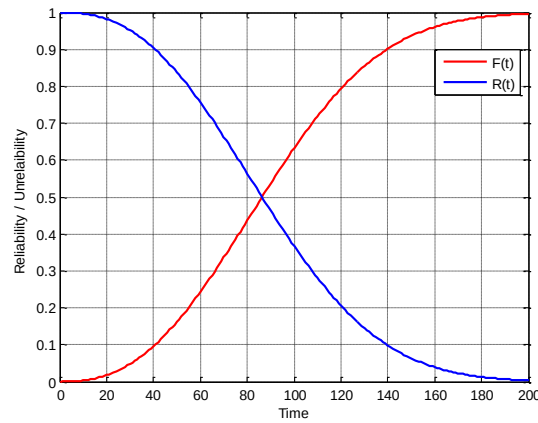


Fig. 2.1. La fiabilité/la dé-fiabilité vs le temps

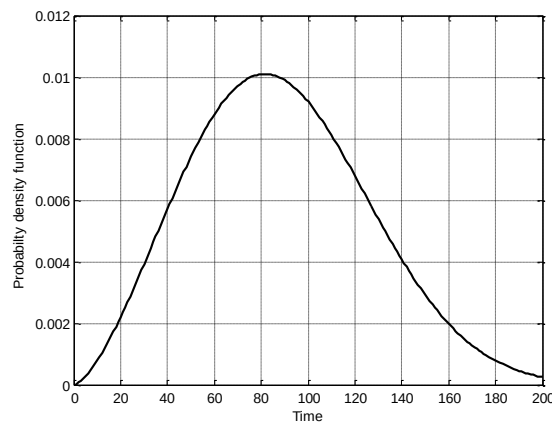


Fig. 2.2. La fonction densité de probabilité vs le temps

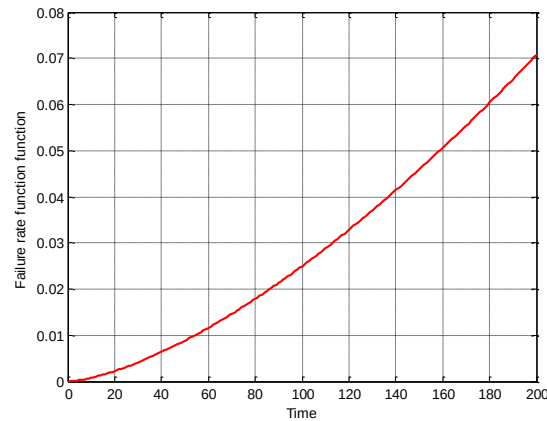


Fig. 2.3. Le taux de défaillance vs le temps

Dans le cas général, le comportement temporel du taux de défaillance est représenté par la courbe « en baignoire », figure 2.4. et figure 2.5.

Cette courbe comporte trois phases pour lesquelles on détaille les causes potentielles et les actions à entreprendre pour améliorer le comportement du système.

Selon le type de produit (électronique, informatique ou mécanique), l'allure de la courbe peut changer. Plusieurs types de courbes en baignoire peuvent être présentés, Figure 2.3.

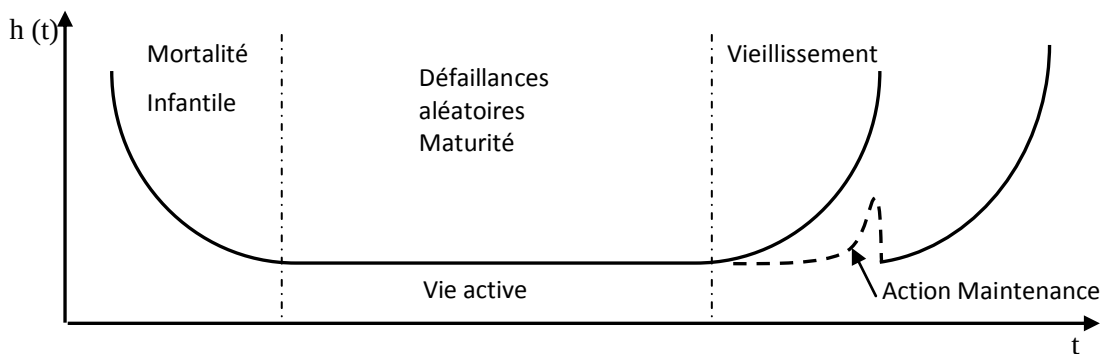


Fig. 2.4. Évolution du taux de panne en courbe « baignoire »

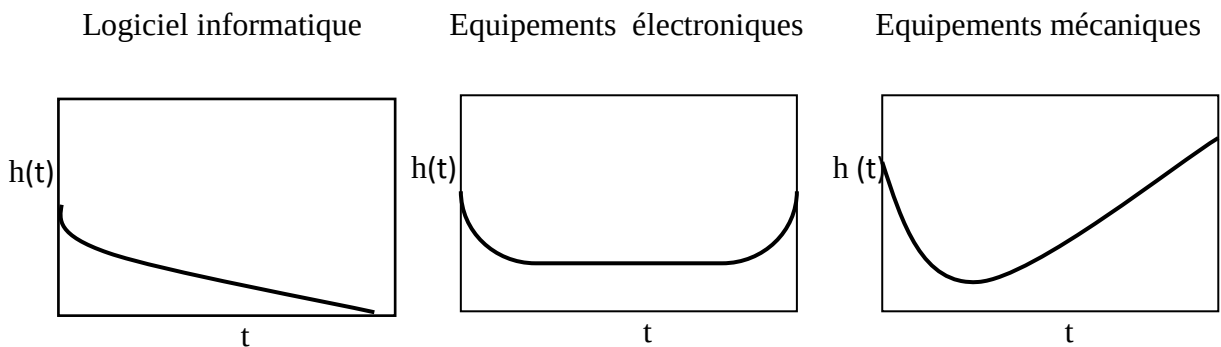


Fig. 2.5. Allures caractéristiques du taux de défaillance

Ainsi dans le tableau 2.1, nous résumons l'ensembles des causes possibles et comment les remédiées.

Tab. 2.1. Causes & Remèdes

Taux de panne λ (t)	Causes	Remèdes
Mortalité infantile	Défauts de fabrication Contrôle de la qualité Conception Assemblage Contamination	Tests de validation Vérification Contrôle de la qualité
Défaillances aléatoires	Environnement Charges aléatoires Erreur humaine Catastrophes naturelles Évènements aléatoires	Redondance Amélioration de la résistance
Vieillessement	Fatigue Corrosion Âge Frottement Charges cycliques	Réduction du taux de panne Maintenance préventive Remplacement préventif Technologie

2.3. Estimation des paramètres du modèle

2.3.1. Distribution identique et indépendante

On suppose que lorsque les ensembles de données sont (Identically and Independently Distribution) iid, cela signifie que la distribution de probabilité choisie est appropriée pour modéliser le système. Si, dans le cas où l'ensemble de données ne répond pas aux exigences iid et que des distributions de probabilité ont été utilisées dans la modélisation, le résultat et / ou les conclusions d'une telle analyse peuvent être trompeurs. Pour les besoins de ce travail, l'hypothèse iid sera vérifiée graphiquement en utilisant les tests de tendance et de corrélation sérielle [34, 35, 36].

2.3.1.1. Test de tendance

Le test de tendance ou (Trend test), est généralement appliqué pour vérifier les tendances des modèles de défaillance d'un système. Le test consiste à tracer la défaillance cumulée ou le numéro de réparation par rapport au temps cumulé entre les défaillances (CTBF) ou temps de réparation (TTR). Le test de tendance peut être présenté graphiquement afin de vérifier présence d'une tendance dans l'ensemble de données ou déterminer si le taux de défaillance d'un système (ou un composant du système) a augmenté, diminué ou constant. La forme du graphique de tendance révélera si un système connaît un taux de défaillance décroissant

(amélioration), un taux de défaillance croissant (détérioration) ou constant (ligne droite). Dans le cas d'une ligne droite, l'ensemble de données est exempt de toute tendance et est dit distribué de manière identique.

2.3.1.2. Test de corrélation sérielle

Le test de corrélation sérielle ou (serial correlation test), est effectué pour vérifier la relation entre deux variables (ith TBF et (i-1) th TBF). Dans ce cas, le (i-1)ème TBF est tracé par rapport au ième TBF. Si les points de données résultants sont dispersés au hasard et sont sans motif notable, cela indique que l'ensemble de données est exempt de corrélation sérielle, et suggère en outre que l'ensemble de données est indépendant les uns des autres.

2.3. 2. Méthode des moindres carrées

La méthode des moindres carrés ou " Least Squares Method" en anglais, repose sur la minimisation de la somme des carrés des distances entre données du modèle et celles mesurées [37, 38]. Pour faciliter l'utilisation de cette méthode, on transforme l'équation de répartition en équation linéaire. Dans notre cas la linéarisation de la fonction de répartition de Weibull se fait comme suite :

$$\begin{aligned}
 F(t) &= 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\theta} \\
 -\ln(1 - F(t)) &= \left(\frac{t}{\eta}\right)^\theta \\
 \ln(-\ln(1 - F(t))) &= \theta \cdot \ln\left(\frac{t}{\eta}\right) \\
 \ln(-\ln(1 - F(t))) &= \theta \cdot \ln(t) - \theta \cdot \ln(\eta)
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

La fonction de répartition peut récrire sous la forme suivante:

$$y = \ln(-\ln(1 - F(t)))$$

Ou : $x = \ln(t)$

On arrive à la formule:

$$y = \theta \cdot x - \theta \cdot \ln(\eta) \tag{2.15}$$

C'est une équation linéaire sous la forme de:

$$y = ax + b$$

On recherche d'après cette méthode d'estimer les paramètres du modèle mathématique qui sont : le paramètre θ qui peut calculer à l'aide de l'équation 2.16 et le paramètre η qui peut calculer à l'aide de l'équation 2.19

$$\theta = \frac{N \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i - \sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N x_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - [\sum_{i=1}^N x_i]^2} \quad (2.16)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - \theta \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (2.17)$$

$$b = -\theta \cdot \ln(\eta) \quad (2.18)$$

$$\eta = e^{-\frac{b}{\theta}} \quad (2.19)$$

2.3. 3. La méthode du maximum de vraisemblance (MV)

La méthode du maximum de vraisemblance ou (Maximum Likelihood Estimation) MLE en anglais, est généralement préférée à d'autres méthodes car cette méthode présente l'avantage d'être rigoureuse pour toutes les lois, et de permettre d'obtenir des écart-types approximatifs pour les estimateurs des paramètres, mais plus complexe que les autres [38, 39, 41, 42].

Principe, soit l'échantillon $t_1, t_2, \dots, t_N$ de données de fiabilité non censurées, et $X(x_1, x_2, \dots, x_k)$ est le vecteur de paramètres à estimer, $f(t_i, X)$ est la densité de probabilité, de forme connue mais des paramètres inconnus, la vraisemblance s'écrit alors :

$$L(t_i, X) = \prod_{i=1}^N f(t_i, X) \quad (2.20)$$

Dans le cas où les données sont censurées [40, 41] à droite, la vraisemblance des observations s'écrit :

$$L(t_i, X) = \prod_{i=1}^{n1} f(t_i, X) \prod_{j=1}^{n2} R(t_j, X) \quad (2.21)$$

Où l'indice i est relative aux défaillances et j est relative aux données censurée à droite avec $n1$ et $n2$ sont respectivement le nombre de défaillances et le nombre de données censurée à droite. Si les données avaient censurée à gauche, la densité aurait été remplacée par sa fonction de répartition.

Les estimateurs du maximum de vraisemblance visent à estimer les paramètres du modèle de distribution, qui sont obtenues en mettant à zéro, les premières dérivées partielles du logarithme de la fonction de vraisemblance par rapport à $x_1, x_2, \dots, x_k$.

C'est-à-dire :

$$\frac{\partial \ln(L(t_i, X))}{\partial x_K} = 0, \quad K = 1, 2, \dots, k$$

La méthode du maximum de vraisemblance présente de nombreux avantages :

- elle générale ; d'autre méthodes simples existent mais on ne peut les généraliser.
- elle a la propriété d'invariance.

- elle est asymptotiquement normale : si toute la population est observée, le maximum de vraisemblance donnera la réponse exacte et l'estimateur sera distribué selon une loi normale (approximativement), pour de grands échantillons.

Dans le cas de loi de Weibull à deux paramètres on a:

$$L(t_i, \eta, \theta) = \prod_{i=1}^N f(t_i)$$

$$L(t_i, \eta, \theta) = \prod_{i=1}^N \frac{\theta}{\eta} \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{\theta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\theta}$$

$$\ln(L(t_i, \eta, \theta)) = N \ln \theta - N \theta \ln \eta + (\theta - 1) \sum_{i=1}^N \ln t_i - \sum_{i=1}^N \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\theta \quad (2.22)$$

En menant la dérivé partielle de la fonction $\ln(L(t_i, \eta, \theta))$ par rapport à η égale à 0, l'optimum de η est donné comme il est montré ci-dessous:

$$\frac{\partial \ln(L(t_i, \eta, \theta))}{\partial \eta} = 0$$

$$-\frac{N\theta}{\eta} + \frac{\theta}{\eta} \sum_{i=1}^N \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\theta = 0$$

$$\eta = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^\theta\right)^{1/\theta} \quad (2.23)$$

En menant la dérivé partielle de la fonction $\ln(L(t_i, \eta, \theta))$ par rapport à θ égale à 0, l'optimum de θ est donné comme il est montré ci-dessous:

$$\frac{\partial \ln(L(t_i, \eta, \theta))}{\partial \theta} = 0$$

$$\frac{N}{\theta} + \sum_{i=1}^N \ln\left(\frac{t_i}{\eta}\right) - \sum_{i=1}^N \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\theta \ln\left(\frac{t_i}{\eta}\right) = 0$$

$$\frac{1}{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i^{\theta} \ln t_i}{\sum_{i=1}^N t_i^{\theta}} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln t_i \quad (2.24)$$

θ peut trouver avec les méthodes numériques. Une fois θ est calculée, η peut être obtenu en plaçant θ dans l'équation (2.23)

2.3. 4. Exemple :

L'historique d'intervention de l'équipe maintenance sur une machine électrique soumis à des conditions spécifiques, durant son cycle de vie, a relevé les temps de fonctionnement, en unité du temps, entre deux interventions consécutives. Les données sont regroupées dans le tableau 2.2 et la fonction de répartition cumulée est calculée par la méthode de rangs médians et consignées dans le même tableau.

Tab. 2.2. Exemple

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
t_i	65	82	104	128	162	196	230	278	302	336	380	460	505
$F(i)^{\wedge}$	2.76	6.96	10.63	14.57	18.50	22.44	26.38	30.31	34.25	38.19	42.13	46.06	50.00

	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	556	676	706	915	995	1120	1250	1360	1480	1590	1710	1800
	53.94	57.87	61.81	65.75	69.69	73.62	77.56	81.50	85.43	89.37	93.31	97.24

La figure 2.6 décrit la distribution empirique de probabilité

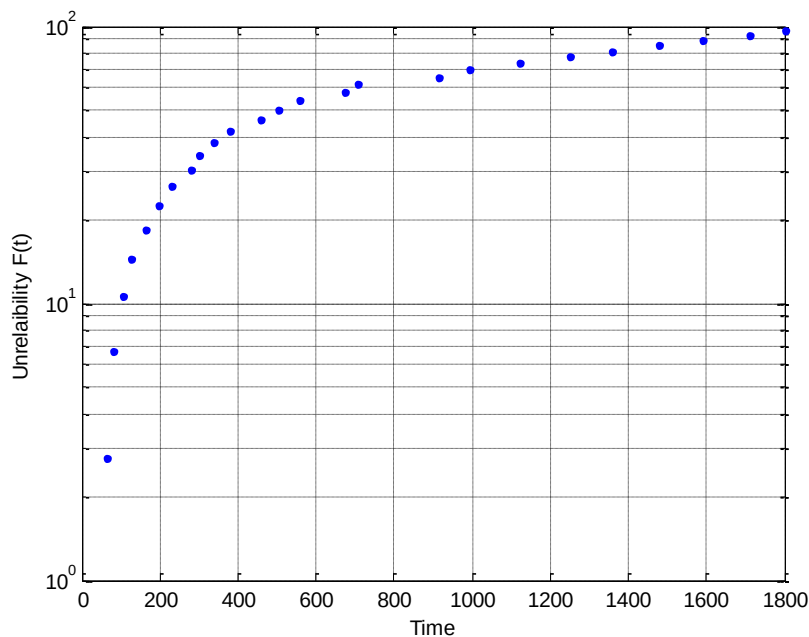


Fig. 2.6. Diagramme de distribution empirique

L'ajustement d'un modèle de type ligne droite par la méthode des moindres carrées

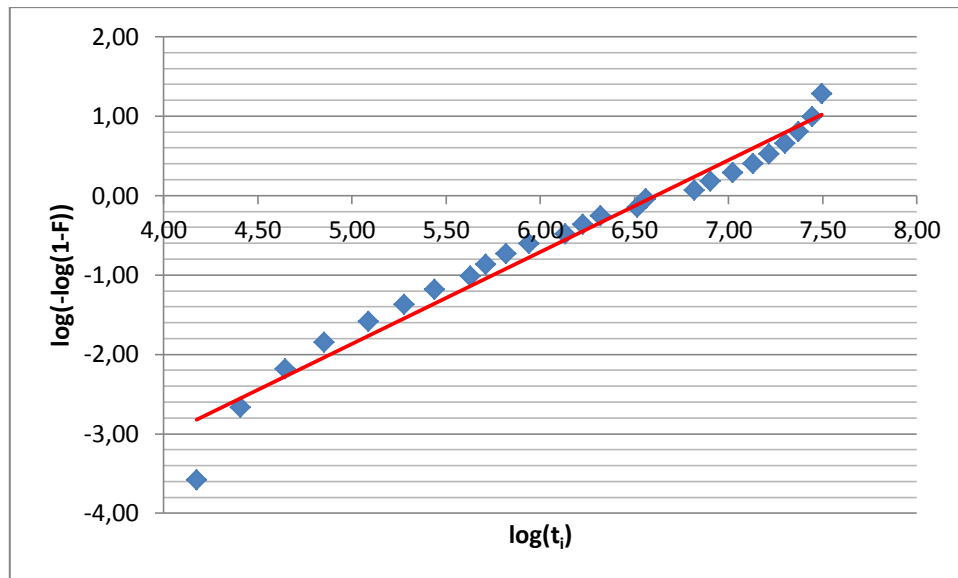


Fig. 2.7. Ajustement d'un modèle de type $y = a x + b$

Nous avons obtenus les paramètres du modèle de Weibull suivant:

$$\hat{\theta} = 1.156$$

$$\hat{\eta} = 746,889$$

Le coefficient de corrélation est : $R^2 = 0.967$

L'ajustement par la méthode du maximum de vraisemblance(MV) à partir du MATLAB nous a d'obtenir les paramètres du modèle de Weibull suivant:

$$\hat{\theta} = 1.2234$$

$$\hat{\eta} = 743.4355$$

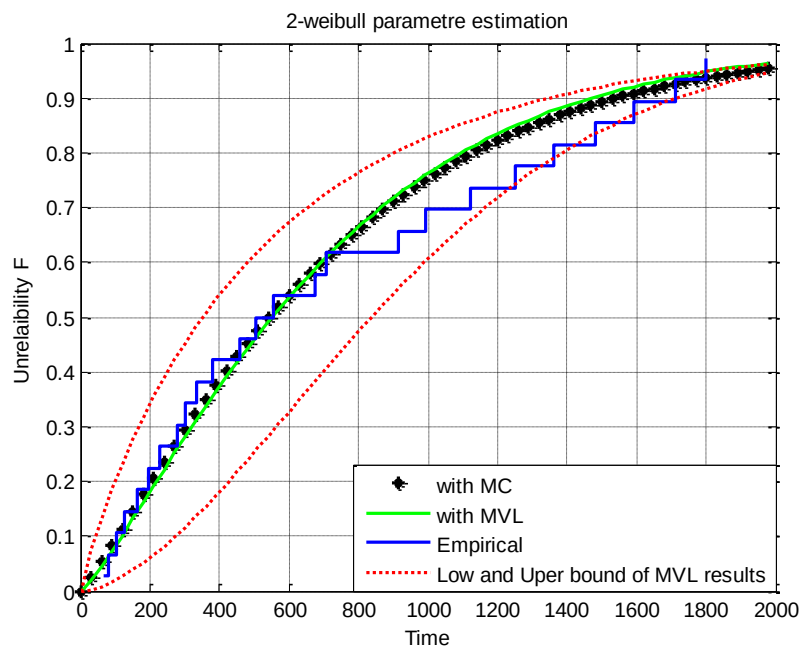


Fig. 2.8. Comparaison entre les méthodes d'ajustement

2. 4. Tests d'adéquation :

Après l'étape d'estimation que les données sera amené à traiter, il y a aura régulièrement des hypothèses sur des lois de probabilité qu'il lui faudra vérifier.

Il existe de nombreux tests pour vérifier qu'un échantillon suit ou non une loi de probabilité théorique, on présente ici trois tests, le test de Khi-deux, de Kolmogorov-Smirnov et d'Anderson-Darling.

2. 4.1. Test de Khi-deux (χ^2)

La loi de χ^2 (Annexe B) est principalement utilisée pour tester l'adéquation, l'indépendance et l'homogénéité [38, 40, 46]. De notre cas, ce qui nous intéresse, c'est le test d'adéquation d'une distribution empirique à une distribution théorique à des paramètres estimés. Pour vérifier l'adéquation il faut suivre les étapes :

- a- On doit regrouper les observations dans des intervalles de sorte que la plupart des intervalles aient plus de cinq observations
- b- Calculez la valeur du test d'ajustement du χ^2 qui donnée par la formule suivante :

$$K_{\chi^2} = \sum_{i=1}^r (n_i - np_i)^2 / np_i \quad (2.25)$$

Où :

n_i : valeurs de la fréquence empirique, np_i : valeurs de la fréquence théorique

- c- Définissez les deux hypothèses du test de khi-deux:

- H_0 : l'hypothèse nul ou l'échantillon suit la loi théorique ;
- H_1 : rejeté l'hypothèse nul ou l'échantillon ne suit pas la loi théorique;

- d- Déterminer la valeur critique $K_{critique}$ (Tableau B.1 dans l'Annex B) tel que

$$\alpha = 1 - P_{\chi^2}(T \leq K_{critique})$$

- e- Comparez cette valeur à la valeur critique de la loi de χ^2 à $(r-1)$ - nombre de paramètres estimés de la loi théorique) ddl.

Si :

$$K_{\chi^2} \leq K_{critique} ,$$

$$P_{value} \geq \alpha$$

Ou

$$P_{value} = 1 - P_{\chi^2}(T \leq K_{\chi^2})$$

- f- Conclure que l'échantillon suit ou non la loi théorique avec niveau de signification α donnée.

2. 4.2. Test de Kolmogorov-Smirnov :

Le test de Kolmogorov-Smirnov (Annexe B)est un test non paramétrique a pour objet de vérifier l'adéquation d'une distribution empirique à une loi de probabilité donnée par sa fonction de répartition[43, 44, 45].

Supposant que nous avons l'échantillon $F_1, F_2, F_3, \dots F_n$ d'une distribution empirique cumulée $F_n(t)$ et nous aimerions tester l'hypothèse que cette échantillon suit une loi théorique donnée par sa fonction de répartition $F(t)$.

Pour vérifier l'adéquation il faut suivre les étapes :

- a- Calculez D_n l'écart maximum entre la fonction de répartition empirique et celle de la répartition théorique suivant l'équation 2.26 dessous.

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{i}{n} - F(t_i); F(t_i) - \frac{i-1}{n} \right\} \quad (2.26)$$

- b- Définissez les deux hypothèses du test:

H_0 : accepte l'hypothèse nul ou l'échantillon suit la loi théorique ;

H_1 : rejeté l'hypothèse nul ou l'échantillon ne suit pas la loi théorique;

- c- Déterminer la valeur critique $D_{n,\alpha}$ (Tableau B.2 dans l'Annex B) tel que

$$\alpha = 1 - P_{KS}(T \leq D_{n,\alpha})$$

Ou α est le niveau de signification et $KS(t)$ est la fonction de répartition de la distribution Kolmogorov-Smirnov

- d- Conclure que l'échantillon suit la loi théorique si :

$$D_n \leq D_{n,\alpha} ,$$

$$P_{value} \geq \alpha$$

Ou :

$$P_{value} = 1 - P_{KS}(T \leq D_n)$$

L'utilisation du tableau A.2(Annexe A) est nécessaire pour donner directement les valeurs critiques $D_{n,\alpha}$ telles que décrites dans le test de Kolmogorov-Smirnov.Où n est la taille de l'échantillon, $F_n(t)$ est la fonction de répartition empirique

2. 4.3. Test d'Anderson-Darling

Le test d'Anderson-Darling est un test non paramétrique pour vérifier l'adéquation d'une distribution empirique à une loi de distribution théorique. Plus la statistique de ce test est faible, plus la distribution empirique suit bien la loi théorique[46, 47, 48].

$$A = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(2i-1)[\ln(F(t_i)) + \ln(R(t_{n+1-i}))]] \quad (2.27)$$

Ou n est la taille de l'échantillon.

La statistique AD d'Anderson-Darling est calculée à la base de A et la loi théorique, comme décrit dans le tableau B.3 (Annex B)

Pour la distribution de Weibull

$$AD = A(1 + \frac{0.2}{\sqrt{n}})$$

$$P_{value} = \frac{1}{1 + \exp(-0.1 + 1.24 \ln(AD) + 4.48AD)}$$

Comme les deux tests précédents, on a deux hypothèses du test d'Anderson-Darling:

- H_0 : l'échantillon suit la loi théorique ;
- H_1 : l'échantillon ne suit pas la loi théorique;

On conclure que l'échantillon suit ou non la loi théorique:

Si :

$$AD \leq AD_{critique}$$

$$P_{value} \geq \alpha$$

On accepte l'hypothèse nulle H_0 , si le contraire on accepte l'hypothèse H_1

Ou la valeur critique $AD_{critique}$ d'Anderson-Darling est calculée à la base de la statistique AD et également dépend la loi théorique, comme décrit dans le tableau B.4 (Annexe B)

2. 4.4. Exemple

Les tests d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov (KS), de Khideux (χ^2) et d'Anderson-Darling (AD) avec un niveau de signification de $\alpha=0.05$ ont été effectués pour la validation des modèles obtenus dans l'exemple précédent le tableau 2.3, résume les résultats obtenu

Tab. 2.3 : Résultats des tests

méthode	Paramètres estimé	Test de χ^2		Test de KS		Test d'AD	
MC	$\hat{\theta} = 1.16$ $\hat{\eta} = 746.89$	$K_{\chi^2} = 3.53$ $P_{value} = 0.1712$ $K_{critique} = 5.99$	H_0	$D_n = 0.0776$ $P_{value} = 0.9952$ $D_{n,\alpha} = 0.2641$	H_0	$AD = 0.2919$ $P_{value} = 0.5792$ $AD_{critique} = 0.757$	H_0
MV	$\hat{\theta} = 1.22$ $\hat{\eta} = 743.45$	$K_{\chi^2} = 4.06$ $P_{value} = 0.1313$ $K_{critique} = 5.99$	H_0	$D_n = 0.0887$ $P_{value} = 0.9794$ $D_{n,\alpha} = 0.2641$	H_0	$AD = 0.3742$ $P_{value} = 0.4115$ $AD_{critique} = 0.757$	H_0

Le test de χ^2 ne peut pas être appliqué à des échantillons extrêmement petits en raison de la procédure de regroupement les distributions en classes, alors que les tests KS et AD sont illimité à cet égard. Il faut noter que la puissance de les deux tests KS et AD augmente plus la taille de l'échantillon assis grande. Pour l'analyse de fiabilité le test de Kolmogorov-Smirnov

plus puissant que les deux autres tests. De cette raison on a adopté dans notre travail le test de KS pour valider les paramètres du modèle estimé à travers les données collecter par l'équipe de maintenance de la station du poste MT/BT dans le dernier chapitre.

2.5. Coût de la maintenance

Le coût de la de maintenance est le coût associé à chaque tâche de maintenance corrective ou préventive, que ce soit qu'il est basé sur le temps ou sur l'état. Le coût de maintenance corrective prévue est le coût total des ressources de maintenance nécessaires à la réparation ou de dépannage des éléments défailants. De même, le coût de maintenance préventif espéré est le coût total des ressources de maintenance nécessaires pour inspecter et/ou d'examiner un composant avant l'apparition de la panne et parfois de remplacer une partie de ce composant. Ainsi, le coût total de maintenance tout au long de la vie des composants du système est la somme des coûts de maintenance corrective, préventive et de remplacements. Les frais généraux, qui comprennent tous les frais autres que les matériels directs, main-d'œuvre et les équipements du système sont inclus. Donc le cout total des tâches de la maintenance peut être déterminé par l'expression suivante

$$\text{Total Cost} = C_{UM} + C_{PM} + C_{RM} \quad (2.28)$$

Où C_{UM} , C_{PM} et C_{RM} sont respectivement le coût total de la maintenance corrective, le coût total de la maintenance préventive et le coût de remplacement ou de rénovation rationnelle des composants de système.

2.6. L'effet de la maintenance sur la fiabilité

On considère que la maintenance préventive PM est en générale imparfaite et peut pas restaurer le composant a l'état initiale (as good as new), nous adoptons dans ce travail le modèle hybride de la fonction taux défaillance qui se combine de deux modèles d'augmentation du taux de défaillance [49] et la réduction d'âge [50]. Ce modèle permet simultanément aux actions imparfaites de PM de réduire l'âge effectif à une certaine valeur et de modifier la pente de la fonction de taux défaillance. La modélisation de l'effet des actions imparfaites des interventions préventive (PM) effectuées sur un composant est donnée par la fonction de taux de défaillance. Cette modélisation se caractérise par le maintien de la fonction principale, l'identification des modes de défaillance, la priorisation des fonctions et l'existence d'un plan de maintenance efficace.

Les hypothèses de base du modèle sont:

- Le système subit des conditions relativement constantes de stress, d'environnement et de maintenance en cycle de vie.
- Le taux de défaillance est une fonction connue
- Une action PM a un effet imparfait sur le système. Cela indique que le système commence un nouveau processus de défaillance après une action PM
- l'action de remplacement RM restaure le système à l'état initial.

- Les durées de PM, UM et RM sont supposées négligeables par rapport au cycle de remplacement global. Par conséquent, ces réparations et remplacements sont considérés comme instantanés.
- L'état du système peut être surveillé en permanence et parfaitement.

2.6.1. Évolution de la fonction du taux de défaillance

Dans les articles [51-54], les auteurs utilisent une approche unique dans la modélisation des PMs imparfaites basée sur le modèle hybride de taux de défaillance introduit initialement par Lin et al[55]. À partir de ce modèle, on peut voir que la méthode de réduction de l'âge a l'avantage de déterminer la valeur initiale du taux de défaillance après chaque PM, tandis que la méthode d'augmentation du taux de défaillance a l'avantage de permettre au taux de défaillance d'être plus élevé après chaque PM. Avec la possibilité de combiner ces deux avantages, un modèle hybride basé sur le modèle de réduction de l'âge et le modèle d'augmentation de défaillance, comme le montre la figure 2.9, est, ceci, adopté.

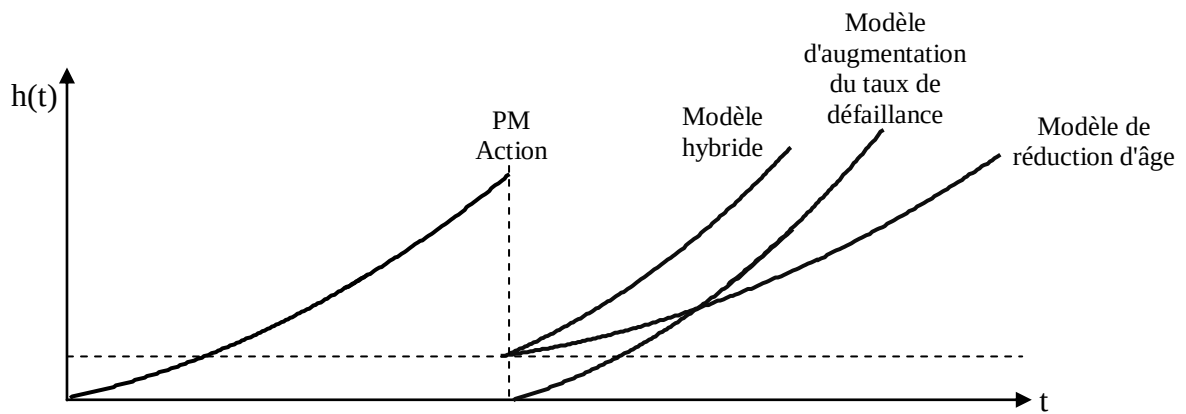


Fig. 2.9. Comparaison des modèles de PM imparfait

La relation entre les fonctions de taux de défaillance après la (i-1)ème PM et les fonctions de taux de défaillance initiale (première) peut être écrite comme suit:

$$h_i^j(t) = B_i^j \cdot h_1^j(A_i^j + t) \text{ pour } t_{i-1}^j \leq t < t_i^j \quad (2.29)$$

Où t_i^j est le temps pour appliquer ième PM intervention sur la jème composant

Ces fonctions peuvent être déduites de l'historique des données de maintenance. Ce modèle hybride permet de prédire l'évolution de la fonction du taux de défaillance dans différents cycles de maintenance.

Avec :

$$\begin{cases} A_i^j = \sum_{k=1}^{i-1} a_k^j \cdot T_k^j; \text{ if } i > 1 \\ A_1^j = 0; \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} B_i^j = \prod_{k=1}^{i-1} b_k^j; \text{ if } i > 1 \\ B_1^j = 1; \end{cases} \quad (2.30)$$

$h_i^j(t)$: est la fonction du taux de défaillance de jème composant après (i-1)ème PM

T_k^j : c'est l'intervalle du temps entre (k-1) et k PM de jème component.

a_k^j et b_k^j : respectivement les facteurs de réduction d'âge et d'ajustement.

Ces facteurs peuvent être déterminés à l'aide du jugement d'experts [49] ou historique des données de maintenance [48]. Nous adoptons les facteurs a_k^j et b_k^j de la même manière qu'à Zhou [53] c'est :

$$a_k^j = \frac{k}{3k+7}; \quad b_k^j = \frac{12k+1}{11k+1} \quad (2.31)$$

Ainsi, la figure 2.10 présente le comportement de la fonction du taux de défaillance est après chaque intervention PM

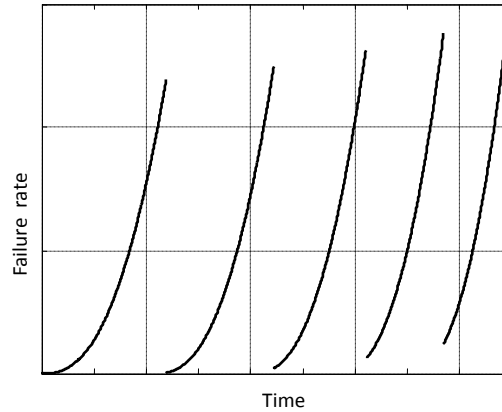


Fig. 2.10. L'allure du taux de défaillance avec le modèle hybride

Le composant est soumis à une stratégie hybride PM imparfaite chaque fois que la fiabilité du composant atteint un seuil de fiabilité R_{th}^j pendant la période comme indiqué sur la figure 2.11 et la fiabilité est donc donnée comme suit:

$$\begin{aligned} R_i^j(t) &= \exp \left(- \int_{t_{i-1}^j}^t h_i^j(u - t_{i-1}^j) du \right); \text{ for } t_{i-1}^j \leq t < t_i^j \\ R_i^j(t) &= \exp \left(B_i^j \left(\frac{A_i^j}{\eta^j} \right)^{\theta^j} \right) \cdot \exp \left(-B_i^j \left(\frac{t - t_{i-1}^j}{\eta^j} \right)^{\theta^j} \right) \end{aligned} \quad (2.32)$$

Où η^j est le paramètre d'échelle de la loi de Weibull pour le jème composant dans le system et θ^j est le paramètre de forme de la loi de Weibull pour le jème composant avec:

$$t_i^j = \sum_{k=1}^i T_k^j \quad (2.33)$$

L'impact du modèle hybride de PM imparfaite sur la fonction fiabilité $R(t)$

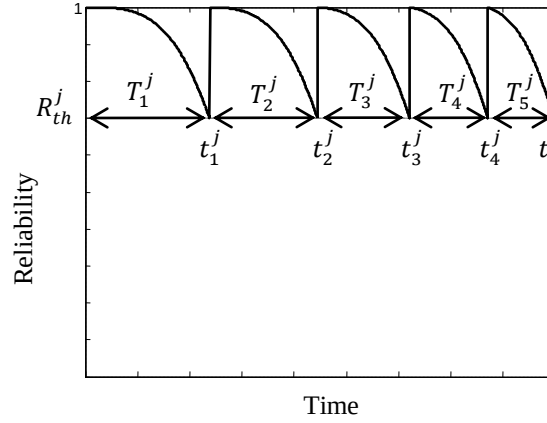


Fig. 2.11. L'allure de fiabilité avec le modèle hybride

2.6.2. Détermination de la longueur du ième intervalle PM: T_i^j

Une action PM est effectuée à chaque fois que la fiabilité de la composante j R_i^j atteint un seuil prédéterminé R_{th}^j . Par conséquent, nous avons $R_{th}^j = R_i^j(T_i^j)$. Le taux de défaillance cumulé dans le l'ième intervalle PM:

$$H_i^j = \int_0^{T_i^j} h_i^j(t) dt \quad (2.34)$$

$$H_i^j = B_i^j \cdot \left[\left(\frac{T_i^j + A_i^j}{\eta^j} \right)^{\theta^j} - \left(\frac{A_i^j}{\eta^j} \right)^{\theta^j} \right] \quad (2.35)$$

Cette expression est égale à $-\ln(R_{th}^j)$

$$H_1^j = H_2^j = \dots = H_i^j = \dots = H_n^j = -\ln(R_{th}^j) \quad (2.36)$$

La longueur du jème intervalle PM T_i^j ($i=1, \dots, n$) peut être obtenu à partir des équations (2.35) et (2.36) comme suit:

$$T_i^j = \eta^j \left(\left(\frac{A_i^j}{\eta^j} \right)^{\theta^j} - \frac{\ln(R_{th}^j)}{B_i^j} \right)^{1/\theta^j} - A_i^j \quad (2.37)$$

2.7. Le taux du coût cumulé attendu pour le cycle de vie (ECC)

Cela implique que la probabilité attendue de défaillance du système à chaque cycle de maintenance est égale à $-\ln(R_{th}^j)$. Cela indique également qu'au temps T_i^j ,

Ensuite, le taux de coût cumulé attendu pour le composant j dans le cycle de vie est

$$ECC^j(n) = \frac{n \cdot Cu^j \cdot (-\ln(R_{th}^j)) + (n-1) \cdot Cp + Cr}{\sum_{i=1}^n T_i^j} \quad (2.38)$$

Ou:

Cu^j : le coût moyen de la maintenance corrective de jème composant;

Cp^j : le coût moyen de la maintenance préventive de jème composant;

Cr^j : le coût moyen de remplacement de jème composant;

En choisissant la valeur la plus basse du taux de coût cumulé attendu $ECC^j(n)$ dans le cycle de vie du composant j, le nombre optimal correspondant n^j pour le cycle PM et le temps de remplacement $Reptime^j$ peut alors être déterminé. Le seuil de fiabilité R_{th}^j peut être déterminé en utilisant l'algorithme proposé.

La figure 2.12, représente le taux de coût cumulé attendu dans le cycle de vie par rapport au nombre n de cycles de PM

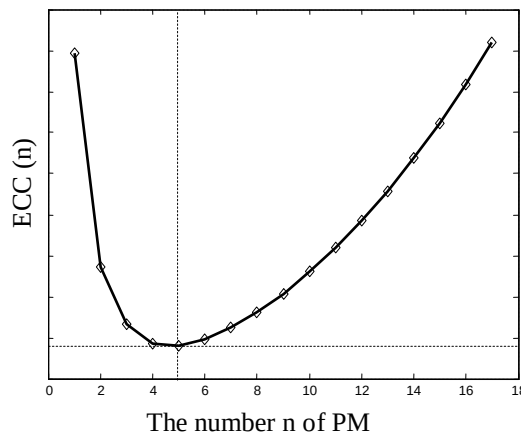


Fig.2.12.ECC v.s le nombre n de PM

2.7.1. Exemple :

Considérons un composant a des caractéristiques de Weibull suivant : le paramètre de forme $\theta = 2.3$, le paramètre d'échelle $\eta = 80$,

les facteurs a_k et b_k sont : $a_k = \frac{k}{3k+7}$; $b_k = \frac{12k+1}{11k+1}$

avec : $C_u = 15$, $C_p = 4$ et $C_r = 30$,

Les résultats obtenu dans le tableau 2.4 lie chaque seuil de fiabilité a le nombre optimal n de PM qui donne le minimum ECC(en gars) dans le cycle de vie du composant

Tab. 2.4. ECC en fonction de la combinaison (n , R_{th})

$\begin{matrix} n \\ R_{th} \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.98	1.8040	1.1018	0.8963	0.8143	0.7810	0.7713	0.7749	0.7866	0.8035	0.8242
0.95	1.2618	0.7795	0.6396	0.5852	0.5644	0.5600	0.5649	0.5753	0.5894	0.6061
0.90	0.9711	0.6111	0.5086	0.4704	0.4576	0.4573	0.4640	0.4750	0.4888	0.5045
0.85	0.8387	0.5376	0.4534	0.4236	0.4154	0.4178	0.4262	0.4382	0.4526	0.4686
0.80	0.7595	0.4957	0.4234	0.3993	0.3945	0.3991	0.4090	0.4222	0.4375	0.4544
0.75	0.7060	0.4691	0.4056	0.3860	0.3839	0.3904	0.4019	0.4163	0.4327	0.4504
0.70	0.6674	0.4513	0.3949	0.3789	0.3792	0.3876	0.4005	0.4162	0.4337	0.4525
0.5	0.5847	0.4241	0.3875	0.3830	0.3916	0.4067	0.4256	0.4468	0.4696	0.4934

Tab. 2.5. PM intervalle correspondant et temps optimal de remplacement

j	R_{th}	n^*	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	Reptime ^{j*}
1	0.98	6	16.7979	14.6110	12.0014	9.6542	7.7769	6.3384		67.1798
2	0.95	6	24.3845	21.2100	17.4218	14.0144	11.2893	9.2011		97.5212
3	0.90	6	32.5208	28.2871	23.2348	18.6906	15.0561	12.2712		130.0606
4	0.85	5	38.6769	33.6418	27.6331	22.2287	17.9062			140.0866
5	0.80	5	43.9060	38.1901	31.3691	25.2340	20.3271			159.0263
6	0.75	5	48.6021	42.2749	34.7243	27.9329	22.5013			176.0355
7	0.70	4	52.9662	46.0709	37.8422	30.4411				167.3204
8	0.50	4	69.0908	60.0963	49.3626	39.7083				218.2580

2.8. Approche par blocs diagrammes de fiabilité

2.8.1. Modèle série :

Si un seul composant est défectueux le système ne fonctionne plus alors dans l'hypothèse où la panne d'un composant est indépendante des autres, la probabilité cumulée de défaillance est égale le produit des probabilités cumulées

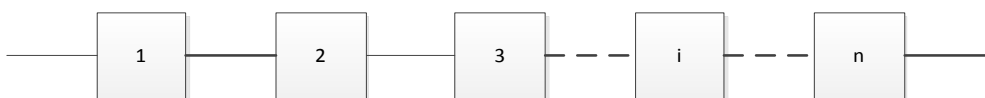


Fig. 2.13 Modèle série

Comme souvent il est fait usage de la loi exponentielle, la multiplication de plusieurs termes de probabilités cumulées étant relativement longue à écrire, nous lui préférons l'utilisation de la probabilité de fiabilité cumulée R . Ainsi, la fiabilité (*probabilité de fonctionnement*) d'un système série est donnée par:

$$R_s = 1 - F_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (2.39)$$

2.8.2. Modèle parallèle :

Dans ce cas, le système continu à fonctionner si au moins un composant fonctionne

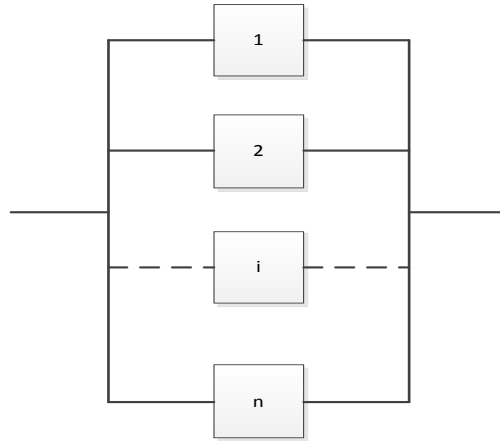


Fig. 2.14. Modèle parallèle

En d'autres termes, la probabilité que ce système fonctionne calculée selon cette équation:

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n F_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (2.40)$$

2.8.3. Modèle k/n (k-out-of-n redundancy)

Ce système fonctionne si k parmi n composants de même loi de fiabilité R fonctionnent. C'est typiquement le cas des disques RAID en informatique pour lesquels il en faut plus d'un qui fonctionne toujours à la fin et ce nombre est déterminé par le volume de données.

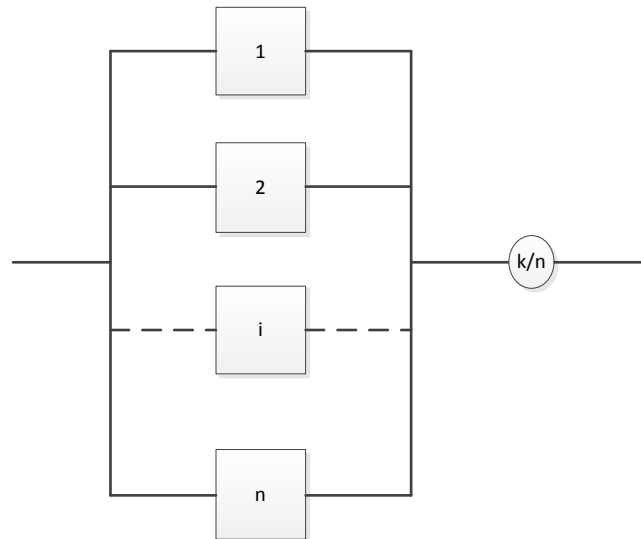


Fig. 2.15. Modèle k/n

Donc chercher la loi de probabilité cumulée de fiabilité revient à se poser la question de la probabilité cumulée d'avoir k éléments qui fonctionnent parmi n qui sont non distinguables.

Suivant la loi binomiale la probabilité cumulée est donnée par:

$$R_s(k, n, R) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} (1 - R)^{n-i} R^i \quad (2.41)$$

2.8.4. Modèle complexe:

Au fait, il ne s'agit pas vraiment de systèmes complexes mais ils nécessitent simplement une petite maîtrise des axiomes de probabilités. L'exemple particulier qui va nous intéresser est le suivant :

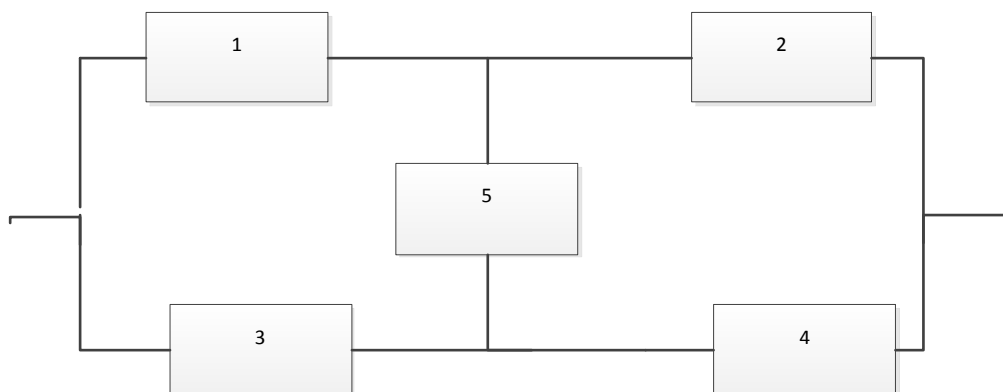


Fig. 2.16. Modèle complexe

Ce qui rend le système complexe est le composant 5. Nous pouvons alors considérer une première approche qui est de décomposer le problème. Le système si le composant 5 en panne sera soit dans l'état:

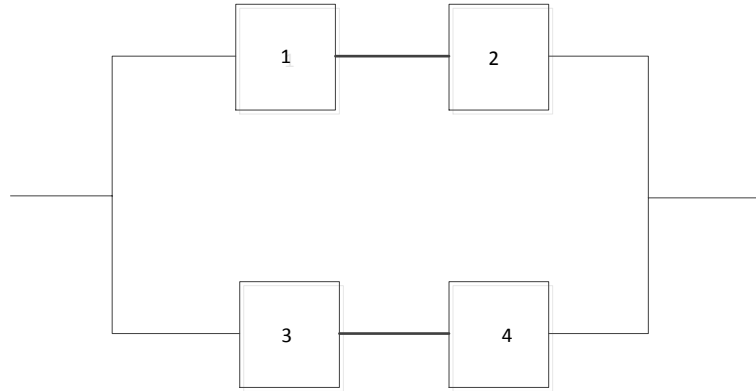


Fig. 2.17 modèle complexe 1

S'il est défectueux avec une loi de densité probabilité et ayant lui-même une fiabilité de:

$$R_{s1} = 1 - \prod_{j=1}^2 (1 - \prod_{i=1}^2 R_{ij}) \quad (2.42)$$

$$= 1 - (1 - R_1 \cdot R_2)(1 - R_3 \cdot R_4)$$

Selon la relation du système complexe série/parallèle, soit dans l'état suivant s'il est fonctionnel avec une loi de densité probabilité

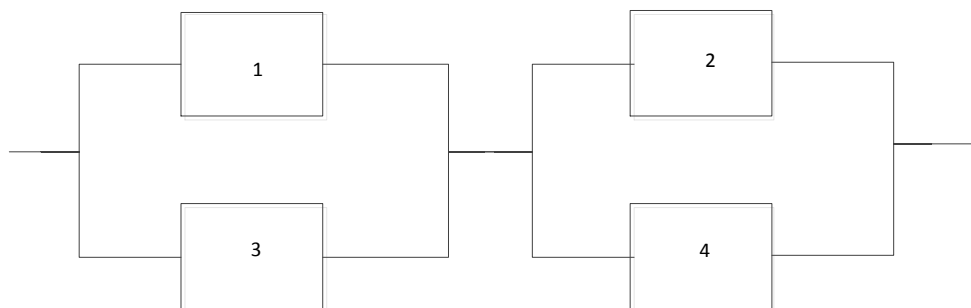


Fig. 2.18. Modèle complexe 2

Et ayant lui-même une fiabilité de:

$$R_{s2} = \prod_{i=1}^2 (1 - \prod_{j=1}^2 (1 - R_{ij})) \quad (2.43)$$

$$= (1 - (1 - R_1)(1 - R_3))(1 - (1 - R_2)(1 - R_4))$$

Selon la relation du système complexe parallèle/série, comme le système ne peut pas être dans les deux états en même temps, nous avons affaire à une probabilité disjointe soit la somme des densités auxquelles nous devons associer les autres composants. Dès lors nous avons:

$$R_s = (1 - R_5) \cdot R_{s1} + R_5 \cdot R_{s2}$$

Nous pouvons alors à l'aide de l'ensemble des 5 topologies précédentes faire une évaluation de la fiabilité d'un système quelconque.

2.9. Approche par Arbres de défaillances AdD

2.9.1. Définition

L'arbre de défaillance AdD est une technique purement déductive. Un AdD représente un mode de défaillance d'un système en fonction des modes de défaillance de ses sous-systèmes et composants. Le terme "arbre de défaillance" est quelque peu restrictif ; par exemple, nous sommes conduits à parler d'AdD dual qui, en principe, représente le bon fonctionnement d'un système (dans le cas des systèmes binaires). Barlow et Proschan [106] utilisent le terme "arbre d'événements" ("event tree" et non "fault tree") pour désigner un AdD

La méthode des arbres de défaillances permet une analyse « déductive » des causes techniques ou opérationnelles pouvant provoquer des situations contraire à un objectif spécifié, en particulier, la sécurité (*situation redoutée*) ou de disponibilité (*événement indésirable*). On dit que la méthode est déductive car elle permet d'identifier les causes à une situation.

Il s'agit d'une méthode de type booléen :

- Cette situation pourrait bien arrivée si cette opération était exécutée et si ce défaut survenait de manière accidentelle,

- Cet événement pourrait tout à fait survenir si ce contrôle n'était pas réalisé en temps utile ou si cette défaillance du système n'était pas réparée suffisamment vite.

Cette analyse déductive est de nature « *du haut vers le bas* » « *Top-Down* » c'est adire en partant de l'évènement redouté, on recherche pas à pas les événements qui peuvent être la cause, de l'évènement le plus générale pour aller aux événements élémentaires. Ces événements c'est la séquence d'évènements internes ou externes au produit. Parmi ceux-ci figurent les défauts du produit.

2.9.2. Conduite de la méthode

La méthode est plus particulièrement bien adaptée aux événements combinatoires comme le cas de la figure 2.20. Elle devient cependant délicate à mettre en œuvre quand il s'agit

d'évènements séquentiels. Elle peut se mettre en œuvre en suivant les étapes principales suivantes :

- définir les situations indésirables à étudiées,
- définir les combinaisons qui conduisent à cette situation,
- construire l'arbre en utilisant les opérateurs logiques (« ET », « OU », ...),
- rechercher les coupes minimales (les chemins les plus courts conduisant dans l'arbre à la situation indésirable).

2.9.3. Exemple :

Considérant le modèle dans la figure 2.19, il s'agit d'un système composé de trois sous système en série. L'arbre de défaillance de ce système est apparaitre dans la figure 2.20.

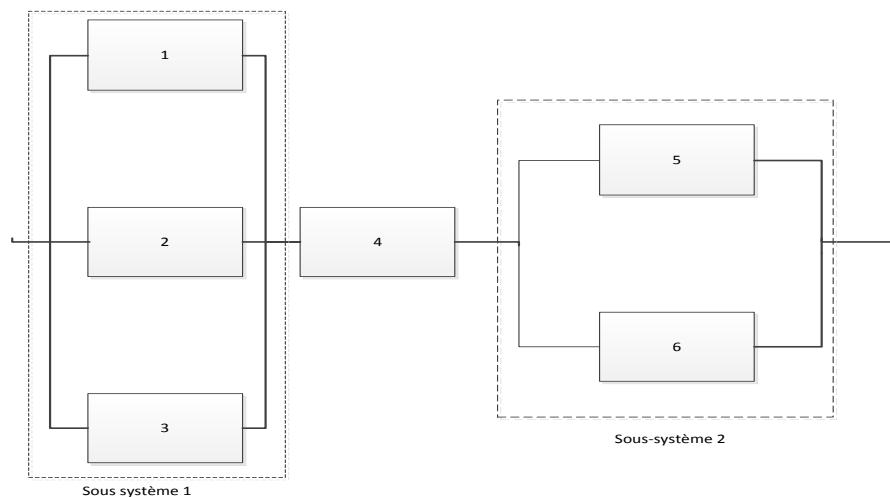


Fig. 2.19. Blocs diagramme de fiabilité

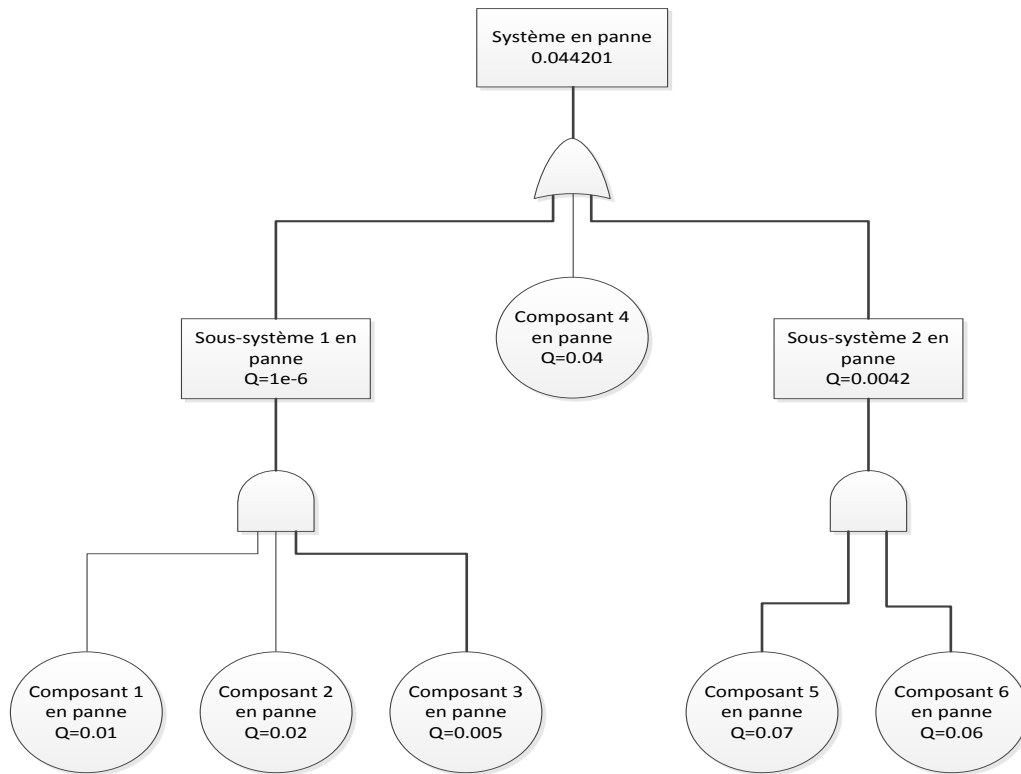


Fig. 2.20. Arbre de défaillance

2.10. Approche par AMDEC

2.10.1. Définition

AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leur Effets et de leur Criticité) est un outil conçu pour évaluer les défaillances associés aux différents modes dans lesquels un composant ou un système peut tomber en défaillance, identifie les effets de ces défaillances, fournit une structure pour réviser la conception afin d'atténuer les risques le cas échéant. Cet outil permet d'analyser systématiquement les dysfonctionnements potentiels d'un composant ou d'un système visant à recenser, puis à évaluer les défaillances d'un système[92]

2.10.2. Terminologie

Afin de comprendre précisément le fonctionnement de l'AMDEC et d'assurer la meilleure application possible, il est important de connaître les notions suivantes :

a. Mode de défaillance

Un mode de défaillance est la manière par laquelle un dispositif peut venir à être défaillant, c'est-à-dire à ne plus remplir sa fonction. Le mode de défaillance est toujours relatif à la fonction du dispositif. Il s'exprime toujours en termes physiques.

b. Cause de défaillance

Une cause de défaillance est l'événement initial pouvant conduire à la défaillance d'un dispositif par l'intermédiaire de son mode de défaillance. Plusieurs causes peuvent être associées à un même mode de défaillance. Une même cause peut provoquer plusieurs modes de défaillance.

c. Effet de la défaillance

L'effet d'une défaillance est, par définition, une conséquence subie par l'utilisateur. Il est associé au couple (mode-cause de défaillance) et correspond à la perception finale de la défaillance par l'utilisateur.

d. Mode de détection

Une cause de défaillance étant supposée apparue, le mode de détection est la manière par laquelle un utilisateur (opérateur et/ou mainteneur) est susceptible de détecter sa présence avant que le mode de défaillance ne se soit produit complètement, c'est-à-dire bien avant que l'effet de la défaillance ne puisse se produire.

e. Criticité

La criticité est une évaluation quantitative du risque (figure 2.21) constitué par le scénario (mode-cause-effet-détection) de défaillance analysé. La criticité est évaluée à partir de la combinaison de trois valeurs:

- O: la probabilité d'occurrence de chaque cause
- G: la gravité de l'effet ;
- D: la possibilité de détection de la couple mode-cause.

Où $C=O.G.D$

Cette évaluation se fait suivant le plan dans la figure suivante :

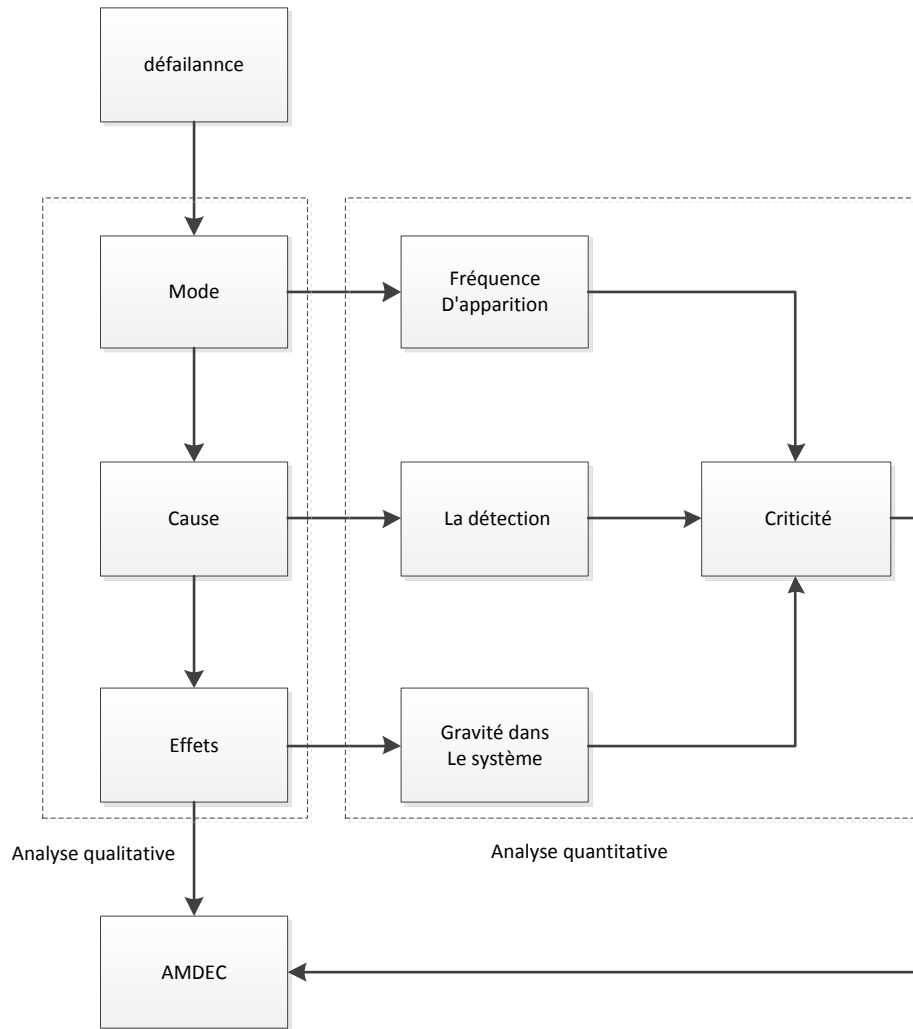


Fig. 2.21. Déroulement de l'AMDEC

Etapes de l'élaboration de l'AMDEC:

- Identifier les modes de défaillance
- Identifier les effets de ces modes sur le système
- Evaluer la gravité de ces effets sur le système (G)
- Identifier les causes de chaque mode de défaillance
- évaluer la probabilité d'occurrence de chaque cause (O)
- évaluer la détectabilité de chaque mode / cause (D)
- Calculé la criticité (numéro de priorité du risque)
Où $C = O \cdot G \cdot D$
- Action recommandé sous forme d'un plan de maintenance puis réévaluer les risques pour s'assurer que l'objectif a été atteint utiliser la conception pour classer les défaillances à haut risque ou très critiques

En pratique, l'AMDEC est représentée sous forme d'un tableau (tableau 2.9) rassemblant les principaux modes de défaillance, causes, effets, criticité et moyen de détection. Il est souvent croisé avec la liste des éléments critiques, qui est réactualisée en conséquence.

Tab.2.6. Exemple de cotation de la gravité, de la détectabilité et de la probabilité d'occurrence

la gravité G		la détectabilité D		La probabilité occurrence O		
mortel	5	non détectable	5	très haut	2 fois par an	5
dangereux	4	moins de chance a détecté	4	haut	1 fois par an	4
modéré	3	modéré	3	modéré	0.5 fois par an	3
faible	2	détectable	2	faible	0.25 fois par an	2
aucun	1	très détectable	1	très faible	moins de 0.25	1

2.10.3. Exemple :

L'élaboration d'un tableau AMDEC (Tableau 2.9) d'un système électrique constitué d'un Transformateur, Jeux de Barres, Sectionneur et Disjoncteur

Tab. 2.9. Fiche AMDEC

Composant	fonction	Mode de défaillance	Effet de défaillance	Cause de défaillance	Mode de détection	G	O	D	C	Actions recommandé
Transformateur	Transformé la tension électrique 60Kv/30kv	Tension réduit au secondaire	Alimentation perturbé	-court-circuit entre les spires de bobine	outils de mesure	2	3	1	6	Action corrective

Jeux de Barres	Distribuer l'énergie électrique	Pas d'énergie	Pas d'alimentation	Un mauvais serrage	Visuelle	3	1	4	12	Action préventive
Sectionneur	L'isolement et le déclenchement visuel de l'équipement	Ne fonctionne pas	-Pas d'alimentation -pas d'isolation	-verrouillage mécanique défaillant -blocage du manette de commande de position ouvert -défaillance du ressort de contact -effet des forces-fusible grillé	Visuelle	1	5	2	10	remplacement du fusible ou du sectionneur
Disjoncteur	Interrupteur automatique de protection	Refus d'ouverture	Pas de protection	-Collage mécanique -La partie commande ne fonction pas	Visuelle	1	2	2	4	Action corrective
		Refus de fermeture	Pas d'alimentation							

Classification des éléments suivant la criticité :

Les éléments du système sont regroupés dans le tableau 2.10 ci-dessous par ordre croissant suivant leur criticité afin d'agir en priorité tout en engageant des actions correctives et préventives appropriées.

Tab. 2.10. Classification des éléments la criticité

éléments	criticité
Disjoncteur	4
Transformateur	6
Sectionneur	10
Jeux de Barres	12

Comme action préventive on peut agir sur le mode de détection pour les éléments dont la criticité dépasse le seuil critique de criticité préalablement détermine afin de minimisé le risque de tombe en panne.

2.11. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la théorie de modélisation, d'estimation et de validité de la fiabilité et aux différentes approches de maintenance, montrant d'une manière générale toutes les descriptions possibles de la modélisation mathématique de la fiabilité des systèmes, l'approche expérimentale MBF qui se base sur l'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité AMDEC, les blocs diagramme de fiabilité RBD et les arbres de défaillance AdD dans le but de les utiliser dans notre étude.

Chapitre 3

Techniques d'optimisation par les méta-heuristiques

3.1. Introduction

Les algorithmes méta-heuristiques ont été conçus essentiellement de ressoudre les problèmes d'optimisation complexe. Grâce à sa flexibilité et son caractère stochastique en recherche, ces algorithmes ont été appliqués avec succès sur un grand nombre de problèmes. Les méta-heuristiques sont souvent simuler de processus réels (biologie, physique, ...) de tel façon a proposé les solutions possibles, puis elles font évoluer ces dernières afin de rapprocher de l'optimum en fonction de l'objectif. Les algorithmes méta-heuristiques sont nombreux, parmi lesquelles, nous intéressons dans cette thèse par GA, SA, PSO et LFA, on a adapté ces algorithmes au problème d'optimisation de la maintenance, en comparant ses performances en terme de trouver l'optimum.

3.2. L'algorithme du recuit simulé (RS)

Recuit simulé ou " Simulated Annealing (SA)" en anglais, est une méthode d'optimisation de recherche locale proposée la première fois par Kirkpatrick et al. [61]. Son idée inspirée du processus de traitement thermique des métaux qui s'appelle recuit.

3.2. 1. Description

En métallurgie, Le recuit consiste à chauffer et refroidir un métal pour modifier ses propriétés physiques en raison des modifications de sa structure cristallin [62, 64]. Le refroidissement lente conduit à former une nouvelle structure (ou les atomes forme des nouvelles liaisons), pour avoir la configuration visé, il faut que le processus de refroidissement doivent être contrôlé de tel sort à atteindre un état d'énergie minimale qui correspond à une structure plus stable du métal [63, 64].

3.2. 2. Algorithme RS

Au fur et à mesure que l'optimisation progresse, la température est réduite suivant un processus de refroidissement, à chaque itération, une position aléatoire est générée au voisinage de la meilleure position actuelle. Si la valeur de la fonction objective est inférieure à sa meilleure valeur actuelle, alors la position est acceptée et mettre à jour la meilleure actuelle. Si la valeur de la fonction objective est supérieure à la meilleure actuelle, la position est parfois acceptée et parfois rejeté tout dépend la valeur de la fonction densité de probabilité (PDF) de la distribution de Boltzmann. Si le PDF supérieure à un nombre aléatoire entre 0 et 1, alors la position candidat est acceptée comme la meilleure solution même si sa valeur de la

fonction objective est supérieure à la meilleure actuelle ; cette stratégie a pour objet d'éviter d'être piégé à une position minimum locale comme il est montré dans la figure 3.1.

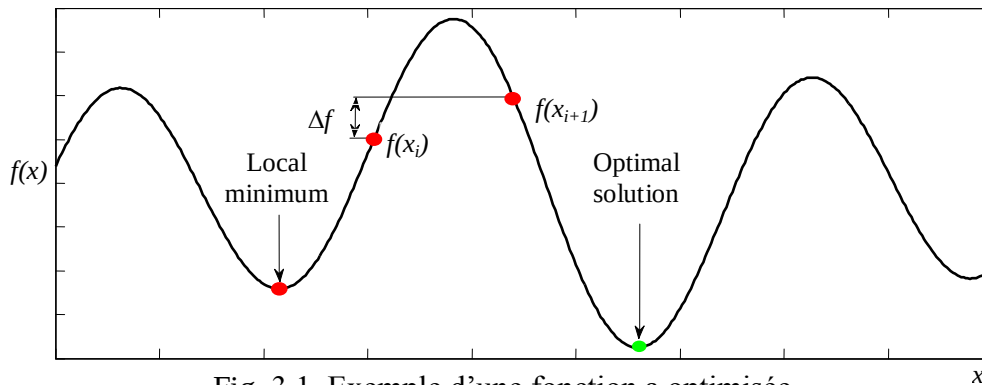


Fig. 3.1. Exemple d'une fonction à optimisée

La fonction PDF de la distribution de Boltzmann est donnée par la relation suivante :

$$P(t) = \exp\left(-\frac{\Delta f(t)}{kT}\right)$$

Où $f(t)$ est la configuration de l'énergie, k est la constante de Boltzmann, et T est la température [58,59]. Dans notre cas, on utilise le processus de refroidissement donnée la relation suivante :

$$T_{it+1} = T_{it} * T_f$$

Ce type de refroidissement s'appelle refroidissement géométrique ou T_{it+1} , T_{it} et T_f sont respectivement la température à l'itération actuelle, l'itération précédente et le taux de refroidissement.

Pour accélérer la recherche dans cet algorithme les auteurs [59], propose de créer plusieurs voisins au lieu d'un seul, ça nous permet de diversifier le choix du voisin

Le pseudo code adopté pour un problème de minimisation d'une fonction objective est le suivant :

Pseudo code

Début

Générer aléatoirement une solution initiale s dans l'espace de recherche

Évaluer la fonction objective $f(s)$

Mettez $f_{best} = f(s)$ et $s_{best} = s$

$T = T_0$; (T_0 : Température initiale)

T_f : taux de refroidissement

Tant que (le critère d'arrêt n'est pas satisfait) **faire**

 Engendrer aléatoirement N voisin de s

 Prendre le meilleur voisin s_i de s en fonction de l'objectif

```

Calculer  $\Delta f = f(s_i) - f(s)$ 
Si  $\Delta f < 0$  Alors
     $s \leftarrow s_i$ 
    Sinon si  $\exp\left(-\frac{\Delta f}{T}\right) > rand$  Alors
         $s \leftarrow s_i$ 
    Fin si
Fin si
Si  $f_{best} > f(s)$ 
     $s_{best} \leftarrow s$ 
     $f_{best} = f(s_{best})$ 
Fin si
 $T \leftarrow T * T_f$ 

```

Fin tant que

Fin

3.3. L'algorithme génétique (GA)

Cette algorithme est une méthode d'optimisation évolutionnaires ont été développés a la première fois par John Holland [65].

3.3.1. Description

Son idée inspirée de la génétique et de l'évolution naturelle d'être vivant: sélection, croisements, mutations, etc. Dans une population, seuls les individus les mieux adaptés ont une descendance à laquelle ils transmettent leurs gènes. L'espèce s'est ainsi améliorée par croisement en fils pendant des générations et aussi par des phénomènes de transfert de gènes [65, 66]. Un algorithme génétique recherche l'optimum en fonction de l'objectif définie sur un espace de recherche donnée. Pour l'utiliser, on doit connaître les terminologies suivantes :

- 1- Le codage c'est le premier pas de l'algorithme génétique, on associe à chacun des points de l'espace de recherche à une structure de données. On note trois types de codage : le codage binaire, codage réel et le codage en base de n.
 - Codage binaire : le gène prendre deux valeurs de 0 et 1, une chaîne de gènes formé un chromosome (ou individu) par la conversion en décimal on obtient la valeur réel, ça nous offre la facilité de mise en point aux opérateurs de l'algorithme mais pose le problème de dégradation de la performance de l'algorithme devant les problèmes d'optimisation de grande dimension à haute précision.
 - Codage réel : le gène prendre directement une valeur réelle, ça nous offre flexibilité de donner une plus grande marge de valeurs possibles et rapidité d'évaluation des individus, cette option parmi les conditions de succès de l'algorithme.

- 2- Un mécanisme de génération de la population initiale (figure 3.2) qui doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures
- 3- Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur appelée fonction objective de l'individu.
- 4- Des opérateurs de sélection, de croisement et de mutation permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace de recherche pour rapprocher de l'optimum au maximum.
 - Sélection : seul les individus forts a la chance de se reproduire et transmettent à leur enfants ses gènes. Il existe plusieurs techniques de sélection, les principales utilisées sont la sélection par tirage à la roulette, la sélection par tournoi, la sélection par rang,
 - Croisement : grâce à l'opérateur de croisement, une nouvelle génération produite cet opérateur combine les caractéristiques des paires d'individus parents préalablement sélectionnés, et génère les individus enfants. Là encore, il existe de types de croisement pour le codage binaire ; le croisement en un point, le croisement multipoints. Pour le codage réel on a le croisement uniforme : si on a deux chromosomes C_1 et C_2 sont sélectionnés d'être parents de deux enfants E_1 et E_2 qui se fait par combinaison linéaire suivant:

$$E_1 = \alpha C_1 + (1 - \alpha)C_2$$

$$E_2 = \alpha C_2 + (1 - \alpha)C_1$$

Où α est un coefficient de pondération aléatoire adapté au domaine d'extension des chromosomes.

- 5- Mutation : on change aléatoirement un gène ou plus dans le chromosome selon l'opérateur de mutation pour diversifier au maximum les individus enfants.
- 6- Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total d'itérations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.
- 7- Élitismes : il s'agit de regrouper la population précédente avec celle produite, puis construire une nouvelle population contiens que les individus les plus performants.

Dans le codage réel, un chromosome représente un individu solution (figure 3.2) ou chaque chromosome formé de combinaison de gènes qui sont des nombres réel.

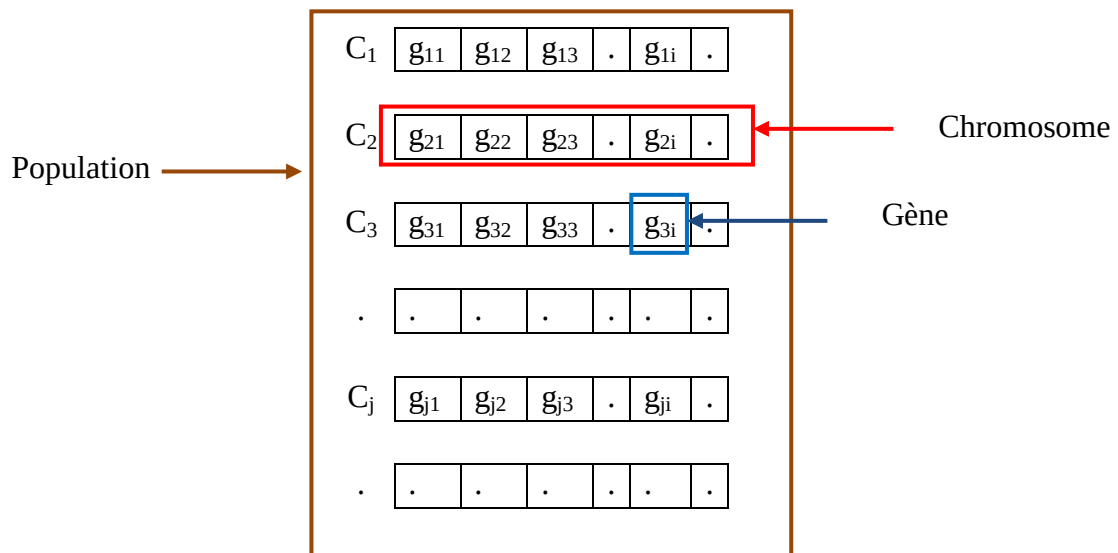


Fig. 3.2. Population d'individus

3.3.2. Algorithme (AG)

Les démarches du fonctionnement d'un algorithme génétique est fait suivant le pseudo code dessous

Pseudo code

Début

Générer une population initial de n individu,

Évaluer la fonction objective de chaque individu

Tant que (critère d'arrêt n'est pas satisfait) **faire**

 Sélection (que les individus forts sont sélectionnés)

 Croisement (Ici, nouvelle génération produite)

 Mutation (processus aléatoire ou un gène ou plus change sa valeur pour diversifier les solutions)

Évaluer la fonction objective de nouvelle population puis prendre le meilleur individu

Choisir la nouvelle population en utilisant l'élitisme

fin Tant que

Fin

3.4. L'optimisation par essaim particulaire (OEP)

L'algorithme OEP ou " Particle Swarm Optimization (PSO)" en anglais, est une méthode d'optimisation évolutionnaires proposée la première fois en 1995 par Kennedy et Eberhart [67, 68].

3.4. 1. Description :

OEP s'inspire du comportement social d'oiseaux évoluant en essaim (figure 3.3), l'intelligence collective de l'essaim permettant de trouver la meilleure position de nourriture.

En optimisation à base de population (essaim) des particules ou chaque position représente une solution potentielle au problème d'optimisation [69]. En évoluant itérativement ces mouvements afin de trouver l'optimum de la fonction objectif.



Fig. 3.3. Une volée d'oiseaux dans la nature [70]

3.4.2. Modélisation du mouvement

Grâce à la collaboration des particules de l'essaim, le mouvement des particules très simples (dans l'espace de recherche), les particules peuvent converger progressivement vers un minimum local. La figure 3.4 explique le principe de déplacement:

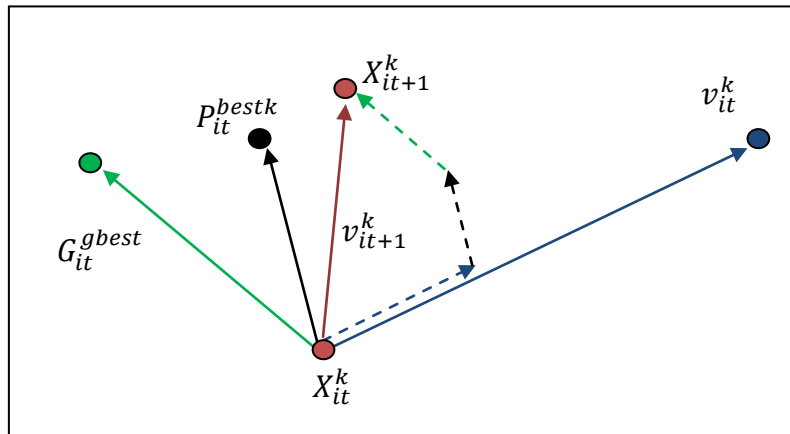


Fig. 3.4. Principe de déplacement d'une particule

Le déplacement d'une particule est donné par les relations suivantes:

$$v_{it+1}^k = w \cdot v_{it}^k + c_1 \cdot rand_1 \cdot (p_{it}^{bestk} - X_{it}^k) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (G_{it}^{gbest} - X_{it}^k) \quad (3.1)$$

$$X_{it+1}^k = X_{it}^k + v_{it+1}^k \quad (3.2)$$

Ou:

v_{it}^k : Vitesse de la kème particule dans l'itération it

X_{it}^k : Position de la kème particule dans l'itération it

c_1, c_2 : Constantes cognitives et sociales de OEP

w : Poids inertiel de OEP

$\text{rand}_{1,2}$: Nombres aléatoires entre 0 et 1

P_{it}^{kbest} : Meilleure position de la kème particule à l'itération it

G_{it}^{best} : Meilleure position dans l'essaim à l'itération it

Le poids d'inertie w prendre divers stratégies telles que le poids d'inertie constants, aléatoires, linéaires décroissants, etc. est utilisé pour réguler la vitesse de particule. La stratégie de poids d'inertie décroissante linéaire a été adoptée dans ce travail car elle fournit des résultats optimaux avec une meilleure précision de convergence [69, 71],

Pour ce la, le poids inertiel w de OEP linéaires décroissants de valeur initiale w_{ini} a une valeur finale w_{fin}

Peut-être varie d'une façon linéaire avec la relation :

$$w = w_{ini} - ((w_{ini} - w_{fin}) \frac{it}{Maxit})$$

où w_{ini} , w_{fin} , it et $Maxit$ sont respectivement la valeur initiale, finale de w , l'itération actuelle et le nombre maximum d'itération.

3.4.3. Algorithme (OEP)

Pseudo code

Début

Définir les paramètres de l'algorithme

Initialisez une population de n particules avec des positions et des vitesses distribués aléatoirement dans l'espace de recherche.

Évaluer les positions x^k de particules par la fonction objective $f(x^k)$, pour $k = 1, 2, \dots, n$.

Mettre la meilleure position de chaque particule $P^{kbest} = x^k$

Mettre la meilleure position de l'essaim G^{best}

Tant que (le critère d'arrêt n'est pas satisfait) **faire**

Pour $k = 1$ à n

 Mettre à jour la vitesse et la position de particule k en utilisant les équations 3.1 et 3.2

Si $f(x^k) < f(P^{kbest})$

 Mettre à jour $P^{kbest} \leftarrow x^k$

Fin si

Si $f(P^{kbest}) < f(G^{best})$

 Mettre à jour $G^{best} \leftarrow P^{kbest}$

Fin si

Fin pour

Fin tant que

Fin

3.5. L'algorithme des lucioles (FA)

L'algorithme de luciole ou " firefly algorithm (FA)" en anglais, est une méthode d'optimisation évolutionnaires proposée par Xin-She Yang [72, 73]. Son idée inspirée du clignotement et l'attractivité de la communauté des lucioles dans la nature (figure 3.5).

3.5. 1. Description

Le but principal du flash d'une luciole est d'agir comme un système de signalisation pour attirer d'autres lucioles. Les femelles peuvent imiter les signaux lumineux d'autres espèces afin d'attirer les mâles qu'elles capturent et dévorent. Les lucioles ont un mécanisme de type condensateur, qui se décharge lentement jusqu'à ce que certain seuil est atteint, ils libèrent l'énergie sous forme de lumière. Le phénomène se répète de façon cyclique.



Fig. 3.5. Lucioles dans la nature [78]

Xin-She Yang [72, 73] a formulé cet algorithme en supposant les règles suivantes:

- 1- Toutes les lucioles sont unisexuées, de sorte que chaque luciole sera attirée par toutes les autres lucioles;
- 2- L'attrait est proportionnel à leur luminosité, et pour deux lucioles, la moins brillante sera attirée par la plus brillante; cependant, l'intensité (luminosité) diminue à mesure que leur distance mutuelle augmente;
- 3- S'il n'y a pas de lucioles plus brillantes qu'une luciole donnée, elle se déplacera de manière aléatoire.

La luminosité des lucioles est la fonction objectif que nous allons optimiser.

3.5. 2. Modélisation du mouvement

Dans l'algorithme des lucioles, il faut connaître les notions suivantes:

- Intensité de lumière :

Dans le cas d'optimisation, la luminosité, ou l'intensité lumineuse d'une luciole à un endroit particulier x peut être choisie comme

$$I(x) \propto f(x)$$

$$I = I_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}$$

- **Attractivité :**

Dans l'algorithme des lucioles, l'attractivité est proportionnelle à la luminosité vue par les lucioles voisines. La fonction d'attractivité peut écrire sous la forme :

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}$$

Où r_{ij} est la distance entre la luciole y^i et y^j , β_0 est l'attractivité à $r_{ij} = 0$ et γ est un coefficient d'absorption lumineuse.

Pour déterminer la vitesse de la convergence.

- **Distance :**

La distance entre lucioles y^i et y^j peut-être la distance cartésienne comme suit:

$$r_{ij} = \|y^i - y^j\|$$

$$r_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_k^i - x_k^j)^2}$$

Où x_k^i est la k ème composant de la i ème luciole.

- **Mouvement :**

Le mouvement d'une luciole i vers une autre luciole plus brillante j est donné par la relation suivante:

$$y_{it+1}^i = y_{it}^i + \beta(y_{it}^j - y_{it}^i) + \alpha \cdot \varepsilon \quad (3.3)$$

Où le second terme de l'équation est due à l'attraction tandis que le troisième terme est la randomisation, α est le paramètre d'échelle pour contrôler la taille du pas et ε est un générateur de nombre aléatoire uniformément distribuée dans $[0, 1]$

3.6. L'algorithme (LFA : Lévy-flight firefly algorithm)

Les LFA ont été développés par Xin-She Yang en 2010 à l'Université de Cambridge [73]. Cet algorithme c'est l'algorithme original de FA régie par le vol de Lévy [72].

3.6.1. Vol de Lévy (Lévy-flight)

Le vol Lévy a été introduit par le mathématicien français Paul Lévy [76, 77]. Le vol Lévy est une description statistique du mouvement qui va au-delà du mouvement brownien plus traditionnel. Paul Levy a généralisé au-delà du mouvement brownien [77] en considérant d'autres distributions pour les quelles N sauts partagent la même forme mathématique.

Ces distributions de prélèvement diminuent selon la loi de puissance (power law) $l = x^{-1/\gamma}$ pour valeurs de x où γ est compris entre 0 et 3. Le mouvement d'un élément du groupe en cherchant de sa nourriture peut être aléatoire pour trouver le meilleur site ciblé. Nous pouvons modéliser le mouvement résultant qui peut être décrit quantitativement comme une liste de sites visités dans un ordre séquentiel (temporel). La figure 3.6 suivante nous donne une image sur un mouvement aléatoire avec (un pas de marche stable avec une direction aléatoire).

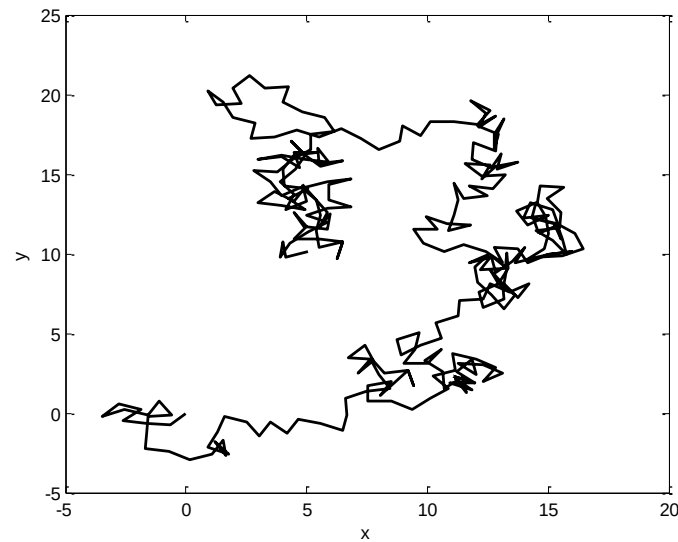


Fig. 3.6. Marche aléatoire à 2D avec 100 pas

D'autre part, un mouvement aléatoire à pas variante qui peuvent être suivis les marches aléatoires de Lévy (L). La figure 3.7 suivante nous donne une image sur un mouvement aléatoire de Lévy (L)

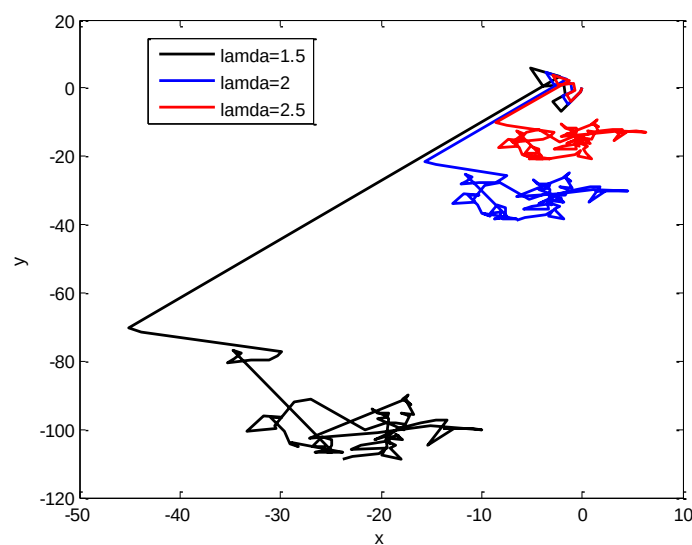


Fig. 3.7. Marche aléatoire de Lévy à 2D avec 100 pas

3.6. 2. Modélisation du mouvement

En combinant les mêmes règles de FA avec les caractéristiques des vols de Lévy détaillées dans le paragraphe précédent, le mouvement d'une luciole i vers une autre luciole la plus brillante j est donné par:

$$y_{it+1}^i = y_{it}^i + \beta(y_{it}^j - y_{it}^i) + \alpha \cdot \varepsilon \cdot \text{sign}(\text{rand} - 0.5) \cdot \text{Lévy} \quad (3.4)$$

Lévy : Distribution de Lévy qui vient sous la forme $\text{Lévy} \sim u = it^{-z}$, avec $1 \leq z \leq 3$

$\text{sign}(\text{rand} - 0.5)$: essentiellement pour fournir un signe ou une direction aléatoire tandis que la longueur de pas aléatoire est tirée d'une distribution de Lévy ou rand c'est un nombre aléatoire entre 0 et 1

On a adopté que le paramètre α de LFA peut être diminué linéairement de valeur initiale α_{ini} à valeur finale α_{fin} avec le progresse de l'optimisation.

3.6. 3. Algorithme (LFA)

L'optimisation dans cet algorithme se fait selon le pseudo code suivant :

Pseudo code

Début

Définir les paramètres de l'algorithme

Générer aléatoirement une population initiale de lucioles, x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)

Évaluer la fonction objective $f(x_i)$

Tant que (le critère d'arrêt n'est pas satisfait) **faire**

Pour $i = 1$ à n

Pour $j = 1$ à n

Si $f(x_j) < f(x_i)$

 Déplacer la luciole i vers j en utilisant l'équation (3.4)

Fin si

 Varie l'attractivité avec la distance r

Fin pour

Fin pour

Évaluer les nouvelles positions de lucioles

Classez les lucioles puis trouver la meilleure actuelle.

Fin tant que

Fin

3.7. Conclusion

Les méta-heuristiques sont des algorithmes visant à résoudre des problèmes d'optimisation complexes, ils utilisent généralement des règles intelligentes pour explorer et exploiter efficacement l'espace de recherche afin de rapprocher vers l'optimum, mais aussi ils partagent les mêmes inconvénients telle que l'initialisation, le réglage de paramètres, le critère d'arrêt et le temps de calcul (souvent élevé). Dans ce chapitre, plusieurs algorithmes sont présentés en montrant leurs mécanismes de recherche, leurs paramètres ainsi que leurs implémentations, et ce afin de résoudre notre problème qui est l'optimisation du coût de maintenance dans les réseaux électriques.

Chapitre 4

Sûreté de fonctionnement des réseaux électriques: exemples d'applications

4.1. Introduction

La sûreté de fonctionnement d'un réseau électrique est définie comme étant l'aptitude à assurer l'état normal de fonctionnement du réseau tout en limitant le nombre d'incidents et réduisant leurs conséquences lorsqu'elles se produisent

La sûreté de fonctionnement des réseaux électriques consiste à maîtriser l'évolution et les réactions du réseau face aux différents aléas. Elle représente une action de réduction de risques et, par voie de conséquences, du coût à l'achèvement. Elle s'exerce donc essentiellement pendant les premières phases des projets, jusqu'à la mise en production. Cette démarche est une partie de la démarche générale qui, depuis quelques années, est mise en œuvre pour contrôler la fabrication d'un produit ou d'un instrument donné, que l'on désigne sous le nom d'Assurance Produit. [18, 85]

Après avoir introduire dans ce chapitre les phases chronologiques de réalisation d'une étude SdF des réseaux électriques, la notion de risque et l'organigramme général de la séquence de simulation de Monte Carlo, nous allons donner quelques exemples d'applications des différentes méthodes de modélisation et de simulation exposés aux chapitres précédents, ainsi que l'expérimentation de l'approche MBF des réseaux de transport dans le monde.

4.2. Les phases chronologiques de réalisation d'une étude de la SdF

Pour réaliser une étude *SdF* il faut faire une recherche qualitative et/ou quantitative de tous les points faibles du réseau électrique, et voir l'impact de la politique de maintenance adoptée sur son coût et sur ses performances.

Quel que soit le besoin exprimé par le concepteur ou l'exploitant d'un système, le déroulement de l'étude de sûreté comporte les phases suivantes qui sont illustrées par la Figure 4.1 : [86]

- expression et analyse du besoin ;
- analyse fonctionnelle du système ;
- analyse des modes de défaillances ;
- recherche de données ;
- modélisation.

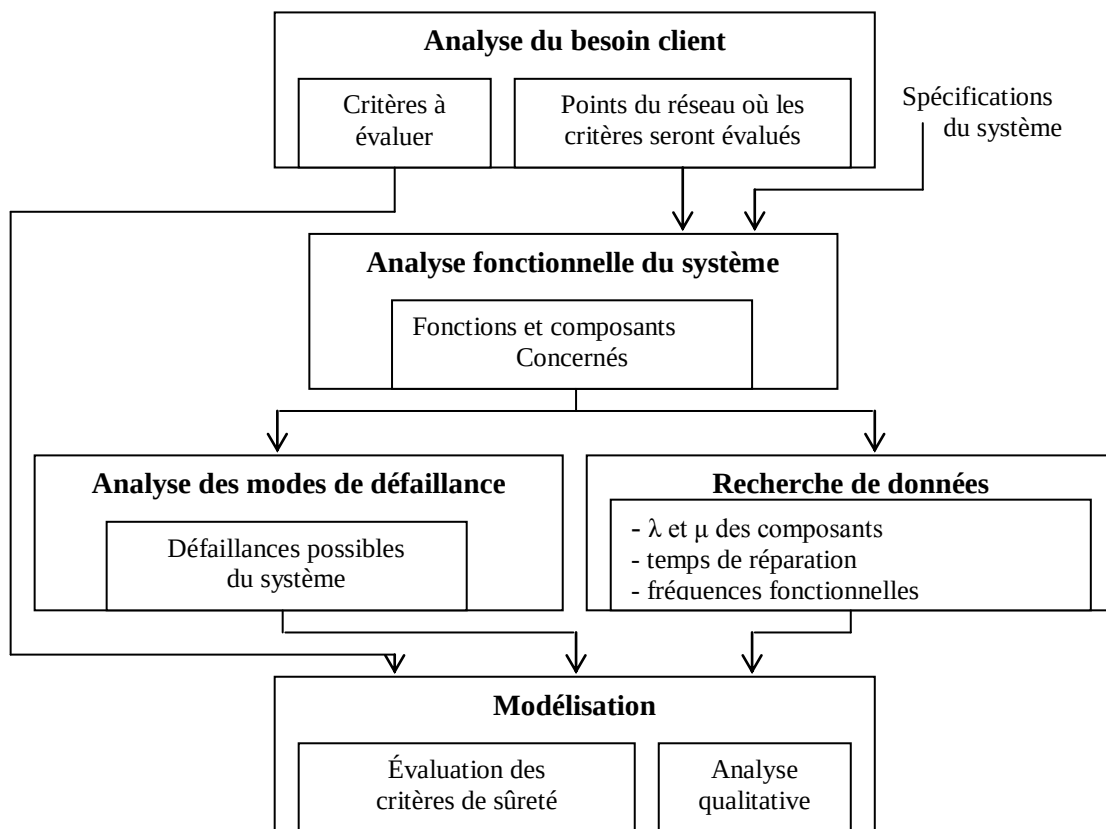


Fig. 4.1. Les phases chronologiques de réalisation d'une étude de la SdF [86]

4.2.1. Expression et analyse du besoin

Les coupures d'électricité sont de moins en moins tolérables et les pertes qu'elles causent aux clients sont devenues inacceptables. Aujourd'hui, le client exige, non seulement la qualité de l'énergie électrique, mais et surtout la disponibilité accrue du système d'alimentation électrique. Les défaillances au niveau des postes peuvent occasionner la perte de plusieurs ouvrages de production et de transport d'électricité et conduire à des incidents redoutés. D'où la nécessité d'une politique de maintenance optimale et durable qui s'adapte le mieux aux besoins de l'exploitant et du client en terme de performances technico-économiques (*coût d'investissement et d'exploitation, continuité de service et qualité*). Le formalisme d'expression du besoin consiste à classer les divers récepteurs en fonction du temps de coupure qu'ils peuvent supporter (*aucun, quelques secondes, quelques minutes, quelques heures*)[86].

4.2.2. Analyse fonctionnelle du réseau de transport

L'analyse fonctionnelle constitue l'étape indispensable pour l'étude de la sûreté de fonctionnement d'un tel système. Elle permet, grâce à une très bonne prise de connaissance de l'ensemble des facteurs matériels, humains et environnementaux, de rendre l'étude de la

sûreté de fonctionnement plus pertinente et plus fiable. Pour cela, deux descriptions peuvent être envisagées : une analyse externe (*approche fonctionnelle*) et une analyse interne (*approche comportementale : temporelle et matérielle*).

4.2.2.1. Analyse externe ou approche fonctionnelle

Cette étape concerne une partie de notre travail dans ce mémoire c'est-à-dire modélisé la gestion de la maintenance des réseaux de transport d'électricité en utilisant le modèle *SADT*. Lors de cette phase, on doit définir avec précision les situations suivantes :

- situations de vie du réseau ;
- fonctions de service du réseau (*fonctions principales et fonction contraintes*).
-

a. Les situations de vie du réseau

Notre travail est porté sur la situation actuelle et réelle relative au non performance des différents thèmes du service maintenance cités au chapitre I, dont l'objectif est d'améliorer la gestion de la maintenance des réseaux de transport d'électricité.

b. Analyse fonctionnelle externe

Les différentes fonctions de service du réseau sont :

- planification du service maintenance par la *MBF* ou la *MBAF*;
- analyse des défaillances par la méthode *AMDEC*;
- établissement du plan de maintenance adapté ;
- le lancement du projet type ;
- élaboration de la feuille de synthèse ;
- prévoir la performance sur les 4 plans suivants : organisation, coût, efficacité et planification.

Les étapes restantes (*analyse des modes de défaillances, modélisation et calcul ou évaluation des critères de sûreté*) sont intégrées directement dans notre travail.

4.2.2.2. Analyse fonctionnelle interne

Cette phase aborde l'aspect comportemental (*approche temporelle et matérielle*) d'une étude d'un système en se basant sur des outils de traitement temporel comme les blocs diagramme de fiabilité *BDF*, les arbres de défaillances *AdD*, les graphes de Markov *GdM*, les réseaux de pétri *RdP*,...et en fin la matérialisation de ce système étudié.

4.3. Le risque

Pour une compagnie d'assurance la notion de risque correspond au poids (*moral, social, et économique*) des événements redoutés. En ce qui concerne une perte de production, l'estimation du risque est assez simple : le produit de la probabilité d'occurrence par le

coût de l'événement redouté donne une idée assez juste. L'évaluation du risque permet de connaître le prix à payer : perte de bénéfice ou assurance ou installation électrique optimisée [86].

Le risque est caractérisé par une grandeur à deux dimensions nommée « criticité » [85] suivant la figure 4.2 :

- en abscisse : la « sévérité » des effets et des conséquences (*parfois appelée aussi « gravité »*), ce dernier terme ne devant être considéré que comme un terme général.
- en ordonnée : « la probabilité d'occurrence », qui peut être quantifiée.

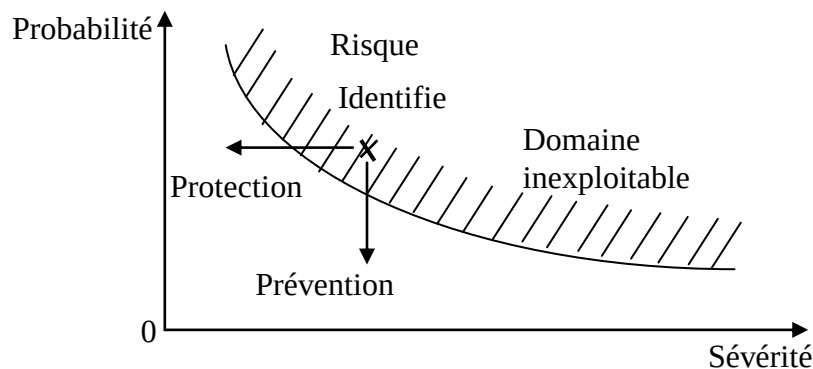


Fig. 4.2. Courbe de risque

Ainsi, la sûreté de fonctionnement s'exerce à la fois sur la prévention et la protection.

4.3.1. Comportement des réseaux électriques

A chaque instant, le système électrique est soumis à divers aléas internes du système comme les variations de la charge, les variations de la capacité de certains moyens de production ou les pannes de composants et aussi aux agressions externes. Ainsi sont créées des perturbations qui peuvent dégrader l'état du réseau et mener éventuellement à une interruption d'alimentation de certaines charges du réseau. Pour assurer la continuité de la fourniture d'énergie, qui représente l'objectif principal du système électrique, il existe plusieurs étages de contrôle pour pouvoir faire face aux aléas indiqués au (§ : 4.3.3):

Un contrôle local, assuré par les automatismes du système comme : Les organes de coupure, qui ont le rôle de mettre hors tension les ouvrages susceptibles d'être endommagés lors d'un incident sur le réseau (*protections des équipements*) ou de déconnecter certaines charges dans différentes situations (*délestage automatique par exemple*). Les réglages automatiques qui assurent l'ajustement de certaines grandeurs telles que la tension et la fréquence.

Un contrôle global, chargé d'appliquer les mesures nécessaires pour respecter les contraintes du système lors de perturbations importantes et d'assurer la continuité d'alimentation des charges. Cette gestion centralisée est effectuée par des opérateurs qui

disposent d'un système performant d'information et de communication appelé *SCADA* (*Supervisor Control and Data Acquisition*) et d'un système d'analyse et d'aide à la conduite appelé *EMS* (*Energie Management System*) [87]. Ceux-ci permettent d'une part de connaître l'état du réseau en temps réel et d'autre part d'agir sur différents éléments : changements de consignes des générateurs, démarrage d'unités supplémentaires, manœuvres d'organes de coupure, réduction ou délestage volontaire de charges, etc. Les moyens de conduite et les manœuvres à effectuer sont différents en fonction du réseau à gérer : transport, répartition ou distribution.

4.3.2. Les problèmes requérant la sûreté de fonctionnement

L'implantation d'un poste électrique est loin de poser les problèmes environnementaux suscités par l'implantation d'une centrale électrique ou d'une ligne à haute tension.

Les problèmes engendrés sont essentiellement :

- **l'esthétique** : les postes électriques utilisant une technologie à isolation dans l'air sont fortement déconseillés en zone urbaine par la surface nécessaire pour implanter les différentes parties qui doivent être isolées entre elles et pour des raisons de sécurité. On préférera des postes à isolation gazeuse installés en bâtiment solution idéale en zone urbaine voir en ville en sous-sol, sinon en espace ouvert la surface est réduite au maximum (*4 à 6 fois moins que pour un isolement en technologie en espace libre*).
- **les nuisances sonores** : les phénomènes de striction dans les transformateurs engendrent un bruit continu ainsi que le bruit des ventilateurs pour les transformateurs de fortes puissances pouvant être gênant pour le voisinage.
- *les nuisances magnétiques* : chaque site doit faire l'objet d'une étude de réduction des champs électromagnétiques résultant des fuites des circuits magnétiques. Les effets de ces fuites sont visibles sur les télévisions ou écrans de *PC* à tube par une légère danse de l'image. Elles doivent toujours être inférieures aux normes $25 \mu T$ pour être sans effet sur la santé.
- **la pollution** (*l'humidité, la salinité, le vent de sable et les intempéries*).
- **la congestion** sur un réseau électrique lorsque les capacités physiques de transit sur certaines lignes sont atteintes. Il n'est donc plus possible d'augmenter les flux et le délestage à cause de la surcharge de la consommation.

Le gestionnaire du réseau doit maintenir, en permanence, l'équilibre entre l'offre disponible et la demande potentielle et assurer le transit de l'énergie depuis les groupes de production jusqu'aux consommations tout en respectant les plages contractuelles de tension et de fréquence et les limites constructives des constituants du réseau.

Les incidents pouvant affecté le fonctionnement du système électrique doivent être maîtrisés pour limiter le malaise occasionné aux utilisateurs du réseau et surtout éviter les phénomènes d'écroulement complet du système.

4.3.3. Modes de dégradation de la sûreté

Le système électrique, par sa nature, est en permanence soumis à différents aléas peuvent être regroupés en quatre familles [16, 18]:

a. Les aléas de consommation

Du fait du caractère non stockable de l'énergie électrique, il faut à tout instant assurer l'adéquation production - transport. Le système est donc piloté par la consommation comme reflet de l'activité économique et sociale du pays, elle se trouve influencée par des multitudes des facteurs dont le principal est d'origine climatique.

b. Les aléas climatiques

Le système électrique est en relation très forte avec l'environnement, Il doit faire face aux agressions du milieu extérieur (*foudre, température, crues ou sécheresses, givre et neige...*) souvent peu prévisible et qui induisent des perturbations importantes.

c. Les pannes et les agressions extérieures

Les composants du système travaillant dans des conditions industrielles sévères, alors que ne sont pas à l'abri des pannes (*défaillance imprévisible d'équipements*) ou d'agressions extérieures, certaines ont des conséquences immédiates, d'autres peuvent rester cachées (*pannes enfermées*) et se dévoiler soudainement lors d'une sollicitation.

d. Les dysfonctionnements liés au facteur humain

Le niveau de performance des composants du système dépend, pour une large part, du facteur humain qui intervient à tous les niveaux : la conception, la mise en œuvre des équipements (*qualité des réalisations, rigueur des essais de mise en service, etc. ...*), l'exploitation et la maintenance (*qualité et rigueur des interventions*). Les conséquences peuvent être immédiates et peuvent se manifester lors d'une sollicitation ultérieure (*erreur de câblage, mauvais réglage, etc. ...*).

La complexité des mécanismes de dégradation des équipements a fait en sorte que la durée de vie de ces derniers a toujours été traitée comme une variable aléatoire. Cet état de fait a encouragé plusieurs entreprises à adopter des approches plutôt réactives, n'étant pas en mesure de justifier économiquement les avantages que peut procurer la mise en place d'une vraie politique de maintenance.

L'absence de données fiables et d'outils efficaces de traitement de ces données a réduit la fonction maintenance à des tâches de dépannage, et par le fait même à une fonction dont

les coûts ne cesse d'augmenter et dont la contribution à l'amélioration de la fonction maintenance n'est pas évidente.

e. Les phénomènes favorisant les pannes

La connaissance intime des machines et équipements permet à la longue de pouvoir prédire les pannes en observant, écoutant, sentant un certain nombre de signes, généralement précurseurs de panne. Il s'agit de :

- l'usure, visible notamment par des limailles, débris, des poussières, du jeu...
- oxydation d'organes, de pièces ou des traces d'oxydation ;
- connexions électriques, mécaniques ou hydrauliques relâchées, défailtantes ;
- vibrations anormales, inhabituelles ;
- fuites de fluides, d'air comprimé...
- échauffements, odeurs ou couleurs particulières et inhabituelles ;
- résultats dégradés; dérive des spécifications des pièces, besoins de réglages fréquents.

Ces signes, le plus souvent discrets, ne sont perceptibles qu'à ceux qui sont proches des machines et observent avec suffisamment d'habitude et de "*compétence*" ; les opérateurs qui les utilisent au quotidien ou des agents de maintenance très présents sur le terrain.

f. Types de défaillances

La défaillance est définie comme étant « *la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise* ». Cette cessation peut être complète (*l'entité ne remplit pas sa mission*) ou partielle (*la mission est assurée dans certaines limites, on parle alors de mode dégradés*). Les défaillances peuvent être momentanées (*indisponibilité du système à remplir sa mission pendant un temps donné, le système revient disponible sans réparation*) ou permanentes (*la défaillance du système est inadmissible et elle peut le rendre dans un état inactive, une maintenance est nécessaire pour remettre le système dans son état d'activité*). Ces défaillances sont caractérisées par:

- **défaillance statique** : le système produit un résultat non correct de manière permanente (*aspects fonctionnels*) ;
- **défaillance dynamique** : le système a un régime transitoire pendant lequel le système produit un résultat faux, puis atteint un régime permanent durant lequel les sorties sont correctes (*aspects temporels*) ;
- **défaillance durable** : le système produit des résultats erronés de manière persistante ;
- **défaillance cohérente ou incohérente** suivant que la perception de la défaillance est identique pour les utilisateurs ou non.

g. La mesure du risque

Le risque est évalué par l'analyste (*la fonction analyste peut être partagée entre le chef de projet, l'ingénieur système et le RA*) qui estime sa « sévérité » en fonction des conséquences de la défaillance de la fonction considérée, tant pour le système que pour l'expérience. Elle s'exprime par un nombre allant de 1 à 5 :

- « *négligeable* » lorsque la défaillance n'entraîne pas de conséquences,
- « *significative* », pour la perte d'une fonction,
- « *majeur* » lorsqu'il y a perte d'un sous-système,
- « *grave* » quand la conséquence est la perte du dispositif,
- « *catastrophique* » quand il y a perte de l'instrument.

Dans certaines normes, les risques 3 et 4 sont confondus et appelés « critiques ».

Dans l'APR, lorsque l'on détecte qu'une panne peut se produire, on ne prend en compte que sa « sévérité » et non sa probabilité d'occurrence. Cette dernière sera éventuellement évaluée par l'AMDEC. Il peut entreprendre une analyse technique du composant, en tenant compte des conditions de sa fabrication et les probabilités de pannes qui y sont associées.

4.4. Simulation Monte Carlo séquentielle des réseaux électriques

Dans la figure 4.3 nous présentons l'organigramme général de la séquence de simulation de Monte Carlo afin de nous permettre d'évaluer les indices de performances de la sûreté de fonctionnement du réseau électrique. [88, 89]

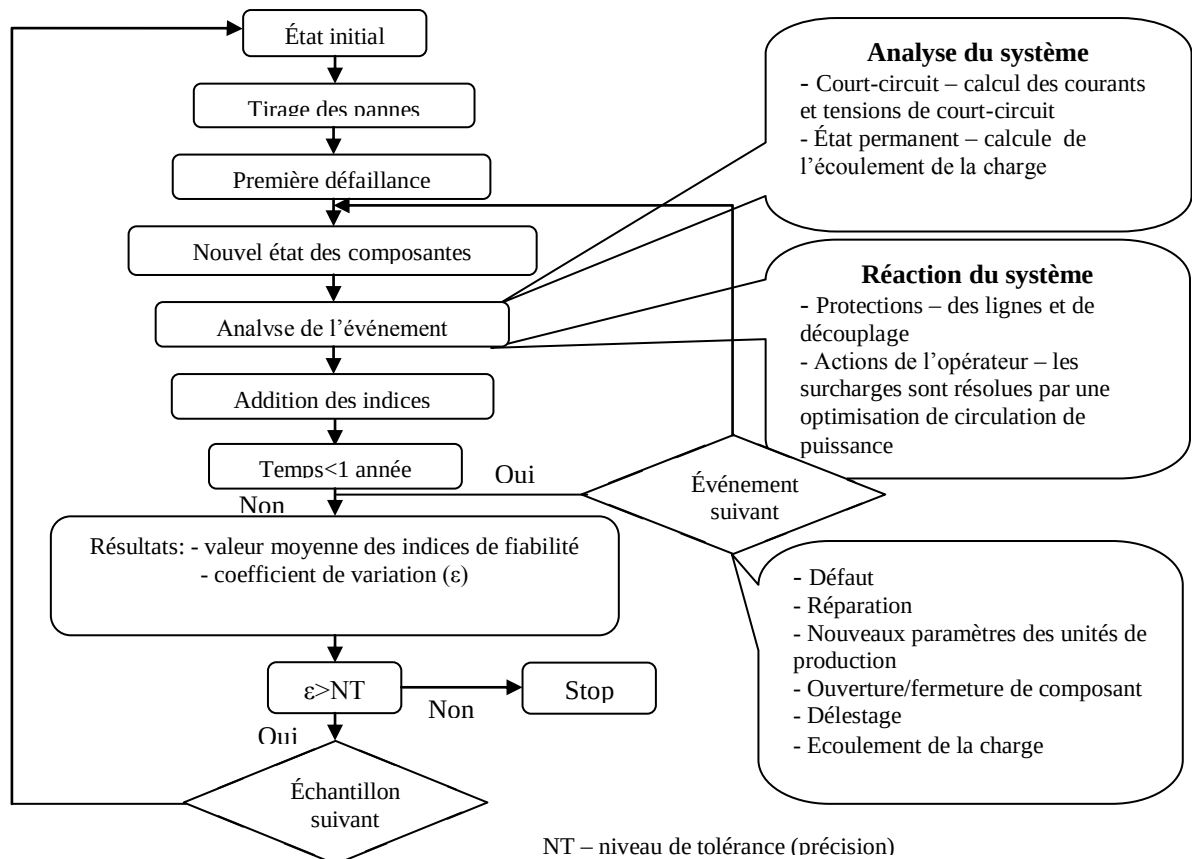


Fig. 4.3. Algorithme simulation Monte Carlo développé [89]

L'approche séquentielle simule les états du système dans l'ordre chronologique, au fur et à mesure des changements d'états de ses composants. La modélisation chronologique est liée à l'évaluation de séries (ou séquences) d'états du système dans le processus stochastique du déroulement de son fonctionnement (*simulation de la vie du système*) sur une période de service donnée (*par exemple un an*). La simulation de la période de service est reproduite un grand nombre de fois pour obtenir des moyennes statistiquement fiables des résultats [83]. L'estimateur est calculé de la façon suivante:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(y_i) \quad (4.1)$$

Avec :- N nombre d'années simulées (*si l'année est la période de service*) ou nombre d'échantillons ;

- y_i les séquences des différents états du système dans l'année « i »;
- $x(y_i)$ la fonction qui calcule les indices chaque année sur la séquence y_i .

Détaillons les étapes de l'algorithme de simulation:

Pas 1. La simulation commence avec un état stable du système (*tous les équipements se trouvent dans l'état de marche*). Une courbe de charge horaire donne la variation de la charge pour la période de simulation (*typiquement une année*).

Pas 2. Générer des nombres aléatoires pour tous les équipements du réseau (*générateurs, lignes, disjoncteurs ...*) et les convertir en temps de défaillance ($T_d = MDT$) selon la distribution de la probabilité de défaillance de l'équipement. Dans notre application, on considère que les temps de défaillance suivent une loi exponentielle (voir même avec les autres lois). La fonction cumulative de distribution $F(t)$ est :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = h \quad (4.2)$$

La méthode de transformation inverse donne :

$$T_{d,j} = -\left(\frac{1}{\lambda_j}\right) \ln(1 - h_j) \quad j \in [1, \dots, m] \quad (4.3)$$

Avec m = le nombre d'équipements, h = nombre aléatoire uniformément distribue sur l'intervalle $[0, 1]$ ($1 - h$ étant distribué de la même façon que h , on obtient :

$$T_{d,j} = -\left(\frac{1}{\lambda_j}\right) \ln h_j \quad j \in [1, \dots, m] \quad (4.4)$$

Pas 3. Ranger dans l'ordre chronologique les temps de défaillance de tous les équipements du système ($T_{d,j}$). Le temps minimum donne le prochain événement et l'équipement défaillant.

Pas 4. Générer un nombre aléatoire pour l'équipement défaillant (*avec le temps minimum*) et le convertir en temps de réparation ($Tr=MTTR$) selon la distribution de la probabilité de réparation de l'équipement. Ce temps Tr , sera ordonné également dans la liste chronologique précédemment créée. Dans notre application, on considère que les temps de réparation suivent une loi de Weibull à deux paramètres ($\gamma = 0$) (voir même avec les autres lois). La fonction cumulative de distribution $F(t)$ est alors :

$$F(t) = h = 1 - \exp \left[1 \left(\frac{1}{\sigma} \right)^\beta \right] \quad (4.5)$$

Avec :

$$\sigma = \frac{MTTR}{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})} \quad (4.6)$$

-Les temps moyens de réparation pour les équipements sont donnés dans l'équation 4.7

La méthode de transformation inverse donne :

$$T_{r,j} = \sigma(-\ln h_j)^{1/\beta} \quad (4.7)$$

Pas 5. Simuler le premier événement (*ou l'événement suivant selon que l'on est dans la première itération ou dans les suivantes*). A chaque événement, le système peut avoir une nouvelle topologie, de nouveaux paramètres de fonctionnement, etc. Ce nouvel état est analysé (*calcul de répartition de charge, calcul de courants de court-circuit, etc.*), les problèmes sont identifiés (*fréquence, tension, courants, ...*) et après, si possible, des actions correctives sont accomplies (*modification des consignes de productions, délestage de charge, etc.*). A la fin du pas, les indices de sureté sont cumulés et un nouveau nombre aléatoire est généré et converti en temps de défaillance ou de réparation, en fonction de l'événement antérieurement simulé. Le nouveau temps est range dans la liste chronologique et le temps minimum donne le prochain événement

Pas 6. Retourner au Pas 5 si le temps de simulation est inférieur à une année. Si le temps de simulation devient plus grand qu'une année, on cumule les indices pour toute l'année et on passe au Pas 7.

Pas 7. Calculer la valeur moyenne x et la variance $\text{var}(x)$ de l'indice x pour toutes les années :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(h_i) \quad (4.8)$$

$$var(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x(h_i) - \bar{x})^2 \quad (4.9)$$

Avec :

- N nombre d'échantillons (*années*) ;
- hi vecteur des nombres aléatoires générés pour l'échantillon «i» (*pour chaque année «i» on génère «m» nombres aléatoires*).

Pas 8. Répéter les Pas 1 à Pas 7 jusqu'à ce que le coefficient de variation «ε» de l'indice de sûreté choisi devienne inférieur à un niveau de tolérance imposé.

Le coefficient de variation se calcule selon la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{var(x)}}{\sqrt{N} \cdot \bar{x}} \quad (4.10)$$

Observation :

En place du coefficient de variation «ε», un nombre maximal d'échantillons «N» peut être imposé comme critère d'arrêt du processus de convergence de la simulation Monte Carlo.

4.5. Expérimentation de la MBF des réseaux de transport dans le monde

Cette méthode a été expérimentée pour optimiser la maintenance des réseaux de transport d'électricité dans plusieurs pays du monde.

4.5.1. Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (O.M.F.), EDF France

EDF a généralisé à toutes ses installations une méthode de maintenance préventive inspirée de L'OMF (*Optimisation de la maintenance par la fiabilité*) utilisée depuis longtemps dans l'aéronautique.

Elle consiste à traiter préventivement les anomalies latentes ou avérées, en combinant différentes opérations de maintenance codifiées, exécutées de manière échelonnée selon une périodicité régulière. La panoplie comprend des opérations légères (*surveillance visuelle, surveillance par thermographie, essais fonctionnels simples par télécommande à distance*) exécutées à un rythme mensuel ou pluri mensuel, et des opérations plus

complexes (*remplacement de pièces d'usures et reconditionnements*) exécutées à intervalles de plusieurs années. Cette méthode poursuit trois buts :

- réduire des coûts de maintenance sans dégradation de la fiabilité,
- améliorer la sécurité et la disponibilité des installations (*en étant plus pertinent sur les périodicités et les éléments à maintenir*),
- maîtriser la durée de vie des équipements (*parfois supérieure à la durée de carrière des opérateurs de maintenance*).

Elle s'appuie sur deux règles de « *bon sens* » :

- classer les défaillances du système par ordre de priorité pour leur assigner une maintenance adaptée : s'il est nécessaire de détecter la défaillance, la maintenance doit être préventive ; s'il suffit de réparer la défaillance, la maintenance ne peut être que corrective,
- utiliser les retours d'expériences sur les défaillances passées pour axer la maintenance sur les composants les moins fiables. [106].

4.5.2. Stratégies et gestion de la maintenance par la fiabilité, RED ELECTRICA

La stratégie de la gestion de la maintenance par la fiabilité en Espagne est reposée sur les grands axes suivants :

- le développement des stratégies ;
- les actions clés ;
- la planification et coordination ;
- l'intégration des systèmes de gestion ;
- la gestion de la qualité et des indicateurs ;
- la monitorisation et innovation technologique ;
- la gestion du personnel et formation ;
- l'intégration de la politique environnemental.

Les principales fonctions :

- exécuter les travaux de maintenance conformément aux critères et aux plans mentionnés ;
- réaliser des mises en services d'installations, en assurant l'état correct et la documentation nécessaire dans le transfert d'actifs ;
- définir des critères de maintenance, les principes de remplacement et ceux de disponibilité de pièces de rechange ;
- établir des plans de renouvellement et d'amélioration qui assure la fiabilité et la qualité du service ;
- gérer la maintenance intégrale des actifs de transport et des bâtiments, en s'appuyant sur les démarcations ;
- implanter des procédés techniques et contribuer aux spécifications d'équipements, matériaux et services ;

- garantir l'accomplissement de la normative en vigueur, la certification ISO9000:2000 et développer des plans de qualité. [17]

4.5.3. Présentation générale de la MBF du service d'électricité au Canada

L'Office National Canadien de l'Energie *ONCE* présente son point de vue de la fiabilité du service d'électricité sous forme des aspects suivants [90].

La fiabilité de chaque réseau d'électricité repose sur deux aspects principaux. Le premier est l'adéquation de l'approvisionnement, qui suppose une capacité de production et de transport suffisante pour répondre aux besoins que l'on a prévus pour le réseau. Le second aspect est la fiabilité d'exploitation du réseau à court terme, c'est-à-dire que le réseau doit pouvoir supporter les perturbations ou situations imprévues et continuer à fonctionner même si des problèmes surviennent dans l'infrastructure ou dans d'autres réseaux interconnectés. Maintenir des réserves de capacité de production et de transport est une façon d'y arriver.

Les deux aspects de la fiabilité ont des actions réciproques. Si, par exemple, à la suite d'une situation imprévue, un exploitant puise dans la réserve pour répondre à la demande, plutôt que comprimer cette dernière, la réserve diminue. L'offre est alors suffisante, mais le réseau devient vulnérable sur le plan opérationnel car la réserve pourrait être de nouveau sollicitée. Étant donné l'interrelation entre les deux aspects de la fiabilité, les réseaux sont conçus de façon à être à la fois suffisants et fiables sur le plan opérationnel. Ainsi, on installera de nouvelles centrales près des centres de distribution à la fois pour suffire à la demande et rehausser la fiabilité opérationnelle du réseau. Il faut que les deux aspects soient pris en considération lorsqu'il s'agit de concilier le coût du maintien de la fiabilité et l'incidence économique des pannes de courant.

En plus d'une infrastructure adéquate, la fiabilité dépend des activités essentielles que les exploitants et planificateurs de réseaux doivent exercer, c'est-à-dire

- observer et surveiller le réseau pour assurer son bon fonctionnement (*fréquence, tension et débit de puissance*);
- analyser et modéliser le réseau pour être en mesure de planifier les incertitudes au chapitre de l'exploitation et des mécanismes de contrôle;
- communiquer avec les contrôleurs d'autres régions et coordonner les activités de chacun pour que l'intégrité du réseau maillé soit maintenue;
- prendre les mesures de contrôle nécessaires (*modification des quantités produites, commutation du transport et délestage de charge*), pour maintenir le fonctionnement du réseau à l'intérieur de limites acceptables;
- veiller à ce que les participants se conforment aux exigences en matière de fiabilité et les contraindre s'il y a lieu;
- apporter les améliorations et installer les équipements nécessaires pour améliorer la fiabilité et décongestionner le réseau;

- veiller à ce que les signaux de prix et les incitatifs favorisent des comportements susceptibles d'améliorer la fiabilité;
- prendre les mesures qui conviennent pour protéger l'infrastructure essentielle, les centrales nucléaires par exemple.
- pour assurer le succès de ces activités, du moins un bon nombre d'entre elles, les exploitants et planificateurs doivent posséder la formation et les outils perfectionnés nécessaires pour résoudre les problèmes complexes que pose le fonctionnement des réseaux électriques.

4.5.4. Politique d'optimisation de la maintenance par la fiabilité GRTE

L'important développement économique de l'ALGÉRIE ces dernières années a nécessité une extension importante de l'infrastructure énergétique, que ce soit en moyens de production, en postes de transformation ou en lignes de transport électrique. [16]

La fonction transport de l'électricité est installée en filiale *GRTE* du groupe *SONELGAZ*, sa mission est :

- de garantir la disponibilité et le bon fonctionnement des équipements ;
- d'assurer la disponibilité et la capacité du réseau de transport ;
- de maîtriser la fiabilité et l'intégrité du réseau de transport ;
- d'optimiser la qualité de service ;
- d'assurer la satisfaction des clients, la sécurité du public et du personnel ;
- d'assurer le respect des lois et des engagements.

Le groupe *SONELGAZ* dans sa démarche stratégique s'est fixé comme objectif d'être, en termes de management de ressources humaines et de coût, parmi les cinq premiers groupes du bassin méditerranéen en ayant comme entreprise de référence le *REE* (*Espagne*).

Suite aux résultats de l'étude sur la position concurrentielle de *SONELGAZ* réalisée par un consultant, dont le projet « *Amélioration de la maintenance et la réparation* », a été lancé en

janvier 2003, les principaux objectifs en maintenance, sont de tendre vers les meilleures pratiques internationales en termes de qualité de services et des coûts qui sont :

- réduction des incidents dus à la maintenance ;
- réduction des coûts de maintenance ;
- réduction des délais d'intervention ;
- augmentation de la productivité des agents par an.

Avec les restrictions budgétaires du groupement *SONELGAZ* suite aux désengagements de l'état de tout financement et pour s'adapter aux nouvelles exigences, la filiale *GRTE* a choisi de s'orienter vers une politique d'optimisation de la maintenance par la fiabilité, c'est une stratégie de maintenance globale utilisant une méthode d'analyse structurée permettant d'assurer la fiabilité des équipements et dont l'objectif est de dégager un plan de maintenance préventive optimisé.

L'implantation de cette nouvelle démarche entraînera une amélioration des différents processus se rapportant à l'acte de maintenance ; une meilleure organisation des moyens existants et justification des compléments ; la vulgarisation et le développement des techniques nécessaires à l'acte de maintenance.

- Comme nous parlons de statistiques, cela sous-entend que de nombreuses histoires devront être réalisées afin de rassembler des échantillons statistiquement représentatifs et suffisants pour la précision recherchée.

4.6. Exemples d'application

Dans cette partie, nous allons donner quelques exemples d'application pour illustrer les différentes approches utilisées dans notre recherche.

4.6.1. Exemple 1

Considérons l'exemple de la figure 4.4 qui comporte trois composants électriques:

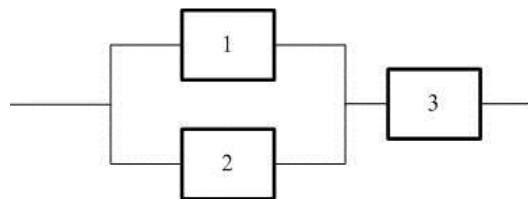


Fig. 4.4. Exemple de BDF

Et considérons la table de vérité suivante avec les 2^n configurations possibles
Tableau 4.1 :

Tab. 4.1. Table de vérité d'un système de maintenance préventive

Etat N°	Composant 1	Composant 2	Composant 3	Sortie
1	0	0	0	0
2	1	0	0	0
3	1	1	1	1
4	0	1	1	1
5	1	0	1	1
6	0	1	0	0
7	1	1	0	0
8	0	0	1	0

Le principe (*il faut le savoir...*) consiste à dire qu'un état UP (*valant donc: 1*) est affecté à la valeur R_i du bloc i concerné.

Et que l'état DOWN (*valant donc: 0*) est affecté à la valeur $(1-R_i)$ du bloc i . Chaque valeur sera multipliée avec les autres pour obtenir la fiabilité totale du système à un état donné. Ainsi, nous n'avons donc que 3 états qui permettent au système de fonctionner. Calculons leur fiabilité respective. L'état N°3 donne donc par définition:

$$R_{s3} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \quad (4.11)$$

Et nous sommes le tout comme indiqué ultérieurement:

$$\begin{aligned} R_s &= R_{s3} + R_{s4} + R_{s5} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3 (1 - R_1) + R_1 \cdot R_3 (1 - R_2) \\ R_s &= R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Et nous pouvons vérifier que cette approche est effectivement correcte en prenant la relation générale d'un tel système démontrée dans le chapitre 2:

$$\begin{aligned} R_s &= \prod_{i=1}^n R_i = \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=1}^m (1 - R_{i,j}) \right] = \left[1 - \prod_{j=1}^2 (1 - R_{1,j}) \right] \left[1 - \prod_{j=1}^1 (1 - R_{2,j}) \right] \\ R_s &= \left[1 - \prod_{j=1}^2 (1 - R_{1,j}) \right] R_3 = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Ce qui montre que nous avons bien le même résultat et que l'approche par décomposition fonctionne aussi.

Ainsi, nous signalons que lorsque nous incluons dans les systèmes des éléments qui permettent de tolérer ou d'accepter certaines erreurs nous parlons alors de "*tolérance aux fautes*" et nous en distinguons principalement de trois types:

- **redondance active:** dans ce cas tous les composants redondants fonctionnent en même temps.
- **redondance passive:** un seul élément redondant fonctionne, les autres sont en attente, ce qui a pour avantage de diminuer ou de supprimer le vieillissement des éléments redondants mais en contrepartie nécessite l'insertion d'un composant de détection de panne et de commutation.
- **redondance majoritaire:** cette redondance concerne surtout des signaux. Le signal de sortie sera celui de la majorité des composants redondants.

4.6.2. Exemple 2

La figure ci-dessous représente un schéma simplifié d'une alimentation électrique [84].

L'alimentation principale (380kV) peut être secourue en cas de défaillance par le réseau auxiliaire (220kV) et par les deux générateurs diesels.

On dira que l'on a la fonction alimentation électrique si l'un des deux jeux de barres JB5 ou JB6 est sous tension.

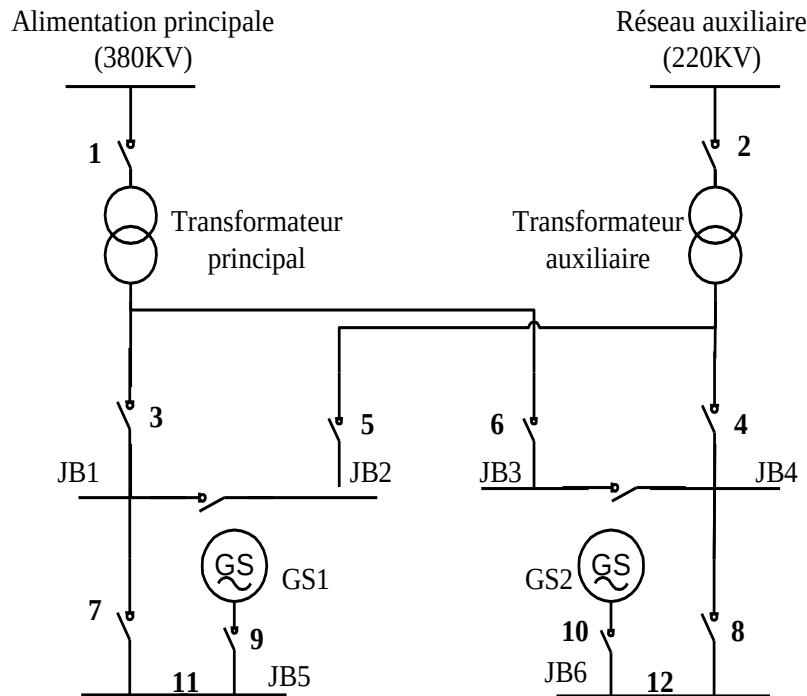


Fig. 4.5. Schéma d'une alimentation électrique

4.6.2.1. Diagramme de fiabilité et arbre de défaillance correspondants

Cas de dépendance des éléments qui constituent cette alimentation électrique et conduisant aux coupes minimales (figure 4.6) : panne commune

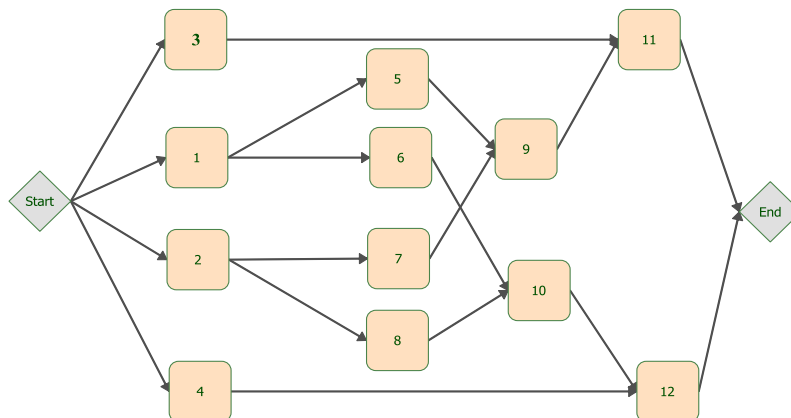


Fig. 4.6. BDF de cette alimentation électrique

Coupes minimales

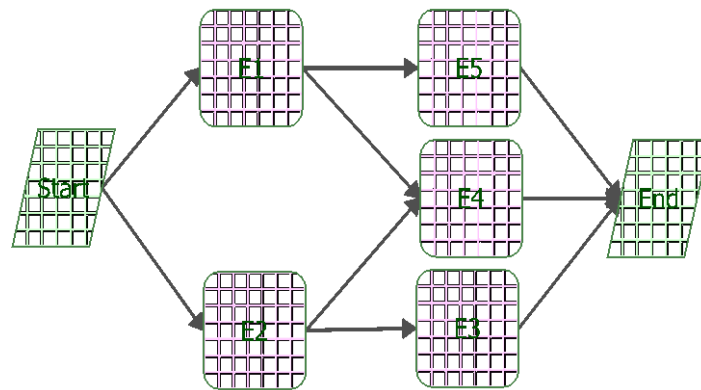


Fig. 4.7. BDF de cette alimentation électrique (chemin de succès)

Les chemins de succès de cette alimentation électrique sont : E1E4, E1E5, E2E3, E2E4 et en donnant la table des combinaisons des coupes minimales suivante :

Tab. 4.2. Table de vérité du système

Chemin	E1	E2	E3	E4	E5
1	1	0	0	0	1
2	1	0	0	1	0
3	0	1	1	0	0
4	0	1	0	1	0

Les coupes minimales : E1E2, E3E4E5, E1E4E5 et E2E4E5
A partir du bloc diagramme de fiabilité, on déduit arbre de défaillance correspondant.

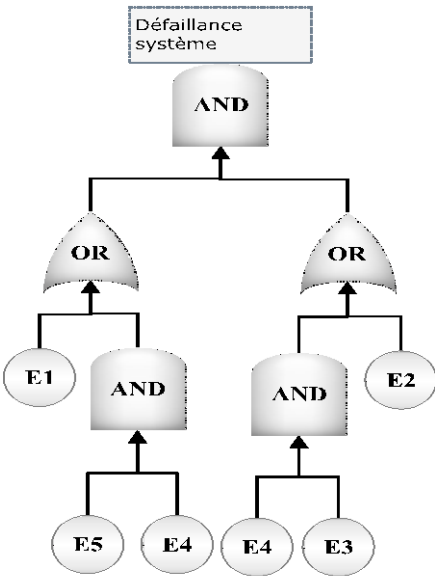


Fig. 4.8. AdD de cette alimentation électrique

4.6.3. Exemple 3

Dans cet exemple nous voulons déterminer le matériel d'une ligne haute tension avec des caractéristiques bien déterminées d'une manière générale en utilisant le modèle *SADT* sur son aspect fonctionnel seulement en sortant les différentes étapes à suivre et les relations qui les relies. Ces étapes sont :

- acquérir les caractéristiques de la ligne ;
- choisir le matériel ;
- calculer la tension et les contraintes ;
- valider l'ensemble.



Fig. 4.9. Travée ligne

4.6.3.1. Analyse fonctionnelle

Dans la figure 4.10 nous représentons le travail demandé dans un rectangle formant ainsi la fonction globale du système, et dans la figure 4.11, nous faisons une explosion de la tâche globale en sous tâches identifiables par un verbe suivant la description demandée dans le cahier charges.

a. Fonction globale A-0

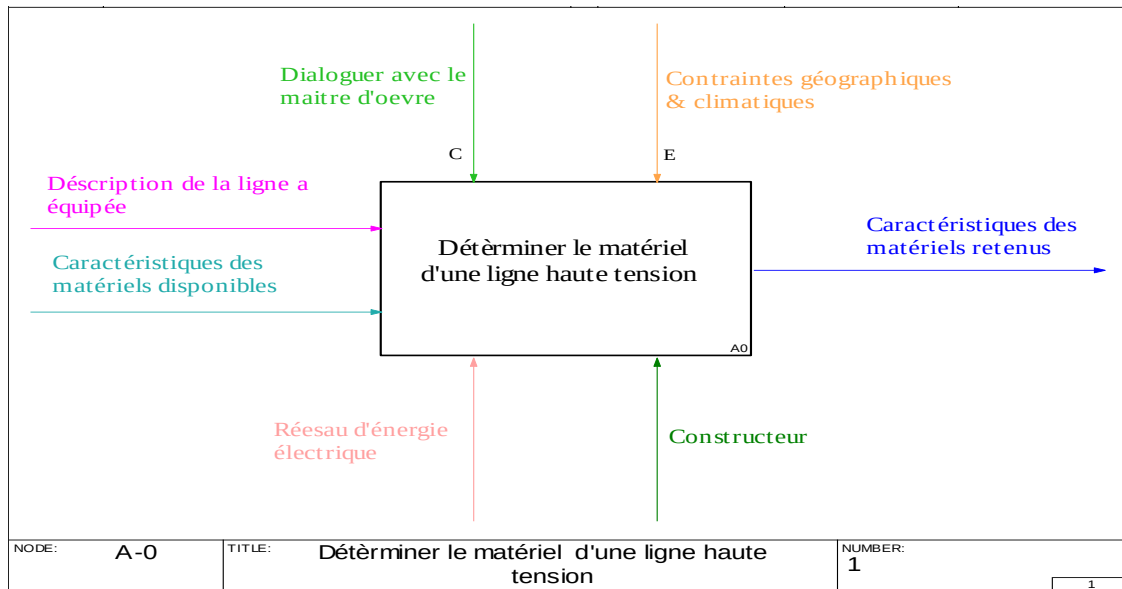


Fig. 4.10. Niveau 0 la tâche A0 (*Déterminer le matériel d'une ligne haute tension*)

b. Analyse descendante de la tâche A-0

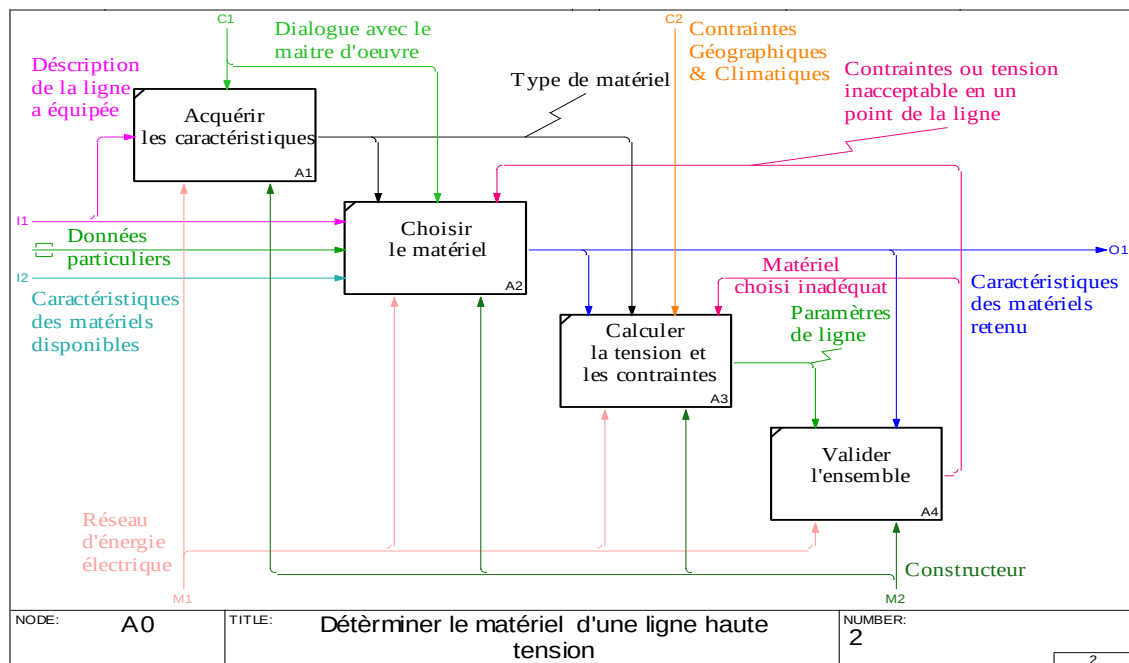


Fig. 4.11. Niveau 1 décomposition de la tâche A0

4.6.4. Exemple 4 : approche MBAF

Pour illustrer cette approche, on va donner une description générale d'une station de distribution électrique. L'alternative proposée pour les systèmes de distribution de l'alimentation peut être schématisée comme suit (Figure 4.12)

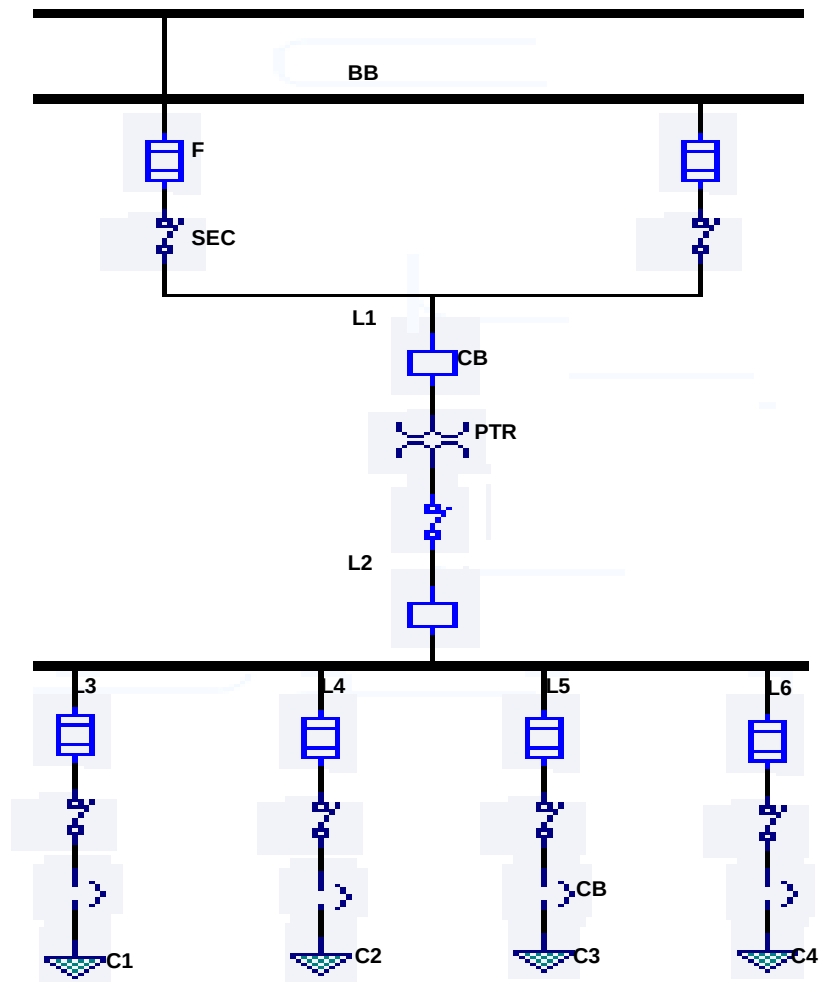


Fig. 4.12. Réseau de distribution électrique

Données de fiabilité issues de la collecte du retour d'expérience au niveau du service maintenance de la station de distribution sont résumées comme suite.

Tab. 4.3. Classification des pannes et coût de remplacement estimatif des principaux composants

Composants électriques	Nombre de défaillances analysées	Nombres de défaillances par élément		coûts (DA / 3an)
Ligne électrique (EL)	143	conducteurs électriques	11/7.7	218500
		Isolateurs	132/92.3	
Transformateur (PTR)	96	Isolateurs	53/55.2	745000
		bornes	31/32.3	
		Sectionneurs	12/12.5	
Disjoncteur (CB)	105	Isolateurs	27/25.7	141400
		unité de commande	58/55.3	
		Système d'entraînement	21/19.0	
Jeu de barre(BB)	39	Contact avec les appareils	39/100	68500

Tab. 4.4. Données de fiabilité

Composant	Défaillance par an	Temps de réparation (h)
L1 à 1.2Km	0.0264	5.6
BB1	0.03	4
F1	0.03	4
CSE1	0.03	4
PTR1	0.018	90
CB1	0.005	10
L2 à 1.5Km	0.0375	12
BB2	0.01	4
SEC2	0.01	4
CB2	0.005	10
L3 à 1.5Km	0.0375	8
L4 à 2.5Km	0.0625	12
L5 à 2.8Km	0.07	14
L6 à 1.8Km	0.045	9
SC3, 4, 5, 6	0.01	4
CB3, 4, 5, 6	0.05	10

4.6.4.1. Résultat et discussion

Pour chaque donnée du réseau de distribution et en utilisant la simulation de Monte Carlo, on calcule les différents indices de fiabilité (SAIDI, SAIFI, CAIDI, ASAI, CTAIDI, CAIDI, ASIFI et ASIDI.) Ainsi on détermine l'AMDEC de ces indices (tableau 4.5) et le coût de panne correspondant pour qu'on puisse identifier les composantes essentielles pour leur adopter un plan de maintenance nécessaire, on donne :

$$U_c = \lambda_c * r_c \quad (4.14)$$

Les indices

SAIFI=0,293pannes/ an, le client ; SAIDI=3,438 heures/ an, client

CAIDI=11,73 heures/panne ; ASAI=0.999607 (99.960% Disponibilité)

ASUI=1-0.99238 = 0,000394 (0,0394% indisponibilité) ; Cde panne 252676DA/ an

CTAIDI=12,275 heures/ an, client ; CAIFI=0,161 heures/clients interrompu ;

ASIFI=0,284 interruption/KWh ; ASIDI=3,534 heures/interruption de KWh ;

Après cette étude, on constate que la propagation de l'indice SAIDI est généralement plus élevée que celui de SAIFI et il en est de même pour d'autres indices (ASIDI /ASIFI et CTAIDI/CAIFI). Et on voit aussi l'effet de la taille du système sur l'augmentation de l'écart-type au moment de sa diminution et le coût de la panne du réseau électrique de distribution est trop élevé. Et donc les petits systèmes sont généralement une plus grande diffusion des indices

En conséquence, la certitude au niveau du système lui-même est différente de celle attendue par la charge et le client. A cet effet, il est recommandé de changer complètement les lignes électriques en utilisant un matériau homogène, rénover ou remplacer les transformateurs de puissance par d'autres plus puissants et plus robustes, et, finalement, changer totalement les anciens isolants par d'autres en matériau composite pour résister à l'humidité et la salinité de cette zone.

Tab. 4.5. AMDEC des indices de fiabilité

<i>Composant</i>	C1			C2			C3			C4		
	$\lambda_{C1}[\text{f/y}]$	$r_{C1}[\text{h}]$	$U_{C1}[\text{h}]$	$\lambda_{C2}[\text{f/y}]$	$r_{C2}[\text{h}]$	$U_{C2}[\text{h}]$	$\lambda_{C3}[\text{f/y}]$	$r_{C3}[\text{h}]$	$U_{C3}[\text{h}]$	$\lambda_{C4}[\text{f/y}]$	$r_{C4}[\text{h}]$	$U_{C4}[\text{h}]$
L1	0.0264	5.6	0.148	0.0264	5.6	0.148	0.0264	5.6	0.148	0.0264	5.6	0.148
L2	0.0375	12	0.45	0.0375	12	0.45	0.0375	12	0.45	0.0375	12	0.45
L3	0.0375	8	0.3	-	-		-	-		-	-	
L4	-	-		0.0625	12	0.75	-	-		-	-	
L5	-	-		-	-		0.07	14	0.98	-	-	
L6	-	-		-	-		-	-		0.045	9	0.405
BB1	0.03	4	0.12	0.03	4	0.12	0.03	4	0.12	0.03	4	0.12
BB2	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04
F1	0.03	4	0.12	0.03	4	0.12	0.03	4	0.12	0.03	4	0.12
F3	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04
SEC1	0.03	4	0.12	0.01	4	0.12	0.01	4	0.12	0.01	4	0.12
SEC2	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04
SEC3	0.01	4	0.01	0.01	4	0.01	0.01	4	0.01	0.01	4	0.01
PTR	0.018	90	1.62	0.018	90	1.62	0.018	90	1.62	0.018	90	1.62
CB1	0.005	10	0.05	0.005	10	0.05	0.005	10	0.05	0.005	10	0.05
CB2	0.005	10	0.05	0.005	10	0.05	0.005	10	0.05	0.005	10	0.05
CB3	0.005	10	0.05	0.005	10	0.05	0.005	10	0.05	0.005	10	0.05
Σ	0.264	173.6	3.148	0.289	177.6	3.598	0.297	179.6	3.828	0.272	174.6	3.253

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu comment adapter les phases chronologiques de réalisation d'une étude de sûreté de fonctionnement pour la sauvegarde de la disponibilité des réseaux électriques, en se basant sur l'analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle des défaillances et qu'elles sont les méthodes statistique et dynamiques utilisées pour la recherche des données de fiabilité.

Néanmoins, cette analyse nécessite des connaissances approfondies sur la notion de risque et de défaillance, et la maîtrise des différentes méthodes utilisées pour effectuer cette étude. A cet effet, nous avons illustré cette analyse par des exemples d'applications et par une étude complète et plus d'entaille dans le prochain chapitre.

Chapitre 5

Les méta-heuristiques dans l'optimisation de la maintenance

5.1. Introduction

Avec l'évolution importante et très rapide des systèmes énergétique et pour des raisons technico-économique, les réseaux électriques de distribution, de transport et d'interconnexion sont actuellement configurés de telle manière, que la génération est concentrée en des points parfaitement déterminés et la consommation est dispersée géographiquement. Cela implique la nécessité de transporter l'énergie électrique à grande distance et de la répartir dans des zones très vastes avec une éminente sécurité et une disponibilité absolue de la fiabilité [01, 02].

En plus, les perturbations inévitables telles que les courts circuits, le manque de fiabilité des réseaux et les indisponibilités momentanées de lignes, de générateurs ou de transformateurs ainsi que les pertes dans les lignes et les aléas de consommation peuvent affecter le réseau à tout instant et l'amener en dehors de sa zone de la stabilité[33, 102].

Parmi les solutions envisageables pour lutter contre les perturbations et les congestions, un système de maintenance adéquat pour les réseaux d'énergie électrique qui doit à la fois satisfaire les critères techniques, maximiser l'impact stratégique et optimiser les critères économiques.

Dans ce chapitre, nous allons faire une optimisation de la maintenance basée sur l'approche des techniques méta-heuristiques, en exploitant les données collectées par le service de maintenance pour estimer les caractéristiques de fiabilité des éléments du réseau électrique a étudié à l'aide de méthodes indiqué au chapitre 2, telles que la méthode du maximum de vraisemblance (MV) puis validé et testé par le test de Kolmogorov-Smirnov (KS), puis on passe à l'analyse fonctionnelles et dysfonctionnelle des modes de défaillances du réseau électrique par l'utilisation de l'analyse AMDEC afin de classer le matériels par ordre de criticité. Ensuite nous faisons la modélisation du système par des blocs diagramme de fiabilité BDF et les arbres de défaillances AdD qui permettent d'identifier les chemins de faiblesse du système. Et parallèlement avec la modélisation nous serons obligés de faire une analyse des coûts des éléments du système et mettre une fonction du cout global de maintenance qui nous permettre de faire l'optimisation. Notre contribution portera sur l'application des méta-heuristiques en optimisation de la fonction

du cout puis prendre le meilleur plans sur les réseaux de distribution dans le but de signaler des recommandations pour bien maintenir le système électrique.

5.2. Description du réseau électrique de SONELGAZ

Le réseau électrique est organisé en différents niveaux de tension: le réseau de transport et de répartition auxquels sont connectés les grands groupes de production centralisée, et le réseau de distribution alimentant la plupart des consommateurs. Cette structure verticale (transport, répartition, distribution) est schématisée par la figure 5.1. Les grands groupes de production d'énergie électrique sont en général basés sur des alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Ils sont connectés sur le réseau de transport via un transformateur de groupe. Les réseaux de transport assurent le transport de l'énergie électrique sur de grandes distances. Afin de minimiser les pertes joules sur les lignes, ces réseaux sont à très haute tension (de 63 kV à 400 kV).

Du point de vue topographique, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, les réseaux de transport sont des réseaux maillés. Les flux de puissance sont bidirectionnels. D'une manière générale, les réseaux de transport, comparativement aux réseaux de distribution, sont très supervisés afin de pouvoir effectuer des contrôles de la tension, de la fréquence, la répartition des flux de puissance et des coûts de production, etc.

Les réseaux de distribution représentent le dernier maillon de la chaîne d'acheminement de l'énergie entre les centres de production et les consommateurs finaux. Ils sont en général plus vastes et plus denses que les réseaux de transport et de répartition qui les alimentent à travers les postes de transformation haute tension de niveau B (supérieur à 50 kV) vers la haute tension de niveau A (comprise entre 1 et 50 kV). Le réseau de distribution national de SONELGAZ est constitué d'un réseau Nord s'étendant d'Est en Ouest sur une distance de (340000 Km) avec un nombre de clients de (960000). Le système électrique de SONELGAZ est un ensemble de plus de (22979MW) de puissance installée et de (20230 GW) vers l'horizon (2030).

Le plan de développement des réseaux de distribution *intègre les programmes d'électrification et de distribution publique du gaz initiés* par l'Etat, les programmes propres et les raccordements clientèle nouvelle ainsi que les équipements de maintenance et d'exploitation et les projets de modernisation de la gestion et de l'exploitation.

Ainsi, le plan de développement des réseaux et infrastructures de la Société algérienne de distribution de l'électricité et du Gaz, sur la période 2018-2028, prévoit de développer un réseau Electricité de 106 563 km de lignes, 51 694 postes et 1 365 034 branchements. [91 et autre].

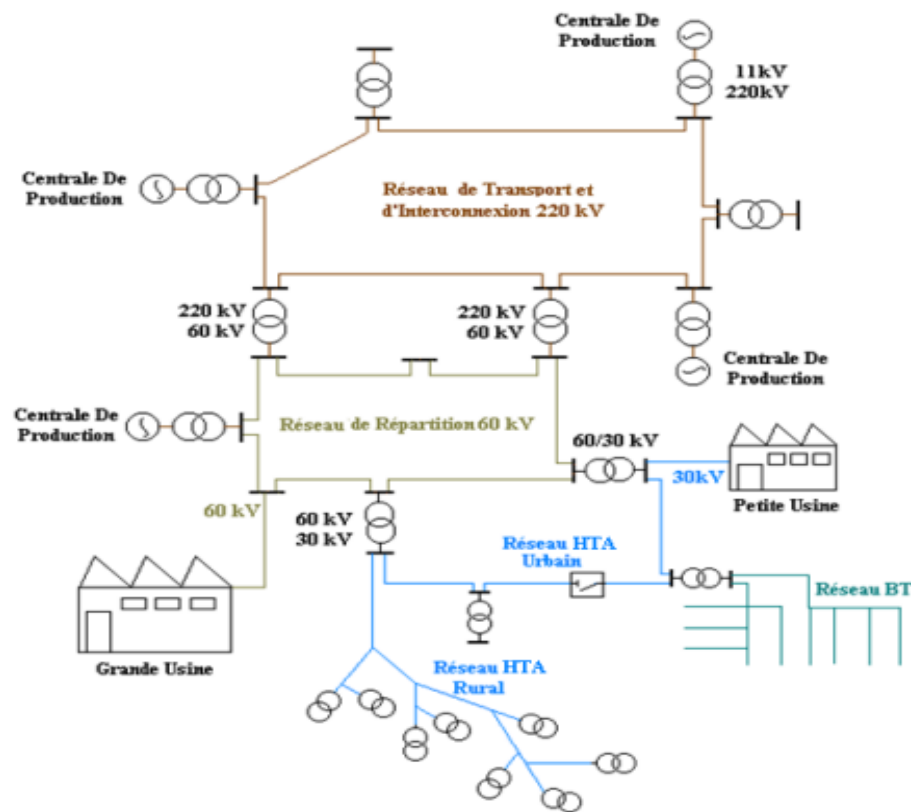


Fig. 5.1. Réseau d'électricité d'Algérie

5.2.1. Exploitation du système électrique en Algérie

L'exploitation du système électrique permet d'assurer trois objectifs majeurs :

1. garantir la sûreté de fonctionnement, à travers la maîtrise de l'évolution et des réactions du système électrique face aux différents aléas dont il est l'objet, en réduisant autant que possible le risque d'incidents pouvant conduire à une coupure de l'alimentation électrique.
2. favoriser la performance économique et l'ouverture du marché de l'électricité, à travers une meilleure utilisation et exploitation des offres de service proposées par les acteurs opérant au sein du système électrique (*équilibre offre -demande dans le cadre de contrats souscrits par la clientèle, échange d'énergie avec les autres réseaux du système électrique maghrébin, etc...*)
3. satisfaire les engagements contractuels vis-à-vis des clients raccordés au réseau de transport en matière de qualité de la fourniture.

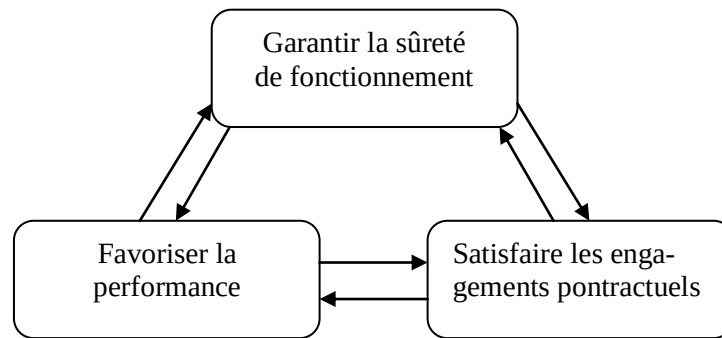


Fig. 5.2. Exploitation du système électrique

Une dégradation de la sûreté du système qui se traduit par une augmentation de la fréquence des incidents serait un échec dans l'exercice de la mission de service public de l'électricité [17].

5.2.2. Description du poste MT de la station de Relizane.

Le poste de distribution fonctionne généralement à niveaux de tension de 2,4 à 34,5 kV, et délivrer de l'énergie électrique directement aux consommateurs industriels et résidentiels. Les alimentations de distribution acheminent l'énergie des sous-stations de distribution aux locaux des consommateurs finaux. Il est connecté à un sous-système de transmission via au moins une ligne d'alimentation, souvent appelée alimentation primaire.



Fig.5.3. Poste HT/MT

Cependant, il est typique qu'un poste de distribution soit alimenté par deux lignes d'alimentation ou plus afin d'accroître la fiabilité de l'alimentation en cas de coupure d'une ligne d'alimentation.

Une ligne d'approvisionnement peut être une ligne aérienne ou un départ souterrain, selon l'emplacement de la sous-station, avec des lignes de câbles souterraines principalement dans les zones urbaines et des lignes aériennes dans les zones rurales et les banlieues.

Les lignes d'alimentation sont connectées à la sous-station via des interrupteurs de déconnexion haute tension afin d'isoler les lignes de la sous-station pour effectuer des travaux de maintenance ou de réparation. La figure 5.4 schématise une partie de ce poste. Il comprend :

- 4 lignes arrivées HT 60 KV
- 19 lignes départs de 30kV;
- des transformateurs de puissance (60/30kV) ;
- des transformateurs de tensions VT;
- des transformateurs de courant CT;
- des disjoncteurs CB;
- des sectionneurs DS;
- des fusibles FUS;
- des jeux de barre SB;
- des isolateurs IS.

La figure 5.4 présente une partie de ce poste qu'il fera l'objet de l'application de notre approche pour aboutir à un résultat constituant représentant un référentiel de base pour le service maintenance dans l'entreprise électrique.

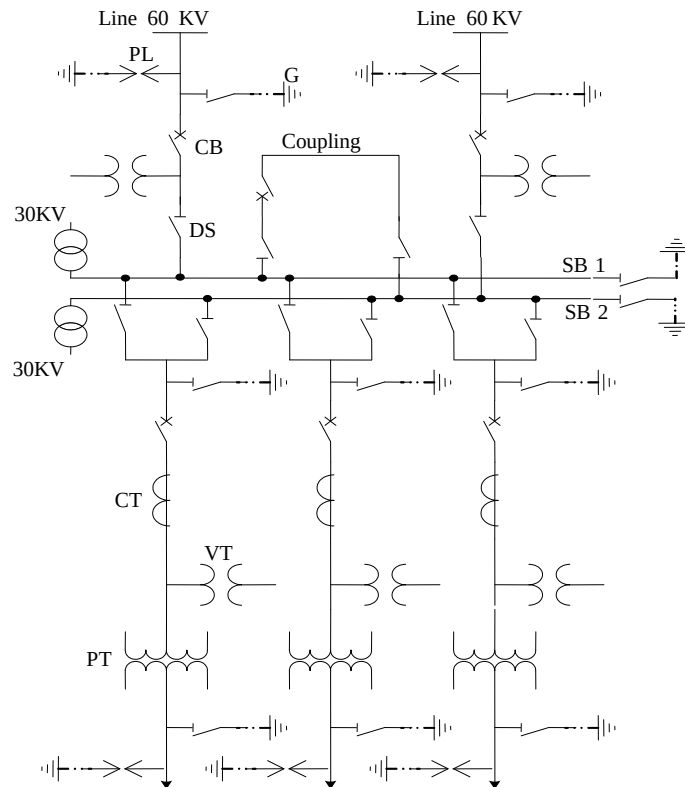


Fig.5.4. Poste MT 60 KV

5.3. Présentation de la nouvelle approche : MBF rationnelle

La méthode *MBF* appliquée actuellement pour l'optimisation de la maintenance se base sur l'analyse dysfonctionnelle des modes de défaillances des systèmes (*AMDEC*), et après la détermination de la criticité, un plan de maintenance adéquat est adopté. Suite à une succession d'application de cette méthode dans plusieurs domaines et pendant une vingtaine d'années d'expérience, c'est avéré que l'optimisation par une telle démarche est incomplète car d'autres critères d'analyse et d'évaluation sont ignorés complètement surtout dans les systèmes électriques [01, 02]. Notre point de vue est d'appliquer cette méthode rationnellement, en introduisant toute une étude de sûreté de fonctionnement (*SdF*).

Etapas de la démarche MBF rationnelle

La maintenance basée sur la fiabilité du réseau de transport d'électricité s'appuie sur les phases indiquées dans la figure 5.5 ci-dessous.

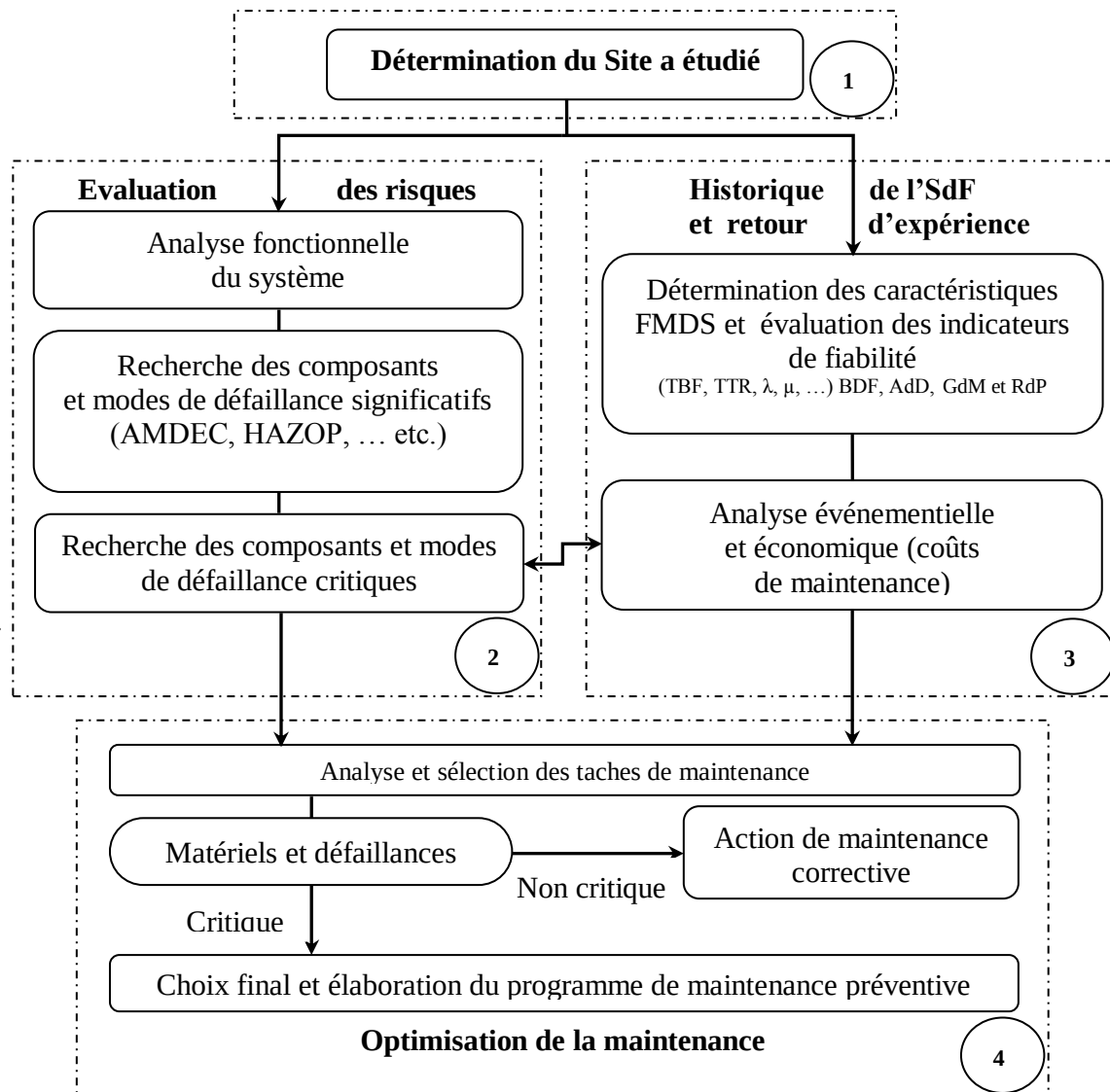


Fig. 5.5.Démarche MBF rationnelle

1. sélection des sites et des équipements à étudier
2. évaluation des risques.
 - analyse fonctionnelles du système;
 - recherche des composants et modes de défaillance significatifs par la méthode *AMDEC*,
 - recherche des composants et modes de défaillance critiques
3. historique de la SdF et retour d'expérience.
 - analyse événementielle et économique (*coûts de maintenance*)
 - détermination des caractéristiques *FMDS* et évaluation des indicateurs de fiabilité (*TBF*, *TTR*, ...);
4. optimisation de la maintenance.
 - analyse et sélection des tâches de maintenance
 - choix final et élaboration du programme de maintenance préventive

5.4. Les démarches de l'analyse de fiabilité

5.4.1. Collection de données

La première étape de l'étude est la collection de données où les données de défaillance et de réparation du système sont enregistrées en permanence pour l'analyse. La présente étude surveille les données de temps entre deux défaillances consécutives de composants du poste de distribution et d'interconnexion de l'énergie électrique.

Les données relatives au temps entre défaillances (TBF) ont été collectées à partir du registre des processus du post de distribution et du rapport de service de maintenance du post pour la période 2010 à 2019, qui sont triés et classés pour analyse. La figure 5.6 présente la répartition des fréquences de défaillance des principaux composants de notre système.

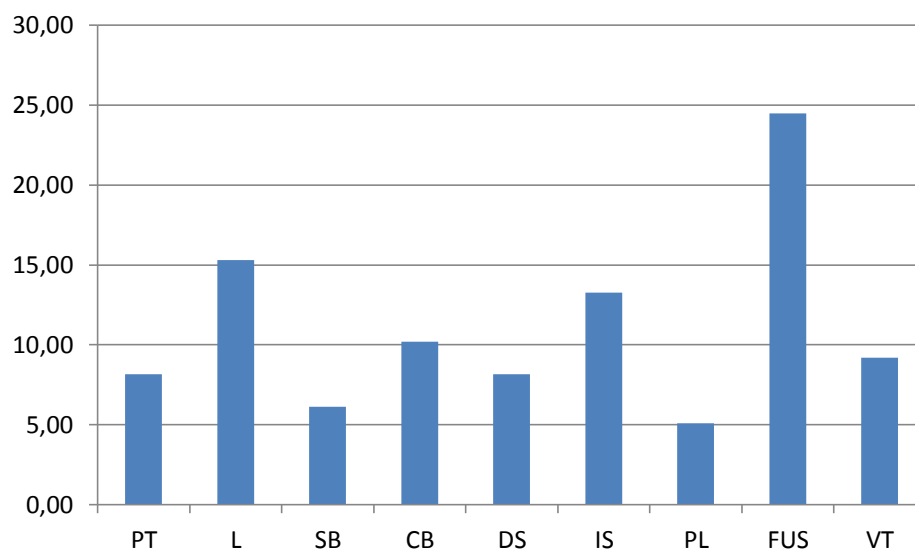
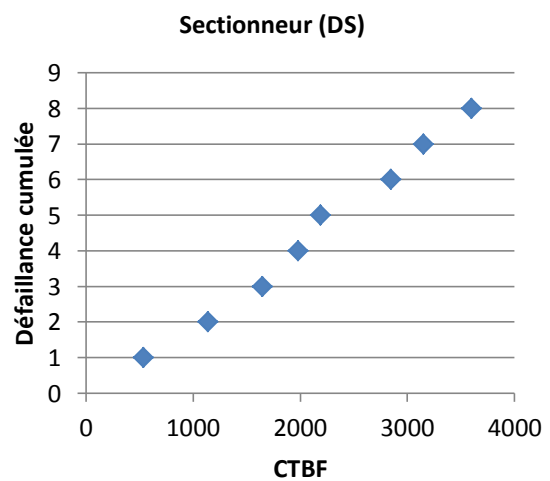
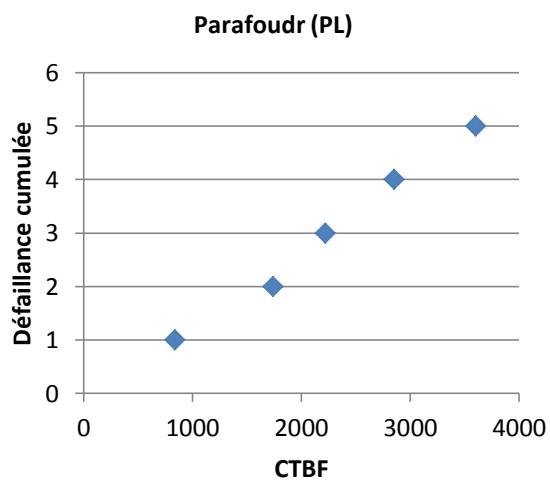
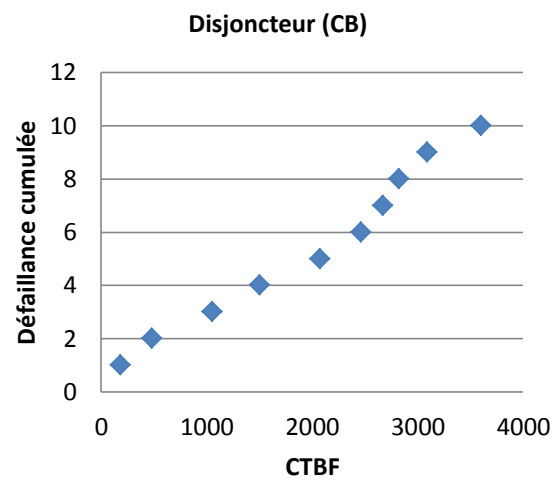
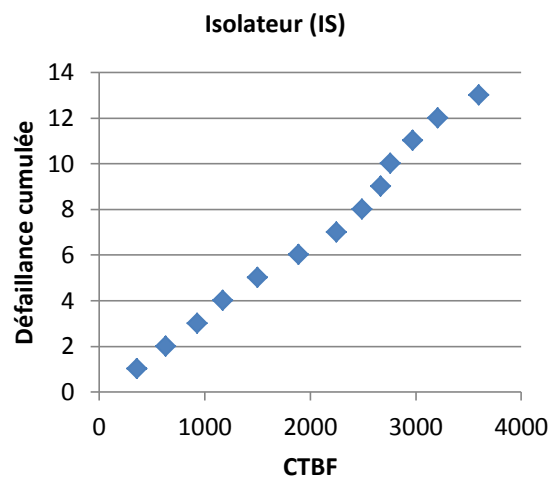
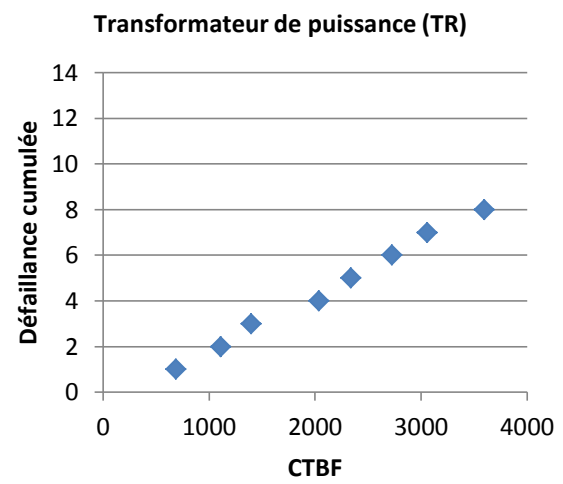
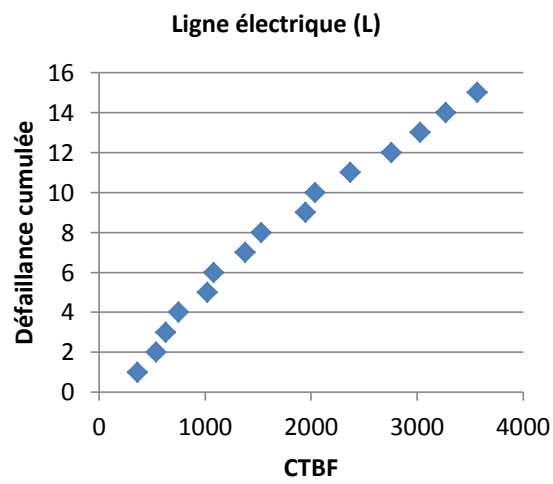


Fig.5.6. Fréquence de défaillance des principaux composants du système

5.4.2. Test de tendance

La figure 5.7 présente graphiquement le TBF de chaque composant. Les points dans cette figure ont formé une semi droite positive, cela signifie que l'ensemble de données est exempt de toute tendance et est dit distribué de manière identique



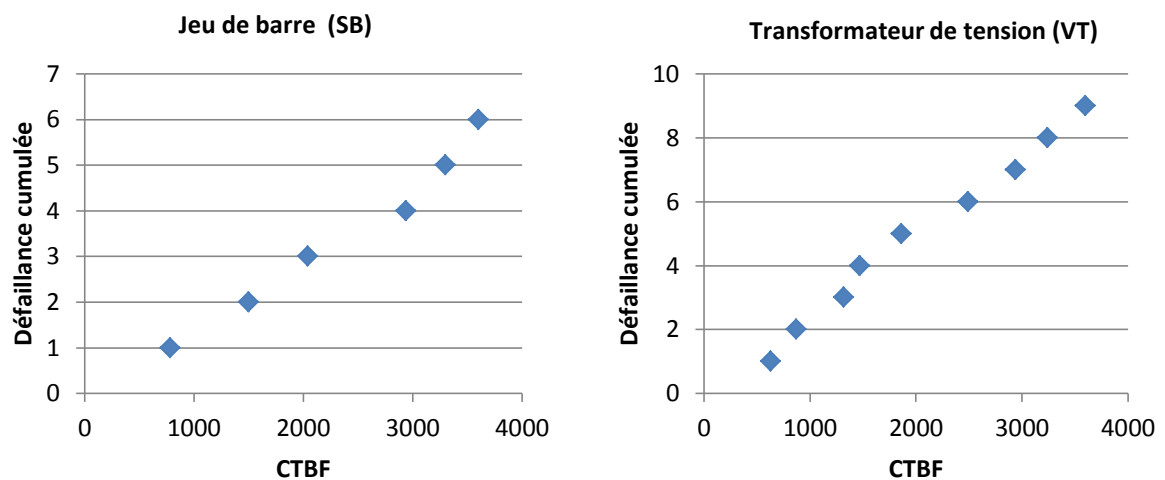
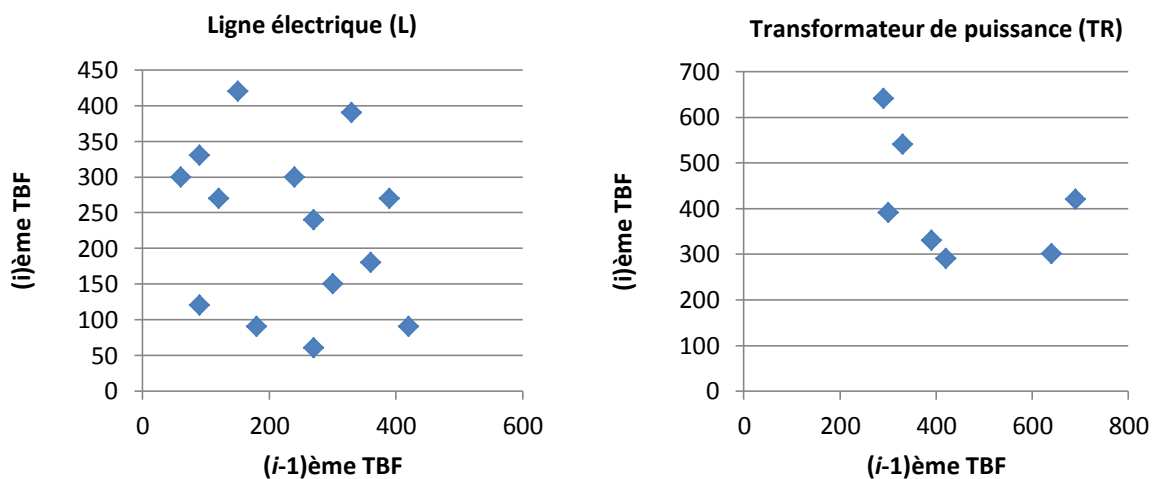


Fig. 5.7. Test de tendance pour TBF

5.4.3. Test de corrélation sérielle

On remarque dans la figure 5.8 que les points de données résultants sont dispersés au hasard et sont sans motif notable, cela indique que l'ensemble de données est exempt de corrélation sérielle, et suggère en outre que l'ensemble de données est indépendant les uns des autres.

Basant sur les deux tests précédents, on peut conclure que les ensembles de données sont iid (Distribution identique et indépendante)



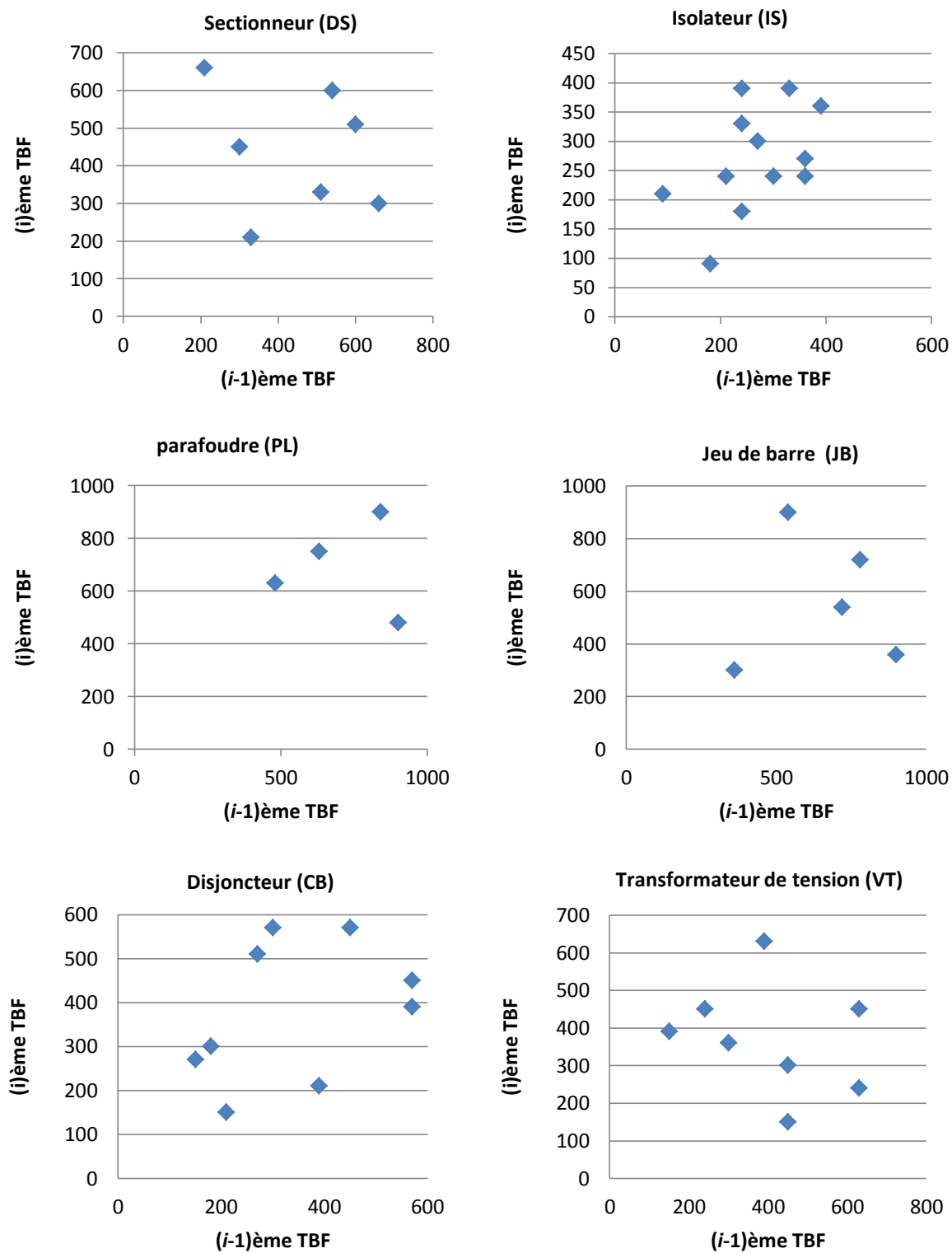


Fig. 5.8. Test de corrélation sérielle pour TBF

5.4.4. L'analyse des données

Les paramètres sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance puis validé par le test de Kolmogorov-Smirnov. Les résultats sont regroupés dans le tableau 5.1

Tab. 5.1 : résultats d'estimation et de validation

Composants	Weibull Paramètres		Test de KS ($\alpha=0.05$)		MTBF(J)	λ (fréquence/J)
	$\hat{\eta}$	$\hat{\theta}$	P _{value}	Décision		
L	269.06	2.28	0.7283	H ₀	238.34	0.0042
CB	407.09	2.63	0.9761	H ₀	361.70	0.0028
SB	673.92	3.13	0.9137	H ₀	602.92	0.0017
DS	501.78	3.55	0.9396	H ₀	451.81	0.0022
PL	780.18	5.89	0.9667	H ₀	723.07	0.0014
VT	449.71	2.89	0.9672	H ₀	400.92	0.0025
PT	502.50	3.38	0.8299	H ₀	451.28	0.0022
IS	306.92	3.77	0.9059	H ₀	277.26	0.0036

5.5. Evaluation des risques des réseaux de distribution électrique

L'AMDEC (*Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité*) est une méthode d'analyse prévisionnelle de la fiabilité qui permet de recenser les défaillances potentielles dont les conséquences affectent le bon fonctionnement du système étudié, puis estimer les risques liés à l'apparition de ces défaillances, afin d'engager des actions de maintenance à apporter lors de la conception, de la réalisation ou de l'exploitation du système[06,97,98].

C'est une méthode inductive et qualitative qui propose d'explorer le système composant par composant. Pour chacun d'eux on recherche les modes de défaillance et leurs effets sur le système, en détaillant leur criticité et leur probabilité d'occurrence pour ainsi souligner les points sensibles du système. On tente ensuite de proposer des solutions pour combattre les problèmes soulevés. Le but d'une AMDEC permet l'examen complet d'un système afin de mettre en évidence ses points critiques et permettre aux concepteurs de réaliser une solution atteignant ses objectifs en termes de la *SdF*. L'AMDEC organise donc les activités suivantes.

5.5.1. Estimation des risques

Lorsque l'AMDEC est terminée, une analyse d'évaluation des risques est effectuée pour toutes les défaillances précédemment déterminées. La criticité C ou le nombre de priorité du risque NPR est donné par :

$$C = O \times G \times D \quad (5.1)$$

Avec :

O : indice de fréquence.

Il représente la probabilité d'occurrences que la cause de la défaillance apparaisse et qu'elle entraîne le mode potentiel de la défaillance considérée. Le barème de cotation varie entre 0.1 et 0.5.

Tab. 5.2. Fréquence O : probabilité d'occurrence (*Sécurité*)

Critères	Fréquence	Cotation
Une défaillance par 10 années	Défaillance très rare	0.1
Une défaillance par 5 années	Défaillance rare	0.2
Une défaillance par 3 années	Défaillance possible	0.3
Une défaillance par une année	Défaillance fréquente	0.4
Une défaillance par 4 à 6 mois	Défaillance très fréquente	0.5

G : indice de gravité.

Le barème de cotation varie entre 0.1 et 0.5 se base sur les effets provoqués par la défaillance en terme de :

- temps d'intervention
- qualité d'alimentation en électricité
- sécurité des hommes et des biens

Tab. 5.3. Gravité G : (*Disponibilité*)

Critères	Gravité	Cotation
Coupure d'alimentation < 5 mn	Mineure	0.1
Coupure d'alimentation < 20 mn	Significative	0.2
25 mn < Coupure d'alimentation < 30 mn	Moyenne	0.3
1 h < Coupure d'alimentation < 2h	Majeure	0.4
5 h < Coupure d'alimentation < 1 jours	Catastrophique	0.5

D : indice de détectabilité.

C'est la probabilité que la cause ou le mode de défaillance supposés apparus provoque l'effet le plus grave, sans que la défaillance ne soit pas détectée au préalable. Le barème de cotation varie entre 1 et 5.

Tab. 5.4. Probabilité de non détection : D (*Maintenabilité*)

Critères	Détectabilité	Cotation
Temps mis pour détecter la défaillance	Détection évidente	1
Défaillance précocement détectable	Détection possible	2
Défaillance difficilement détectable	Détection peu probable	3
Défaillance péniblement détectable	Détection improbable	4
Défaillance indétectable	Détection impossible	5

A partir de ces indices de criticité, il est possible de hiérarchiser les défaillances et de recenser celles dont le niveau de criticité est supérieur à une limite constante contractuellement imposée comme suivant : **[19, 89,90, 99]**.

Tab. 5.5. Partition des équipements et plan d'action

Condition imposée	Conséquence	Action de maintenance
$C < R$	Aucun problème, R.A.S.	Maintenance corrective
$R < C < S$	Acceptable mais	surveillance particulière maintenance préventive / conditionnelle
$C > S$	Remise en cause complète de l'étude	- action de maintenance préventive systématique - nouvelle étude amélioratrice.

Le résultat de l'analyse *AMDEC* est résumé dans le tableau ci-dessous

Tab. 5.6. AMDEC : Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité

AMDEC : Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité											
Station de distribution de Relizane						Date:					
Elément	Fonction	modes de défaillances	Causes	Effets	Détection	Criticité R = 0.540 et S = 0.999					Plan d'action de maintenance
						O	G	D	C	Test	
Ligne électrique Transmission Line (L)	Transport	Contact de deux lignes	Forces électrodynamiques du vent	Coupure	Visuelle	0.5	0.5	4	1	C > S	- Action Corrective: si panes mineurs. - action de maintenance préventive systématique - nouvelle étude, utilisation des câbles de même matériel (remplacement)
Isolateur en verre ou en céramique Insulator (IS)	Isolation	Vieillissement Amorçage	- décharges partielles ou complètes de l'arc électrique dans son volume. - surtension (foudre) streamer/leader sa surface par un arc électrique. - pollution atmosphérique (dépôt d'une couche de pollution sur la surface de l'isolateur, humidification progressive de la couche de pollution, développement de zones sèches et apparition d'arcs partiels. - extension des arcs partiels si les conditions sont favorables jusqu'à amorçage de l'isolateur) (milieux poussiéreux quasi-désertique ou salés)	Perforation	Visuelle	0.5	0.5	4	1	C > S	- Action corrective Ils peuvent être recouvert de graisse ou lavé régulièrement. - action de maintenance préventive systématique. - Nouvelle étude amélioratrice
Jeu de barre Bus Bar (SB)	Sélection des lignes	Court-circuit		Contournement	Visuelle	0.5	0.4	3	0.6	R <C<S	action de maintenance préventive systématique

Transformateur de puissance Power Transformer (PT)	Utilisé pour augmenter ou diminuer le niveau de tension d'une source d'énergie alternative.	- les nuisances sonores : les phénomènes de striction dans les transformateurs - résistance d'isolement faible - déclenchement à la mise sous tension au moment de l'opération de délestage	- la vibration de l'enveloppe métallique, des jeux de barres et de la plaque signalétique. - un empoussièrément anormal. Un encrassage par vapeurs et poussières grasses. - les convertisseurs électroniques sont mal connectés ou la tension d'alimentation est non conforme. Les fusibles sont mal calibrés. Les transformateurs de courant (TC) sont saturés par les courants d'enclenchement. Amorçage à la masse ou entre spires des enroulements du transformateur.	- échauffement excessif - contournement - absence de tension	- bruit - Visuelle -échauffement	0.5	0.5	4	1	C > S	Surveillance particulière, maintenance préventive conditionnelle - revoir les fixations et les serrages des panneaux et des supports. - vérifier l'état mécanique du transformateur. - effectuer des mesures de bruit. - vérifier le calage et le centrage des bobines. - revoir la fixation de la plaque signalétique. - aspirer la poussière et de nettoyer toutes les parties accessibles puis souffler le transformateur à l'azote ou à l'air asséché. - utiliser un dégraissant à froid pour le nettoyage de la résine et des cales.- - vérifier le branchement et alimenter avec les tensions spécifiées sur le boîtier des convertisseurs électroniques. - changer le calibre des fusibles - revoir la définition des transformateurs de courant. - effectuer un contrôle visuel et un diagnostic avec mesure des résistances d'isolement des enroulements.
Parafoudre Arrester (PL)	Protection	- surtensions	- foudre - manœuvre d'appareillage - défaut d'isolement	- claquage de matériels	- Visuelle	0.2	0.1	2	0.04	C < R	Maintenance corrective - maintenir les Parafoudres - maîtrise du défaut d'isolement des prises de terre - choix du niveau d'isolement
Disjoncteur	Protection	- coupures brèves et	- réseau d'alimentation - ré-enclenchements	- arrêt d'équipement - arrêt d'installation - perte de	- bruit - Visuelle	0.5	0.5	4	0.5	C > S	- action de maintenance préventive systématique. - Nouvelle étude amélioratrice

Circuit Breaker(CB)	et control	longues	- défauts internes - permutations de sources	production - dysfonctionnement électronique de puissance	- échauffement						- modification d'architecture du système
Fusible Fuses (F)	Protection	Surintensité	- surcharges	Fusion	Visuelle	0.5	0.3	4	0.6	R <C<S	Remplacement
Sectionneur Sectionalizers (DS)	-isolation galvanique - Séparation électrique	- fermeture difficile ou - ouverture difficile	- alimentation du réseau - Réinitialiser - Les défaillances internes - Les sources de permutations	Blocage	- Visuelle - bruit	0.5	0.4	3	0.6	R <C<S	- Aspirer la poussière et nettoyer toutes les parties accessibles en soufflant le transformateur avec de l'azote ou de l'air sec. - Remplacement

5.5.2. Détermination des équipements les plus critiques

Après l'analyse AMDEC que nous avons réalisé sur le poste MT de Relizane, nous avons pu préciser et classer les composants les plus critiques durant la période d'essai du réseau électrique (figure5.9).

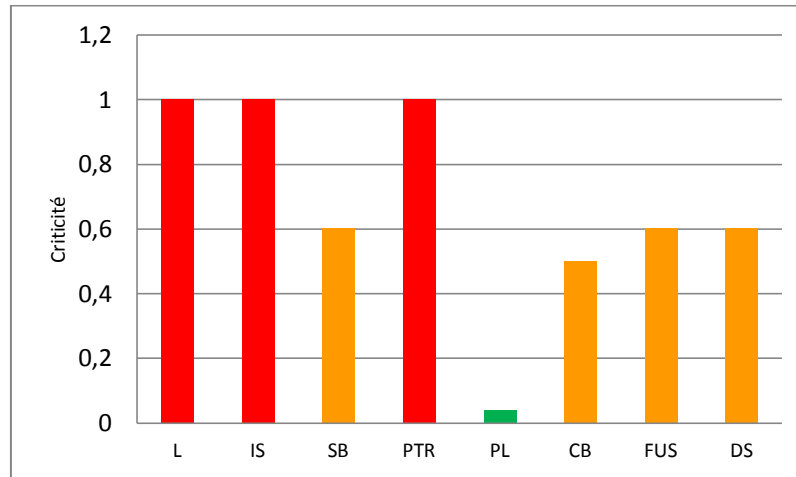


Fig. 5.9. Les équipements critiques

L'analyse AMDEC aboutit à deux descriptions complémentaires du réseau :

- une description, formalisée par des blocs diagrammes fonctionnels BDF (Figure. 5.10) et un arbre de défaillance AdD dont le but est de présenter l'architecture du système et les liens fonctionnels entre les différents éléments de ce système et la détermination des caractéristiques FMDS ou (RAMS).

5.6. Blocs Diagrammes de fiabilité du système

C'est une représentation quasi-directe de la vision fonctionnelle du système grâce à la juxtaposition série parallèle ou mixte de blocs associés aux entités de base de ce système. Dans cette représentation, les blocs représentent des éléments (*matériels ou événements*) dont la défaillance entraîne la panne du système. Le diagramme de fiabilité est donc un graphe sans circuit, admettant une entrée et une sortie, dont les sommets, appelés blocs, représentent les éléments du système et dont les arcs traduisent les relations entre les différents éléments [92]. Ainsi, dans la figure 5.10, nous nous concentrons sur une modélisation événementielle sans décomposition afin de voir l'influence de fiabilité de chaque composant sur la fiabilité globale du système et avoir une concordance et la complémentarité du bloc diagramme de fiabilité *BDF* avec l'arbre de défaillance *AdD*.

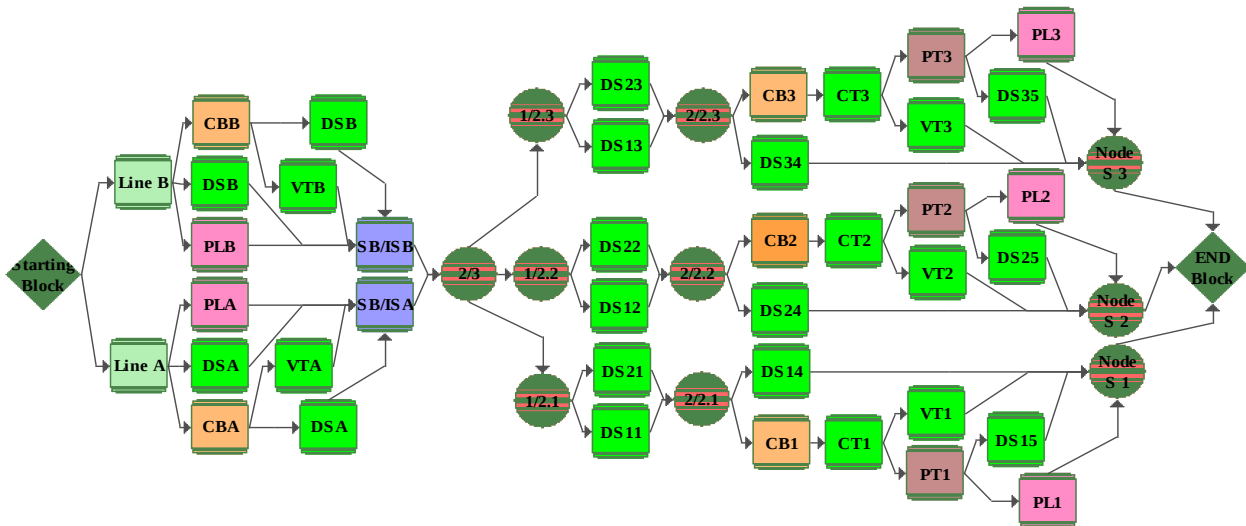


Fig. 5.10. Blocs diagrammes de fiabilité BDF

La fiabilité du système est donnée par l'équation 5.2

$$R_s(t) = g\{R^1(t), R^2(t), \dots, R^j(t), \dots, R^m(t)\} \quad (5.2)$$

Où la fonction g est la relation de calcul de fiabilité totale du système en utilisant BDF mentionné au chapitre 2 et $R^j(t)$ est la fonction de fiabilité du $j^{\text{ème}}$ composant du système.

5.7. Arbre de défaillance dynamique Add

L'arbre de défaillance permet d'identifier les chemins de faiblesse du système, son objectif est de déterminer la raison initiale d'apparition d'un événement non désiré et la probabilité que celui-ci survienne. Il se procède par combinaison de fautes menant à l'événement non désiré ou redouté. On part d'un événement indésirable unique et bien défini qui correspond au non fonctionnement d'un système et l'arbre de défaillance représentera graphiquement les combinaisons d'événements qui conduisent à la réalisation de cet événement indésirable (*méthode déductive*). La figure 5.11 ci-dessous montre l'exemple d'arbre d'évènements du système étudié qui conduit à la perte d'alimentation. Les éléments sont représentés par des symboles (*cercles, rectangle*) auxquels sont associées des portes logiques : « "et", "ou" ». On recherche la plus petite combinaison possible d'évènements de base conduisant à l'événement au sommet.

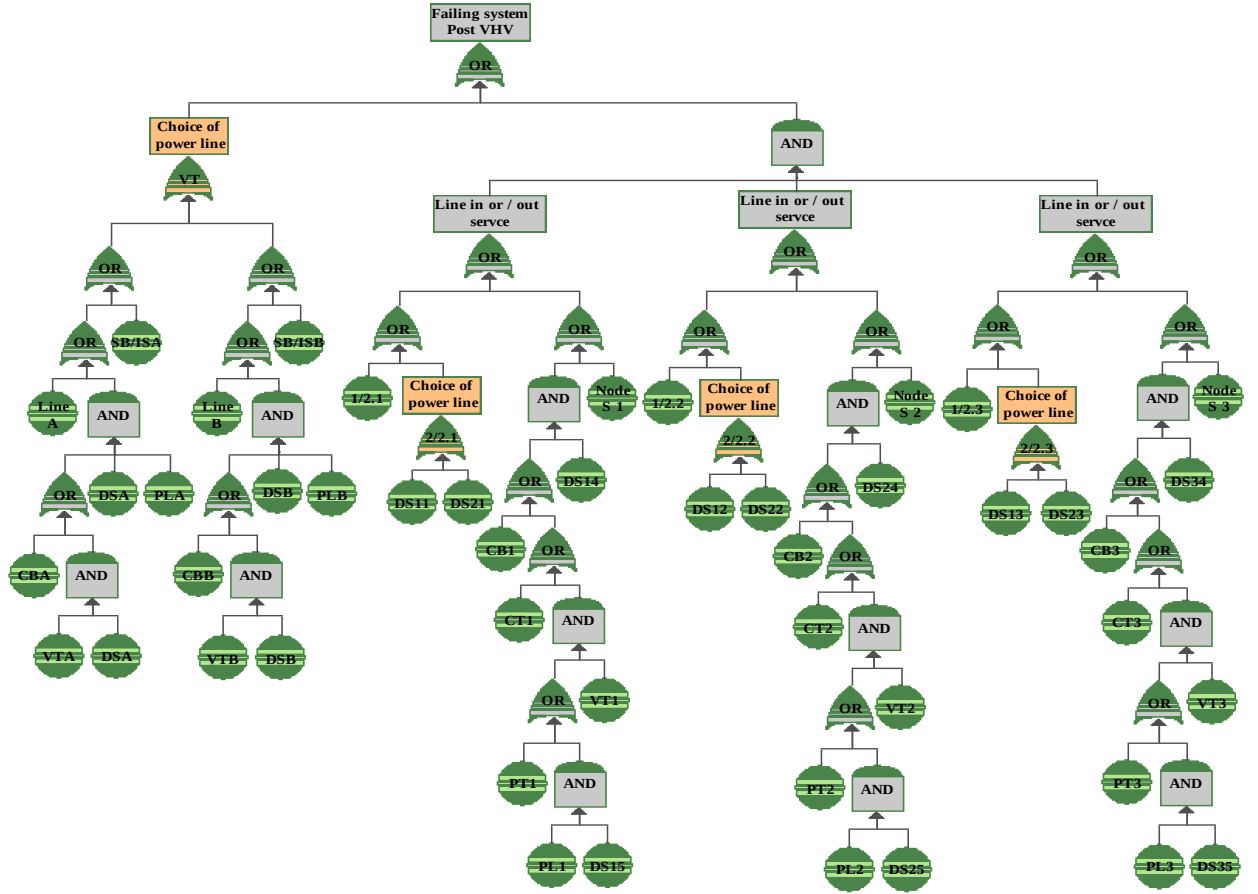


Fig. 5.11. Arbre de défaillance Add

5.8. Approche d'optimisation par les méta-heuristiques

5.8.1 Formulation du problème et méthodologie proposée

Le problème est de minimiser le coût total de maintenance attendu dans la période T_{mis} sous les contraintes de fiabilité en trouvant des valeurs optimales de seuil de fiabilité R_{th}^j ($j=1, 2, \dots, m$)

$$Total\ Cost = C_{UM} + C_{PM} + C_{RM} \quad (5.3)$$

Tel que:

$$R_M \geq R_d \ \& \ t \leq T_{mis}$$

Où :

$$R_M = \frac{1}{T_{mis}} \int_0^{T_{mis}} R_s(t) dt \quad (5.4)$$

R_{th}^j : Seuil de fiabilité du $j^{ème}$ composant

R_d : Fiabilité désirée

R_M : Fiabilité moyenne du système pendant T_{mis}

$R_s(t)$: Fiabilité instantanée du système

Pour résoudre ce problème, nous avons proposé une évaluation de chaque solution $R_{th}(R_{th}^1 R_{th}^2 \dots R_{th}^m)$ selon l'organigramme de la figure 5.12 ci-dessous, en utilisant les algorithmes mentionnés auparavant (au chapitre 3).

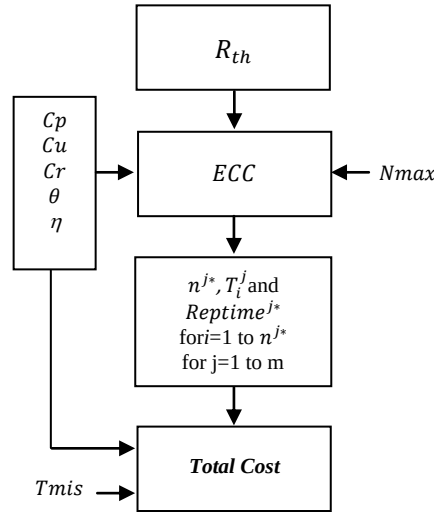


Fig. 5.12. La méthodologie proposée dans cette étude

Le choix du nombre optimal n^{j*} de cycle de PM qui correspond au seuil de fiabilité R_{th}^j du jème élément se fait par le calcul du ECC^j pour chaque composant du système. Ce choix peut être déterminé en utilisant le pseudo code proposé par l'auteur [03] suivant :

Pseudo code to choose the lowest $ECC^j(n)$ for all components

Input: $R_{th}, \eta, \theta, Cu, Cp, Cr$ and $Nmax$

Set $j=1; n=1;$

While $j \leq m$ **do**

While $n \leq Nmax$ **do**

for $i=1:n$

Compute A_i^j, B_i^j, T_i^j from eq 2.30, 2.31 and 2.37

end for

use eq 2.38 to evaluate $ECC^j(n)$

$n=n+1$

end while

Store the lowest value of $ECC^{j*}(n)$

Set $n^{j*} = n; \quad Reptime^{j*} = \sum_1^{n^{j*}} T_i^j;$

$j=j+1$

end while

5.8.2. Coût total de la maintenance

Le coût total de maintenance pour T_{mis} est donné par l'équation suivante:

$$TotalCost = C_{UM} + C_{PM} + C_{RM} \quad (5.5)$$

Le coût attendu de l'action PM

$$C_{PM} = \sum_{j=1}^m N_{PM}^j \cdot Cp^j \quad (5.6)$$

Le coût attendu de l'action RM:

$$C_{RM} = \sum_{j=1}^m N_{RM}^j \cdot Cr^j \quad (5.7)$$

Le coût attendu de l'action UM:

$$C_{UM} = \sum_{j=1}^m Cum^j \left[(N_{PM}^j + N_{RM}^j) \cdot (-\ln(R_{th}^j)) + B_i^j \cdot \left(\left(\frac{A_i^j + x^j}{\eta^j} \right)^{\theta^j} - \left(\frac{A_i^j}{\eta^j} \right)^{\theta^j} \right) \right] \quad (5.8)$$

Ou:

$Cum^j, N_{PM}^j, N_{PM}^j$ et N_{RM}^j sont respectivement le cout de la maintenance corrective de jème composant, le nombre de l'action PM sur le jème composant pour T_{mis} et le nombre de RM action sur le jème composant pour T_{mis} .

$$N_{RM}^j = \left\lfloor \frac{T_{mis}}{Reptime^j} \right\rfloor ;$$

$$\text{On pose: } T_{mis} = N_{RM}^j \cdot Reptime^j + d^j$$

$$\text{Avec: } t_{i-1}^j \leq d^j < t_i^j \text{ où } 1 \leq i \leq n^j \text{ et } t_0^j = 0$$

$$N_{PM}^j = (n^j - 1) \cdot N_{RM}^j + i - 1;$$

$$\text{On pose: } x^j = d^j - t_{i-1}^j$$

5.8.3. Le résultat d'optimisation

En adaptant les algorithmes montrés au troisième chapitre au problème d'optimisation. Il s'agit de chercher des solutions dans l'espace de recherche ou chaque solution R_{th} est représentée par son m composante, c'est-à-dire $R_{th} = (R_{th}^1, R_{th}^2, \dots, R_{th}^m)$, où m représentent la dimension du problème d'optimisation à résoudre et R_{th}^j est le seuil de fiabilité de la jème composant du système. L'évaluation de solutions se fait selon l'organigramme de la figure 5.12. Après l'étape de paramétrage et l'initialisation, les boucles d'optimisation qui sont guidées par SA, GA, PSO et LFA, poursuivent indépendamment l'optimisation jusqu'à ce qu'elles atteignent le critère d'arrêt. On a deux choix dans le critère d'arrêt le premier c'est que la fonction du cout cesse d'évoluer, le deuxième où les itérations atteint le nombre maximum d'itérations. Dans ce travail ; nous adoptons le deuxième choix pour comparer la performance de ces algorithmes.

Le choix de l'espace de recherche se fait d'une manière empirique, ainsi, on a deux choix :

Le premier est de choisir directement les seuils R_{th}^j de l'espace de recherche $[R_{thmin} ; R_{thmax}]$; où R_{thmin} et R_{thmax} sont respectivement la limite inférieure et supérieure de l'espace de recherche. Donc on aura $L = R_{thmax} - R_{thmin}$.

Le deuxième choix se fait par intervalle de temps T_1^j indiqué au (§ : 2.6.1)

Puisque on a $R_{th}^j(T_1^j) = \exp\left(-\left(\frac{T_1^j}{\eta^j}\right)^{\theta^j}\right)$ avec $l_{min} \leq T_1^j \leq l_{max}$ et $L = l_{max} - l_{min}$

Ce deuxième choix nous offre une diversité de valeurs mieux que le premier. Pour cette raison on le choisi pour résoudre notre problème avec $l_{min} = 0$ et $l_{max} = 800$.

Dans cette étude on a choisi une période $T_{mis} = 1825j$.

Les coûts des différents types de maintenance en unité monétaire (UM) sont récapitulés dans le tableau 5.7 ci-dessous.

Tab.5.7. Coûts des différents types de maintenance

j	Composants	Code	Cu^j	Cp^j	Cr^j
1	Ligne électrique	L	142	24	284
2	Sectionneur	DS	15	4	30
3	Disjoncteur	CB	92	15	184
4	Jeu de bar	SB	45	10	90
5	isolateur	IS	40	12	80
6	Transformateur de puissance	PT	400	100	1000

Il est important de noter que les données regroupées dans ce tableau sont des valeurs estimées approximativement après l'analyse des données collectées suite à un audit de maintenance que nous avons fait avec le personnel du post d'interconnexion et de distribution de l'énergie électrique de la station de Relizane dans le but de valider notre approche proposée.

5.8.3.1. Le résultat de L'algorithme SA

Les paramètres

$T_0=0.2$

$T_f=0.99$

Nombre d'itérations=40

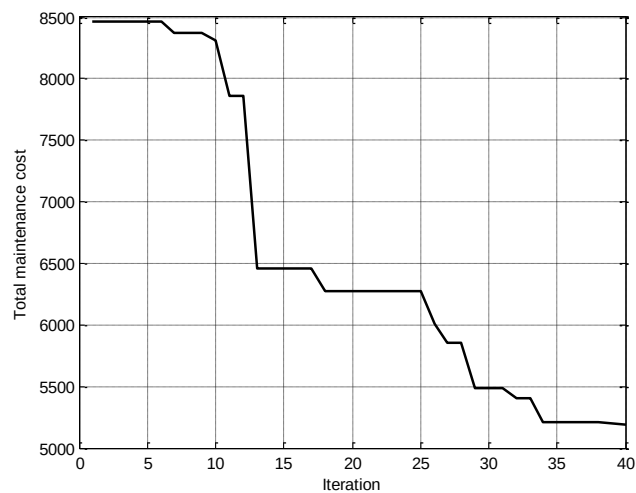


Fig. 5.13. Variation du coût de maintenance

5.8.3.2. Le résultat de L'algorithme GA

Les paramètres

Nombre de population est 30 individus

Nombre d'itération est 40

Le codage réel : chaque individu est 'un vecteur contient m valeurs réel

La sélection : On adopte la sélection par tournoi ; cette technique concerne la sélection proportionnelle des paires d'individus puis choisit parmi ces paires qui les plus performants.

Le Croisement : le croisement uniforme ou $\alpha = 1.2$ pour exploité au maximum l'espace de recherche

Mutation et élitismes comme il est indiqué au chapitre 3.

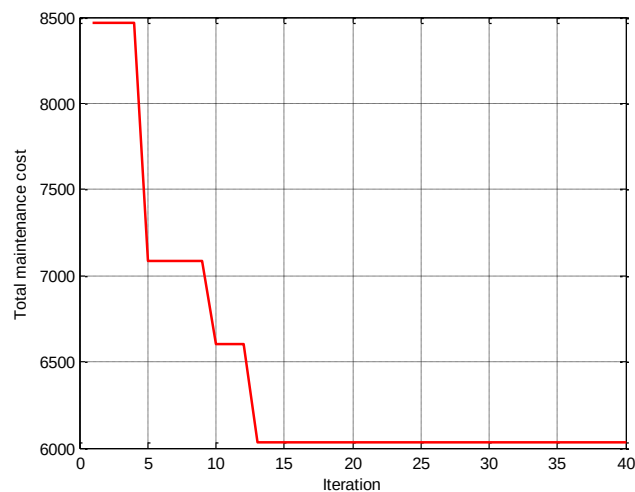


Fig. 5.14. Variation du coût de maintenance

5.8.3.3. Le résultat de L'algorithme OEP

Les paramètres

Nombre de particules est 30

Nombre d'itération est 40

w : décroissant linéairement de 0.9 à 0.4

$c_1 = c_2 = 2$

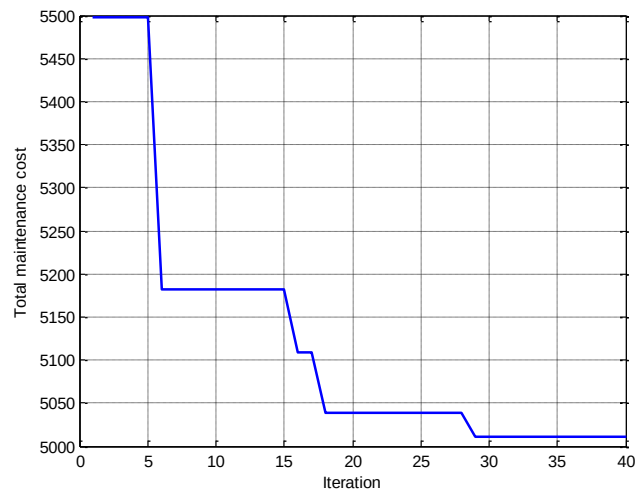


Fig.5.15. Variation du coût de maintenance

5.8.3.4. Le résultat de L'algorithme LFA

Les paramètres :

Nombre de lucioles est 30

Nombre d'itération est 40

$\beta_0 = 2, \gamma = 1$

α : décroissant linéairement de 0.2 à 0.1

ε : Ses valeurs entre 0 et 0.05L

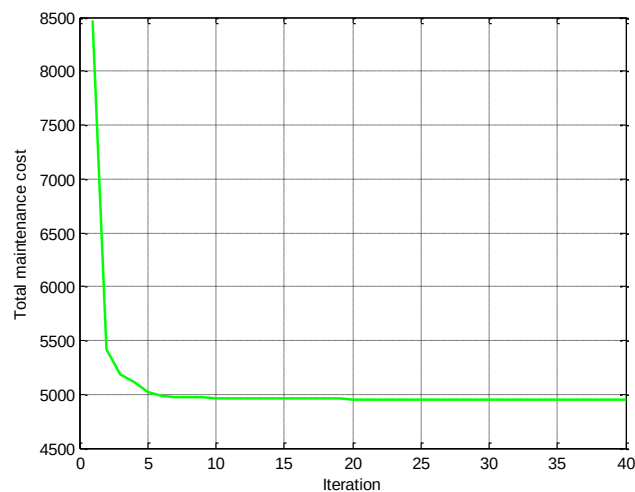


Fig.5.16. Variation du coût de maintenance

5.8.3.5 Les résultats de l'ensemble SA, GA, PSO et LFA

On regroupe les courbes précédentes dans la figure 5.17 pour voir clairement la déférence

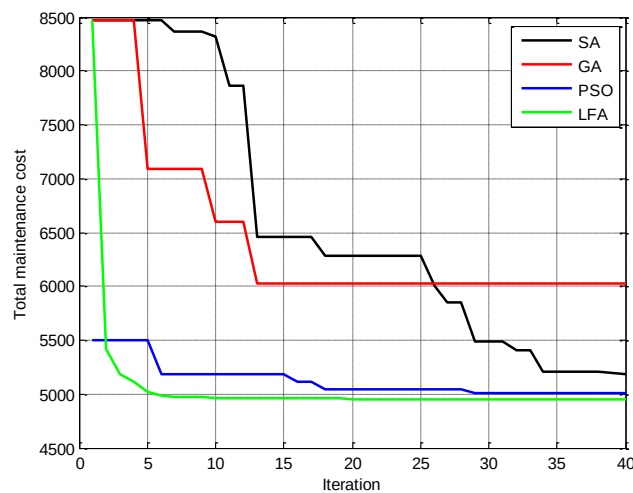


Fig.5.17. Variation du coût de maintenance

Dans le tableau 5.8, nous résumons le coût de maintenance optimal qui doit être dépensé pendant une période T_{mis} de service de système par les quatre algorithmes.

Tab.5.8. Coût optimal obtenu

	SA	GA	PSO	LFA
Total Cost	5189.1	6032.1	5011.4	4955.1
$R_M(\%)$	96.03	96.60	95.18	95.79

Nous voyons clairement que la fiabilité moyenne du poste électrique garde un certain niveau assis élevé.

Le coût cumulé attendu pour le cycle de vie de chaque composant du système est illustré à la figure 5.18. Sur cette figure, nous pouvons remarquer la différence entre eux, et cela est dû à ce que nous l'avons mentionné précédemment.

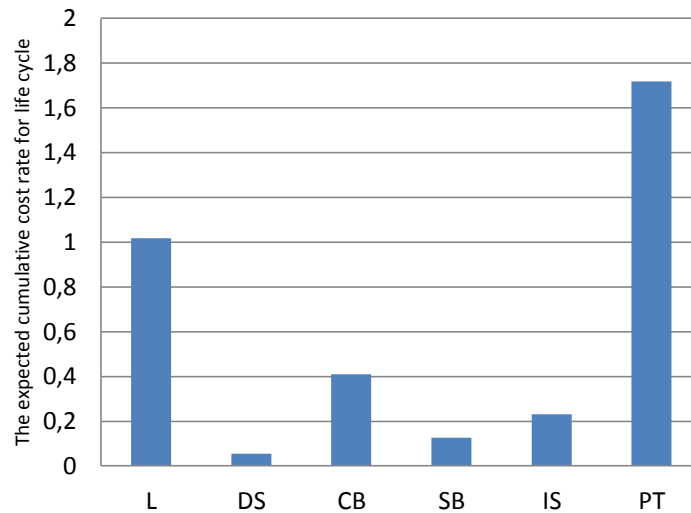


Fig.5.18. ECC v.s composants

5.9. Plan de maintenance adopté

les intervalles de temps entre $i^{\text{ème}}$ et $(i+1)^{\text{ème}}$ actions de PM sont déterminés par les relations précédentes (chapitre 2 : équations 2.30 et 2.37) afin de trouver et d'adopter des plans de maintenance adéquats pour chaque situation critique du système étudié.

Ensuite, l'optimum de seuil de fiabilité R_{th}^j et l'optimum d'intervalle des actions préventives T_i^j par l'adoption de résultat obtenu par la méthode LFA se résume dans le tableau 5.9 suivant :

Tab.5.9 : Résultats optimaux obtenus par l'algorithme LFA

Composant	$R_{th}^j(\%)$	n^{j*}	T_1^j	T_2^j	T_3^j	T_4^j	T_5^j	T_6^j	Reptime j*
L	68.72	5	175.02	151.90	125.06	101.36	82.49		635.8
DS	86.12	5	293.72	257.82	212.01	167.98	131.34		1062.9
CB	75.28	5	252.25	219.70	180.34	144.56	115.84		912.7
SB	88.09	5	348.40	304.85	250.26	198.92	156.91		1259.3
IS	78.19	4	211.58	185.98	153.10	121.21			671.9
PT	90.32	6	255.65	224.14	184.17	146.06	114.56	90.40	1015

Nous voyons clairement qu'à partir les figures 5.19 et 5.20 ci-dessous que notre système garde un certain niveau assis élevé de fiabilité après l'adoption de notre approche d'optimisation.

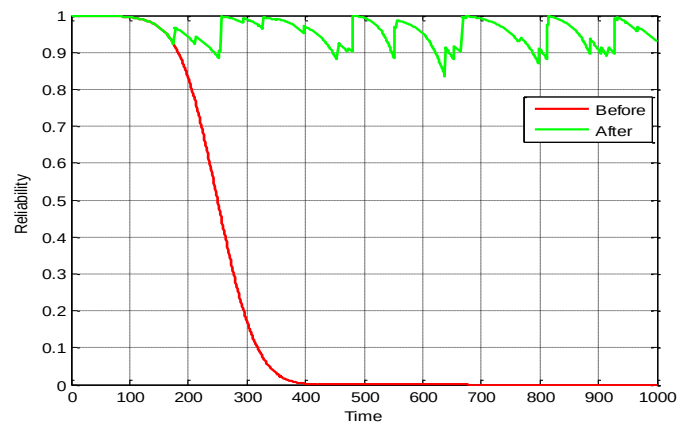


Fig. 5.19. La fiabilité avant et après l'optimisation

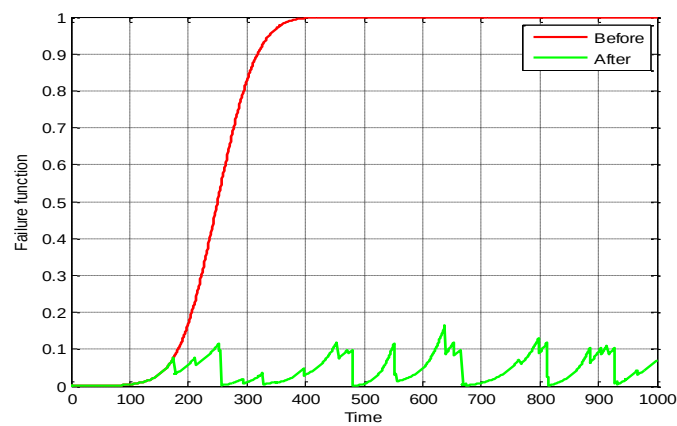


Fig. 5.20. La dé-fiabilité avant et après l'optimisation

Analyse de la disponibilité des composants du système

La disponibilité intrinsèque des composants du système a été calculée à l'aide de l'équation 5.7 et le résultat est présenté dans le tableau 5.10.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (5.9)$$

Tableau 5.10 : Résultat de calcul de disponibilité

Composant	MTBF(J)	MTTR(hr)	A
L	238,34	4,5	0,9992
DS	451,81	5	0,9995
CB	361,7	5	0,9994
SB	602,92	4	0,9997
IS	277,26	3	0,9995
PT	451,28	3,5	0,9997

5.10. Interprétation du résultat

De ce résultat obtenu, il est clair que ces figures montrent la différence entre les approches utilisées pour optimiser les coûts des opérations de maintenance du réseau de distribution en évaluant l'intervalle optimal du plan de maintenance proposé. Ainsi, on se rend compte de la nécessité d'atteindre les objectifs fixés par le modèle MBF plus particulièrement l'augmentation de la fiabilité, de la disponibilité et de la sécurité de ce système, et par conséquent, la méthode LFA est beaucoup plus robuste par rapport aux approches SA, GA et PSO, ainsi.

La figure 5.6 montre la courbe de la fréquence de défaillance des principaux composants utilisés dans notre système étudié, afin de nous permettre de traiter et d'analyser les étapes de la démarche MBF. En commençant par l'étude de la détermination des tests de tendance et de corrélation sérielle figures 5.7 et 5.8, afin d'analyser le temps entre les défaillances de chaque élément du système et par la suite une évaluation expérimentale des risques des réseaux de distribution électrique est obligatoire pour la détermination des équipements les plus critiques du système figure 5.9, et l'adoption du plan de maintenance préventive pendant la période d'essai de notre intervention sur le système étudié.

Après cela, nous passons sur l'utilisation des algorithmes méta-heuristique pour optimiser les coûts de maintenance. Parmi ces algorithmes, nous avons utilisé les algorithmes génétiques (genetic algorithms) GA, le recuit simulé (simulated annealing) SA, l'algorithme des essaims particuliers (Particle Swarm Optimization) PSO et l'algorithme Algorithme de luciole réagi par des vols de Levy (Levy flights firefly algorithm) LFA vues successivement sur les figures de 5.13 à 5.17, ainsi, nous voyons clairement que l'optimisation des coûts de maintenance par l'algorithme LFA est meilleur par rapport aux autres algorithmes et le résultat est résumé dans le tableau 5.8. De plus, le coût cumulé attendu pour le cycle de vie de chaque composant du système par rapport au nombre de cycles PM appliqués au système, et en appliquant notre point de vue; nous obtenons le résultat illustré par la figure 5.18 et le tableau 5.9.

De plus, nous voyons clairement qu'à partir des figures 5.19 et 5.20 que notre système garde un certain niveau assis élevé de fiabilité après l'adoption de notre approche d'optimisation.

Enfin, nous avons constaté que l'algorithme LFA peut donner un meilleur résultat par rapport aux algorithmes.

Après cette étude intensive, qui s'appuie principalement sur le modèle MBF (RCM) pendant une période déterminée, et l'utilisation des algorithmes méta-heuristiques pour trouver les meilleures solutions, nous avons pu sortir par des recommandations listées en conclusion afin de les mettre à la disposition du service maintenance de la station du réseau de distribution électrique.

5.11. Conclusion

D'après les différentes simulations et les résultats obtenus, nous concluons que l'application effective de l'optimisation de la maintenance par une telle démarche permettra donc d'améliorer la fiabilité et la disponibilité des réseaux électriques, d'augmenter la sécurité des personnes et des biens et de l'environnement et de réduire le coût global d'exploitation et de maintenance.

Conclusion générale

L'influence des changements technologiques sur la fiabilité des composants des réseaux électriques et des coûts de maintenance peut être évaluée par une méthode basée sur la théorie du renouvellement généralisé.

A travers ce travail nous avons montré que la fonction maintenance est un impératif de réussite des entreprises. Sa prise en compte, son développement et son optimisation est une nécessité surtout si les enjeux sont très importants comme le cas des réseaux de transport électrique où la sûreté de fonctionnement, la sécurité du personnel et de la clientèle est une priorité quel que soit le coût qui sera derrière cette fonction inévitable.

Ce travail nous a permis de saisir certaines réalités du monde industriel, où les structures organisationnelles ne sont pas toujours sensibilisées à la nécessité de mettre en place un système de maintenance. La méthodologie d'implantation proposée dans cette étude repose sur les concepts de la maintenance basée sur la fiabilité (MBF) et elle propose un outil d'analyse et de modélisation des données.

Ce travail présente un modèle hybride de PM aux composants du système pendant une période finie. Des actions PM imparfaites de durée négligeable sont effectuées par l'équipe de maintenance chaque fois que la fiabilité de l'équipement atteint un certain seuil. Ils ne réduisent pas seulement l'âge effectif des composants, mais ils augmentent également leur taux de défaillance. Toutes les pannes sont réparées au minimum avec une durée négligeable.

Un modèle mathématique et des algorithmes méta-heuristiques ont été adoptés pour trouver le seuil de fiabilité optimal R_{th}^j pour chaque composant du système. Un exemple numérique a été présenté pour illustrer le modèle proposé. Les résultats obtenus ont montré l'utilité et la cohérence du modèle.

Une méthodologie complète pour trouver l'optimum du seuil de fiabilité R_{th}^j et par l'utilisation des quatre algorithmes méta-heuristiques avec des mécanismes différents dans la recherche de l'optimum global. La PSO qui est basée sur la communication entre les membres de l'essaim, le GA inspiré de la génétique dans la production des solutions et l'idée de sauter d'une solution à une autre dans le SA, tandis que le LFA, cherche autour des membres les plus lumineux afin de trouver l'optimum R_{th}^j . Après la simulation et la comparaison entre ces quatre algorithmes, nous avons constaté que l'algorithme LFA est plus efficace que les trois autres algorithmes (SA, GA et PSO).

Les résultats obtenus, à partir des différentes modélisations et différentes simulations, nous ont permis de formuler les conclusions suivantes :

- l'application effective de l'optimisation de la maintenance nous a permis d'améliorer la fiabilité et la disponibilité des réseaux électriques, d'augmenter la sécurité des personnes et des biens et de l'environnement et la réduction du coût global d'exploitation et de maintenance.

En conséquence, l'amélioration de la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité des réseaux électrique, impose au service de maintenance de le redynamiser, d'anticiper et de collecter toutes les défaillances possibles à l'âge de maturité avant de penser à l'application d'un plan de maintenance quelconque.

- la modélisation des systèmes électriques par la méthode MBF et l'utilisation des méta-heuristiques nous a permis donc de faciliter les tâches de compréhension et de conception pour aboutir à des solutions fiables et stratégiques.

Suite à cette étude qu'on a réalisée dans la station d'énergie électrique de Relizane, il sera nécessaire de prendre en compte les recommandations suivantes. Faire une rénovation complète du système, puisque la majorité des équipements sont très anciens et provient de la période coloniale, en particulier les lignes électriques et les transformateurs. A cet effet, il est conseillé de redynamiser le service maintenance, de changer complètement les lignes électriques en utilisant le même matériau, rénover ou remplacer les transformateurs de puissance par d'autres plus puissants et plus robustes, et, finalement, changer totalement les anciens isolateurs par d'autres en matériau composite pour résister à l'humidité et la salinité de cette zone.

En perspective et de manière générale, nous voudrions prendre le même exemple en insérant le coût de non production tout en considérant que les différentes interventions ayant des durées non négligeables, avec l'utilisation d'autres méthodes et d'algorithmes d'intelligence artificielle.

Références

1. B. Yssaad, M. Khiat, A.Chaker, “Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems,” in *IJEPES International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, pp. 108–115, Volume 55, February 2014
2. B. Yssaad, M. Khiat, and A. Chaker . “Reliability Centered Asset Maintenance Optimization for Power Distribution Systems,” in *IREMOS International Review on Modelling and Simulations*,(Vol. 6 N. 1) part A, February 2013.
3. B. Abdallah, B. Yssaad, D. Mohamed, B. Benaissa, Y. Benabdellah. “Maintenance Optimization for Complex System using Evolutionary Algorithms under Reliability Constraints within the Context of the Reliability-Centered-Maintenance”. *IJPE*, vol. 17, no. 1, January 2021, pp. 1-13.
4. Daoued. Ait Kadi. “Fiabilité des systèmes ». Université Laval 2000”.
5. Renaud Guignet. “ Management de la maintenance, améliorez les performances opérationnelles et financières de votre maintenance ”. DUNOD 2002.
6. François Monchy. “ La fonction maintenance: Formation à la gestion de la maintenance industrielle ”. Collection technologies de l'université à l'industrie, MASSON, 1991.
7. Hedi Kaffel. “Maintenance distribuée : concepts, évaluation et mise en œuvre”. Thèse de Doctorat 2001.
8. Jean claude francastel “ la fonction maintenance de l’expression à la satisfaction du besoin ”. Edition AFNOR 1999.
9. Francastel J.C., Externalisation de la maintenance : Stratégies, méthodes et contrats. Dunod, Paris, 2003.
10. Bouche, M. “Ou va la maintenance industrielle, Problèmes économiques”, No 2, 1990.
11. Laprie J.C. et al, “Guide de la sûreté de fonctionnement. Ouvrage collectif du Laboratoire d'Ingénierie de la Sûreté de fonctionnement”. Cépaduès Editions, 1995.
12. Jean Claude Francastel. “Ingénierie de la maintenance : de la conception à l’exploitation d’un bien ” . DUNOD 2003.
13. P. Bilan, “Modélisation des modes de marche d’un système automatisé de production ” Thèse de Doctorat. Nantes 1994.
14. Jourden, P., “Pratique de la maintenance industrielle”, Dunod, France, 2002
15. I.P.S. Ahuja and J.S. Khamba, “Total productive maintenance: literature review and directions”. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 25 No. 7, 2008, pp. 709-756

16. Documents du SONEGAZ-GRTE. “ article 2005”
17. RED. “Systèmes de Gestion de la Maintenance des réseaux électriques”. l’expérience de RED ELECTRICA DE ESPAÑA 2005
18. Kufmman. A, Granchko. G, Kroun. R. “Modèles mathématique pour l’étude de la fiabilité des systèmes”. Masson et Cie. 1975
19. Retour D, Bouche M. et Plauchu V., “Où va la maintenance industrielle. Problèmes économiques”, No. 2.159, pp. 7-13, Janvier, 1990.
20. Piechowiak S., “Intelligence artificielle et diagnostic”. Techniques de l’ingénieur, S 7 217, décembre, 2003.
21. harvard business review “les systèmes de mesure de la performance” Edition d’organisation 1999.
22. Grusenmeyer, C., “ Organisation de la maintenance et interactions maintenance” . INRS, NS 0182, France, 2000.
23. Rasovska I, Chebel-Morello B. et Zerhouni N., “Process o s maintenance: decision support system for maintenance intervention”. Proc. of 10th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation ETFA’05, Italie, 2005.
24. Spadoni M., “ Système d’information centré sur le modèle CIMOSA dans un contexte d’entreprise étendue”, JESA, Volume 38, n° 5, pp. 497-525, 2004.
25. M. Gabriel et Y. Pimor. “GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur) ”. 1985
26. Disponible sur: <http://fr.wikipedia.org>.
27. Ivana Rasovska. “Contribution à une méthodologie de capitalisation des connaissances basée sur le raisonnement à partir de cas : Application au diagnostic dans une plateforme d’e-maintenance”. Thèse 2006.
28. Malik MEGDICHE. “Sûreté de fonctionnement des réseaux de distribution en présence de production décentralisée”. Thèse doctorat Grenoble Décembre 2004
29. Olivier Losson. “Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels”, http://lagis-vi.univ-lille1.fr/~lo/ens/ancien/surete_cours_selection_9dpp.pdf
30. J-C. Laprie : “Dependability of computer systems : concepts, limits, improvements”. In Proc. 6th International Symposium on Software Reliability Engineering, October 1995.
31. J-C. Laprie : “Sûreté de fonctionnement des systèmes : concepts de base et terminologie”. Revue de l’Électricité et de l’Électronique, No. 11, Déc. 2004, pp. 95-105.

32. M. Jallouli “Méthodologie de conception d’architectures de processeur sûres de fonctionnement pour les applications mécatroniques” thèse de doctorat Juin 2009. Université Paul Verlaine – Metz
33. Xavier Zwingmann. “ Modèle d’évaluation de la fiabilité et la maintenabilité au stade de la conception ”. Thèse de Doctorat, 2005.
34. S.V.S. Rajaprasad, “ Investigation of reliability, maintainability and availability of a paper machine in an integrated pulp and paper mill”, I J EST, Vol. 10, No. 3, 2018, pp. 43-56.
35. H. P. Jagtapa, A. K. Bewoor, R. Kumarc, M. H. Ahmadi, M. E.H. Assade, M. Sharifpur, “RAM analysis and availability optimization of thermal power plant water circulation system using PSO”, ELSEVIER, Energy Reports, doi.org/10.1016/j.egyr.2020.12.025
36. M. J. Rahimdel, S. H. Hosienie, M. Ataei, R. Khalokakaei, “The Reliability and Maintainability Analysis of Pneumatic System of Rotary Drilling Machines”, The Institution of Engineers (India) 2013, DOI 10.1007/s40033-013-0026-0
37. Clément Rau, “ Ajustement linéaire par les moindres carrés”, Laboratoire de Mathématiques de Toulouse Université Paul Sabatier-IUT GEA Ponsan.
38. I. M. Mfetoum¹, S. N. Essiane, E. F. Fakam Kamanke, G. B. Ndzie¹, S. Mbemmo Fotso. “Estimation des paramètres du modèle de WEIBULL : application à la modélisation de la fiabilité de l’entailleuse-perceuse mécanique de ballasts de chemin de fer de CAMRAIL”. Sciences, Technologies et Développement, Edition spéciale, pp117-121, Juillet 2016
39. F. Yang, H. Ren, Z. Hu, “Maximum Likelihood Estimation for Three-Parameter Weibull Distribution Using Evolutionary Strategy”. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, Article ID 6281781, 8 pages, 2019.
40. P. Lyonnet, J. Fauchon. “ Comparaison de la méthode d’estimation des rangs de défaillances dans le cas de données fortement censurées proposée par Johnson avec celle proposée par Patrick Lyonnet ”. Revue de statistique appliquée, tome 40, n°3 (1992), p. 73-78.
41. B. Beuzamy, L. L. Falher, “ Données censurées : Comment les prendre en compte ? ”. Société de Calcul Mathématique SA Manuel données censurées, 2013/08.
42. F. Yang, H. Ren, Z. Hu, “Maximum Likelihood Estimation for Three-Parameter Weibull Distribution Using Evolutionary Strategy”, *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2019 |Article ID 6281781.
43. J.W. Evans, R.A. Johnson, D.W. Green “Two- and Three-Parameter Weibull Goodness-of-Fit Tests” United States Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, November 1989.

44. Dimitrina S. Dimitrova, Vladimir K. Kaishev , Senren Tan “Computing the Kolmogorov-Smirnov Distribution When the Underlying CDF is Purely Discrete, Mixed, or Continuous”. In *Journal of Statistical Software* October 2020, Volume 95, Issue 10, doi: 10.18637/jss.v095.i10.
45. G. Marsaglia, W. W. Tsang, J. Wang “Evaluating Kolmogorov’s Distribution”
46. F.M. Alwan, A. Baharum, S. T. Hasson “The Performance of High-power Station Based on Time Between Failures (TBF)” *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 5(13): 3489-3498, 2013.
47. “Anderson-Darling: A Goodness of Fit Test for Small Samples Assumptions” *START* 2003-5, A-D Test , Volume 10, Number 5
48. L. J  ntschi, S. D. Bolboac  , “Computation of Probability Associated with Anderson–Darling Statistic”, Paper, mathematics, 2018.
49. Malik, M. “Reliable Preventive Maintenance Scheduling,” *A I I E Transactions*, 11(3), pp.221-228, 1979
50. Nakagawa, T. “Sequential imperfect preventive maintenance policies”. In *IEEE Transactions on Reliability*, 37(3), pp.295-298, 1988
51. Khatab, A., Ait-Kadi, D. and Rezg, N. “Availability optimisation for stochastic degrading systems under imperfect preventive maintenance”. In *IJPR International Journal of Production Research*, 52(14), pp.4132-4141, 2014.
52. A.Khatab, C.Diallo, and I.B.Sidibe. “Optimizing upgrade and imperfect preventive maintenance in failure-prone second-hand systems,”in *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 43, Part 1, Pages 58-78, April 2017
53. Zhou, X., Li, Y., Xi, L. and Lee, J. “Multi-phase preventive maintenance policy for leased equipment”. In *International Journal of Production Research*, 53(15), pp.4528-4537, 2014
54. Zhou, X., Xi, L. and Lee, J. “Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation”. In *Reliability Engineering & System Safety*, 92(4), pp.530-534, 2007
55. Lin, D., Zuo, M. and Yam, R. “General sequential imperfect preventive maintenance models”. In *IJRQSEInternational Journal of Reliability Quality and Safety Engineering*. 7(3), pp.253–266, 2000
56. Lie, C. H. and Chun, Y. H. “An algorithm for preventive maintenance policy”. in *IEEE Transactions on Reliability*, 35(1), pp.71-75, 1986
57. M. Alrifaey, T. S. Hong, A. As’arry, E. E. Supeni , C.K. Ang. “Optimization and Selection of Maintenance Policies in an Electrical Gas Turbine Generator Based on the Hybrid Reliability-Centered Maintenance (RCM) Model”. *Processes* 2020, 8, 670, doi 10.3390.
58. M. A. da Rosa, Armando M. Leite da Silva, and Vladimiro Miranda. “Multi-agent systems applied to reliability assessment of power systems”. In *IJEPES*, Volume 42,

Issue 1, November 2012

59. D.E. Nordgard. "A framework for risk-informed decision support in electricity distribution companies utilizing input from quantitative risk assessment". In *IJEPES*, Volume 43, Issue 1, December 2012.
60. L. Chang , and Zhigang Wu. "Performance and reliability of electrical power grids under cascading failures". In *IJEPES*, Volume 33, Issue 8, October 2011
61. S. Kirkpatrick; C. D. Gelatt; M. P. Vecchi "Optimization by Simulated Annealing" *Science*, New Series, Vol. 220, No. 4598. (May 13, 1983), pp. 671-680.
62. L.M. Rasdi Rere, Mohamad Ivan Fanany, Aniati Murni Arymurthy "Simulated Annealing Algorithm for Deep Learning". In *Procedia Computer Science* 72 (2015) 137 – 144
63. Panneerselvam Senthilkumar, Sockalingam Narayanan "Simulated Annealing Algorithm to Minimize Makespan in Single Machine Scheduling Problem with Uniform Parallel Machines". In *Intelligent Information Management*, doi:10.4236/iim.2011.31003.
64. D. Fodorean, L. Idoumghar, A. N'diaye, D. Bouquain, A. Miraoui. "Simulated annealing algorithm for the optimization of an electrical machine". *IET Electric Power Applications*. doi: 10.1049/iet-epa.2011.0029.
65. Holland, J.H. "Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press". Ann Arbor. (2nd Edition, MIT Press, 1992.)
66. I. Maatouka, N. Chebbo, E. Châtelet, and I. Jarkass. "Preventive Maintenance Optimization for Multi States Series Parallel System". In *PCO Proceeding based on AIP Guide* Vol: 2008, ISBN: 978-983-44483-63, 2013.
67. Kennedy J, and Eberhart RC. "Particle swarm optimization". In *Proceedings of IEEE international conference on neural networks*, Piscataway, NJ, 1942–1948, 1995
68. Kennedy J, and Eberhart RC. "A discrete binary version of the particle swarm algorithm". In *Proceedings of IEEE international conference on systems, man and cybernetics*, Orlando, FL, pp 4104–4108, 1997
69. M. K. Loganathan, and O. P. Gandhi. "Maintenance cost minimization of manufacturing systems using PSO under reliability constraint". In *IJSAEM International Journal of Systems Assurance Engineering and Management* · DOI: 10.1007/s13198-015-0374-2. Springer, July 2015.
70. <https://unanimous.ai/two-new-patents>.
71. Gaurav. Sharma, and P. C. Tewari. "Performability Analysis for Feeding Unit of a Sugar Plant using Particle Swarm Optimization Technique". In *IJPE International Journal of Performability Engineering*, 15(11), pp. 2835-2842, 2019.
72. X. S. Yang. "Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms". In *Luniver Press*, Frome, UK, 2008.
73. X.-S. Yang. "Firefly algorithm, Lévy flights and global optimization". In *RDIS*

- Research and Development in Intelligent Systems XXVI* (Eds M. Bramer, R. Ellis, M. Petridis), Springer London, pp. 209-218, 2010
74. V. G. Mejlaj, P. Falkenberg, E. Türck and T. Vietor “Optimization of Variable Stiffness Composites in Automated Fiber Placement Process using Evolutionary Algorithms”. In *Procedia CIRP* Volume 66, 2017, Pages 79-84
 75. N. F. Johari, A. M. Zain, N. H. Mustaffa and A. Udin “Machining Parameters Optimization using Hybrid Firefly Algorithm and Particle Swarm Optimization”. In *JPCS, 2017 J. Phys.: Conf. Ser.*892 012005.
 76. M. Jamil, H-J. Zepernick, “Lévy Flights and Global Optimization”, Elsevier, *Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation*, 2013, Pages 49-72
 77. M. F. Shlesinger, G. M. Zaslavsky, Uriel Frisch, “Lévy Flights and Related Topics in Physics”. *Proceedings of the International Workshop Held at Nice, France*, 27–30 June 1994.
 78. <https://www.journalscientifique.com/zoologie/le-monde-feerique-des-lucioles>.
 79. M. Alrifayy, T. S. Hon, A. As’array, E. E. Supeni and C. K. Ang. “Optimization and Selection of Maintenance Policies in an Electrical Gas Turbine Generator Based on the Hybrid Reliability-Centered Maintenance (RCM) Model”. *MDPI/Processes* (2227 9717) 2020, 8, 670.
 80. F.M. Alwan, A. Baharum , S.T. Hasson. “The Performance of High-power Station Based on Time Between Failures (TBF)”. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 5(13): 3489-3498, 2013.
 81. S.V.S. Rajaprasad. “ Investigation of reliability, maintainability and availability of a paper machine in an integrated pulp and paper mill”. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 10, No. 3, 2018, pp. 43-56.
 82. I. Sarantakos, D.M. Greenwood, J. Yi, S. R. Blake, Phil C. Taylor, “ A method to include component condition and substation reliability into distribution system reconfiguration”. *Electrical Power and Energy Systems* 109 (2019) 122–138.
 83. A. PAGÈS, M. GONDRAN. “ Fiabilité des Systèmes”. Édition Eyrolles, 1980
 84. A. Villemeur “ Sûreté de Fonctionnement des systèmes industriels ”. EYROLLES Paris 1988.
 85. Sylvie LOGIACO . “Etudes de sûreté des installations électriques”. *Cahier technique* n° 184
 86. *Techniques de l’ingénieur*, “Conduite d’un Systeme de Production-Transport”. D4080.

87. J.C.O. Mello, M.V.F. Pereira, A.M. Leite da Silva "Evaluation of Reliability Worth in Composite System Based on Pseudo-Sequential Monte Carlo Simulation". IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 9, n°3, Aout,1994.
88. M. Megdiche, "Sureté de Fonctionnement des Réseaux de Distribution en Présence de Production Décentralisée". Thèse préparée à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Decembre, 2004.
89. Document technique. "Perspectives de marché d'électricité". Office National de l'énergie canadienne ONE 2005/2006
90. Sylvie LOGIACO . "Etudes de sûreté des installations électriques". Cahier technique n° 184
91. <https://www.sonelgaz.dz/fr/835/plan-de-developpement-2018-2028>
92. B. Yssaad. "Optimization of the maintenance based on the approach of the techniques of modeling and simulation: application to the networks of transport and interconnection". Doctoral thesis *ENPO Oran Algeria*. January 2014
93. A. Pillay & J. Wang. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. Reliability Engineering & System Safety, vol. 79, pp. 69-85, 2003.
94. Olivier LOSSON. "Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels "L'AMDEC" , un atout pour les PMI". Recueil de conférences CETIM, 1992
95. "Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes. Procédure AMDE".
96. D. Ait-Kadi, J. Gao et M-C. Portmann, "Minimisation des coûts de détection de pannes à partir des coupes minimales du diagramme de fiabilité ". Actes MOSIM 2001 : Troisième conférence Francophone de Modélisation et Simulation, Troyes, France, 2001.
97. Marck horton. "Introduction maintenance : Optimisation maintenance and RCM ". Maintenance. 1993.
98. Le journal de la production. Mettez en place la nouvelle maintenance, N° 37, décembre, 2001.
99. P. Wang, R. Billinton, "Reliability Cost/Worth Assessment of Distribution Systems Incorporating Time-Varying Weather Conditions and Restoration Resources". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, n°1, Janvier, 2002.
100. R. Billinton, W. Wangdee, "Delivery Point Reliability Indices of a Bulk Electric System Using Sequential Monte Carlo Simulation". IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 21, n°1, Janvier, 2006.
101. M. Bouguerra, I. Habi "Improvement of the Reliability of the Industrial Electric Networks". International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering 1;1 © www.waset.org Winter 2007

102. Jean Pierre Hoareau. “énergie renouvelable ”. Document technique.
- 103.D.Richet, “maintenance basé sur la fiabilité, un outil pour la certification”. Collection organisation industrielle, Edition Masson paris 1996.
104. David Smith. “ Fiabilité, Maintenance et Risque ”. DUNOD 2006.
- 105.R.E. Barlow, F. Proschan, “Importance of system components and fault tree events”. Stochastic Processes and their Applications 3(1975) 153-173, North-Holland Publishing company

106. Normes
- NF EN 31010(Juillet 2010) Gestion des risques - Techniques d'évaluation des risques - Homologue
- NF X50501 (Septembre 2007) Maintenance - Etats de référence des biens : vocabulaire des activités de rénovation et de reconstruction - Homologuée
- FD X60000 (Mai 2002) Maintenance industrielle - Fonction maintenance - Fascicule de documentation Ce guide présente les lignes directrices pour concevoir le processus maintenance d'une entreprise industrielle ou de service en vue de satisfaire ses enjeux techniques et économiques. Par rapport à la précédente version (de février 1995) celle-ci présente les lignes directrices pour concevoir, évaluer ou réviser le processus maintenance de l'entreprise. Elle intègre les 5 niveaux de maintenance qui existaient dans l'ancienne norme française de terminologie maintenance remplacée par la norme européenne de terminologie NF EN 13306 en octobre 2010 Maintenance - Terminologie de la maintenance - Homologuée (versions française et anglaise)
- NF X60012 (Aout 2006) Maintenance - Termes et définitions des éléments constitutifs des biens et de leurs approvisionnements - Homologuée
- NF EN 60300-1 (Décembre 2004) Gestion de la sûreté de fonctionnement - Partie 1 : gestion du programme de sûreté de fonctionnement - Homologuée (version anglaise)
- NF EN 15341 (Juin 2007) Maintenance - Indicateurs de performances clés pour la maintenance - Homologuée (versions française et anglaise)
- NF EN 60300-3-11 (Avril 2010) Gestion de la sûreté de fonctionnement – Partie 3-11 : guide d'application - Maintenance basée sur la fiabilité - Homologuée
- NF EN 60300-3-12 (Juillet 2011) Gestion de la sûreté de fonctionnement – Partie 3-12 : guide d'application - Soutien logistique intègre - Homologuée

FD X60090 (Juillet 2011) Maintenance - Critères de choix du type de contrat de maintenance - Contrats de moyens – Contrats de résultats

- CEI 50 (191) (1990) : vocabulaire électrotechnique international. Chapitre 191 : Sûreté de fonctionnement et qualité de service
- CEI 812 (1985) : technique d'analyse de la fiabilité des systèmes – procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)
- CEI 863 (1986) : présentation des résultats de la prévision des caractéristiques de fiabilité, maintenabilité et disponibilité
- CEI 300 : Gestion de la sûreté de fonctionnement - 3ème partie : Guide d'application – Section 1 : Techniques d'analyse de la sûreté de fonctionnement – Guide Méthodologique.
- CEI 305/UTE C20321 à 20327 : Essai de fiabilité des équipements.
- CEI 362/UTE C20313 : Guide pour l'acquisition des données de fiabilité, de disponibilité et de maintenabilité à partir des résultats d'exploitation des dispositifs électroniques.
- CEI 671 : Essais périodiques et surveillance du système de protection des réacteurs nucléaires.
- CEI 706/X 60310 ET 60312 : Guide maintenabilité de matériel
- CEI 812/X 60510 : Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes. Procédure d'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE).
- CEI 863/X 60520 : Prévision des caractéristiques de fiabilité, maintenabilité et disponibilité.
- CEI 880 : Logiciels pour les calculateurs utilisés dans les systèmes de sûreté des centrales nucléaires.
- CEI 987 : Calculateurs programmés importants pour la sûreté des centrales nucléaires.
- CEI 1165 : Application des techniques de Markov.
- CEI 1226 : Centrale nucléaire – Système d'instrumentation et de contrôle commande important pour la sûreté - classification.
- NFC 71-011 : Sûreté de fonctionnement des logiciels - Généralité.
- NFC 71-012 : Sûreté de fonctionnement des logiciels - Contraintes sur le logiciel.
- NFC 71-013 : Sûreté de fonctionnement des logiciels - Méthodes appropriées aux analyses de sécurité.

Logiciels

MALAB

Microsoft EXCEL

Microsoft Visio

Reliasoft (Bloclsim)

Annexes

Annexe A

Lois de probabilité

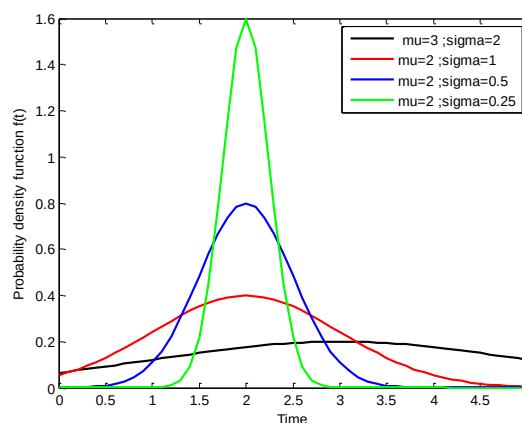
La loi normale

- La fonction densité de probabilité de la loi normale notée $f(\mu, \sigma)$ dépend deux paramètres : son espérance μ , et l'écart type σ où $\sigma \geq 0$.

- La courbe de cette fonction est une courbe en cloche symétrique par rapport à la droite d'équation $t = \mu$. C'est la représentation la plus connue de ces lois. La loi normale d'espérance nulle et d'écart type unitaire est appelée loi normale centrée réduite ou loi normale standard.

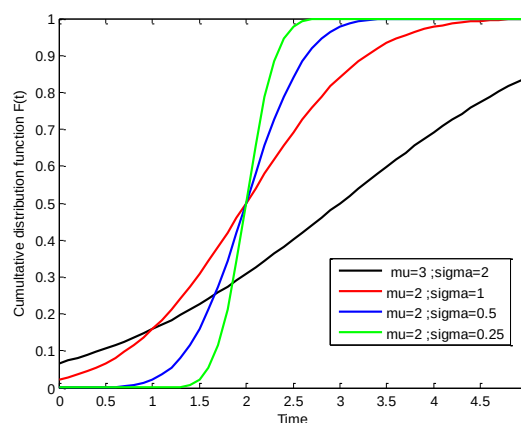
La densité de probabilité d'une loi normale d'espérance μ et écart-type σ est donnée par l'expression suivante:

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



La fonction de répartition s'écrit :

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



La fiabilité est donnée par:

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

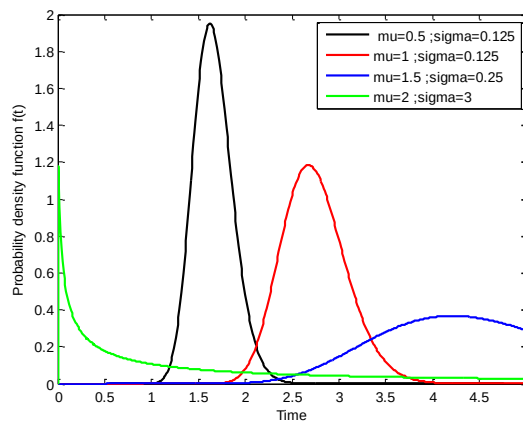
Où :

$$F(t) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right)$$

La loi Log-normale

Pour $t > 0$. La fonction densité de probabilité d'une loi log-normale de paramètres μ et σ (l'espérance et l'écart type du logarithme de la variable) est donnée par l'expression:

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

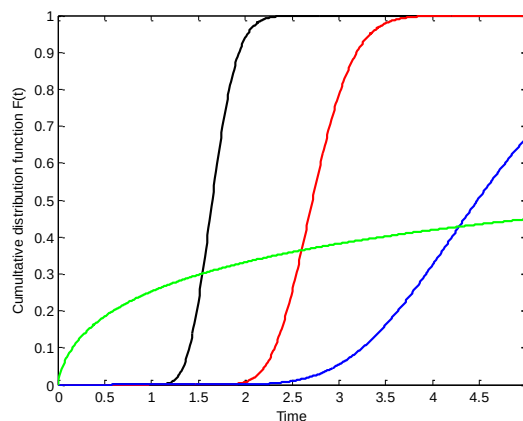


La fonction de répartition s'écrit :

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

$$F(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right)$$

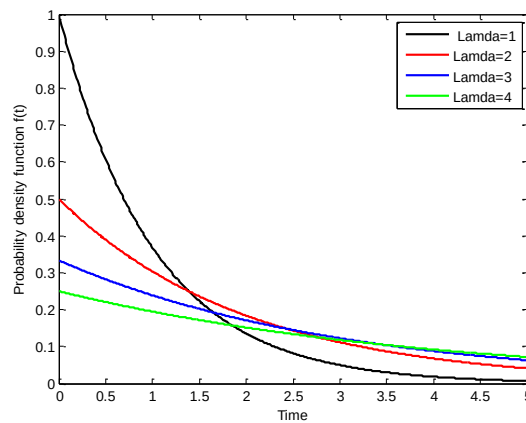
Où : erf c'est la fonction d'erreur



La loi exponentielle

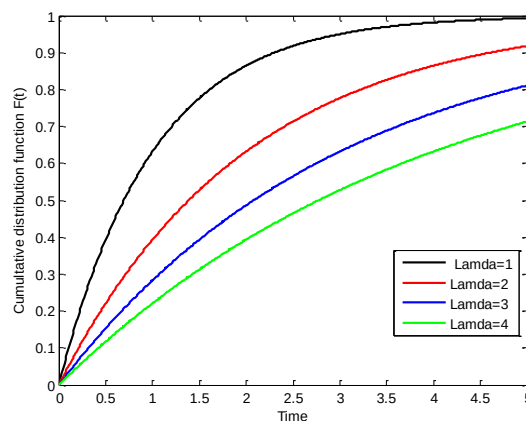
La fonction densité de probabilité d'une loi exponentielle de paramètre λ est donnée par l'expression suivante :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ avec } t \geq 0.$$



La fonction de répartition s'écrit :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$



La fiabilité est donnée par l'équation :

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

La loi Weibull

La fonction densité de probabilité d'une loi de Weibull de trois paramètres β , η et γ est donnée par l'expression suivante :

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

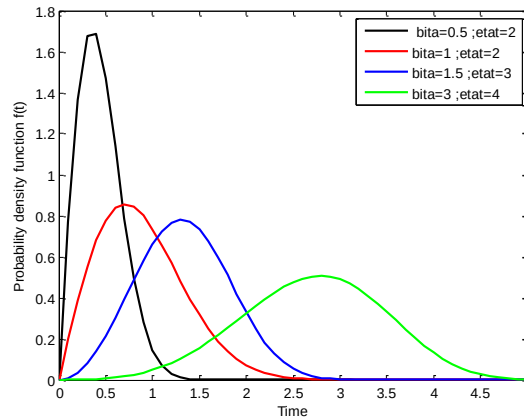
avec $t \geq 0$ & $t \geq \gamma$

Où :

β : le paramètre de forme ($\beta > 0$)

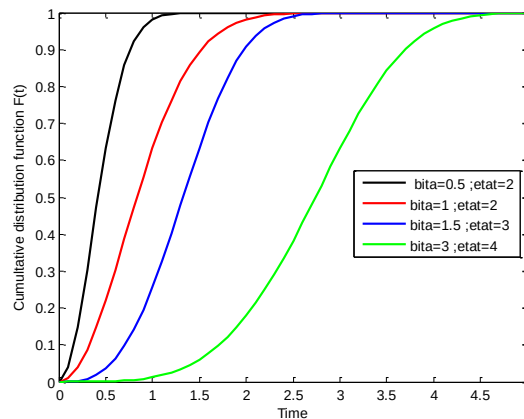
η : le paramètre d'échelle ($\eta > 0$)

γ : le paramètre de position ($\gamma \geq 0$)



La fonction de répartition s'écrit :

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



La fonction fiabilité s'écrit:

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

Le taux de défaillance est donné par:

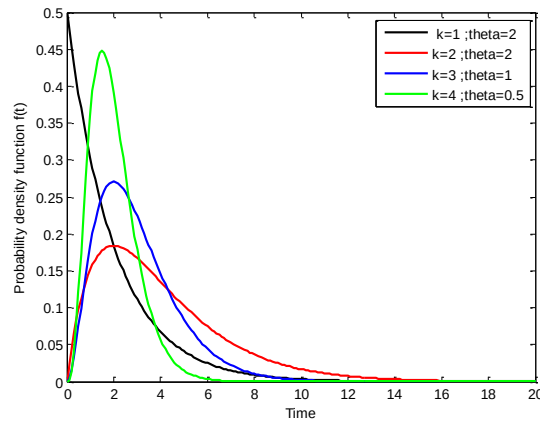
$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

La loi gamma

La fonction densité de probabilité de la loi Gamma de paramètres (k, θ) est donnée par l'expression suivante :

$$f(t) = \frac{t^{(k-1)} e^{-\frac{t}{\theta}}}{\Gamma(k) \theta^k}$$

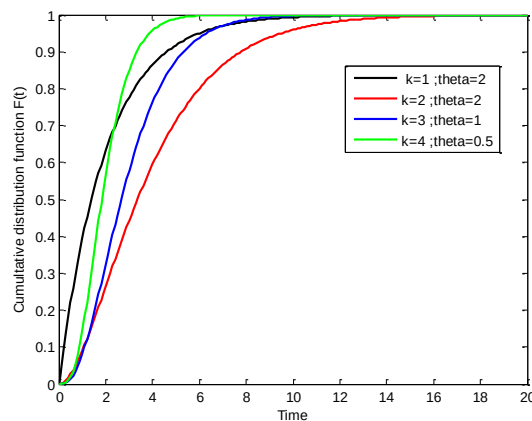
Où : $t \geq 0$, $k > 0$ et $\theta > 0$



La fonction de répartition de cette loi s'écrit :

$$F(t) = \frac{\gamma(k, \frac{t}{\theta})}{\Gamma(k)}$$

Avec : Γ est la fonction Gamma d'Euler et γ désigne la fonction Gamma incomplète.



Relations avec d'autres lois :

Posant T un variable aléatoire suit une loi de Gamma $\Gamma(k, \theta)$

Si $T \sim \Gamma(k = 1, \theta = 1/\lambda)$ alors T suit une distribution exponentielle de paramètre λ .

Si $T \sim \Gamma(k = n/2, \theta = 2)$ alors T suit une distribution du $\chi^2(n)$ (distribution de Khi-deux) de n degrés de liberté

Annexe B

Les tests d'adéquation

Khi-deux (χ^2)

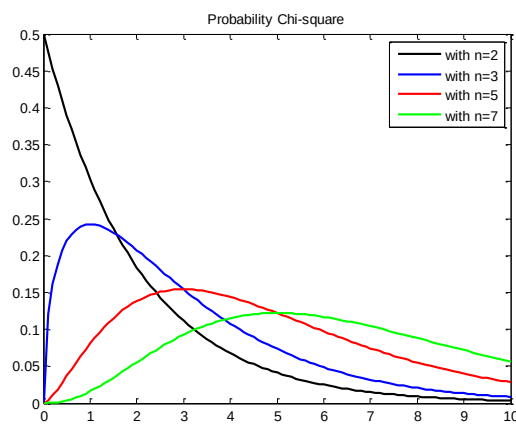
La distribution du χ^2 : On considère n variables indépendantes suivant des lois normales standards:

$$T_1^2 + T_2^2 + \dots + T_n^2 = \sum_{i=1}^n T_i^2$$

Là on dit que le variable aléatoire T suit la distribution de χ^2 à n degrés de liberté (dll).

La densité de probabilité de χ^2 sera :

$$f(t) = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} t^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}} \quad \text{pour } t \geq 0$$



Où : Γ est la fonction gamma.

Sa fonction de répartition sera :

$$F(t) = \frac{\gamma(\frac{n}{2}, \frac{t}{2})}{\Gamma(\frac{n}{2})}$$

Où : $\gamma(s, t)$ la fonction gamma incomplète

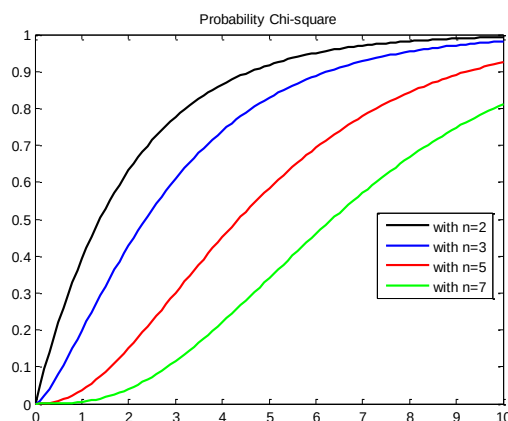


Tableau B.1. La valeur critique $K_{critique}$ en fonction de la combinaison (dll, α) suivant la loi de Khi-deux

$\alpha \backslash$ dll	0.2	0.1	0.05	0.01	0.001
1	1.64	2.71	3.84	6.64	10.83
2	3.22	4.61	5.99	9.21	13.82
3	4.64	6.25	7.82	11.35	16.27
4	5.99	7.78	9.49	13.28	18.47
5	7.29	9.24	11.07	15.09	20.52
6	8.56	10.64	12.59	16.81	22.46
7	9.80	12.02	14.07	18.48	24.32
8	11.03	13.36	15.51	20.09	26.13
9	12.24	14.68	16.92	21.67	27.88
10	13.44	15.99	18.31	23.21	29.59
11	14.63	17.28	19.68	24.73	31.26
12	15.81	18.55	21.03	26.22	32.91
13	16.99	19.81	22.36	27.69	34.53
14	18.15	21.06	23.69	29.14	36.12
15	19.31	22.30	25.00	30.58	37.70
16	20.47	23.54	26.30	32.00	39.25
17	21.61	24.77	27.59	33.41	40.79
18	22.76	25.99	28.87	34.81	42.31
19	23.90	27.20	30.14	36.19	43.82
20	25.04	28.41	31.41	37.57	45.32

Graphiquement,

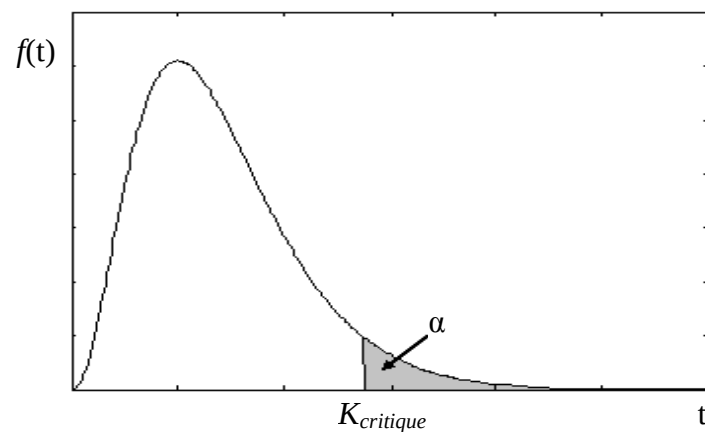


Figure B.1. Probabilité khi-deux

Kolmogorov-Smirnov :

La fonction de répartition de Kolmogorov est donnée par l'équation suivante:

$$K(t) = 1 - 2 \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^{i-1} e^{-2t^2 i^2}$$

$$K(t) = \frac{\sqrt{2\pi}}{t} \sum_{i=1}^{\infty} \exp(-(2i-1)^2 \pi^2 / (8t^2))$$

Pour un échantillon n suffisamment grand d'une fonction de distribution continue $F_n(t)$, les valeurs de $\sqrt{n}D_n$ suit approximativement la distribution de Kolmogorov.

Où : D_n la statistique de Kolmogorov-Smirnov.

Le tableau B.2 donne les valeurs critiques $D_{n,\alpha}$ telles que décrites dans le test de Kolmogorov-Smirnov.

Le tableau B.2.

$n \backslash \alpha$	0.001	0.01	0.02	0.05	0.1	0.15	0.2
1		0.99500	0.99000	0.97500	0.95000	0.92500	0.90000
2	0.97764	0.92930	0.90000	0.84189	0.77639	0.72614	0.68377
3	0.92063	0.82900	0.78456	0.70760	0.63604	0.59582	0.56481
4	0.85046	0.73421	0.68887	0.62394	0.56522	0.52476	0.49265
5	0.78137	0.66855	0.62718	0.56327	0.50945	0.47439	0.44697
6	0.72479	0.61660	0.57741	0.51926	0.46799	0.43526	0.41035
7	0.67930	0.57580	0.53844	0.48343	0.43607	0.40497	0.38145
8	0.64098	0.54180	0.50654	0.45427	0.40962	0.38062	0.35828
9	0.60846	0.51330	0.47960	0.43001	0.38746	0.36006	0.33907
10	0.58042	0.48895	0.45662	0.40925	0.36866	0.34250	0.32257
11	0.55588	0.46770	0.43670	0.39122	0.35242	0.32734	0.30826
12	0.53422	0.44905	0.41918	0.37543	0.33815	0.31408	0.29573
13	0.51490	0.43246	0.40362	0.36143	0.32548	0.30233	0.28466
14	0.49753	0.41760	0.38970	0.34890	0.31417	0.29181	0.27477
15	0.48182	0.40420	0.37713	0.33760	0.30397	0.28233	0.26585
16	0.46750	0.39200	0.36571	0.32733	0.29471	0.27372	0.25774
17	0.45440	0.38085	0.35528	0.31796	0.28627	0.26587	0.25035
18	0.44234	0.37063	0.34569	0.30936	0.27851	0.25867	0.24356
19	0.43119	0.36116	0.33685	0.30142	0.27135	0.25202	0.23731
20	0.42085	0.35240	0.32866	0.29407	0.26473	0.24587	0.23152
25	0.37843	0.31656	0.30349	0.26404	0.23767	0.22074	0.20786
30	0.34672	0.28988	0.27704	0.24170	0.21756	0.20207	0.19029
35	0.32187	0.26898	0.25649	0.22424	0.20184	0.18748	0.17655
40	0.30169	0.25188	0.23993	0.21017	0.18939	0.17610	0.16601
45	0.28482	0.23780	0.22621	0.19842	0.17881	0.16626	0.15673
50	0.27051	0.22585	0.21460	0.18845	0.16982	0.15790	0.14886
OVER 50	1.94947	1.62762	1.51743	1.35810	1.22385	1.13795	1.07275
	$\sqrt{n}$	$\sqrt{n}$	$\sqrt{n}$	$\sqrt{n}$	$\sqrt{n}$	$\sqrt{n}$	$\sqrt{n}$

Anderson-Darling

Tableau B.3 donne les relations de calcul de la statistique AD telles que décrites dans le test d'Anderson-Darling

Distribution	La statistique AD
Uniforme	A
Exponentielle	$A(1 + \frac{0.6}{\sqrt{n}})$
Weibull	$A(1 + \frac{0.2}{\sqrt{n}})$
Normale /lognormale	$A(1 + \frac{0.75}{n} + \frac{2.25}{n^2})$
Gamma (k=1)	$A(1 + \frac{0.6}{n})$
Gamma (k ≥ 2)	$A + \frac{0.2 + 0.3/k}{n}$

Tableau B.4 : donne les valeurs critiques $AD_{critique}$ telles que décrites dans le test de Anderson-Darling

α		0.01	0.025	0.05	0.1	0.25
Distribution						
Exponentielle		1.959	1.591	1.321	1.062	0.736
Weibull		1.038	0.877	0.757	0.637	0.474
Normale /lognormale	a	1.0348	0.8728	0.7514	0.6305	/
	b	1.013	0.881	0.795	0.750	/
	c	0.93	0.94	0.89	0.80	/
	$AD_{critique}$	$a(1 - \frac{b}{n} - \frac{c}{n^2})$				
Gamma	K=1	1.092	0.917	0.786	0.657	0.486
	K=2	1.062	0.894	0.768	0.643	0.477
	K=3	1.052	0.886	0.762	0.639	0.475
	K=4	1.048	0.883	0.759	0.637	0.473
	/	/	/	/	/	/
	/	/	/	/	/	/