

République Algérienne Démocratique et populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohammed Boudiaf

**Faculté de Génie Electrique**  
*Département d'Electrotechnique*

Thèse En Vue De L'obtention Du Diplôme De

# **Doctorat En-sciences**

**SPECIALITE :**  
**Electrotechnique**

**OPTION :**  
**Réseaux Electriques**

**PRESENTEE PAR :**  
**Mme Benaicha Halima**

## **INTITULE DE LA THESE**

# **Analyse des stratégies de maintenance des systèmes de production industrielle**

---

SOUTENUE LE .....DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

M. Allali A .....	(professeur USTO-MB).....	Président
M. Chaker A.....	(professeur ENPOran).....	Rapporteur
M. Azoui B .....	(Professeur Université de Batna).....	Examinateur
M. Rahli M.....	(professeur USTO-MB).....	Examinateur
M Sebbani M	(professeur Université d'Oran)	Examinateur
M. Kotni H	(professeur USTO-MB).....	Examinateur

République Algérienne Démocratique et populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohammed Boudiaf**

**Faculté de Génie Electrique  
*Département d'Electrotechnique***

**Thèse En Vue De L'obtention Du Diplôme De**

**Doctorat En-sciences**

**SPECIALITE :  
Electrotechnique**

**OPTION :  
Réseaux Electriques**

**PRESENTEE PAR :  
Mme Benaicha Halima**

**INTITULE DE LA THESE**

**Analyse des stratégies de maintenance des  
systèmes de production industrielle**

**SOUTENUE LE .....DEVANT LE JURY COMPOSE DE :**

M. Allali A .....	(professeur USTO-MB).....	Président
M. Chaker A.....	(professeur ENPOran).....	Rapporteur
M. Azoui B .....	(Professeur Université de Batna).....	Examinateur
M. Rahli M.....	(professeur USTO-MB).....	Examinateur
M Sebbani M	(professeur Université d'Oran)	Examinateur
M. Kotni H	(professeur USTO-MB).....	Examinateur

**2015**

## **Résumé**

---

Les stratégies de maintenance et leurs évaluations demeurent une préoccupation particulièrement forte au sein des entreprises aujourd’hui. Les enjeux socio-économiques dépendant de la compétitivité de chacune d’entre elles sont de plus en plus étroitement liés à l’activité et à la qualité des interventions de maintenance.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés au développement de démarches dont l’objectif est d’aboutir à un outil d’aide à la décision pour construire des programmes de maintenance en effectuant des choix entre les différentes alternatives identifiées suite à l’application de la modélisation et les outils mathématiques et statistiques qui permettent d’exploiter les données disponibles et de comprendre le comportement de l’équipement, puis de prévoir les fonctionnements futurs de ce dernier.

Afin de montrer l’avantage de ces méthodes, nous illustrons le travail par une étude sur un d’Oran sud, suite à des données provenant d’un historique des équipements du réseau fourni par la SONELGAZ.

Mots clé : stratégies de maintenance, modélisation, outils mathématiques et statistiques, réseau HT/MT/BT

## ***Abstract***

---

Today, maintenance strategies and their analyses remain a worrying problem for companies. Socio economic stakes depending on competitiveness of each strategy are even more linked to activity and quality of maintenance interventions.

In this thesis, we are interested in developing approaches whose objective is to achieve a tool for decision support for building maintenance programs making choices between alternatives identified through the application of modelling and the mathematical and statistical tools that will enable us to exploit the available data and understand the behavior of the system and to predict future functioning of the latter.

we present illustrative example to demonstrate the effectiveness of the proposed methodology.

The example considers an electricity system HV / MV/LV located in region of south of Oran. The failure data of system equipments are obtained from the Western Algeria Electricity Distribution Company (SONELGAZ).

## ملخص

---

لا تزال استراتيجيات الصيانة وتقديراتها مصدر قلق قوي بشكل خاص بين الشركات اليوم. القضايا الاجتماعية والاقتصادية التي تعتمد على القدرة التنافسية للكثير منهم أكثر ارتباطاً  
النشاط ونوعية الصيانة .

في هذه الرسالة، نهتم بتطوير أساليب ترمي للوصول للإعانة على أخذ القرار من أجل بناء برامج الصيانة و القيام بالاختبارات بين مختلف البدائل المعترف عليها بعد تطبيق النمذجة والأدوات الرياضية والإحصائية لاستغلال البيانات المتاحة وفهم سلوك الجهاز ويتوقع أداء المستقبلي لهذا الأخير للتدليل على الاستفادة من هذه الأساليب، ونحن توضيح العمل من خلال دراسة على الشبكة الكهرباء 10/30/60 ك ف جنوب وهران، في أعقاب البيانات من تاريخ معدات الشبكات التي تقدمها شركة توزيع الكهرباء والغاز

## ***Remerciements***

---

Après avoir rédigé un rapport de thèse, je pensais qu'écrire la page des remerciements serait le plus simple. En fait, il n'en est rien... Il faut choisir les bons mots et n'oublier personne ! Mais les mots sont difficiles à trouver. Un dernier effort donc, à fournir avant de rendre ce manuscrit.

Commençons par le commencement. Je tiens à remercier avec la plus grande sincérité mon directeur de thèse Chaker Abdelkader pour avoir guidé mes pas lorsque la thèse semblait décrire maintes routes pour sujet de recherche. Tu as toujours été disponible pour répondre à mes bonnes et mauvaises questions. Tes qualités pédagogiques et tes connaissances scientifiques m'ont aidé à surmonter les différents obstacles rencontrés pendant ces longues années.

Ma gratitude et mes remerciements vont ensuite aux membres du jury :

A M, Allali A, Professeur à l'USTOran, M, Rahli M, Professeur à l'USTOran, M Azoui B, Professeur à l'Université de Batna, M Sebbani M, Professeur à l'Université d'Oran ainsi que M, Kotni L, Professeur à l'USTOran, pour avoir accepté d'examiner ce travail, pour l'intérêt qu'ils ont porté au sujet ainsi que pour leurs commentaires constructifs et leurs remarques pertinentes.

Je tiens à remercier l'ensemble des agents de la SONELGAZ. J'ai une pensée particulière pour Mme Touba pour son aide précieuse dans la collecte des données.

Je tiens à exprimer ma plus grande gratitude et toute mon affection envers ma famille qui, à chaque étape, chaque instant de ma thèse, a su être encourageante et me porter jusqu'à destination. Mon cher papa, te voilà enfin rassurée de l'aboutissement de mes travaux et je peux à présent te répondre plus sincèrement à ta question récurrente "Oui ! ma thèse, se passe bien".

Enfin, un remerciement à mon mari et mes enfants .Tout au long de ma thèse, vous m'avez toujours soutenu même quand je vous parlais de Weibull et des stratégies de maintenance pendant nos vacances.

Une profonde pensée pour Monsieur le professeur Kateb décédé.

Enfin, à toutes et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce thème, trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

## **Table des matières**

Introduction	1
<b>Chapitre 1- Généralités sur la maintenance</b>	
1.1-Introduction	5
1.2-Stratégies de maintenance	5
1.2.1-Définition de la maintenance	5
1.2.2-Objectifs de la maintenance	6
1.2.3-Evolution de la maintenance	7
1.2.4-Importance de la maintenance	7
1.2.5-Politiques de la maintenance	8
1.2.5.1-Maintenance Corrective	8
1.2.5.1.1-Maintenance curative	9
1.2.5.2.2-Maintenance palliative	9
1.2.5.2-Maintenance préventive	10
1.2.5.2.1-Maintenance préventive systématique	11
1.2.5.2.2-Maintenance préventive prévisionnelle	12
1.2.5.2.3-Maintenance préventive conditionnelle	13
1.3-Opérations de la maintenance	14
1.3.1-Opérations de la maintenance corrective	14
1.3.2-Opérations de la maintenance préventive	14
1.4-Classification des taches de la maintenance	15
1.5-Centralisation ou décentralisation de la maintenance	16
1.5.1-La centralisation	16
1.5.2-La décentralisation	16
1.6-Les stratégies et les décisions associées	17
1.7-Les équilibres de la maintenance	18
1.8-Autres formes et méthodes de la maintenance	19

1.8.2- La totale productive maintenance (TPM)	20
1.8.3-Télémaintenance	20
1.9-Conclusion	21
<b>Chapitre 2-Notions de fiabilité</b>	
2.1-Introduction	22
2.2-Concepts de la fiabilité	22
2.2.1-Durée de la vie	22
2.2.2-Fonction de la fiabilité	22
2.2.3-Fonction de réparation	23
2.2.4-Fonction de densité de probabilité	23
2.2.5-Fonction de risque instantané ou taux de pannes	25
2.2.6-Différentes grandeurs utilisées en maintenance	27
2.2.6.1-MTTF	27
2.2.6.2-MTBF	28
2.2.7-Relation entre la maintenance et la fiabilité	28
2.3-Défaillances	29
2.3.1- Classification des défaillances par impact sur les performances du système	30
2.3.1.1- Classification des défaillances en fonction de leur manifestation	30
2.3.1.1.1- Défaillance progressive	30
2.3.1.1.2- Défaillance soudaine	30
2.3.1.2-Classification des défaillances en fonction de leur amplitude	30
2.3.1.2.1- Défaillance partielle	30
2.3.1.2.2- Défaillance complète	30
2.3.1.2.3- Défaillance intermittente	30
2.3.2-Modes de défaillance	31
2.3.3-Causes de défaillance	31
2.4-Les facteurs d'importance	33
2.4.1-Facteur d'importance fiabiliste	33
2.4.2-Facteur d'importance Critique	34

2.4.1-Facteur d'importance fiabiliste	33
2.4.2-Facteur d'importance Critique	34
2.4.3-Le facteur d'importance RRW-WORTH	3
2.4.4- Le facteur d'importance Fussel- Vesely	34
2.5-Conclusion	35

### **Chapitre 3-Méthodologie de traitement des données**

3.1-Introduction	36
3.2-Méthodologie	36
3.2.1-Première approche	36
3.2.1.1-Collecte des données	37
3.2.1.2-Analyse fonctionnelle	37
3.2.1.3-Modélisation sous SIMFIA	38
3.2.1.4- Simulation et Calcul	43
3.2.1-Première approche	43
3.2.2.1-Collecte des données	43
3.2.2.2-Modèle probabiliste des durées de vie d'un équipement	43
3.2.2.3- Modèle de Weibull à deux paramètres	44
3.2.2.4- Modèle de Weibull mélange	47
3.2.2.4.1- Mélanges de deux Weibull à cinq paramètres	48
3.2.3- Méthodes d'estimation des paramètres	49
3.2.3.1-Méthode du Maximum de vraisemblance	49
3.2.3.1.1- Maximum de vraisemblance de la loi de Weibull à deux paramètres	49
3.2.3.2- Maximum de vraisemblance de mélange de deux Weibull	51
3.3-Conclusion	52

### **Chapitre 4- Transformateur de puissance**

4.1-Introduction	53
4.2-Le rôle du transformateur de puissance	54
4.3-Constitutions des transformateurs de puissance	54
4.3.1-Le circuit magnétique	54
4.3.2-Enroulements	56
4.3.3-Système d'isolation	56

4.3.1.1-Huile diélectrique	57
4.3.1.1.1-Rôle isolant	57
4.3.1.1.2- Rôle caloporteur	57
4.3.2.2-Isolants solides	58
4.3.4-Traversées isolantes	58
4.3.5-Régleur hors tension	59
4.3.6-Régleurencrage	59
4.3.7-Refroidissement	60
4.3.8-Cuve	61
4.3.9-Conservateur	62
4.4- Mode de défaillances des transformateurs	62
4.4.1- Mode de défaillance diélectrique	62
4.4.2- Mode de défaillance électrique	63
4.4.3- Mode de défaillance mécanique	64
4.4.4- Mode de défaillance thermique	64
4.5-Composants causant les défaillances des transformateurs	65
4.6- Causes de défaillances des transformateurs de puissance	66
4.7-Conclusion	67

## **Chapitre 5- Illustration**

5.1-Introduction	68
5.2-Etude du réseau électrique HT/MT Oran –Sud	68
5.2.1-Analyse fonctionnelle du système	70
5.2.1.1-Expression et analyse du besoin	70
5.2.1.2-Analyse fonctionnelle externe	70
5.2.1.3-Analyse fonctionnelle interne	72
5.2.2-Modélisation par diagramme de fiabilité (RDB)	77
5.2.3-Facteurs d'importance	79
5.3-Etude des transformateurs de puissance	82
5.3.1-Etude de données	82
5.3.2-Modèles probabilistes	83
5.4-Estimation de la loi de fiabilité	84

5.4.1-Loi de Weibull	84
5.4.2-Melange des deux Weibull	84
5.5-Conclusion	87
<b>Conclusion</b>	89
Bibliographie	

## LISTE DES FIGURES

### **Chapitre 1**

N° figures	Intitulés	pages
1.1	Objectif de la maintenance	6
1.2	Evolution de la maintenance depuis 1940	7
1.3	Les différentes politiques de maintenance	8
1.4	Intervention corrective	9
1.5	Maintenance curative ou réparation	9
1.6	Maintenance palliative	10
1.7	Intervention préventive	11
1.8	Intervention préventive systématique	12
1.9	Schématisation de la maintenance prévisionnelle	12
1.10	Intervention préventive conditionnelle	13
1.11	Fréquence des opérations de maintenance sur les couts	19
1.12	Télémaintenance Vs Maintenance	21

### **Chapitre 2**

N° figures	Intitulés	pages
2.1	Courbes paramétriques de la fiabilité	24
2.2	La fonction densité de durée de vie	25
2.3	Courbe en baignoire du taux de défaillance	26
2.4	La présentation des différentes grandeurs en fonction du temps	28
2.5	L'impact de la maintenance sur la fiabilité de la maintenance	29
2.6	Dégradation du bien et durée de vie	29
2.7	Classification de la défaillance en fonction du niveau d'information	32

### **Chapitre 3**

N°	Intitulés	pages
3.1	Le déroulement de l'approche	36
3.2	Représentation graphique d'un bloc fonctionnel	38
3.3	Description d'une fonction	39
3.4	Représentation graphique d'un état de bloc fonctionnel	40
3.5	Représentation graphique d'un état de fonction	41
3.6	Représentation graphique des liens logiques entre fonctions	41
3.7	Représentation graphique des liens logiques pour un etat de bloc	42
3.8	Schéma synoptique de la méthodologie	43
3.9	Forme de la f.d.p. de la loi Weibull pour différentes valeurs de $\beta$	45
3.10	Forme de la f.d.p. de la loi Weibull pour différentes valeurs de $\alpha$	45
3.11	Représentation théorique de l'évolution du taux de défaillances en fonction du temps	47
3.12	Courbe de la distribution Weibull mixte avec des sous-populations	49

## Chapitre 4

N° figures	Intitulés	pages
4.1	Conduction d'un cycle de vie d'un transformateur	53
4.2	Les composantes du transformateur de puissance	55
4.3	Hystéresis du circuit magnétique	55
4.4	Circuit magnétique triphasé à 3 colonnes	56
4.5	Enroulement de transformateur	57
4.6	Traversée condensateur haute tension	59
4.7	Un régiteur hors tension	59
4.8	Régiteur en charge	60
4.9	Aéroréfrigérant	61
4.10	Radiateurs sur un transformateur	61
4.11	Amorçage entre spires	63
4.12	Point chaud du sélecteur du régiteur en charge	63
4.13	Point chaud sur connexion boulonnée	64
4.14	Joint de traversée écrasé	65
4.15	Echauffement d'un enroulement excessif	65
4.16	Distribution des défaillances pour les transformateurs de	69

## Chapitre 5

N° figures	Intitulés	pages
5.1	Schéma réseau électrique	69
5.2	Le système avec ses milieux extérieurs	72
5.3	Modélisation initiale	73
5.4	L'arbre global (décomposition matérielle du système)	74
5.5	Bloc fonctionnel et ses fonctions	75
5.6	Polynômes des fonctions	76
5.7	Etat de bloc du composant	76
5.8	Polynômes des états du bloc du composant	77
5.9	Modélisation par RDB	78
5.10	Graphe de fiabilité	79
5.11	Données statistiques durant un intervalle de temps (2008-	83
5.12	Fonction de distribution cumulative de Weibull à 2	84
5.13	Fonction de distribution cumulative de mélange de deux	85
5.14	Représentation de la fiabilité des deux modèles	86

## LISTE DES TABLEAUX

### **Chapitre 1**

N°	Intitulés	pages
1.1	Prise de décisions pour les stratégies de maintenance	18

### **Chapitre 2**

N° Tableaux	Intitulés	pages
2.1	Exemples de causes de défaillance	32

### **Chapitre 4**

N° Tableaux	Intitulés	pages
4.1	Traduction des termes des composants du transformateur	66
4.2	Causes de défaillances des transformateurs de puissance	66

### **Chapitre 5**

N° Tableaux	Intitulés	pages
5.1	Les fonctions contraintes	71
5.2	Les indicateurs de la maintenance du système	79
5.3	Valeurs des facteurs d'importance pour différents composants du système	81
5.4	Paramètres obtenue par la distribution mélange de Weibull	85
5.5	Péridicité de maintenance préventive basée sur la fiabilité	86
5.6	Résultat de l'AIC	87

La concurrence industrielle incite les entreprises à rechercher la qualité et la réduction des coûts tout en fournissant les clients dans les délais demandés. Depuis un certain temps, la maintenance est devenue l'une des fonctions stratégiques de l'entreprise puisqu'elle représente le moyen privilégié pour maintenir un niveau de disponibilité acceptable. L'arrêt ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le non respect des délais qui s'en suivent, engendrent une pénalité que les entreprises ne sont plus en état de supporter. Pour demeurer compétitive, l'entreprise ne doit plus subir les aléas, mais elle doit les prévoir et analyser leurs effets sur le long terme. Pour arriver à une telle finalité l'entreprise doit mener une stratégie de maintenance efficace pour son outil de production afin d'améliorer la disponibilité et réduire les pertes liées à la demande client non honorée.

La stratégie de maintenance de l'outil de production doit être en concordance avec la politique de la gestion de la production. Il est clair que la gestion de production joue un rôle important dans la satisfaction du client dans les délais. En effet, un bon réglage de la cadence de production permet de satisfaire au maximum les demandes des clients.

Suite à ce constat, il devient nécessaire de définir une stratégie de maintenance qui établit la séquence d'actions à entreprendre en fonction de l'état du système. A chaque opération de maintenance on associe, les critères de choix qui permettront d'identifier les dates et le type d'intervention à mettre en œuvre. Ces stratégies de maintenance auront pour objectif essentiel l'amélioration de la fiabilité de ces outils de production. C'est sur ce problème que porte notre réflexion.

Les résultats d'une stratégie de maintenance sont clairement tributaires du modèle de fiabilité choisi. Un tel modèle doit être suffisamment précis pour garantir une stratégie de maintenance appropriée à l'équipement. Ces modèles doivent décrire fidèlement le comportement des équipements pour assurer une cohérence des résultats théoriques avec la réalité. Il reste évident que le choix d'un modèle influence significativement les résultats d'optimisation finaux et leurs interprétations.

En réalité, les paramètres des modèles de probabilité choisis pour l'équipement sont inconnus et par conséquent doivent être estimés en se basant sur les données des durées vie expérimentales ou provenant de l'historique d'exploitation. Ces données résultent de l'usage de l'équipement soumis à des conditions d'exploitation qui ne sont pas nécessairement identiques. Par conséquent, les différents environnements d'exploitation induisent une hétérogénéité quant aux données collectées.

Les réseaux de distributions constituent le pivot des centres de distributions de l'énergie électrique. Tout défaut dans un réseau peut provoquer un handicap dans l'entreprise. De ce fait, analyser le défaut et évaluer le système permet ainsi sans tarder de prendre les mesures nécessaires afin de minimiser les préjudices dus aux défauts dans les réseaux électriques. Pour cela, notre travail repose sur la maintenance des réseaux de distribution électriques et apporter une disponibilité maximale de la distribution de l'énergie électrique. Que ce soit dans un immeuble de grande hauteur, une banque, un hôpital, un supermarché, un tunnel, une PMI, ou un grand site industriel, il est de plus en plus nécessaire de contrôler les installations électriques à des fins :

- de sécurité,
- de disponibilité de l'énergie,
- de maîtrise de l'énergie consommée et de son coût (selon la politique tarifaire du distributeur),
- de diminution des coûts d'exploitation et de maintenance,
- de maintenabilité et d'évolutivité de l'installation électrique.

Les exemples de ce type d'incidents sont devenus très fréquents, pour pallier aux coupures d'électricité et améliorer la qualité du produit « énergies électrique », les systèmes électriques font l'objet d'études de fiabilité dont le but est de maîtriser les défaillances dues aux évolutions imprévues de la consommation de l'énergie, distribution, production, transport...

L'idée directrice de ce travail, comprend deux volets complémentaires.

Le premier volet est d'étudier la fiabilité de l'architecture du système, par la modélisation d'un réseau électrique HT/MT/BT de la SONELGAZ.

Les principales questions que nous avons soulevées et auxquelles nous avons tenté d'amener des éléments de réponses sont les suivantes :

- Quel est l'état actuel du système de maintenance dans le réseau de distribution de la SONELGAZ et comment poser le diagnostic ?
- Quelle est l'architecture du système de maintenance la plus adéquate pour le système ?
- Quelles sont les propositions nécessaires à la réussite d'un tel système ?

Pour cela, Nous avons proposé un outil flexible et facile à planter. Cet outil fait référence au potentiel stratégique du système de maintenance dans l'entreprise.

Le deuxième volet, est porté sur l'étude de la durée de vie des transformateurs de puissance. En effet, une attention particulière doit être portée sur ces appareils en matière de maintenance et surveillance en raison de leur impact sur la performance du réseau électrique. Afin de

déterminer la performance du réseau électrique, nous nous intéressons dans cette thèse au critère de fiabilité et plus particulièrement à l'intensité de panne des transformateurs de puissance en se basant sur les outils mathématiques et statistiques qui permettent d'exploiter les données disponibles et de comprendre le comportement du matériel, puis de prévoir les fonctionnements futurs de ce dernier.

Les résultats de ces deux études sont mis en commun pour l'analyse d'une stratégie de maintenance.

Le travail élaboré dans ce mémoire, se présente en cinq chapitres,

Dans le premier chapitre nous abordons les généralités de la maintenance, en citons ses différentes formes et stratégies.

Dans le second chapitre, nous rappelons certains concepts de fiabilité, non seulement pour introduire certaines définitions, mais également pour mettre en évidence l'ampleur de l'effort nécessaire pour mettre en place une stratégie de maintenance adéquate. Il est important aussi de comprendre les phénomènes de défaillance des équipements.

Nous développons dans le chapitre trois, deux approches basées sur l'analyse de la fiabilité des équipements en vue de la définition des actions de maintenance à entreprendre. Ces approches sont expliquées et illustrées depuis l'étape de collecte des données jusqu'à la phase de détermination de la stratégie de maintenance.

Le quatrième chapitre, présentera le transformateur électrique en général, ses diverses utilisations ainsi que les principaux éléments qui le constituent. Les principales étapes de la vie d'un transformateur seront précisées, leur fiabilité, ainsi que les modes de défaillance qu'il peut subir et doit pouvoir tenir.

Finalement, dans le cinquième chapitre, les contributions formalisées aux chapitres précédents sont mises en œuvre sur deux cas applicatifs industriels permettant d'illustrer, suite à des données provenant d'un historique des équipements fourni par la SONELGAZ.

Le premier cas, est l'étude de la fiabilité d'un réseau électrique réel (Oran-sud). 60/30/10KV, dont le but est de valider notre recherche par la détermination d'une stratégie de maintenance du réseau de distribution, permettant ainsi un fonctionnement normal du système étudié, réduire le nombre d'incidents majeures menant à des coupures généralisés d'électricité, et limiter les conséquences de ces derniers lorsqu'elles se produisent.

L'outil SIMFIA permet d'analyser et de simuler le comportement global du système et d'automatiser l'étude de la fiabilité.

On envisage, l'évaluation des facteurs d'importance des composants du système qui nous permettent de déterminer ceux qu'il est préférable de réparer les premiers et ceux dont les performances doivent être améliorées afin d'optimiser les performances globales du système. Après l'étude complète du réseau et en tenant compte du calcul des facteurs d'importance, nous constatons que le transformateur de puissance est l'élément le plus défaillant de notre réseau. Ce qui nous amené dans un deuxième cas applicatif à l'étudier séparément pour permettre aux personnes chargées de la maintenance de déterminer la périodicité de maintenance préventive optimale . Ce dernier aspect pose le problème de la connaissance de la durée de vie des transformateurs de puissances.

Finalement, nous terminons par une conclusion générale, suivie d'une annexe.

### **1.1. Introduction**

Longtemps vue comme un mal nécessaire, la maintenance est devenue une réelle préoccupation dans les entreprises. Elle s'est affirmée comme un véritable enjeu compétitif, tant sur l'assurance des performances de disponibilité des matériels existants qu'en termes de sécurité, de qualité et de coûts, par exemple. On note aussi la prise en compte de nouvelles préoccupations telles que les aspects environnementaux par le biais de la réduction des émissions de déchets polluants ou encore le recyclage des systèmes en fin de vie. Aujourd'hui, elle est perçue comme un processus industriel à part entière lorsqu'elle n'est pas identifiée comme une des activités principales de l'exploitation industrielle. L'objectif de ce chapitre est de mettre en relief la notion de maintenance, son importance et les différentes pratiques existantes selon la taille et la productivité de l'entreprise.

### **1.2. Stratégie de maintenance**

Ensemble des décisions qui conduisent :

- à définir le portefeuille d'activités de la production de maintenance, c'est - à - dire, à décider des politiques de maintenance des équipements (méthodes correctives, préventives, à appliquer à chaque équipement)
- et, conjointement, à organiser structurellement le système de conduite et les ressources productives pour y parvenir dans le cadre de la mission impartie (objectifs techniques, économiques et humains). [1]

Les stratégies de maintenance sont aussi variées que peuvent l'être les systèmes sur lesquels elles s'appliquent. Cependant, toutes visent le maintien du système dans un état de bon fonctionnement le plus longtemps possible ou la restauration la plus brève lors d'une défaillance.

#### **1.2.1. Définition de la maintenance**

La maintenance est l'ensemble des moyens nécessaires pour maintenir et remettre les facteurs d'opérations en bon état de fonctionnement. [2]. Elle comprend l'ensemble des moyens d'entretien et leur mise en œuvre. La différence entre la maintenance et l'entretien est que ce dernier consiste à maintenir les facteurs d'opérations en état de fonctionnement adéquat. En fait, les facteurs d'opérations se manifestent dans les moyens et les ressources indispensables à la création du bien ou du service, comme entre autres: les machines, les équipements, etc.

Selon AFNOR X 60-010, la maintenance est « l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à réaliser un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Bien

maintenir, c'est assurer ces opérations au coût optimal. [3]. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management ».

D'après la définition CEN projet WI 319-003 (1997), la maintenance est « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion durant le cycle de vie d'un bien , destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise».[3]. La fonction requise est ainsi définie : « fonction, ou ensemble de fonctions d'un bien considérées comme nécessaires pour fournir un service donné ».

Le problème qui réside est que la plupart des entreprises ne sont pas sensibilisées à l'importance de la maintenance au sein de l'industrie.

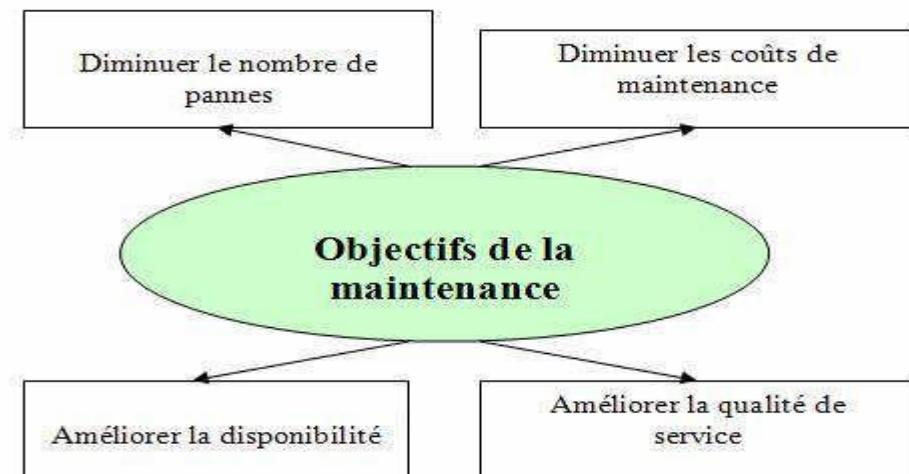
La définition de la maintenance fait donc apparaître 4 notions :

- Maintenir qui suppose un suivi et une surveillance
- Rétablir qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut
- État spécifié et service déterminé qui précise le niveau de compétences et les objectifs attendus de la maintenance ;
- Coût optimal qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité économique

### **1.2.2 Objectif de la maintenance**

Les objectifs de la maintenance, schématisés dans la figure 1.1 sont nombreux :

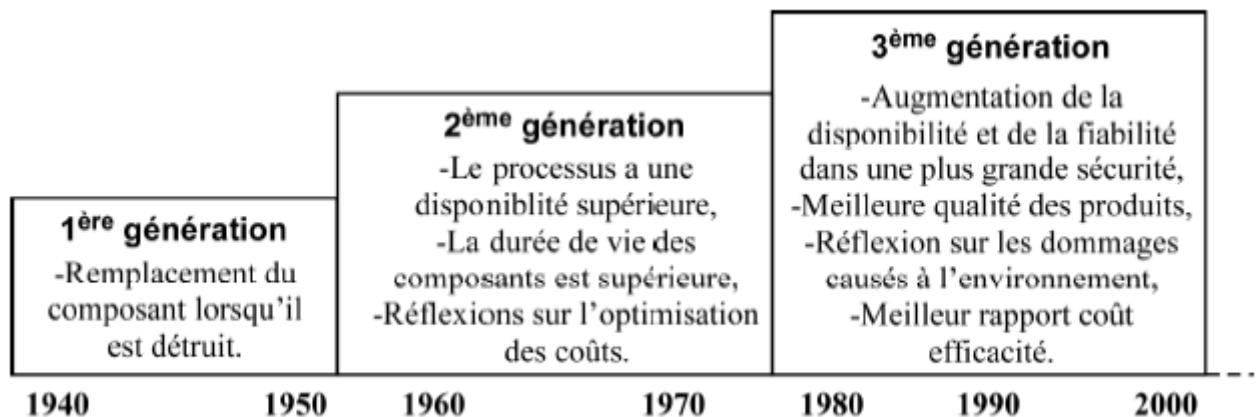
- Assurer la qualité et la quantité des produits fabriqués, tout en respectant les délais.
- Optimiser les actions de maintenance (exemple : réduire la fréquence des pannes).
- Contribuer à la création et au maintien de la sécurité au travail.
- Consolider la compétitivité de l'entreprise (exemple: améliorer la productivité) [4].



**FIG. 1.1 – Objectif de la maintenance**

### 1.2.3. Evolution de la maintenance

Dans un contexte de concurrence économique à l'échelle planétaire, la gestion de la maintenance est loin d'être stabilisée dans un environnement où l'automatisation et le processus de fabrication deviennent de plus en plus complexes. Depuis les années 1940, l'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations (Figure 1.2) [5].



**FIG. 1.2 - Evolution de la maintenance depuis 1940**

### 1.2.4. L'importance de la maintenance

La maintenance est importante pour l'industrie, ce qui paraît clair lors de l'occurrence des pannes provoquant des arrêts non planifiés. [2]. Par conséquent, toute interruption au cours du fonctionnement cause, comme entre autres:

- Augmentation du coût de productions,
- Diminution de la marge du profit,
- Rupture du stock,
- Retard des livraisons,
- Ajout des heures supplémentaires,
- Absence des sécurités des opérateurs.

Donc, si on planifie et on prévoit des entretiens planifiés avant l'occurrence des pannes, on pourra surmonter ces conséquences.

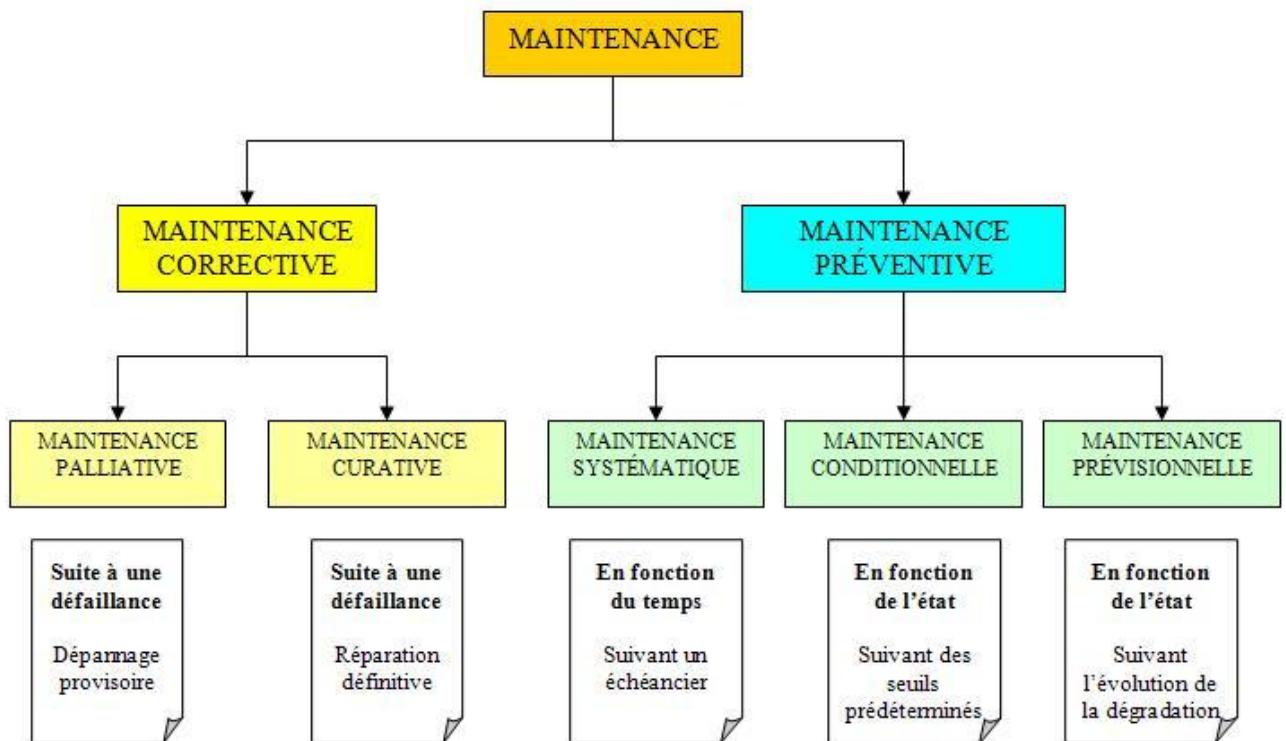
Pour ce faire, la partie suivante comprend des stratégies de maintenances.

### **1.2.5. Politiques de maintenance**

La politique de maintenance peut être répertoriée en deux grandes catégories la maintenance corrective et la maintenance préventive.

La maintenance corrective est la maintenance qui intervient suite à la défaillance du système alors que la maintenance préventive est réalisée lorsque le système est encore en fonctionnement. Le recours à l'une ou à l'autre de ces politiques diffère suivant l'élément considéré mais aussi le type de structure, la politique d'exploitation et de suivi, les coûts, la disponibilité de l'information, etc.

Dans la figure 1.3, nous présentons les différentes politiques suivant le type de maintenance étudiée. Alors que la mise en place d'opérations correctives ne dépend que de l'occurrence d'une panne, les maintenances préventives peuvent être programmées en fonction de différents paramètres.

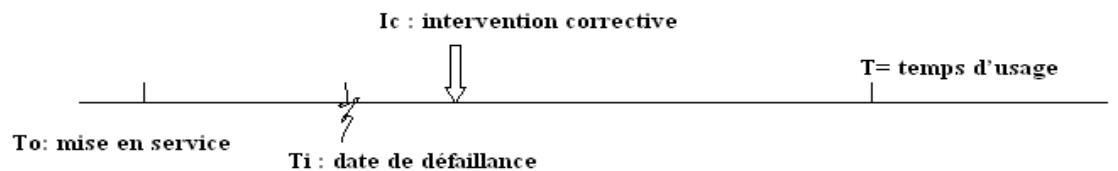


**FIG. 1.3 - Les différentes politiques de maintenance**

#### **1.2.5.1. Maintenance corrective**

La maintenance corrective (ou accidentelle) a pour objectif de rétablir le système après une défaillance (perte de la fonction requise) de manière à ce qu'il soit capable de fournir à

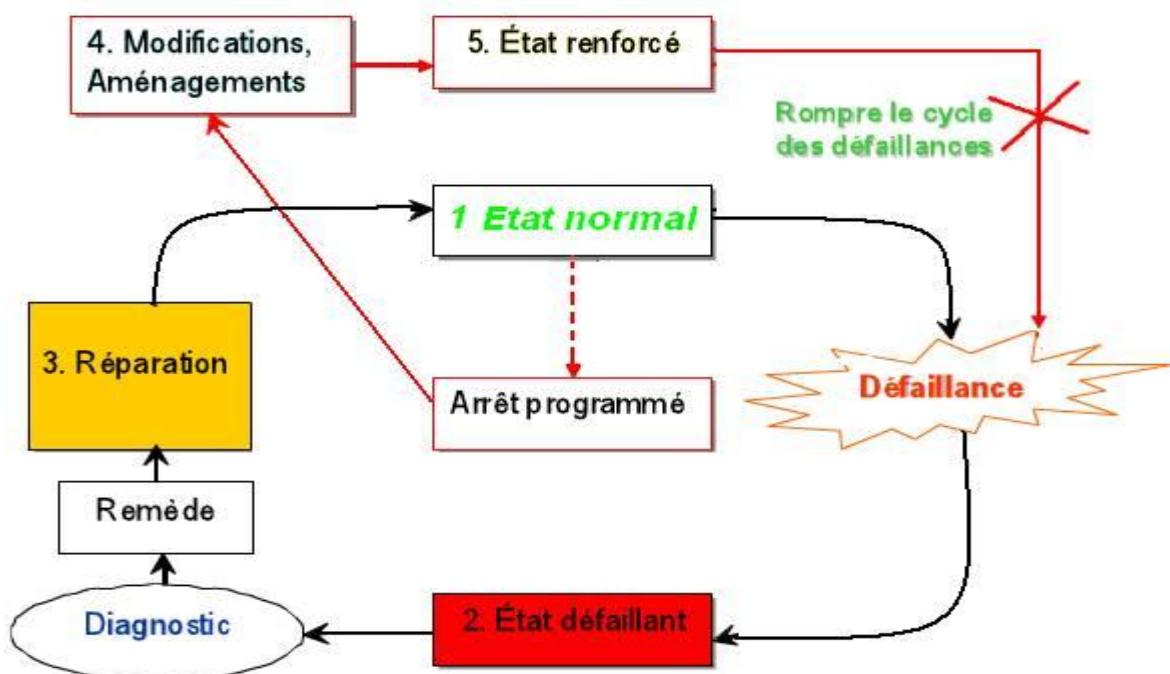
nouveau ses fonctions. fig1.4. On peut distinguer deux types de maintenance corrective la maintenance curative et la maintenance palliative [6].



**FIG. 1.4 - Intervention corrective**

#### 1.2.5.1.1. Maintenance curative

Ce type de maintenance permet de remettre définitivement en état le système après l'apparition d'une défaillance (fig1.5). Cette remise en état du système est une réparation durable. Les équipements réparés doivent assurer les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Une réparation est une opération définitive de la maintenance curative qui peut être décidée soit immédiatement à la suite d'une défaillance, soit après un dépannage, ce type de maintenance, provoque donc une indisponibilité du système [7].



**FIG. 1.5 - Maintenance curative ou réparation**

### 1.2.5.1.2. Maintenance palliative

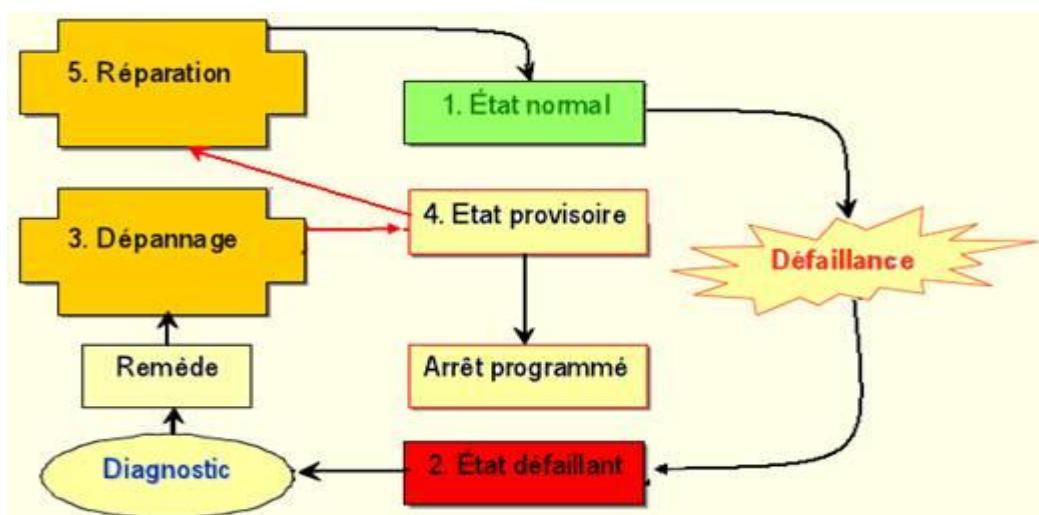
La maintenance palliative revêt un caractère temporaire, provisoire (fig1.6). Elle est principalement constituée d'opérations qui devront toutefois être suivies d'opérations curatives (réparations). Le dépannage est une opération de maintenance palliative qui est destinée à remettre le système en état provisoire de fonctionnement de manière à ce qu'il puisse assurer une partie des fonctions requises. Les opérations de dépannage sont souvent de courte durée et peuvent être nombreuses [6,7]. Son coût est très élevé, pour plusieurs raisons:

- Non respect des dates de livraisons, d'où le risque de perdre des clients qui vont chercher des concurrents,
- Recours aux heures supplémentaires qui coûtent chers,
- Baisse de la qualité des produits,
- Absence de la sécurité dans les lieux de travail,

Pour remédier à ces pannes, on a recours :

- Aux équipements de secours ou en attente qui peuvent entrer directement en fonction à la place de l'équipement défectueux,
- Besoin d'une équipe d'entretien hautement qualifiée et compétente.

Le plus souvent, ces solutions sont un peu coûteuses. [2]. D'où l'intérêt de faire une étude de rentabilité pour savoir s'il est préférable de subir les inconvénients des pannes plutôt que de subir les coûts qu'entraîneraient ces solutions.



**FIG. 1.6 - Maintenance palliative**

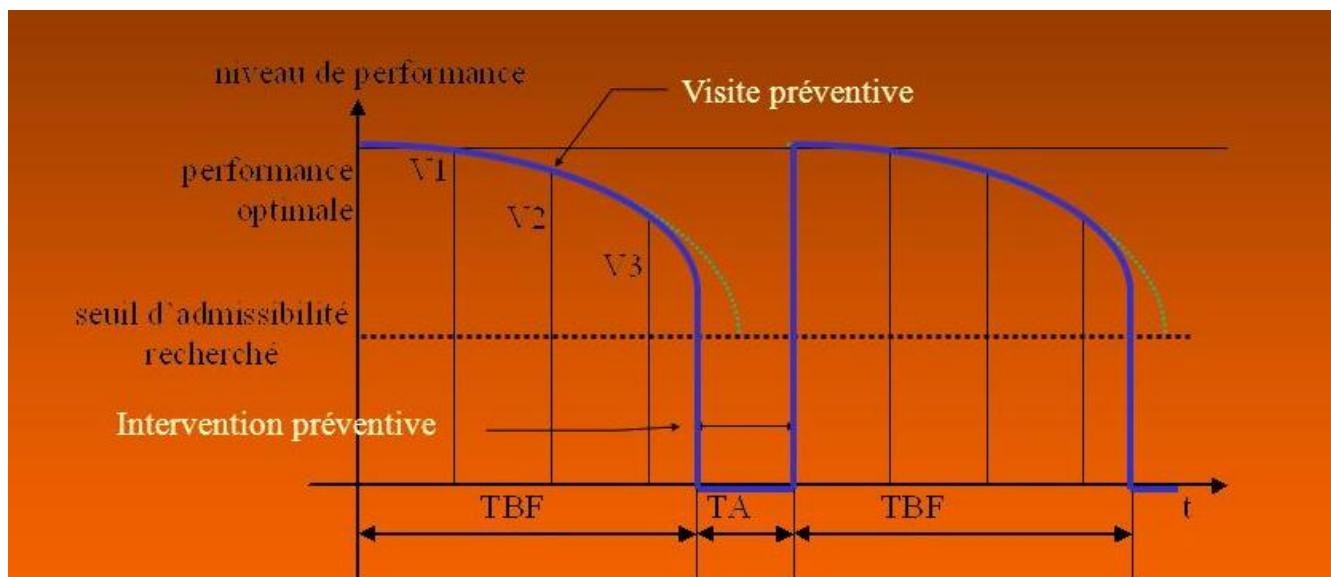
### **1.2.5.2. Maintenance préventive**

Opération de maintenance effectuée avant la détection d'une défaillance d'une entité, à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits (suite à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs) et destinée à réduire la probabilité de défaillance d'une entité ou la dégradation du fonctionnement d'un service rendu (fig1.7). [3]

Si une entité tombe en panne avant l'occurrence d'une date de maintenance, elle n'est pas réparée et attendra la prochaine date de maintenance préventive.

Note : L'intervention préventive sert à améliorer l'état de l'élément. Par conséquent, seules les défaillances progressives sont prises en compte ici. Une politique de maintenance préventive a pour objectifs :

- réduire les coûts de défaillance ;
- augmenter la fiabilité d'une machine ;
- améliorer la disponibilité de l'atelier de production ;
- augmenter la durée de vie efficace d'une machine ;
- améliorer l'ordonnancement des travaux ;
- faciliter la gestion des stocks ;
- assurer la sécurité, etc.

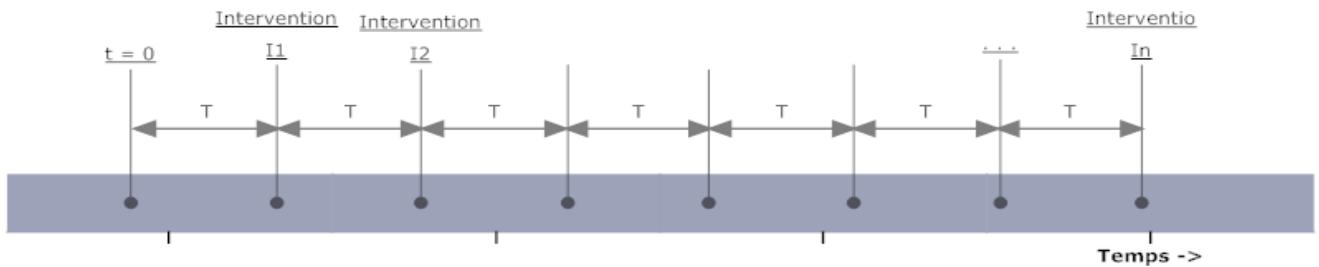


**FIG. 1.7 – Intervention de préventive**

### **1.2.5.2.1. Maintenance préventive systématique (périodique)**

Lorsque la maintenance préventive est réalisée à des intervalles prédéterminés, on parle de maintenance systématique, l'opération de maintenance est effectuée conformément à un

échéancier, un calendrier déterminé a priori (fig1.8). Aucune intervention ne peut avoir lieu avant l'échéance prédéterminée [8]. L'optimisation d'une maintenance préventive systématique consiste à déterminer au mieux la périodicité des opérations de maintenance sur la base du temps, du nombre de cycles de fonctionnement, du nombre de pièces produites... etc.



**FIG. 1.8 – Intervention préventive systématique**

Où

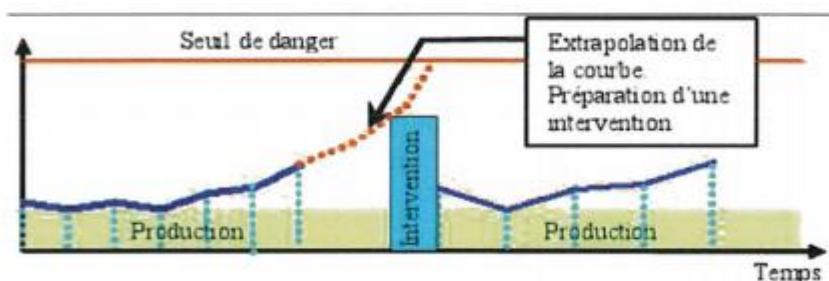
- $T$  : période d'intervention à intervalles constants

- $I_n$  : intervention préventive systématique

### 1.2.5.2.2. Maintenance préventive prévisionnelle

Lorsque la maintenance préventive est effectuée sur la base de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste avant l'observation de l'événement redouté, on parle de maintenance prévisionnelle (fig. 1.9). Une maintenance prévisionnelle peut prendre en compte un âge du matériel qui n'est pas forcément calendaire mais par exemple le temps de fonctionnement mesuré depuis la dernière inspection [9].

Elle consiste à extrapolé la courbe de dégradation d'un organe pour prévoir une intervention.

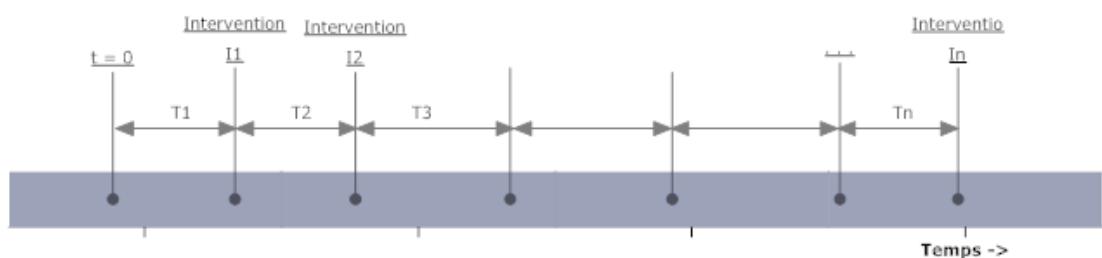


**FIG. 1.9 – Schématisation de la maintenance prévisionnelle.**

### **1.2.5.2.3. Maintenance préventive conditionnelle**

Cette maintenance est définie comme étant celle que l'on réalise uniquement lorsque l'état du bien le nécessite. La conséquence immédiate est qu'il est nécessaire de savoir mettre en place des techniques de surveillance de l'état du bien (faisabilité technique et économique) et surtout d'être capable de qualifier de façon précise l'état de ce bien. Un certain nombre de paramètres techniques, significatifs de l'état du bien, doivent donc être définis au cas par cas. Lorsque cela est possible (car ce n'est pas toujours le cas !) on arrive à optimiser les interventions de maintenance préventive en intervenant uniquement lorsque cela s'avère nécessaire (fig1.10). On peut schématiser ce processus en disant que l'intervention doit se réaliser lorsque le voyant rouge s'allume sur le tableau de bord. Cela pose cependant un autre problème qui est la définition des seuils acceptables pour chacun des paramètres précédemment définis. C'est un écueil qui limite considérablement l'application de cette méthode donc réservée la plupart du temps à des biens dont la technologie et le comportement en exploitation sont parfaitement connus. Comme elle peut être appliquée suite d'une inspection ou d'un contrôle. Ainsi, le système n'est arrêté que lorsqu'il existe une certaine probabilité de défaillance, définie par l'analyse de niveaux d'indicateurs issus de mesures et établis en permanence au cours du fonctionnement. Cette méthode présente donc l'avantage d'éviter la surprise du dysfonctionnement.

Les exemples les plus classiques des techniques utilisées pour mettre en place la maintenance conditionnelle sont la thermographie infrarouge, l'analyse des lubrifiants et la mesure des vibrations. Ces techniques donnent lieu d'ailleurs à des articles approfondis dans le cadre de ce traité [10].



**FIG. 1.10 – Intervention préventive conditionnelle**

Où

-T : période d'intervention à intervalles variant

-In : intervention préventive conditionnelle

### **1.3. Opérations de la maintenance**

Il existe des définitions normatives des différentes opérations de maintenance.

#### **1.3.1. Opérations de la maintenance corrective :**

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

- **test** : c'est à dire la comparaison des mesures avec une référence.
- **détection** ou action de déceler l'apparition d'une défaillance.
- **localisation** ou action conduisant à rechercher précisément les éléments par lesquels la défaillance se manifeste.
- **diagnostic** ou identification et analyse des causes de la défaillance.
- **dépannage, réparation** ou remise en état (avec ou sans modification).
- **contrôle** du bon fonctionnement après intervention.
- **amélioration éventuelle** : c'est à dire éviter la réapparition de la panne.
- **historique** ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure.

#### **1.3.2. Opérations de la maintenance préventive**

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

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

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

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

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

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

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

### **1. 4 Classification des tâches de maintenance**

Les tâches de maintenance sont classées en cinq niveaux. Ceux-ci font référence à la complexité des tâches à effectuer et, entre autres aux ressources matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches [11, 12] :

- ✓ **Tâches de maintenance du premier niveau** : Comporte des réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage ; ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité, sans avoir la nécessité à un outillage spécifique.
- ✓ **Tâches de maintenance de deuxième niveau** : Comporte des opérations de dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet ou opérations mineures de maintenance préventive qui peuvent nécessiter un outillage standard.
- ✓ **Tâches de maintenance de troisième niveau** : Nécessite une identification et un diagnostic des pannes. La réparation s'effectue toujours par un échange de composants fonctionnels et les réparations mécaniques à réaliser sont mineures. L'outillage nécessaire est courant et prévu pour ce type d'intervention. De plus des appareils de mesure (banc d'essai, contrôle, etc....) sont nécessaires pour la remise en route correcte de l'équipement qui a nécessité l'intervention.

- ✓ **Tâches de maintenance du quatrième niveau :** Est celui des travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Un outillage plus spécialisé est généralement requis tel que du matériel d'essai ou de test, un banc de contrôle, ...etc.
  
- ✓ **Tâches de maintenance du cinquième niveau :** Comporte les travaux de rénovation, de reconstruction ou réparations importantes confiés à un atelier central. Les moyens nécessaires pour effectuer ce type d'intervention sont proches de ceux qui ont été utilisés lors de la fabrication de l'équipement par le constructeur. Après avoir défini l'activité du service de maintenance dans le milieu industriel, nous allons maintenant en détailler la composition avec notamment ses ressources.

### **1.5. Centralisation ou décentralisation de la maintenance**

Il existe deux tendances quant au positionnement de la maintenance dans l'entreprise :  
[13]

#### **1.5.1. La centralisation :**

Toute la maintenance est assurée par un service. D'où les avantages sont :

- ✓ Standardisation des méthodes, des procédures et des moyens de communication.
- ✓ Possibilité d'investir dans du matériel onéreux grâce au regroupement.
- ✓ Vision globale de l'état du parc du matériel à gérer.
- ✓ Gestion plus aisée et plus souple des moyens en personnels.
- ✓ Rationalisation des moyens matériels et optimisation de leur usage (amortissement plus rapide).
- ✓ Diminution des quantités de pièces de rechange disponibles.
- ✓ Communication simplifiée avec les autres services grâce à sa situation centralisée [14].

#### **1.5.2. La décentralisation :**

La maintenance est confiée à plusieurs services, de dimension proportionnellement plus modeste, et liés à chacun des services de l'entreprise. D'où les avantages sont :

- ✓ Meilleures communications et relations avec le service responsable et l'utilisateur du parc à maintenir.
- ✓ Effectifs moins importants dans les différentes antennes.
- ✓ Réactivité accrue face à un problème.
- ✓ Meilleure connaissance du matériel.

- ✓ Gestion administrative allégée.

### **1.6. Les stratégies et les décisions associées**

- ✓ Les stratégies de maintenance permettent de définir des règles de décision et de déterminer le contexte informationnel qui détermine un espace de décision de maintenance [15].

Les questions POURQUOI, QUAND, QUOI et OÙ sont les questions essentielles auxquelles une décision de maintenance doit répondre. En effet les questions COMMENT et COMBIEN DE TEMPS, d'ordre opérationnel, sont caractéristiques de l'action envisagée et peuvent être données par le plan de maintenance. Toutefois les réponses peuvent être considérées comme des contraintes sur les actions envisagées. Ainsi le tableau 1 synthétise les différents contextes de la décision à travers les réponses aux questions POURQUOI, QUAND, OÙ et QUOI.

	<b>POURQUOI ?</b>	<b>QUAND ?</b>	<b>OÙ ?</b>	<b>QUOI ?</b>
<b>Maintenance corrective</b>	Corriger une défaillance	Après le constat de la défaillance	Composant défaillant (résultat du diagnostic)	Dépannage ou Réparation
<b>Maintenance préventive</b>	Eviter une défaillance	Avant la défaillance qui est déterminée par le franchissement (présent ou futur) d'un seuil représentatif de la défaillance par un indicateur	Composant associé à un indicateur ou résultat d'un diagnostic	Défini par le plan de maintenance ou par l'expert
<b>Maintenance systématique</b>	Eviter une défaillance	Un indicateur d'usage	Composant associé	Défini par le plan de

<b>Maintenance Conditionnelle</b>	Eviter une défaillance en optimisant le risque d'action superflue	Un indicateur surveillé atteint un seuil représentatif d'un niveau de dégradation	Composant associé à l'indicateur surveillé ou résultat d'un	Défini par le plan de maintenance
<b>Maintenance prévisionnelle</b>	Eviter une défaillance en agissant au meilleur moment vis-à-vis de la dégradation et des performances du composant ou système	Un indicateur prédit de dégradation atteint un seuil	Composant associé à l'indicateur prédict ou résultat d'un diagnostic	Issue d'un processus d'aide à la décision rationalisant les performances du composant ou système

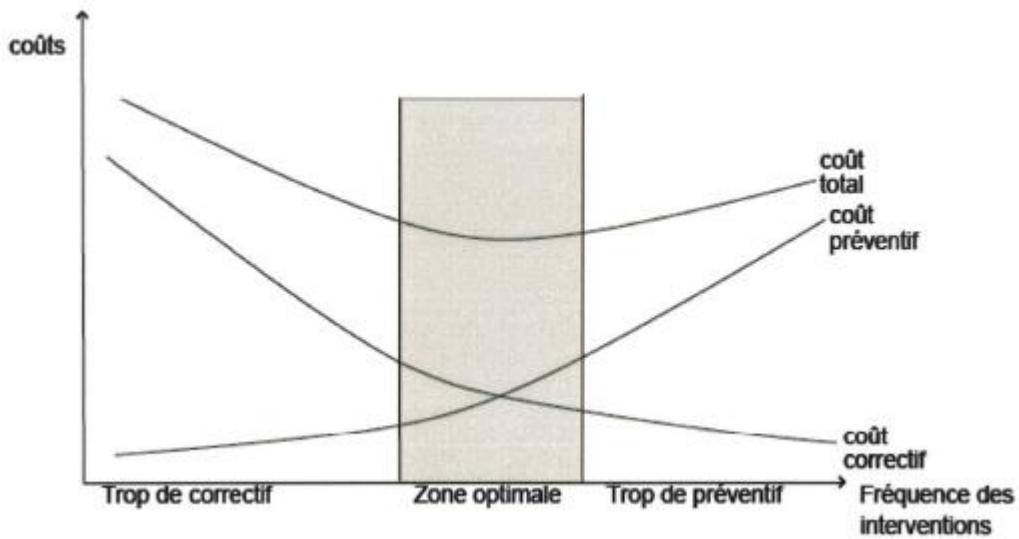
**Tableau 1. Prise de décisions pour les stratégies de maintenance**

Les stratégies recensées dans le tableau 1 ont le point commun de se focaliser sur des objectifs de fiabilité ou de disponibilité.

### **1.7. Les équilibres de la maintenance**

Dans le milieu industriel, en général, une maintenance mixte est appliquée aux systèmes. En effet, la maintenance préventive est destinée à réduire la probabilité de défaillance, mais il subsiste une part de maintenance corrective incompressible. Il est donc nécessaire de considérer des stratégies qui combinent les deux : maintenance corrective et maintenance préventive [16].

De plus l'optimisation de la maintenance consiste à trouver la balance optimale entre maintenance préventive et corrective tout en respectant les objectifs fixés. L'entreprise doit rechercher un compromis afin d'optimiser les relations entre les coûts de maintenance [17,18].



**FIG. 1.11 –Fréquence des interventions de maintenance en fonction du coût**

La figure 1.11 est une illustration des effets de la fréquence des opérations de maintenance sur les coûts liés soit à la maintenance corrective, soit à la maintenance préventive. L'augmentation du nombre d'interventions sur le système permet de réduire les effets indésirables engendrés par une panne mais pénalise le fonctionnement du système. Il peut donc entraîner une augmentation du coût global d'exploitation du système dans la mesure où chaque opération de maintenance engendre un coût.

## 1.8. Autre formes et méthodes de maintenance

### 1.8.1. La maintenance améliorative

L'amélioration des biens d'équipements qui consiste à procéder à des modifications, des changements, des transformations sur un matériel correspond à la maintenance d'amélioration.

Dans ce domaine beaucoup de choses restent à faire. C'est un état d'esprit qui nécessite une attitude créative. Cette créativité impose la critique. Cependant, pour toute maintenance d'amélioration une étude économique sérieuse s'impose pour s'assurer de la rentabilité du projet. Les améliorations à apporter peuvent avoir comme objectif l'augmentation des performances de production du matériel ; l'augmentation de la fiabilité, c'est-à-dire diminuer les fréquences d'interventions ; l'amélioration de la maintenabilité (amélioration de l'accessibilité des sous-systèmes et des éléments à haut risque de défaillance) ; la standardisation de certains éléments pour avoir une politique plus cohérente et améliorer les actions de maintenance, l'augmentation de la sécurité du personnel.

Tous les matériels sont concernés à condition que la rentabilité soit vérifiée. Cependant une petite restriction pour les matériels à renouveler dont l'état est proche de la réforme, pour usure généralisée ou par obsolescence technique [19].

### **1.8.2. La total productive maintenance (T.P.M)**

La stratégie TPM1 est un élargissement de la mission de la maintenance à la totalité du personnel, c'est-à-dire impliquant la participation de tous les services notamment ingénierie, implication de toutes les productions, maintenance et tous les niveaux hiérarchiques, des dirigeants aux services opérateurs. Elle s'inscrit dans les stratégies fondamentales du juste à temps (zéro panne, zéro stock, zéro délai, etc.). Les fonctions et responsabilités envers les équipements sont partagées, en procédant comme suit

- Les opérateurs sont chargés de tâches de maintenance du 1er niveau (nettoyage, lubrification, examen externe, etc.). Ils ont la responsabilité de leur équipement ;
- Le service maintenance intervient comme spécialiste pour des tâches plus complexes ;
- La TPM fait participer des petits groupes analogiques aux cercles de qualités ayant pour objectif l'amélioration de la maintenance dans l'intérêt de l'entreprise.

Les objectifs de TPM sont :

- Réduction du délai de mise au point des équipements.
- Augmentation de la disponibilité, et du taux de rendement synthétique (T.R.S.).
- Augmentation de la durée de vie des équipements.
- Participation des utilisateurs à la maintenance appuyés par des spécialistes de maintenance.
- Pratique de la maintenance préventive systématique et conditionnelle.
- Meilleure maintenabilité des équipements (envisagée à la conception, aide au diagnostic, systèmes experts) [20,21].

### **1.8.3. Télémaintenance**

La télémaintenance représente « la maintenance d'un bien exécutée sans accès physique du personnel au bien ». Elle permet, en effet, d'adoindre à distance des activités de maintenance (Fig. 1.4.). Cela envisage la mise en place des moyens assurant des télécommunications directes entre les unités fonctionnelles (biens) et un centre spécialisé en vue d'exécuter des tâches de maintenance. Ce concept de télémaintenance repose donc sur la perception de données ainsi que la prise de contrôle à distance [22,23].



**FIG. 1.11– Télémaintenance Vs Maintenance**

### **1.9. Conclusion**

Une attention particulière se doit d'être portée sur la mise en place d'une stratégie de maintenance adéquate en fonction de l'activité de l'entreprise et de ses potentiels de développement, et ceci afin de répondre aux besoins des consommateurs et augmenter sa profitabilité.

Le présent chapitre, nous a permis d'exprimer quelques notions de la maintenance industrielle telle que les types de maintenance, les différents types de conséquences sur le fonctionnement et les coûts de la maintenance. Comme toute activité industrielle, la maintenance évolue et il ne peut donc pas avoir une seule et unique pratique de la maintenance, la politique de maintenance a pour objectif première de porter l'outil de production à son meilleur potentiel de disponibilité et ce, au coût minimal.

### **1.1. Introduction**

Le choix d'une stratégie de maintenance affecte fortement la performance d'une installation. Elle agit sur les biens et couvre l'ensemble des opérations d'entretien destinées à accroître la fiabilité et à pallier les défaillances.

Dans ce chapitre, nous rappelons certains concepts de fiabilité, non seulement pour introduire certaines définitions, mais également pour mettre en évidence l'ampleur de l'effort nécessaire pour mettre en place une stratégie de maintenance adéquate. Il est important aussi de comprendre les phénomènes de défaillance des équipements.

### **2.2. Concepts de la fiabilité**

#### **2.2.1. Durée de vie**

La durée de vie d'un système est la période qui sépare sa mise en exploitation de l'apparition de sa défaillance. On mesurera la durée de vie de l'équipement par le nombre d'heures durant lesquelles il aura effectivement fonctionné. On suppose alors que l'équipement ne peut occuper que l'un des deux états suivants: en état pour opérer ou hors d'usage.

La durée de vie de l'équipement sera supposée être une variable aléatoire continue notée  $T$  dont la loi de probabilité devrait être estimée à travers ses réalisations  $\{t_i\} i=1, \dots n$  constituant un historique des données des durées de vie [24].

#### **2.2.2. Fonction de la fiabilité**

La fiabilité d'un système s'exprime par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminée [25, 26]. Nous la désignons, dans ce qui suit par  $R(t)$  où  $t$  désigne la durée de la mission.

La définition de la fiabilité montre bien que son domaine englobe les probabilités, donc les statistiques et les mathématiques.

Exprimé mathématiquement, c'est la probabilité que l'équipement fonctionne sans défaillance (ne tombe pas en panne avant l'instant  $t$ ) jusqu'à de l'instant  $t$  (fig2.1 (b)) :

$$R(t) = P\{T > t\} = \int_t^{\infty} f(u) du \quad (2.1)$$

Où  $T$  est une variable aléatoire qui caractérise les durées de vie d'un équipement .

La fonction de survie ou de fiabilité est décroissante en fonction de la variable t. Elle vérifie les propriétés :

$$\lim_{t \rightarrow 0} R(t) = 1 \quad (2.2)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0 \quad (2.3)$$

Il existe deux types de fiabilité :

- la fiabilité intrinsèque, qui est propre à un matériel, selon un environnement donné ; elle ne dépend que de la qualité de ce matériel.
- La fiabilité extrinsèque, qui résulte des conditions d'exploitation et de la qualité de la maintenance; elle est relative à l'intervention humaine.

### **2.2.3. Fonction de répartition**

La fonction de répartition de l'équipement est la probabilité complémentaire de la fonction de survie  $R(t)$  [27].Cette fonction appelée aussi la fonction cumulative ou fonction de distribution définit la probabilité de défaillance de l'équipement avant l'instant  $t$  .(fig2.1 (a)) :

$$F(t) = P\{T \leq t\} = \int_0^t f(u) du \quad (2.4)$$

La fonction de répartition  $F(t)$  est une fonction croissante et bornée telle que :

$$\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 0 \quad (2.5)$$

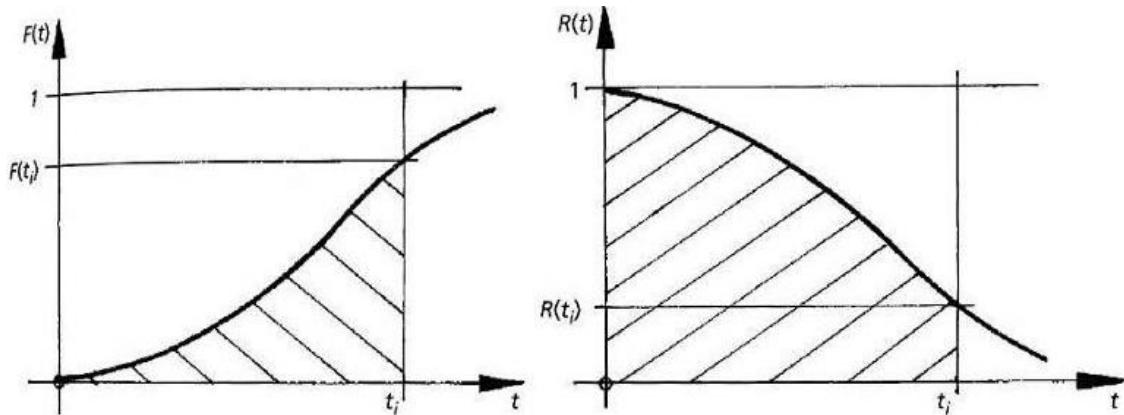
$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1 \quad (2.6)$$

### **2.2.4. Fonction de densité de probabilité**

La fonction  $f(t)$  définit la densité de probabilité des durées de vie de l'équipement à un instant donné. C'est une fonction mesurable et de mesure égale à l'unité. La probabilité de défaillance de l'équipement entre  $[t, t + dt]$  est approximativement égale au produit  $f(t)dt$  :

La surface  $F(t)$  définie sous la courbe de la figure2.2 représente la probabilité que le système soit en défaillance à l'instant  $t^*$  ; et la surface  $R(t)$ , la probabilité que le système soit en

opération. Logiquement, avec l'évolution du temps (déplacement de  $t^*$  vers la droite dans le graphique) la probabilité de défaillance augmente et la fiabilité décroît . (fig 2.2).



(a) Fonction de Répartition

(b) Fonction de Fiabilité

**FIG.2.1- Courbes paramétriques de la fiabilité**

Si  $F(t)$  est une fonction continue, alors on peut définir une fonction de densité  $f(t)$

$$f(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + dt)}{dt} \quad (2.7)$$

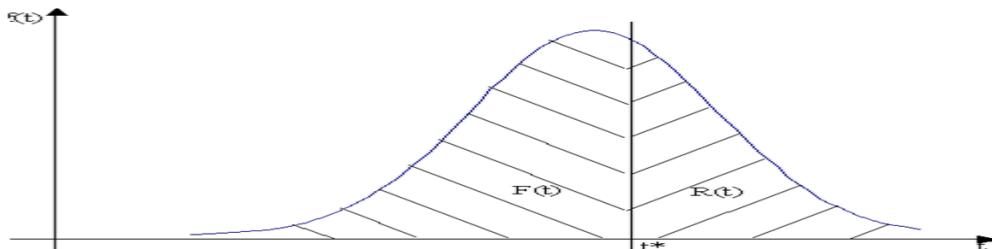
$$\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{F(t + dt) - F(t)}{dt}$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

$$= -\frac{dR(t)}{dt}$$

### 2.2.5. Fonction de risque instantané ou taux de panne

La défaillance d'un équipement peut être caractérisée par un taux appelé taux de panne. Ce taux est aussi appelé taux de défaillance, taux de hasard ou taux de mortalité. Nous le désignons par  $\lambda(t)$ .



**FIG.2.2- La fonction densité de durée de vie**

La fonction  $\lambda(t)dt$  est la probabilité conditionnelle de défaillance de l'équipement à un instant  $t+dt$  sachant qu'il a survécu jusqu'à l'âge  $t$  sans défaillance. C'est une fonction positive, définie par :

$$\lim_{dt \rightarrow 0} \lambda(t)dt = P(t < T \leq t + dt | T > t) \quad (2.8)$$

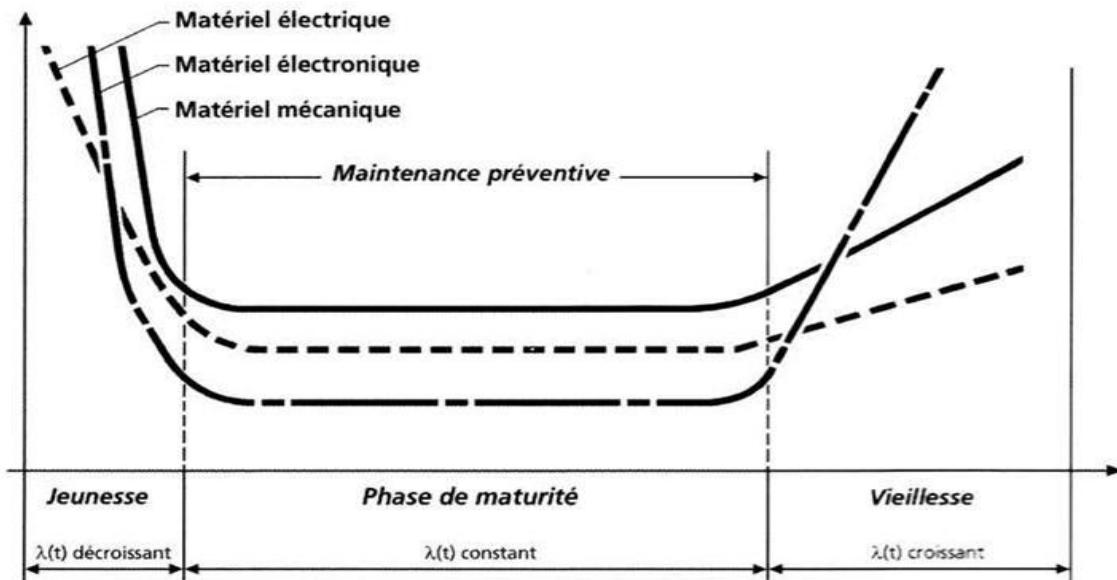
$$\begin{aligned} &= \frac{P(t < T \leq t + dt \cap T > t)}{P(T > t)} \\ &= \frac{P(t < T \leq t + dt)}{P(T > t)} \end{aligned}$$

La fonction du taux de défaillance est très importante dans l'analyse de la fiabilité parce qu'elle indique le taux de vieillissement du système [28].

Des Équations (2.7) et (2.8), nous déduisons l'expression de la fonction de risque instantané ou de taux de défaillance par :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.9)$$

L'allure du taux de panne en fonction du temps est souvent représentée par la fonction de la fig 2.3 .Le taux varie selon une courbe qui prend l'allure d'une baignoire [29].



**FIG.2.3 - Courbe en baignoire du taux de défaillance**

Cette courbe met en évidence trois périodes distinctes :

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

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

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

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

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

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

Cette courbe en baignoire montre bien que la maintenance préventive n'est réellement justifiée que pour la phase de maturité. Dans cette période, le taux de défaillance est sensiblement constant et égal à l'inverse de l'indice de fiabilité: MTBF (Mean Time Between Failure). La MTBF, ou moyenne des temps de bon fonctionnement, est la valeur moyenne des temps entre deux défaillances consécutives [30].

De l'équation (2.9) et sachant que :

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2.10)$$

Nous obtenons :

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)}$$

En intégrant les membres, on obtient :

Nous pouvons en déduire, une relation entre le taux de défaillance et la fiabilité :

$$\lambda(t) = -\frac{d \log R(t)}{dt}$$

En intégrant les deux membres de 0 à t, sachant que  $R(0) = 1$  :

$$R(t) = \exp \left( - \int_0^t \lambda(t) dt \right)$$

Où t est la durée de la mission considérée.

### **2.2.6. Différentes grandeurs utilisées en maintenance**

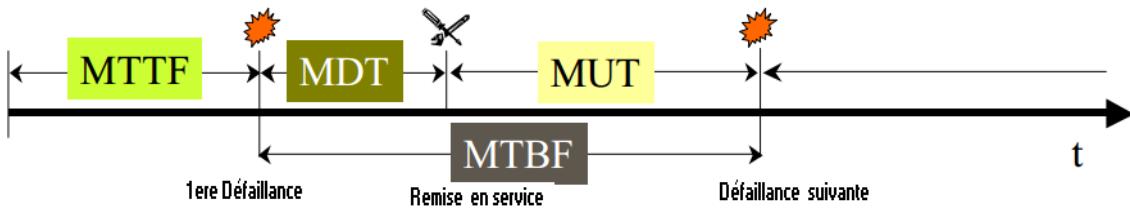
La vie utile d'un composant comporte des cycles de fonctionnement. Au cours d'un cycle, l'état du composant passe de l'état «en fonction» à l'état «hors d'usage» (figure 2.3).

#### **2.2.6.1. MTTF**

Un autre indicateur de fiabilité est le MTTF (de l'anglais, Mean Time To Failure) qui représente une estimation du temps moyen de fonctionnement avant la première défaillance, ce temps a un rôle important en fiabilité, il est souvent pris comme un indicateur permettant la comparaison des fiabilités des systèmes fournis par un constructeur [31,32]. Il est défini par :

$$MTTF = \int_0^\infty R(t) dt \quad (2.13)$$

Le MTTF est calculé par la surface délimitée par  $R(t)$ .



**FIG.2.4- La présentation des différentes grandeurs en fonction du temps**

### 2.2.6.2. MTBF

Si nous analysons ce cycle, nous remarquons qu'il est composé de la moyenne de temps de bon fonctionnement (MTBF). Cette moyenne est définie comme la durée moyenne entre deux défaillances (Mean time between failure ) (figure 2.3). L'expression du MTBF est donnée par [33]:

$$\text{MTBF} = \text{MDT} + \text{MUT} \quad (2.14)$$

Où

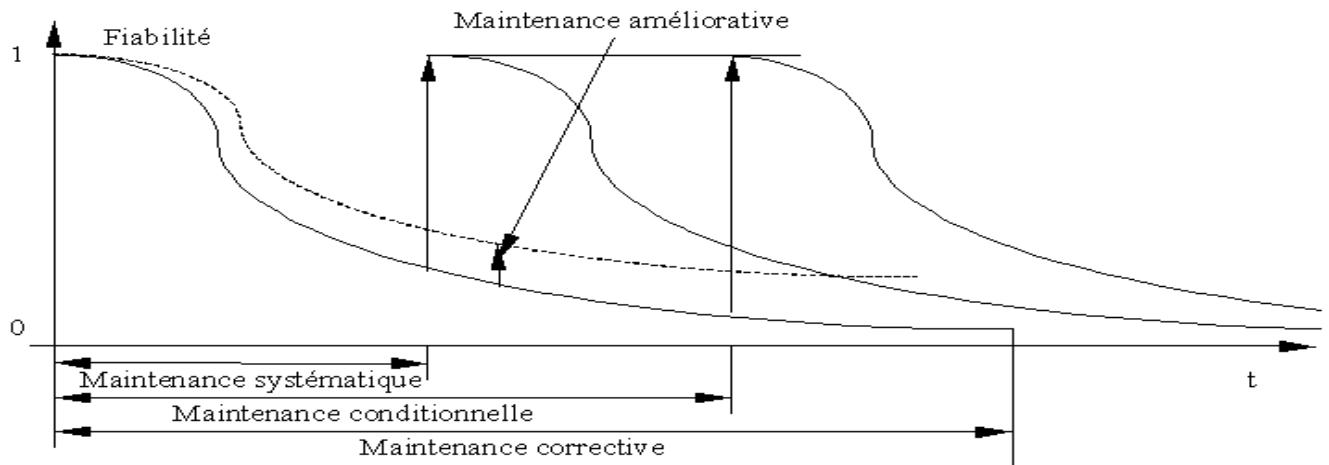
MUT : Durée moyenne de temps de fonctionnement (*Mean Up Time*)

MDT : temps moyen de panne (*Mean Down Time*)

### 2.2.8. Relation entre la maintenance et la fiabilité

L'évaluation de l'état de dégradation des équipements industriels s'avère un élément indispensable à la définition des opérations de maintenance destinées à garantir, pour un coût maîtrisé et préétabli, un niveau maximum de disponibilité et de sécurité de ces équipements.

La figure 2.4 présente la contribution des différents types de maintenance en ce qui concerne la fonction de fiabilité ( $R(t)$ ) et la durée de vie utile de l'équipement [34]. Il va sans dire qu'une réduction du taux de panne  $\lambda(t)$  entraîne une amélioration de la fonction de fiabilité  $R(t)$ . C'est dans cette optique que la maintenance améliorative a été instaurée. La maintenance préventive, avec toutes ses variantes, va en revanche tenter de ramener le taux de panne à son niveau le plus bas en remplaçant la composante usée sans améliorer les caractéristiques intrinsèques de l'équipement.

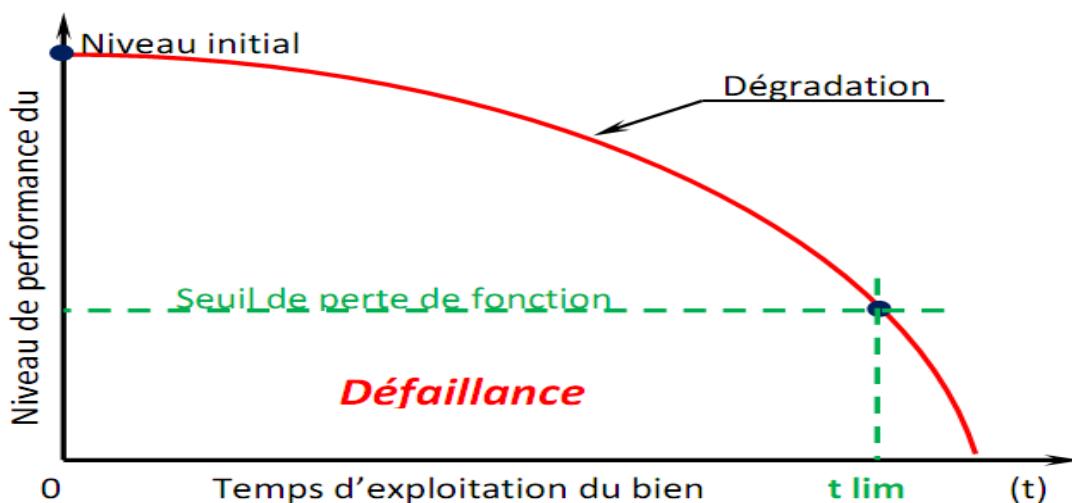


**FIG.2.5- l'impact de la maintenance sur la fiabilité des équipements**

### 2.3. Défaillances

A cette notion de fiabilité, la notion de défaillance est indissociable. C'est par cet état de fonctionnement, ou plutôt de non fonctionnement que l'on peut déterminer si un système est fiable ou non.

C'est la « cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ». Par extension, on considère parfois qu'il y a une défaillance lorsqu'il y a altération de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise: les tolérances associées doivent être définies [35].



**FIG.2.6- Dégradation du bien et durée de vie**

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

### **2.3.1. Classification des défaillances par impact sur les performances du système**

Les défaillances ont des causes, des manifestations et des conséquences très diverses, aussi pour mieux les connaître et pouvoir efficacement intervenir, il est nécessaire de les classer en fonction de leurs impacts sur les performances du système (figure 2.6).

Nous proposons ici de reprendre les classifications présentées dans [36, 37,38].

#### **1.3.1.1. Classification des défaillances en fonction de leur manifestation**

##### **2.3.1.1.1. Défaillance progressive**

C'est la défaillance due à une évolution progressive des caractéristiques d'un bien. Ces défaillances concernent principalement le domaine mécanique. Ce type peut être repéré par un contrôle antérieur. Elle peut être évitée par la mise en place d'une maintenance spécifique [39].

##### **2.3.1.1.2. Défaillance soudaine**

C'est la défaillance brutale due à une évolution quasi instantanée des caractéristiques d'un bien. La soudaineté de l'apparition de ces défaillances rend impossible une anticipation pour une intervention avant manifestation [40].

#### **2.3.1.2. Classification des défaillances en fonction de leur amplitude**

##### **2.3.1.2.1. défaillance partielle**

C'est la défaillance résultante de déviation d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées mais telle qu'elle n'entraîne pas une disparition complète de la fonction requise.

##### **2.3.1.2.2. défaillance complète**

C'est la défaillance résultante de déviation d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiques telle qu'elle n'entraîne pas une disparition complétée de la fonction requise.

##### **2.3.1.2.3. défaillance intermittente**

Ces défaillances résultent d'une perte de certaines des fonctions pour une très courte durée dans le temps. Le bloc fonctionnel retrouve ses performances d'opération tout de suite après la défaillance. (Exemple : défaut de connexion électrique.).

Les défaillances catastrophiques correspondent aux défaillances soudaines et complètes, alors que les défaillances dégradées correspondent aux défaillances partielles et progressives.

### **2.3.2. Modes de défaillances**

Il est important d'introduire le concept du mode de défaillance : « un mode de défaillance est l'effet par lequel une défaillance est observée » [41].

Ainsi, à chaque défaillance des équipements, on associe des modes de défaillance et des causes de défaillance ; les modes de défaillance sont générés par les causes de défaillance, un mode de défaillance représentant l'effet (ou les effets) par lequel (ou lesquels) se manifeste la cause de défaillance. Les défaillances d'un équipement ont des effets sur les fonctions de celui-ci, le mode de défaillance sera dénommé du nom de l'effet.

Un mode de défaillance peut intervenir de quatre manières différentes:

- Plus de fonction : la fonction cesse de se réaliser.
- Pas de fonction : la fonction ne se réalise pas lorsqu'on la sollicite.
- Fonction dégradée : la fonction ne se réalise pas parfaitement : altération des performances.
- Fonction intempestive: la fonction se réalise alors qu'elle n'est pas sollicitée.

Chaque équipement ou système peut posséder plusieurs modes de défaillance.

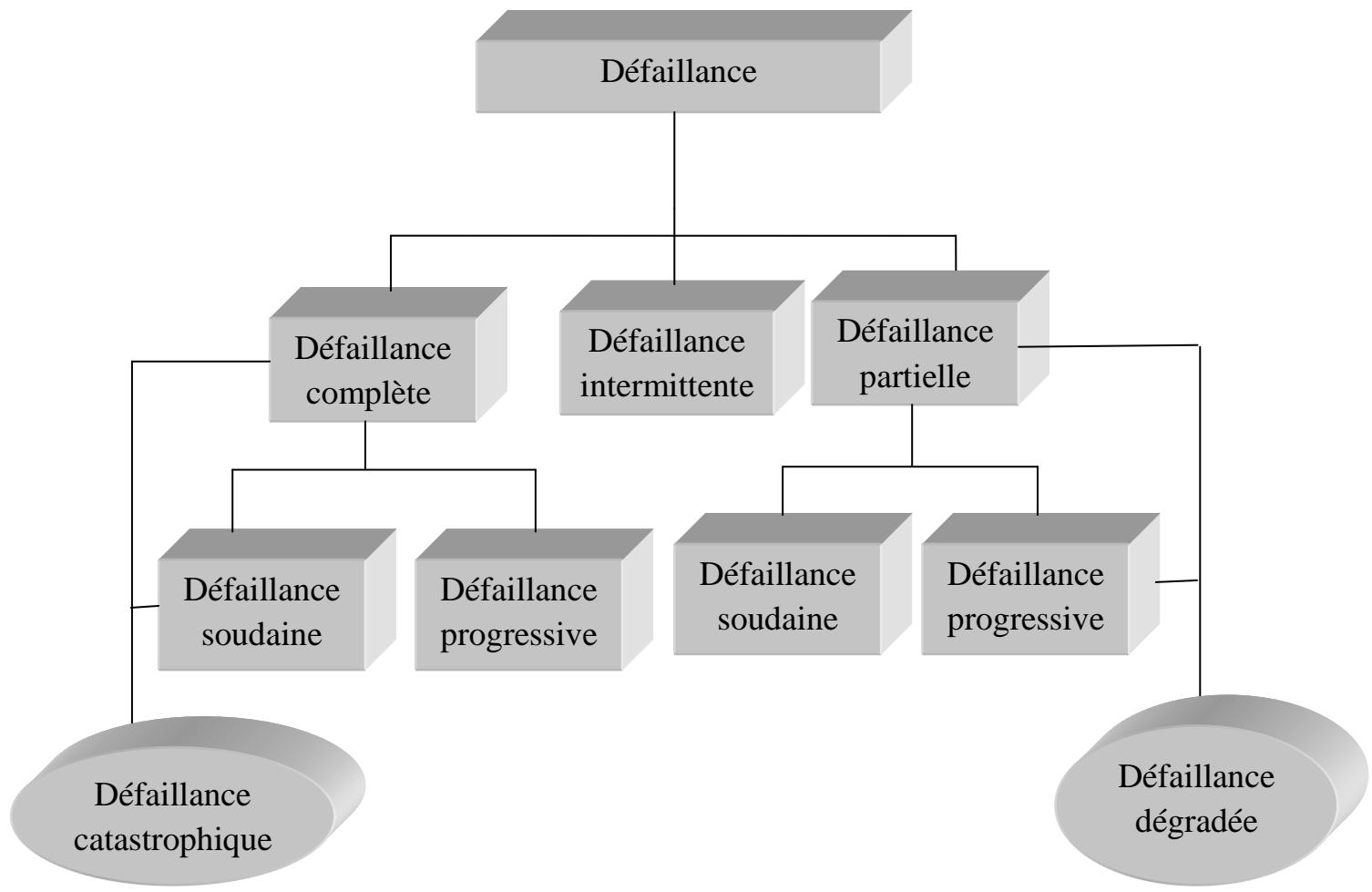
A titre d'exemple, on considère un disjoncteur

Les principaux modes de défaillance sont :

- le disjoncteur ne ferme pas sur ordre.
- le disjoncteur n'ouvre pas sur ordre.
- le disjoncteur ouvre sans ordre.
- le disjoncteur ferme sans ordre.
- le disjoncteur n'établit pas le courant.
- le disjoncteur ne coupe pas le courant.
- le disjoncteur ne supporte pas le courant.

### **2.3.3. 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. Il existe trois types de causes conduisant à une défaillance : - Causes internes au matériel.- Causes externes dues à l'environnement, au milieu, à l'exploitation.- Causes externes dues à la main d'œuvre.



**FIG.2.7- Classification de la défaillance en fonction du niveau d'information**

Causes de défaillance	Composants électriques	Composants mécaniques
<b>Causes internes. Matériel</b>	- vieillissement - composant HS	- contraintes mécaniques - fatigue mécanique - états de surface
<b>Causes externes Milieu d'exploitation</b>	- pollution (poussières, huile, eau) - chocs - vibrations - échauffement local - parasites, etc.	- pollution (poussières, huile, eau) - vibrations - échauffement local - choc
<b>Causes externes Main d'œuvre</b>	- montage - réglages - mise en œuvre - utilisation	- conception - montage - réglages - mise en œuvre - utilisation

**Tableau 2.1- Exemples de causes de défaillance**

## 2.4. Les facteurs d'importance

Une étude probabiliste de fiabilité n'a plus pour seul objectif de vérifier qu'un niveau de performance requis est effectivement atteint. Ces études doivent en effet également permettre d'améliorer la conception, l'exploitation et la maintenance du système considéré en offrant des éléments de réponse aux questions suivantes :

- quels composants ou modules du système contribuent le plus à sa défiabilité ?
- sur quel composant agir pour améliorer de façon la plus efficace et la moins coûteuse les performances du système ?
- sur quel composant peut-on relâcher (ou au contraire doit-on absolument garantir) des exigences de maintenance ?

Les analyses de sensibilité ou d'importance permettent d'évaluer la contribution relative d'un composant à la fiabilité ou la défiabilité du système, et elles ont précisément pour objet de répondre (en partie, au moins) aux interrogations formulées ci-dessus. L'importance d'un composant dépend à la fois de sa fiabilité propre et de son rôle fonctionnel au sein du système et mesure la sensibilité du système au composant considéré et à ses caractéristiques .Selon le type d'utilisation envisagée (amélioration de la fiabilité en conception, pilotage d'une stratégie de diagnostic de défaillance...). Pour l'étude de sensibilité plusieurs facteurs d'importance ont été définis [42,43].

### 2.4.1. Facteur d'importance fiabiliste

Le facteur d'importance marginal introduit par Birnbaum, est défini comme une mesure de la variation de la fiabilité du système en fonction de la fiabilité d'un composant, défini de la façon suivante [44]:

$$I_i^B(t) = \frac{dR_S(t)}{dR_i(t)} = R_S(t; R_i(t) = 1) - R_S(t; R_i(t) = 0) \quad (2.14)$$

$R_S(t; R_i(t) = 0)$  : Fiabilité du système à l'instant t, le composant i étant défaillant (en panne) et  $R_S(t; R_i(t) = 1)$  : Fiabilité du système à l'instant t, le composant i non défaillant (fonctionne parfaitement).

Si le facteur est grand, un changement de la fiabilité du composant i aura un grand impact sur la fiabilité du système .Il s'agit donc d'un facteur de sensibilité.

### **2.4.2. Facteur d'importance Critique**

Il renseigne par une évaluation chiffrée de la présence d'une quantité de la défiabilité du composant .Mathématiquement, ce facteur est exprimé par la relation donnée ci dessous [45]:

$$I_i^{CR}(t) = I_i^B(t) \frac{dF_i(t)}{dF_S(t)}$$

$$= [R_S(t; R_i(t) = 1) - R_S(t; R_i(t) = 0)] \frac{F_i(t)}{F_S(t)} \quad (2.15)$$

où  $F_i(t)$  est la défiabilité du composant i et  $F_S(t)$ est la défiabilité du système à l'instant t.

### **2.3.3. Le facteur d'importance RRW-WORTH**

Pour évaluer l'importance d'un composant sur la fiabilité du système, nous nous intéressons au facteur RRW-Worth. La démarche consiste donc à considérer qu'un composant est fiable et à évaluer les effets de cette fiabilité sur la fiabilité du système .Ce facteur est exprimé par la relation :

$$RRW_i = \frac{R_S(t)}{R_S(t; R_i(t) = 0)} \quad (2.16)$$

### **2.4.4. Le facteur d'importance Fussel- Vesely**

Il mesure la baisse maximum de la fiabilité de la fiabilité du système causé par un composant particulier .Il est défini par la relation suivante :

$$I_i^{FV}(t) = \frac{R_S(t) - R_S(t; R_i(t) = 0)}{R_S(t)} \quad (2.17)$$

Ce facteur dépend du nombre et de l'ordre de coupe du circuit dans lequel apparaît le composant. Il mesure la baisse maximum.

Les facteurs fiabilistes jouent un rôle important dans l'analyse de la sûreté de fonctionnement des systèmes. Ils contribuent au diagnostic de défaillance et ainsi fournir des éléments d'aide à la décision pour améliorer la conception et l'exploitation du système en identifiant les principaux points faibles [46,47].

## **2.5. Conclusion**

Afin de mettre en exergue l'intérêt de nos travaux, dans ce chapitre, Dans un premier temps, nous avons rappelé les concepts de la fiabilité ainsi que les relations qui existent entre elle et les différentes fonctions de densité de probabilité, de taux de panne. La connaissance de l'une de ces fonctions permet en effet de déterminer les autres. Dans un second temps, nous avons défini et classifier les défaillances d'un système ainsi que ses modes de défaillances et ses causes. La connaissance de ces notions est indispensable pour pouvoir implanter une stratégie de maintenance efficace et rentable.

En dernier, Les facteurs d'importance fiabilistes ont été définis dans le cadre de localiser l'élément susceptible de criticité, d'où un outil efficace pour la prise de décision dans les études de fiabilité, en maintenance

### **3.1 Introduction**

Le fonctionnement d'un système électrique sur une période donnée se caractérise par les variations plus ou moins corrélées d'une multitude de paramètres importants. Cette relative « vie » du système impose aux exploitants et aux gestionnaires des défis dont un des plus importants est la maîtrise de l'impact lié à ces variations. Cela passe par une modélisation probabiliste de tous les paramètres participant au fonctionnement du système électrique autrement dit par une caractérisation probabiliste du système électrique.

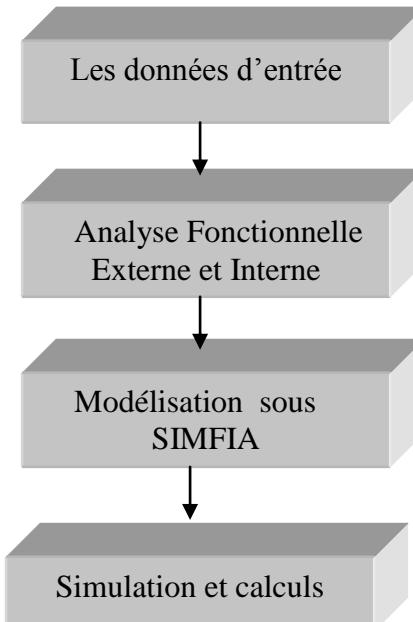
Donc le choix d'une maintenance se définit par un ensemble d'actions exécutées et ordonnées selon une certaine stratégie. Dans le cadre de cette recherche, nous développons deux approches fiabilistes basée sur l'analyse de la fiabilité des équipements en vue de la définition des actions de maintenance à entreprendre. Ces approches sont expliquées et illustrées depuis l'étape de collecte des données jusqu'à la phase de détermination de la stratégie de maintenance.

### **3.2. Méthodologies**

#### **3.2.1. Première approche**

Pour apporter des éléments d'aide au choix d'une stratégie de maintenance. Nous proposons, une méthodologie basée sur la modélisation et la simulation.

La figure 3.1 suivante présente les étapes nécessaires à la réalisation du modèle



**FIG. 3.1 – Le déroulement de l'approche**

### **3.2.1.1. collecte des données**

Cette étape consiste à collecter des données pour chaque système. Ces données proviennent d'un historique d'événements.

Le système de collecte des données (Les données d'entrée) doit assurer une circulation continue de renseignements dont les sources sont connues. Il doit préciser les procédures de transmission des données, y compris l'utilisation de formulaires, d'imprimés d'ordinateur, etc. L'exploitant doit veiller à attribuer au sein de son organisme les responsabilités pour la collecte de données provenant de chaque source [48].

Ce formulaire comprend le numéro d'équipement, la classe de l'équipement, les états de l'équipement qui sont enregistrés depuis sa première mise en service (mise en marche, première panne, en maintenance, remise en marche, arrêt pour inspection, remise en marche, deuxième panne...),

La saisie d'informations relatives aux caractéristiques des processus de défaillance et même de réparation peut concerner la date, la description et la durée de l'intervention, la nature, la cause et la gravité de la défaillance [49].

Les informations sont extraites de plannings hebdomadaires renseignés par les opérateurs de production ou de maintenance et représentent les séquences de bon fonctionnement et d'immobilisation des équipements. Les raisons d'arrêt et les opérations effectuées sur l'équipement immobilisé sont précisées, ce qui permettra de tirer des conclusions par rapport à la typologie des défaillances [50].

### **3.2.1.2. Analyse fonctionnelle**

L'analyse fonctionnelle est un préalable obligatoire. Elle consiste à raisonner en termes de besoins à satisfaire, exprimés sous forme de fonctions à remplir avec des critères de valeurs dans un environnement donné

Pour faire une étude pertinente de fiabilité d'un système, il est impératif de connaître ses décompositions matérielle et fonctionnelle, les facteurs d'influence internes et externes qui concourent à l'amélioration de sa fiabilité et ceux qui, au contraire, constituent une entrave et mènent vers des dysfonctionnements probables. L'analyse fonctionnelle permet, grâce à une très bonne prise de connaissance de l'ensemble des facteurs matériels, humains et environnementaux, de rendre l'étude plus pertinente et plus juste. Pour cela, deux types d'analyse peuvent être envisagés : Une analyse fonctionnelle externe et une analyse fonctionnelle interne

1. L'analyse fonctionnelle externe qui a pour objectif de formaliser et de valider l'analyse du besoin. Le système est considéré comme une boîte noire recevant des entrées et fournissant des sorties ;
2. L'analyse fonctionnelle interne permet d'identifier les fonctions techniques et les solutions technologiques nécessaires pour la réalisation de la boîte noire [51].

### **3.2.1.3. Modélisation sous SIMFIA**

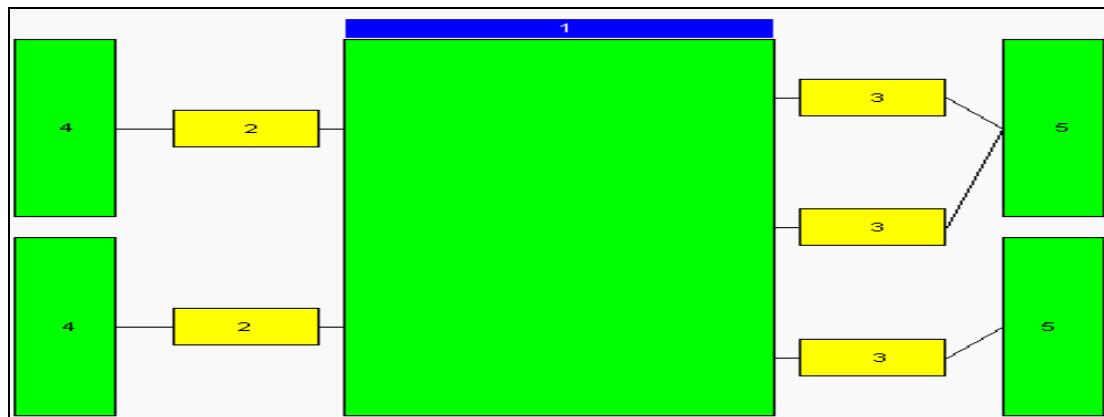
A partir de l'acquisition de connaissances issues de l'analyse fonctionnelle d'un système SIMFIA contient tous les outils qui permettent de :

- Créer une modélisation,
- Sauvegarder ou charger une modélisation,
- Représenter graphiquement les objets modélisés,
- Valider la modélisation,
- Imprimer les représentations sur traceur ou imprimante,
- gérer le multifenêtrage.

Les principaux objets manipulés dans SIMFIA sont :

#### **a- Bloc fonctionnel :**

Le bloc fonctionnel est l'entité de base de la modélisation. Il est la représentation fonctionnelle ou physique d'un élément du système modélisé. Il est susceptible de recevoir ou de produire des fonctions (fig3.2).



**FIG. 3.2 – Représentation graphique d'un bloc fonctionnel**

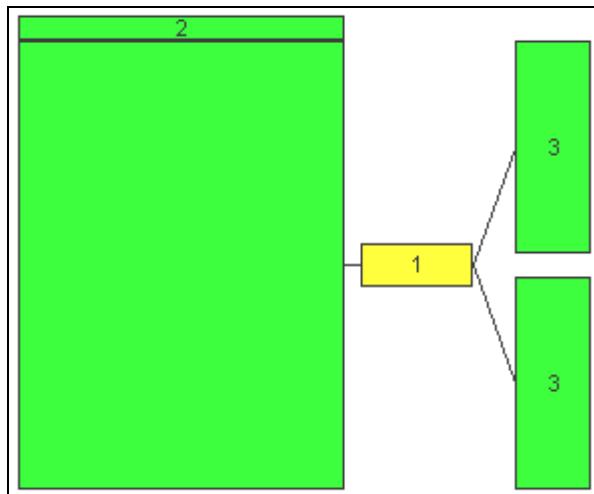
- 1- Bloc fonctionnel
- 2- Fonctions en entrée du bloc fonctionnel

- 3- Fonctions en sortie du bloc fonctionnel
- 4- Blocs fonctionnels origines des fonctions entrées
- 5- Blocs fonctionnels destinations des fonctions sorties

Cette représentation visualise au centre de la fenêtre le bloc sélectionné<sup>1</sup>. Les fonctions sorties 3sont affichées à droite avec leurs blocs destinations<sup>5</sup>. Les fonctions entrées 2sont affichées à gauche avec leur bloc origine<sup>4</sup>.

### **b- Fonction (connecteurs) :**

La fonction est le support des différents types d'interactions exercées entre les blocs fonctionnels. Une fonction a pour origine un et un seul bloc fonctionnel. Une fonction peut avoir pour destination un ou plusieurs blocs fonctionnels (fig3.3).



**FIG. 3.3 – Description d'une fonction**

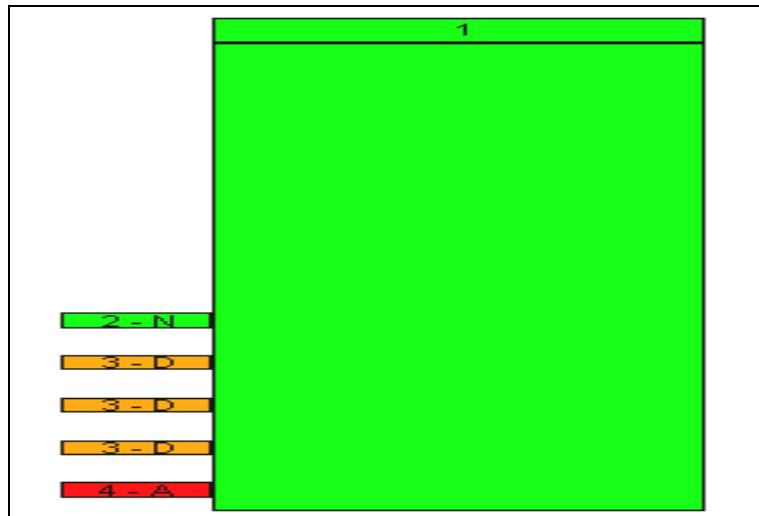
- 1- Fonction
- 2- Bloc fonctionnel origine de la fonction 1
- 3- Blocs fonctionnels destination de la fonction 1

Les fonctions entrées et sorties d'un bloc fonctionnel sont reliées entre elles par des liens logiques.

### **c- État de bloc fonctionnel :**

L'état de bloc fonctionnel est une information qualitative associée à un bloc fonctionnel. Comme pour une fonction, un bloc fonctionnel peut avoir trois types d'états (fig3.4) :

- Etat nominal : C'est l'état de bon fonctionnement du bloc fonctionnel, tel qu'on doit le trouver lorsque le système est en fonctionnement normal.
- Etat absent : Cet état fictif équivaut à l'absence totale du bloc fonctionnel. Cet état est unique.
- Etat dégradé : Il s'agit de tout état intermédiaire entre l'état nominal et l'état absent.



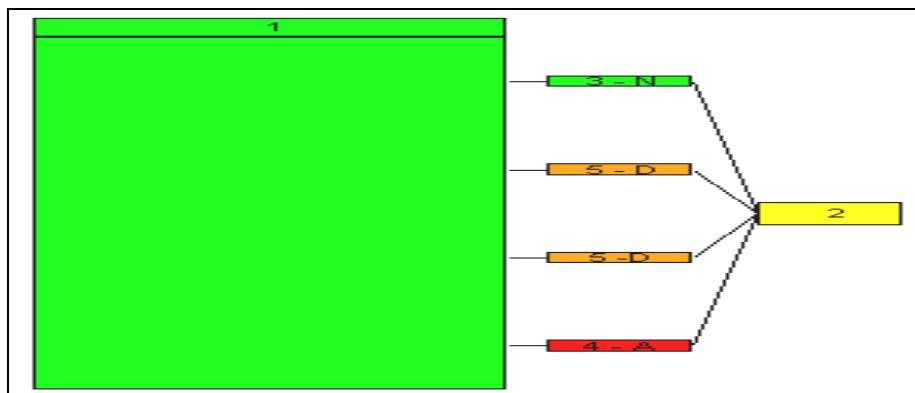
**FIG. 3.4 – Représentation graphique d'un état de bloc fonctionnel**

- 1- Bloc fonctionnel
- 2- État nominal ou état de bon fonctionnement du bloc fonctionnel
- 3- État dégradé de fonctionnement du bloc fonctionnel
- 4- Dégradation totale du bloc fonctionnel

#### **d -État de fonction**

L'état de fonction est une information qualitative associée à une fonction. Comme pour un bloc, une fonction peut avoir trois types d'états (fig3.5) :

- État nominal : C'est l'état de bon fonctionnement de la fonction, dans lequel il se trouve lorsque le système est en fonctionnement normal..
- État absent : Cet état définit l'absence de la fonction. Cet état est unique.
- État dégradé : C'est un état de fonctionnement non conforme à ce que l'utilisateur attend de son système.



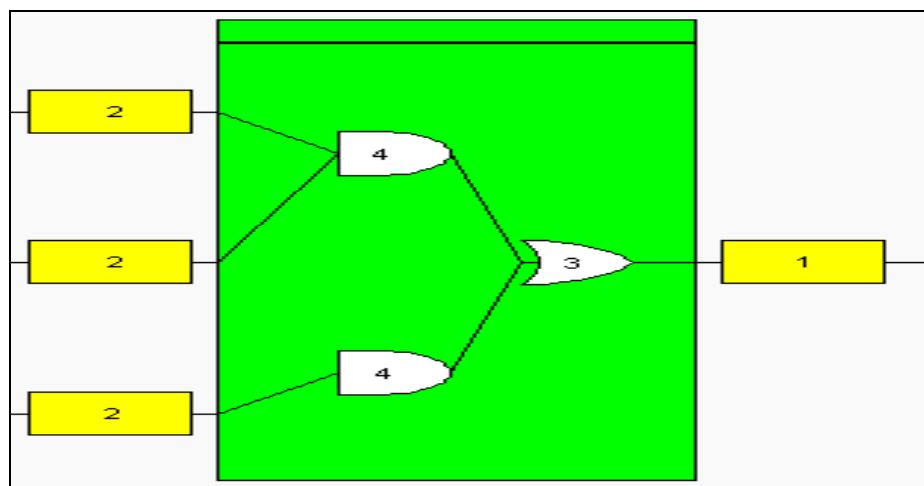
**FIG. 3.5 – Représentation graphique d'un état de fonction**

- 1- Bloc fonctionnel
- 2- Fonction sortie du bloc fonctionnel
- 3- État nominal de la fonction sortie
- 4- État dégradé de la fonction sortie
- 5-Absence de la fonction sortie

#### e- Lien logique

Les liens logiques constituent des expressions logiques internes aux blocs fonctionnels.  
Ces expressions logiques (ou polynômes booléens) relient :

Une fonction sortie à des fonctions entrées (fig3.6).

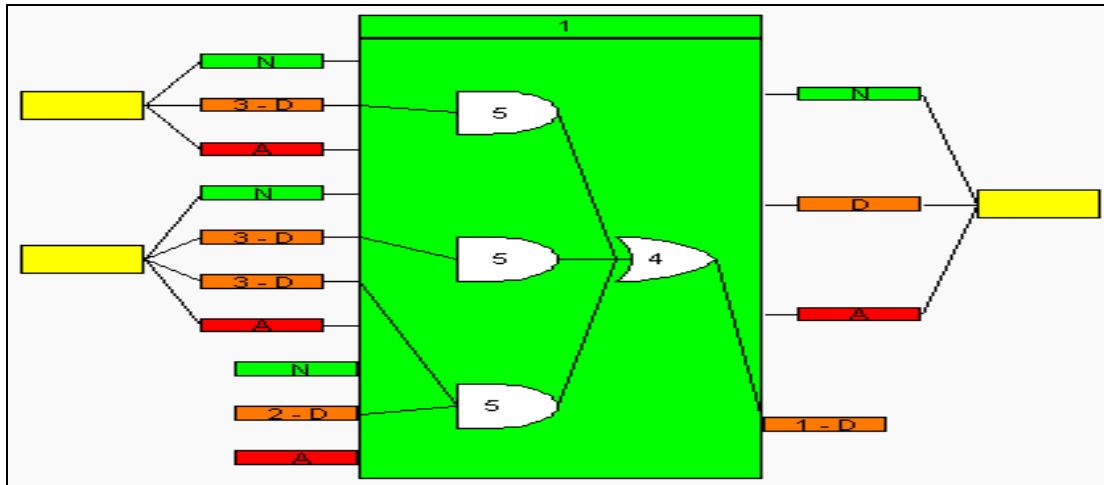


**FIG. 3.6 – Représentation graphique des liens logiques entre fonctions**

- 1- Fonction sortie d'un bloc fonctionnel
- 2- Fonctions entrées causes de la fonction sortie
- 3- "OU" logique définissant le polynôme développé de la fonction sortie

4- "ET" logiques définissant les monômes du polynôme

Un état de bloc à des états du même bloc ou à des états de fonctions entrées de ce bloc (fig3.7).



**FIG. 3.7 – Représentation graphique des liens logiques pour un état de bloc fonctionnel**

- 1- État de bloc fonctionnel sur lequel est défini le polynôme cause
- 2- État de bloc cause de l'état sur lequel est défini le polynôme cause
- 3- États de fonctions entrées causes de l'état de bloc
- 3- "OU" logique définissant le polynôme développé de l'état de bloc
- 5- "ET" logiques définissant les monômes du polynôme

Dans SIMFIA, ces polynômes booléens sont des polynômes logiques développés; c'est-à-dire des sommes de monômes, chaque monôme étant un produit d'éléments (fonctions ou états).

Ces polynômes n'ont pas la même signification suivant l'objet auquel ils sont rattachés :

Lorsque l'utilisateur détermine le polynôme logique associé à une fonction sortie, il s'interroge sur les fonctions entrées nécessaires à la réalisation de cette fonction sortie.

Lorsque l'utilisateur de S détermine le polynôme logique associé à un état (de bloc ou de fonction sortie), il s'interroge sur les causes (états de bloc ou de fonctions entrées) susceptibles de le provoquer.

Un polynôme logique s'identifie par rapport à la fonction ou l'état auquel il est associé [52,53].

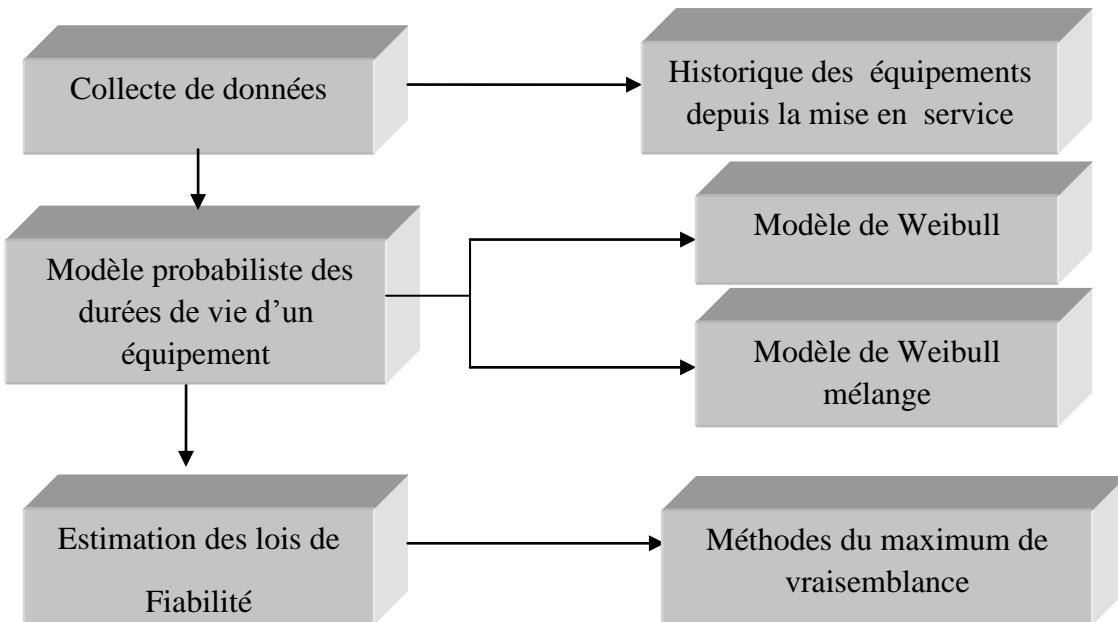
### **3.2.1.4. Simulation et calcul**

SIMFIA permet d'en analyser et simuler le comportement global et d'en automatiser l'étude de fiabilité. Il est possible d'obtenir très facilement de SIMFIA, les indicateurs de performances (MTTF, MTBF...) pour le système.

### **3.2.2. Deuxième approche**

L'objectif de cette approche est de proposer une méthodologie permettant aux personnes chargées de la maintenance de déterminer la périodicité de maintenance préventive optimale.

Les différentes étapes de la méthodologie envisagée sont reprises à la figure 3.8.



**FIG. 3.8 – Schéma synoptique de la méthodologie**

#### **3.2.2.1. collecte des données**

Comme on l'a vu dans la première approche. Il est nécessaire de disposer de données. Ces données peuvent provenir d'un historique de bon fonctionnement de l'équipement.

#### **3.2.2.2. Modèle probabiliste des durées de vie d'un équipement électrique**

Si nous ne tenons pas compte de la nature de l'équipement ainsi que son environnement d'exploitation, il est évident qu'une stratégie de maintenance générique ne sera pas appropriée. En clair, une politique de maintenance issue d'une modélisation, sans considération de l'hétérogénéité des données des durées de vie, conduira à un nombre élevé

d'action de maintenance corrective dans un environnement plus sévère et de maintenance préventive dans un environnement moins sévère. Une stratégie de maintenance générique coûtera donc plus chère sur un environnement sévère (où l'équipement est susceptible d'être souvent défaillant) que moins sévère. Dans le premier cas, les intervalles de temps entre les dates de maintenance préventive seront sur-évalués conduisant ainsi à un nombre élevé de maintenances correctives.

En revanche dans le cas d'un environnement moins sévère, les intervalles entre maintenances préventives seront sous-évalués conduisant, de ce fait à un nombre élevé de maintenances préventives inutiles. Cette analyse succincte montre les limites d'une démarche classique qui repose sur la stabilité des conditions d'exploitation de l'équipement. De ce fait, une modélisation précise et rigoureuse de la loi de probabilité des durées de vie de l'équipement s'impose par l'usage de méthodes d'estimation adaptées ou par une homogénéisation des données. En effet, le but de l'analyse mathématique est l'élaboration de meilleures politiques de maintenance pour l'exploitation d'un équipement dans un environnement spécifique [54].

La loi la plus fréquemment utilisée dans le traitement des collectes des données est la distribution de Weibull et ceci pour plusieurs raisons :

- elle décrit alternativement les trois phases de la vie d'un matériel, en fonction de son paramètre de forme  $\beta$  ;
- elle se justifie par la théorie des valeurs extrêmes : la panne précoce d'un composant, détermine le bon fonctionnement du matériel, c'est le maillon (l'élément) le plus faible qui détermine le bon fonctionnement d'un dispositif [55,56].

### **3.2.2.3-Modèle de Weibull à deux paramètres**

Le principe de la distribution de Weibull est associé à l'étude de la probabilité de défaillance ou de succès. C'est la plus populaire des lois, utilisée dans plusieurs domaines (électronique, mécanique,...). Elle caractérise le comportement du système dans les trois phases de vie : période de jeunesse, période de vie utile et période d'usure ou vieillissement [57].

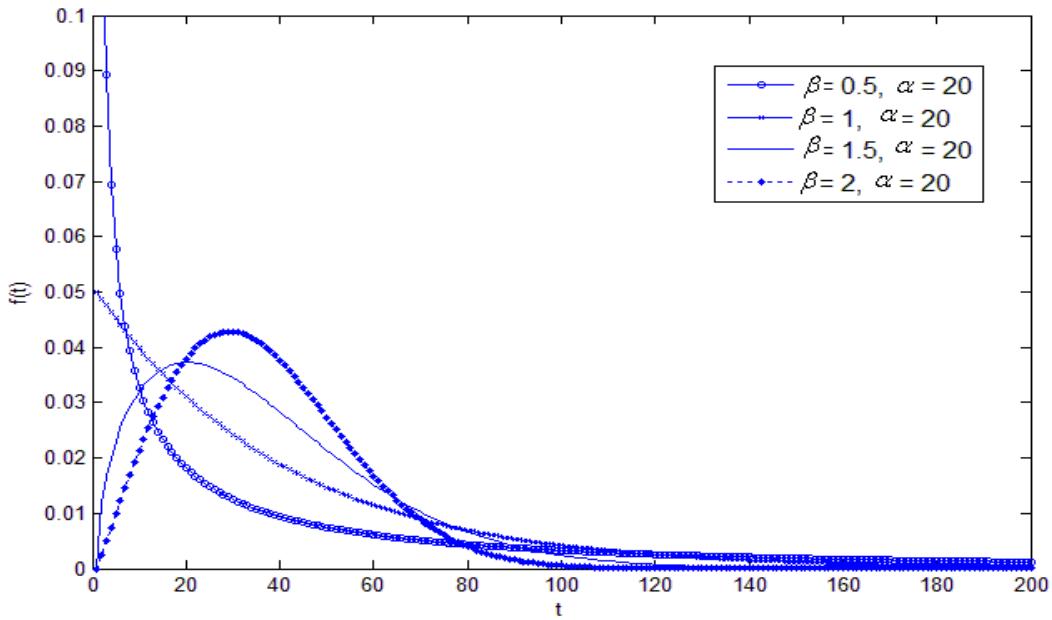
Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend de ses deux paramètres suivants :  $\alpha$  et  $\beta$ . La densité de probabilité d'une loi de Weibull a pour expression :

$$f(t; \psi) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t}{\alpha} \right)^\beta} \quad (3.1)$$

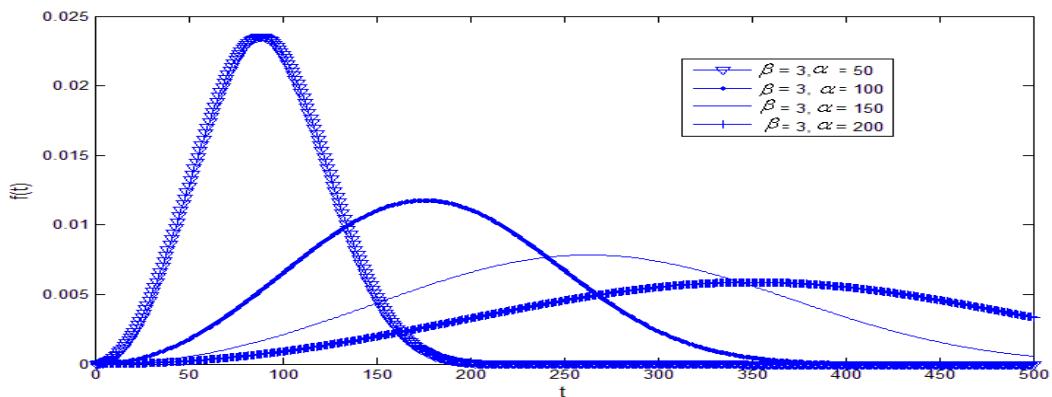
Où  $t \geq 0$ ,  $\psi = (\alpha; \beta)$ ,  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$ .

Le paramètre de forme  $\beta$  (sans unité) qui peut orienter un diagnostic, sa valeur étant caractéristique de certains modes de défaillance.

Le paramètre d'échelle  $\alpha$  (unité de temps) qui, comme son nom l'indique, nous renseigne sur l'étendue de la distribution.



**FIG. 3.9 – Forme de la f.d.p. de la loi Weibull pour différentes valeurs de  $\beta$**



**FIG. 3.10 – Forme de la f.d.p. de la loi Weibull pour différentes valeurs de  $\alpha$**

la fonction fiabilité s'écrit :

$$R(t; \psi) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (3.2)$$

le taux de défaillances

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \quad (3.3)$$

la durée de vie moyenne ou MTTF :

Le temps moyen à la première panne (noté MTTF), lorsque les  $X_i$  suivent une loi de Weibull de paramètre  $(\alpha; \beta)$ , est défini par l'espérance des temps à la première défaillance :

$$\text{MTTF} = \alpha \cdot \Gamma \left( \frac{1}{\beta} + 1 \right) \quad (3.4)$$

avec  $\Gamma$  la fonction gamma définie par :

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx \quad (3.5)$$

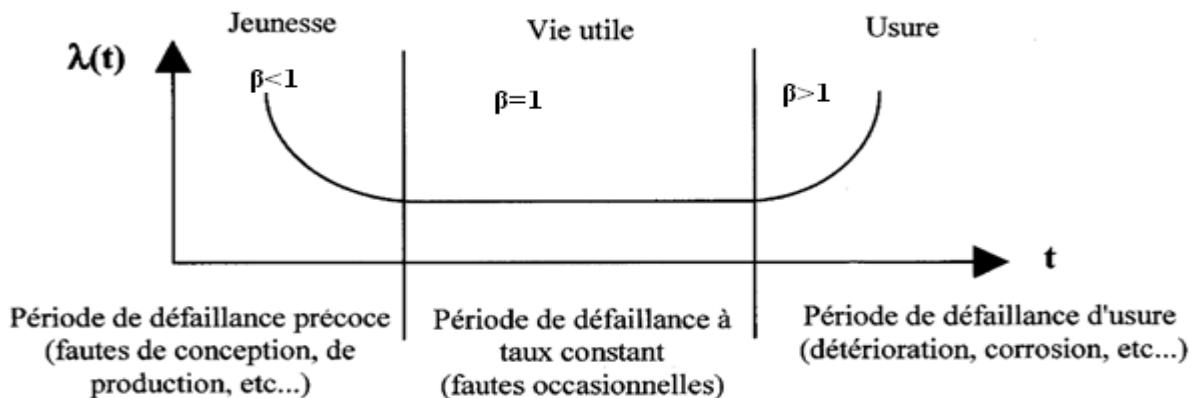
Le comportement des temps de défaillances issues de Collecte de données est souvent modélisé par une distribution de Weibull et une question fondamentale est de décider si [59] :  
–  $\beta < 1$  ( $\lambda(t)$  décroît) : Le composant est dans sa période infantile ou de défauts de jeunesse. Certains composants d'un lot sont moins robustes que les autres (mauvaise fabrication, mauvais stockage, mauvais montage) ; leur défaillance se manifeste pour des contraintes plus faibles. Leur élimination et leur remplacement permettent de retrouver le taux de défaillances normal des composants.

–  $\beta = 1$  ( $\lambda(t)$  constant) : La période est dite de vie utile ou de panne fortuite. Les défauts matériels écartés, le système est dans sa phase de vie principale. Les défaillances qui surviennent durant cette période ont pour cause des événements aléatoires indépendants du temps et de l'âge du système.

Le modèle de Weibull se réduit à un modèle exponentiel.

–  $\beta > 1$  ( $\lambda(t)$  croît) : période de vieillissement, d'usure ou de dégradation. Le taux de défaillance est croissant en fonction du temps. Le stress, la fatigue, la corrosion etc. détériorent le système, ce qui accentue la probabilité qu'une défaillance est lieux durant cette période.

Cette évolution est connue sous le nom de « courbe en baignoire » comme le montre la figure 3.11.



**FIG. 3.11– Représentation théorique de l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps**

„Parfois, une simple distribution de Weibull risque d'être inappropriée lorsque l'on est en présence de plusieurs modes de défaillances [60].

### **3.2.2.1. Modèle de Weibull mélange**

Depuis la première tentative d'analyse d'un modèle de mélange par Pearson [61], l'étude des mélanges de lois est devenue un domaine à part entière de la statistique moderne. De nombreux ouvrages de références existent sur le sujet, le plus récent est Mc Lachlan et Peel [62], faisant un "état de l'art" des différentes approches développées jusqu'à maintenant. Pour un point de vue détaillé des techniques d'analyses non-bayésiennes, on pourra se référer à Titterington et al. [63], ainsi qu'à McLachlan et Basford [64].

Les mélanges de distributions ont fourni un ensemble d'approches mathématiques pour la modélisation statistique d'une grande variété de phénomènes aléatoires.

Vue leur utilité comme méthodes de modélisation flexibles, les modèles de mélange ont continué à avoir un succès et un intérêt croissant du point de vue pratique et théorique.

Les domaines dans lesquels les modèles de mélange ont été expliqués avec succès comprennent l'astronomie, la biologie, la génétique, la médecine, la psychiatrie, l'économie, l'ingénierie et le marketing.

Les mélanges de lois constituent une démarche puissante (une grande diversité de distributions peuvent être modélisées sous cette forme) et parcimonieuse (la distribution ainsi modélisée est décrite par un nombre réduit de paramètres) [65, 66, 67]. Par ailleurs, la composition de la distribution comme un mélange peut souvent être exploitée pour identifier une structure cachée dans le jeu de données, c.à.d. de déterminer des sous-populations intéressantes du point de vue de l'interprétation du jeu de données.

L'hétérogénéité dans un contexte d'exploitation distribuée se manifeste par une mixture de probabilités de défaillance  $f_j(t)$  résultant du comportement de l'équipement en exploitation sur chaque environnement  $j$ . Lorsque les mêmes équipements sont exploités sur un nombre  $m$  d'environnements distincts (organisation, climatique, conditions de production) où le processus d'usure est susceptible d'être modifié par les variables d'exploitation, alors les données des durées de vie sont une mixture (mélange). Le modèle résultant de la mixture est un mélange pondéré de probabilités de défaillance [68]. En conséquent, le modèle est une somme de lois de défaillances  $f_j(t)$  pondérées par un poids  $p_j$  représentant le pourcentage des données des durées de vie provenant de chaque environnement  $j$  [69,70].

$$f(t) = \sum_{j=1}^m p_j f_j(t) \quad (3.6)$$

avec

$$\sum_{j=1}^m p_j = 1 \quad (3.7)$$

Un point important consiste, lorsque c'est possible, de distinguer les différents modes de défaillance. En effet, chaque mode de défaillance suit sa propre statistique de mortalité/survie, et l'on peut voir le comportement d'un système complexe comme la composition de chacun des modes. Selon le niveau de détail visé, on peut séparer les données pour chaque organe (sous-système), ou pour un sous-système donné, les différents modes de défaillance.

La distribution de Weibull mélange s'avère appropriée pour la modélisation de la durée de vie des composants (ou systèmes) électrique et mécanique en présence de plusieurs modes de défaillance différents.

### **3.2.2.2.1. Mélanges de deux Weibull à cinq paramètres**

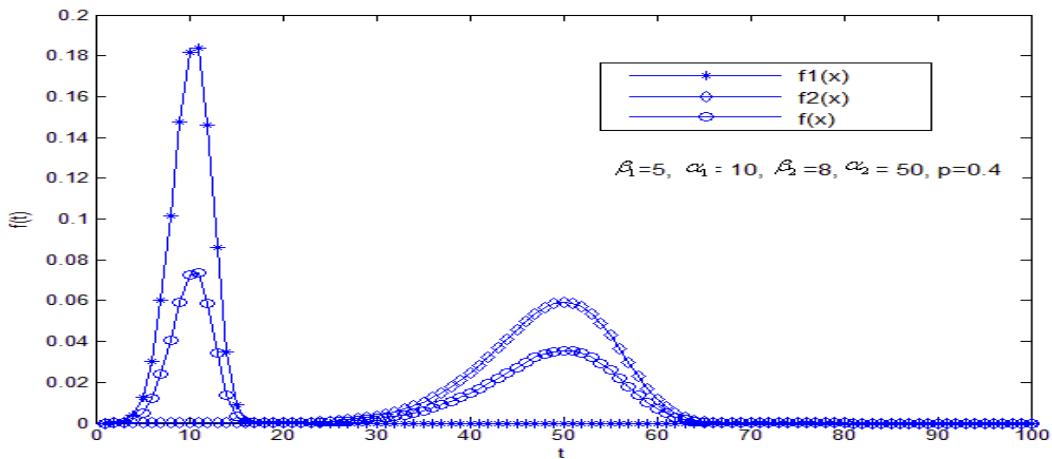
La densité de probabilité d'une loi de mélanges de deux Weibull a pour expression [71].

$$f(t) = pf_1(t) + (1-p)f_2(t) \quad (3.8)$$

$$f(t; \Theta) = p \frac{\beta_1}{\alpha_1} \left( \frac{t}{\alpha_1} \right)^{\beta_1-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}} + (1-p) \frac{\beta_2}{\alpha_2} \left( \frac{t}{\alpha_2} \right)^{\beta_2-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}} \quad (3.9)$$

Où  $\Theta = (p, \psi_1, \psi_2)$

avec  $\psi_i = (\alpha_i, \beta_i)$   $i=1,2$   $\alpha_1 > 0, \beta_1 > 0, p > 0$



**FIG. 3.12 – Courbe de la distribution Weibull mixte avec des sous-populations**

La fonction fiabilité s'écrit:

$$R(t) = p e^{-\left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}} + (1-p) e^{-\left(\frac{t}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}} \quad (3.10)$$

### 3.2.3. Méthodes d'estimation des paramètres

Plusieurs méthodes existent pour estimer les paramètres d'une distribution: la méthode des moindres carrés, de régression absolue (Rank regression), la méthode des moments, la méthode du maximum de vraisemblance et les méthodes graphiques [72]. Pour estimer les paramètres, nous utilisons la technique du maximum de vraisemblance. Étant donné, que cette méthode est très répandue dans ce type d'analyse.

#### 3.2.3.1. Méthode du Maximum de vraisemblance

L'idée fondamentale de l'estimation par maximum de vraisemblance est, comme son nom l'indique, de trouver un ensemble d'estimations des paramètres, pour que la vraisemblance de l'échantillon utilisé, soit maximum.

##### 2.2.3.1.1. Maximum de vraisemblance de la loi de Weibull à deux paramètres

L'une des méthodes les plus importantes d'estimation des paramètres d'une fonction de densité de probabilité est la méthode de maximum de vraisemblance. Le principe de la méthode est de maximiser la fonction de la densité de probabilité pour une fonction de densité de probabilité [73, 74, 75].

Partant d'une série  $\{t_j : j=1,2,\dots,n\}$  d'une variable aléatoire positive T qui représente les temps de défaillance d'un système.

La loi de vraisemblance des données relativement au modèle de paramètre  $\psi$  s'écrit :

$$L(t_1, t_2 \dots t_n ; \psi) = \prod_{j=1}^n f(t_j; \psi) \quad (2.11)$$

Il est plus facile de maximiser la log-vraisemblance au lieu de la fonction de vraisemblance elle-même. Si  $\psi$  maximise  $\ln(L(\psi))$ , alors il maximise également  $L(\psi)$ . Cela est du à la monotonie de la fonction logarithme. Son logarithme est [76]:

$$\ln(L(t_1, t_2 \dots t_n ; \psi)) = \sum_{j=1}^n \ln(f(t_j; \psi)) \quad (2.12)$$

Où  $f(t_j; \psi)$  est donnée en (3.1) avec  $\psi = (\alpha; \beta)$

La log-vraisemblance vaut :

$$\ln(L(t; \psi)) = n \ln \beta - n \beta \ln \alpha + (\beta - 1) \sum_{j=1}^n \ln(t_j) - \alpha^{-\beta} \sum_{j=1}^n \ln(t_j)^\beta \quad (2.13)$$

Une dérivée partielle nulle étant un moyen éprouvé pour trouver un extremum, on pose l'équation de vraisemblance et on dérive la fonction par rapport au paramètre à estimer [77,78].

$$\frac{dL(t; \psi)}{d\alpha} = \frac{-n\beta}{\alpha} + \frac{\beta}{\alpha^{\beta+1}} \sum_{j=1}^n \ln(t_j) = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{dL(t; \psi)}{d\beta} = \frac{n}{\beta} - n \ln \alpha + \sum_{j=1}^n \left( \frac{t_j}{\alpha} \right)^\beta \ln \frac{t_j}{\alpha} = 0 \quad (2.15)$$

En remplaçant  $\alpha$  par son expression dans l'Équation (2.14), nous obtenons :

$$\alpha = \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (t_j)^\beta \right)^{1/\beta} \quad (2.16)$$

$$\frac{dL(t; \psi)}{d\beta} = \frac{1}{\beta} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln(t_j) - \frac{\sum_{j=1}^n (t_j)^\beta \ln(t_j)}{\sum_{j=1}^n (t_j)^\beta} = 0 \quad (2.17)$$

Pour estimer le paramètre  $\beta$ , nous utilisons la méthode de Newton-Raphson avec une bonne condition initiale  $\beta^{(0)}$  [79,80].

Les étapes de ce procédé sont les suivantes:

$$\beta^{(k+1)} = \beta^k - \frac{g(\beta)}{g'(\beta)} \quad (2.18)$$

Où

$$g(\beta) = \frac{\beta}{n} \sum_{j=1}^n \ln(t_j) \sum_{j=1}^n (t_j)^\beta - \beta \sum_{j=1}^n (t_j)^\beta \ln(t_j) + \sum_{j=1}^n (t_j)^\beta \quad (2.19)$$

$$g'(\beta) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln(t_j) \left( \sum_{j=1}^n (t_j)^\beta + \beta \sum_{j=1}^n (t_j)^\beta \ln(t_j) \right) - \beta \sum_{j=1}^n (t_j)^\beta \ln^2(t_j) \quad (2.20)$$

### **3.2.3.2. Maximum de vraisemblance de mélange de deux Weibull**

L'estimation des paramètres de Weibull mélange se fait par la méthode du maximum de vraisemblance.

Partant d'une série  $\{t_j : j=1,2,\dots,n\}$  de temps défaillance d'une variable aléatoire T relative à la durée de fonctionnement avant défaillance issue de densité de probabilité du modèle Weibull mélange.

La dérivée de la fonction log-vraisemblance par rapport à chacun des cinq paramètres est la suivante [81] :

$$\frac{dL(t; \psi)}{\alpha_1} = \sum_{j=1}^n \frac{p}{f(t_j)} \frac{df_1}{d\alpha_1} \quad (2.21)$$

$$\frac{dL(t; \psi)}{\beta_1} = \sum_{j=1}^n \frac{p}{f(t_j)} \frac{df_1}{d\beta_1} \quad (2.22)$$

$$\frac{dL(t; \psi)}{\alpha_2} = \sum_{j=1}^n \frac{(1-p)}{f(t_j)} \frac{df_2}{d\alpha_2} \quad (2.23)$$

$$\frac{dL(t; \psi)}{\beta_2} = \sum_{j=1}^n \frac{(1-p)}{f(t_j)} \frac{df_2}{d\beta_2} \quad (2.24)$$

$$\frac{dL(t; \psi)}{dp} = \sum_{j=1}^n \frac{f_1(t_j; \psi_1) - f_2(t_j; \psi_2)}{pf_1(t_j; \psi_1) + (1-p)f_2(t_j; \psi_2)} \quad (2.25)$$

La suite des opérations est bien sûr l'annulation des dérivées partielles.

Si l'on considère souvent la méthode du maximum de vraisemblance comme une méthode pratique et efficace, il existe d'autres méthodes d'estimation qui peuvent être employées.

### 3.3. Conclusion

Pour atteindre notre objectif, nous avons proposé deux approches. La première approche est basée sur la modélisation du comportement du système et le calcul des indicateurs de performances pour choisir de manière pertinente une stratégie de maintenance. L'objectif de la seconde approche est de proposer une méthodologie permettant aux personnes chargées de la maintenance de déterminer la périodicité de maintenance préventive optimale. A cette fin, il est nécessaire de disposer de données. Ces données peuvent provenir d'un historique de bon fonctionnement du système, A partir de ces données, des modèles de fiabilité sont ajustés par des méthodes de maximum de vraisemblance.

## Introduction

Les transformateurs de puissance sont parmi les éléments les plus importants du réseau de transport et de distribution de l'électricité, leur place au sein de cette infrastructure est primordiale et critique.

Les défaillances des transformateurs en service sont très contraignantes pour l'exploitation et le développement du réseau. Elles sont habituellement causées par des contraintes électriques, thermiques et mécaniques ou d'autres incidents. Or une fiabilité extrême est exigée pour la distribution d'énergie électrique. D'autre part, lorsque les pannes se produisent, elles mènent inévitablement à des coûts de réparation élevés, à des temps d'arrêt longs et à des risques (danger) pour le personnel.

De cet état de fait et des contraintes économiques actuelles, les compagnies d'électricité sont par conséquent obligées de s'inquiéter de la stratégie maintenance des transformateurs de puissance.

Souvent, quatre états apparents (courbe de vie) sont connus dans le cas des transformateurs et qui sont (fig. 4.1):

- Etat normal
- Etat défectueux
- Etat de défaut
- Etat de défaillance

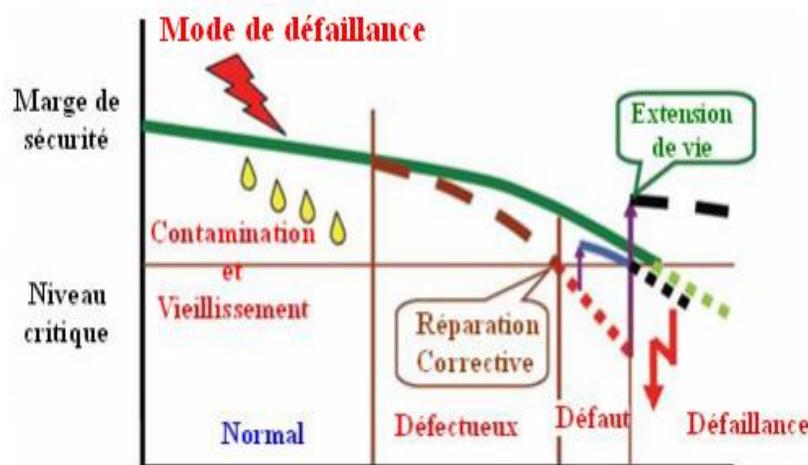


FIG. 4.1 – Conduction d'un cycle de vie d'un transformateur

Dans ce qui suit, une étude théorique détaillée des transformateurs de puissance ainsi que les modes de défaillances seront présentés.

### **4.2-Le rôle des transformateurs de puissances**

Les transformateurs de puissance sont des appareils statiques à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs généralement différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique [82]. Il peut être à construction triphasée, mais pour des raisons d'encombrement (poids et dimensions), de transport et facilité de maintenance, on les trouve également en unités monophasées facilement interchangeables.

Un transformateur électrique permet donc de faire transiter la puissance électrique en courant alternatif (AC) depuis la centrale de production d'électricité jusqu'à son utilisateur final avec un minimum de pertes, à différents niveaux de tensions. Le transformateur est l'élément du réseau qui permet le passage d'une tension alternative donnée à une autre : c'est un convertisseur AC/AC à fréquence fixe, celle du réseau.

### **4.3-Constitutions des transformateurs de puissance**

Les principaux organes du transformateur sont (fig 4.2):

#### **4.3.1-Circuit magnétique**

Les circuits magnétiques sont constitués de tôles magnétiques de fer laminées à froid, dites à « cristaux orientés », permettant un passage optimum du flux magnétique dans leur sens, isolées en surface avec de la carlite, qui est un revêtement minéral isolant.

Le choix des tôles et le calcul du circuit magnétique complet sont fonction de l'induction souhaitée dans celui-ci, de l'épaisseur des tôles et de leurs pertes spécifiques. Classiquement cette induction est d'environ 1,7 tesla et se situe avant la partie en saturation de la courbe  $B(H)$  du matériau (fig.4.3),  $B$  (l'induction magnétique) étant fonction de la tension et  $H$  (champ magnétique) du courant.

Suivant cette caractéristique il est nécessaire de fournir un courant magnétisant  $I_0$ , à vide, qui n'est fonction que de la tension d'alimentation, et caractéristique de l'inductance magnétisante du circuit magnétique. Ce courant est l'image des pertes à vide, ou pertes fer, qui sont permanentes sous tension [83].

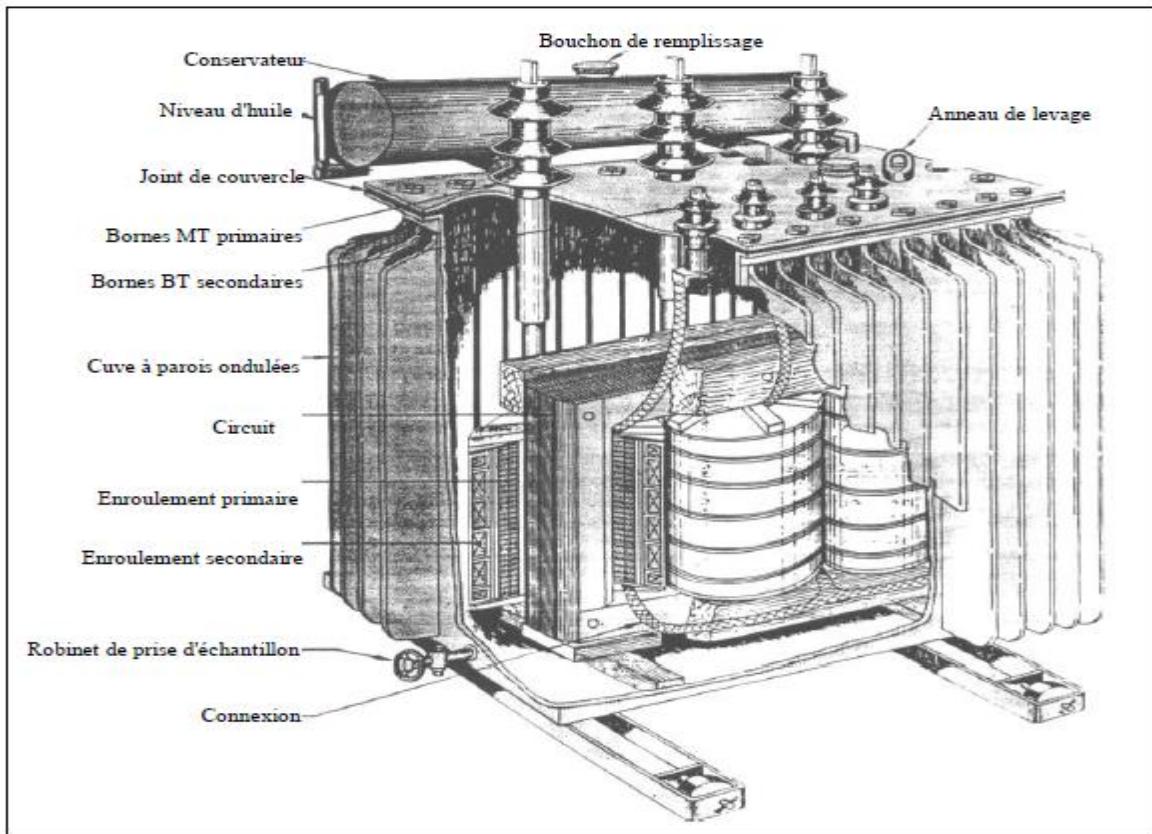


FIG. 4.2 – Les composantes du transformateur de puissance

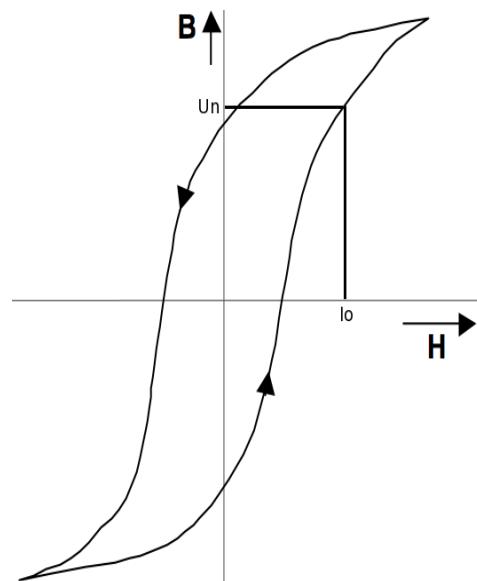


FIG. 4.3 – Hystérésis du circuit magnétique

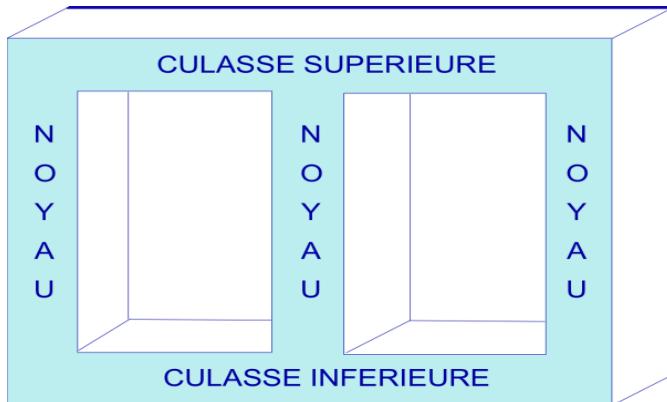


FIG. 4.4 –Circuit magnétique triphasé à 3 colonnes

Mécaniquement le circuit magnétique classique triphasé (fig 4.4) comporte trois noyaux (parties verticales). Sur chacun d'eux est placée une phase (ensemble des enroulements d'un élément monophasé). Ces noyaux sont réunis par des culasses supérieures et inférieures, qui referment le circuit. Ainsi le flux magnétique circulant dans le circuit magnétique a un chemin préférentiel fermé, de réluctance faible. Tout entrefer étant proscrit, son montage qui est manuel requiert un savoir faire particulier.

Le circuit étant métallique il est nécessaire de fixer son potentiel, en l'occurrence à la terre [84].

#### 4.3.2. Enroulements

Les enroulements (feuillard ou rond, ou méplat de cuivre ou d'aluminium) (fig4.5) sont montés sur le noyau du circuit magnétique. Pour une phase d'un transformateur donné, il y a un enroulement par niveau de tension considéré : un basse tension (**BT**) et un haute tension (**HT**), avec parfois un moyenne tension (**MT**) supplémentaire. Ces différents enroulements sont imbriqués les uns dans les autres avec généralement l'enroulement basse tension à l'intérieur et les enroulements de niveaux de tensions supérieures de façon croissante vers l'extérieur [85].

#### 4.3.3-système d'isolation

Dans un transformateur, l'isolation est assurée par un complexe diélectrique solide (papiers ou cartons) et diélectrique liquide (huile isolante).

#### **4.3.3.1-Huile diélectrique**

##### **4.3.3.1.1 -Rôle isolant**

L'ensemble des bobinages est plongé dans une cuve remplie d'un fluide isolant dont la tenue diélectrique conditionne les distances entre pièces sous tension. Par exemple, un transformateur 400 kV devra tenir des chocs brefs de 1425 kV en essais chez le constructeur. Ce fluide est typiquement de l'huile minérale.



FIG. 4.5 – Enroulement de transformateur

##### **4.3.3.1.2 -Rôle caloporeur**

Le fluide sert aussi d'agent caloporeur de la partie active, qui est une source chaude, vers un système de refroidissement, qui est une source froide. La conductibilité thermique de ce fluide et sa chaleur massique doivent être aussi élevées que possible, et sa viscosité idéalement faible. Par exemple dans les plus gros transformateurs, comme en sortie de centrale, les pertes à évacuer peuvent aller jusqu'à quelques MW.

Un transformateur neuf devant supporter plusieurs dizaines d'années de service, il est impératif que la qualité de son huile soit excellente, en particulier sa tenue diélectrique, sa viscosité pour évacuer efficacement les pertes, et sa stabilité dans le temps (à l'oxydation essentiellement).

L'huile minérale, issue du pétrole, est majoritairement utilisée dans les transformateurs de puissance aujourd'hui. Cependant il existe de nombreuses recherches sur des types d'huiles alternatives comme les esters végétaux ou synthétiques, mais aucune d'elles n'est encore

amenée à remplacer l'huile minérale de manière significative actuellement dans les appareils de forte puissance, bien que des essais industriels soient menés [86].

Les défauts internes, thermiques ou électriques entre autres, laissent des traces dans ces huiles. En conséquence l'analyse d'échantillons d'huile prélevés sur les transformateurs permet une détection très efficace de certains de ces défauts, en particulier avec l'huile minérale qui a été très étudiée.

### **4.3.3.2-Isolants solides**

Les papiers et les cartons sont des matériaux isolants possédant des caractéristiques diélectriques excellentes. L'imprégnation par un isolant liquide, essentiellement l'huile minérale leur confère une rigidité diélectrique et apportent, en plus du noyau, une résistance mécanique globale. Les papiers captent et retiennent les dépôts issus de la dégradation des matériaux : ils jouent un rôle de purificateur d'huile et se dégradent lentement. Ajoutée au vieillissement, cette dégradation altère les propriétés de l'huile entraînant à terme un risque de claquage du transformateur. Ces isolants solides sont à base de celluloses, rubans, vernis, résines époxydes, carton, bois [87].

### **4.3.4-Traversées isolantes**

Les traversées isolantes ont pour but d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire et secondaire, d'une part, et les lignes d'arrivée et de départ, d'autre part, à travers le couvercle ; d'où le nom de traversées [88]. Leurs fonctions sont principalement : l'isolement de la connexion par rapport à la cuve, la résistance aux efforts mécaniques, une bonne répartition du champ électrique et une fixation étanche et robuste sur le couvercle.

Il existe plusieurs types de traversées. Pour les tensions jusqu'à quelques dizaines de kV le corps des traversées est généralement constitué d'un bloc unique de porcelaine, qui est un matériau isolant.

Pour les tensions supérieures afin de tenir la perforation et le contournement électrique de la traversée lors de perturbations diélectriques, tels les coups de foudre, les traversées sont souvent constituées d'un condensateur interne. Celui-ci permet de mieux répartir les contraintes dues aux champs électriques élevés le long de la traversée. Ce condensateur est composé de papier et de feuilles d'aluminium immergés dans de l'huile isolante, qui sont assemblés à l'intérieur d'une porcelaine (fig.4.6) pour la partie à l'extérieur du transformateur.

Le fuseau, qui est la partie inférieure immergée dans l'huile, est souvent en bakélite.

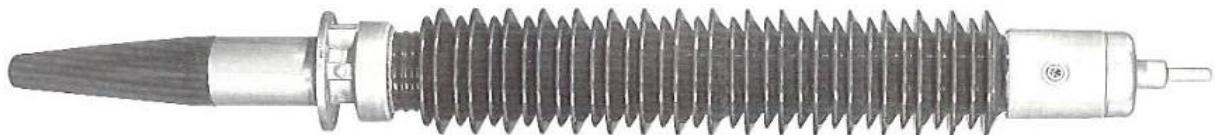


FIG. 4.6 – Traversée condensateur haute tension

#### 4.3.5-Régleur hors tension

Le changeur de prises hors tension est un commutateur raccordé aux prises des enroulements du transformateur ; il règle le rapport de transformation de l'appareil pour s'adapter au niveau de tension exigé par l'installation.

Sur la Figure 4.7 on observe le schéma simplifié d'un régulateur hors tension de cinq prises en série sur l'enroulement considéré. Ici la troisième prise est en service.

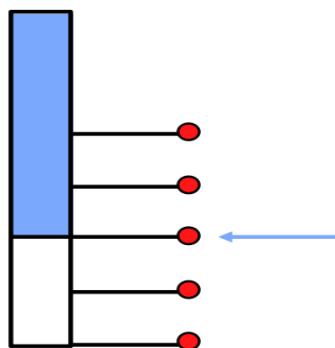


FIG. 4.7 – Un régulateur hors tension

#### 4.3.6-Régleur en charge

Sur de nombreux transformateurs de puissance, des spires additionnelles sont installées en série sur l'enroulement haute tension. Sur ces quelques spires, on peut mécaniquement et électriquement se placer pour faire varier la tension sur une plage de réglage. Par exemple, un transformateur haute tension peut varier sur une plage de 225 kV +/- 15 % sur 35 positions électriques.

Le régulateur en charge est constitué de deux parties : le sélecteur et le commutateur (fig. 4.8).

**1. Un commutateur**, en jaune, qui effectue électro-mécaniquement le passage électrique rapide (quelques dizaines de ms) d'une prise à une autre, en mettant un bref instant les deux

prises en court circuit. Cette partie est dans un volume d'huile isolante hermétique par rapport au reste du transformateur.

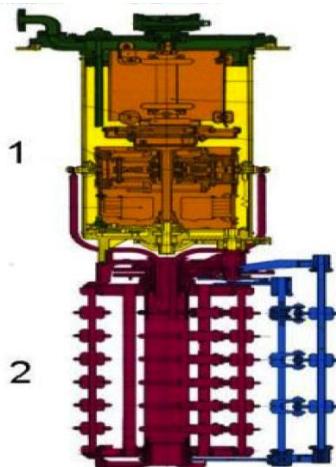


FIG. 4.8 –Régleur en charge

**2. Un sélecteur de prises mécanique**, en rouge, qui se positionne lentement sur les connexions de l'enroulement de réglage souhaitées. Celles-ci étant connectées sur ce sélecteur, ainsi qu'à une extrémité de l'enroulement principal auquel sont ajoutées électriquement les spires de réglage.

L'ensemble commutateur et sélecteur est entraîné par un moteur externe dans une armoire de commande électrique dédiée au régulateur en charge.

#### **4.3.7-Refroidissement**

Dans les transformateurs de puissance immergés dans l'huile, le refroidissement s'effectue via cette huile circulant en circuit fermé de la partie active, siège des pertes, vers une source froide à laquelle il abandonne des calories.

Celle-ci peut être :

- directement la surface de la cuve pour les petites puissances
- des aéroréfrigérants (fig4.9) qui sont constitués de nombreux tubes à ailettes ventilés.
- des radiateurs (fig4.10) permettant un échange par convection naturelle avec l'air ambiant
- des hydro réfrigérants forçant un échange avec un circuit d'eau séparé.

#### **4.3.8-Cuve**

La cuve constituée de tôles d'acier. Les parois de la cuve sont, selon les modèles, radiantes à ailettes ou rigides équipées de radiateurs amovibles connectés par une vanne d'arrêt. La structure et les soudures d'assemblage peuvent être renforcées dans le cas où une bonne tenue au vide est nécessaire [89].



FIG. 4.9 – Aéroréfrigérant



FIG.4.10– Radiateurs sur un transformateur

Elle a pour rôles :

- de Réservoir d'huile
- d'assurer la résistance au court-circuit (pour les transformateurs cuirassé uniquement).
- de maintenir à l'intérieur de la cuve la majorité du flux de fuite produit par le courant dans les enroulements

Elle sert à la protection de la partie active du transformateur. Elle est ajourée pour permettre la circulation naturelle de l'air autour du transformateur [90].

### **4.3.9-Conservateur**

Le conservateur d'huile est situé sur le dessus du transformateur, il joue un rôle de vase d'expansion pour le fluide diélectrique du transformateur. Les variations de températures de l'huile impliquent des variations du volume d'huile. Le conservateur permet au niveau d'huile de varier sans impacter la pression dans le transformateur ni découvrir les parties actives. Il y a parfois une poche souple dans le conservateur pour éviter que l'huile ne soit en contact avec l'air. A propos, l'assecheur du transformateur permet de limiter la teneur en eau de l'air présent dans le conservateur.

### **4.4-Mode de défaillances des transformateurs**

Le transformateur de puissance est un appareil relativement fiable. Sa durée de vie est de l'ordre de trente ans, dans des conditions normales d'exploitation.

Les pannes importantes sont rares mais souvent problématiques, en particulier par rapport à l'indisponibilité du matériel.

Bien que des actions de maintenance préventive existent, comme les analyses d'huile, il n'existe pas encore de maintenance prédictive qui donne l'état futur d'un appareil.

Cependant en fonction de son utilisation, sa maintenance, sa charge, les perturbations qu'il subit, etc. il peut être le sein des défaillances plus ou moins importantes.

La défaillance du transformateur de puissance peut être attribuée à des défaillances thermiques, diélectriques, mécanique [91].

#### **4.4.1-Mode de défaillance diélectrique**

Lors de surtensions sur le réseau, comme des chocs de foudre ou de manœuvre de disjoncteurs par exemple, les modes de défaillances diélectriques entraînent la perte d'isolement développant un amorçage des pièces sous tension [92]:

- entre elles, comme entre enroulements ou entre spires (fig 4.11)
- avec la masse, comme l'amorçage d'une traversée ou d'un enroulement à la cuve ou au circuit magnétique.
- des décharges partielles au sein d'un isolant, classiquement solide dans les transformateurs.

Ce sont des micro décharges locales qui tendent à se propager dans le temps.



FIG. 4.11 – Amorçage entre spires

#### **4.4.2-Mode de défaillance électrique**

Lorsque les contacts se dégradent dans le temps, ils laissent passer le courant sur une surface de passage effective réduite par rapport à la construction originale. En conséquence la densité de courant locale augmente ce qui peut créer des points chauds dus à des échauffements anormaux sur les éléments suivants [93].

- Connexions dans certains changeurs de prises en charge, en particulier les contacts mobiles de l'inverseur s'ils sont peu manipulés, alors qu'ils voient passer en permanence le courant de charge du transformateur (fig. 4.12).



FIG. 4.12 – Point chaud du sélecteur du régleur en charge

- Connexions des changeurs de prise hors tension. Les contacts mobiles sur les positions en service qui ne sont pas manipulés durant des années peuvent se dégrader avec le temps.
- Connexion entre le cuivre des enroulements et une connexion interne, comme pour les prises de réglage ou les connexions qui passent dans les traversées. Ces différentes connexions sont brasées, serties ou boulonnées, et suivant la qualité du contact et les

conditions d'exploitation, certains de ces raccords peuvent chauffer anormalement [94]. Un point chaud très avancé sur un contact boulonné est visible sur la figure 4.13.



FIG. 4.13 – Point chaud sur connexion boulonnée

#### **4.4.3- Mode de défaillance Mécanique**

La dégradation des isolants solides de la partie active, ou le déplacement du circuit magnétique sont dus aux importants chocs du transformateur lors du transport Ceci entraîne :

- Des points chauds sur des régleurs de prises si ceux-ci sont mécaniquement mal alignés.
- La diminution de distances diélectriques, dues au déplacement interne massif d'un circuit magnétique de plusieurs centimètres, suite à un choc mécanique comme lors de la chute d'un transformateur.
- Des dégradations d'isolants internes dues à des vibrations anormales, elles mêmes dues à un manque de serrage interne à la construction, ou suite à des chocs importants.
- Les fuites de joints mécaniquement trop serrés et/ou chauffés (fig4.14) lors de leur installation puis leur exploitation.

#### **4.4.4- Mode de défaillance thermique**

Les surcharges et les points chauds sont principalement des perturbations thermiques anormales

Ces modes de défaillances ont pour effet le vieillissement :

- des papiers isolants, et la dégradation de leurs propriétés diélectriques.
- de l'huile isolante. La contamination, la température, l'humidité et l'oxygène accélèrent le vieillissement.

Par exemple dans la figure 4.15 toute la bobine est noircie de l'intérieur à cause d'un fonctionnement à des températures excessives.



FIG. 4.14 – Joint de traversée écrasé



FIG. 4.15 – Echauffement excessif d'un enroulement

#### **4.5-Composants causant les défaillances des transformateurs**

La dernière enquête internationale conséquente sur les défaillances des transformateurs de puissance date de 1983, [95]. Elle regroupait une collecte de 961 défaillances sur des transformateurs de haute tension supérieure à 60 kV, et de moins de 20 ans. Elle montre que sur les transformateurs de puissance de type poste avec régleur en charge (692 cas de défaillance). La figure 4.16 recense la distribution de ces défaillances.

Après les défaillances sur les changeurs de prise, les problèmes les plus fréquents sont ceux survenant sur les enroulements, les isolants et les traversées.

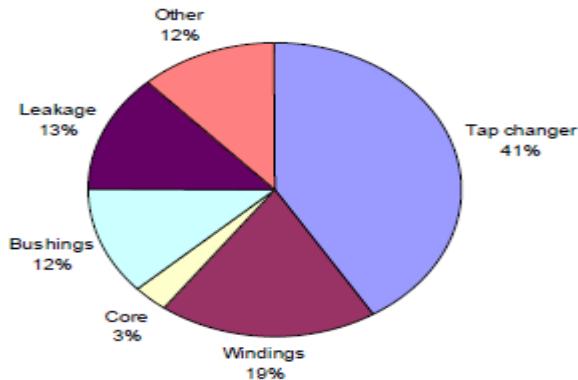


FIG.4.16—Distribution des défaillances pour les transformateurs de puissance ([68])

Les principaux éléments causants la défaillance du transformateur (Tableau 1) :

Anglais	Français
Tap changer	Changeur de prise
Windings	Enroulements
Leakage	Réservoir
Bushings	Traversée
Core	Noyau
Others	Autres

Tableau 4.1 : Traduction des termes des composants du transformateur

#### **4.6-Causes de défaillances des transformateurs de puissance**

Les causes de défaillance peuvent être externes ou internes aux transformateurs de puissances (Tableau 4.2).

Causes internes	Causes externes
Surcharge	humidité
Amorçage et court-circuit	air
Vieillissement, détérioration ou claquage des	court-circuit externes
Déformations ou déplacements	Maintenance inadéquate
Connexions du noyau magnétique	Surtensions transitoires dues à la
Décharge partielle	Sabotage
Humidité	Conception /Fabrication
Défauts de conception et de fabrication	Choc mécanique
court-circuit internes	Température ambiante élevée

Tableau 4.2 - Causes de défaillances des transformateurs de puissance

#### **4.7-Conclusion**

Les transformateurs de puissance sont des appareils complexes, qui doivent tenir de nombreuses et fortes contraintes, de natures diverses, durant leur cycle de vie. De plus, dans le contexte actuel, avec un parc d'appareils vieillissant et un réseau de plus en plus chargé, les transformateurs seront soumis à des contraintes de plus en plus importantes, pendant encore plusieurs années à priori. Bien que leur fiabilité soit plutôt bonne, les transformateurs restent des éléments critiques de tout réseau électrique. Il est donc très important d'être capable d'en assurer la maintenance, et le dépannage au mieux, afin d'optimiser l'exploitation du matériel lui-même, et surtout de garantir la transmission, importante, d'énergie électrique qui transite par lui.

## **5.1-Introduction**

L'intérêt croissant pour une meilleure gestion des équipements industriels a toujours suscité de pertinents travaux sur la modélisation et l'analyse mathématiques des coûts d'exploitation. Un équipement, pour produire de la valeur, se dégrade en fonction de l'environnement et de la sollicitation. Sans une stratégie de maintenance adéquate, l'équipement serait fréquemment sujet à des pannes. Ces pannes d'équipement engendrent des coûts non-planifiés et des risques dont les conséquences peuvent être graves pour l'environnement et les agents d'exploitation.

En tenant compte de toutes les conclusions obtenues dans les chapitres précédents, nous concrétisons notre travail par deux illustrations afin de pouvoir quantifier les stratégies de maintenance dans les deux exemples.

Le premier cas est l'étude, de la fiabilité d'un réseau électrique réel (Oran -Sud), HT/MT/BT 60/30/10KV afin de minimiser les temps de pannes et de satisfaire une alimentation continue des utilisateurs en énergie électrique.

L'outil SIMFIA permet d'analyser et de simuler le comportement global du système et d'automatiser l'étude de la fiabilité.

On envisage, l'évaluation des facteurs d'importance des composants du système qui nous permettent de déterminer ceux qu'il est préférable de réparer les premiers et ceux dont les performances doivent être améliorées afin d'optimiser les performances globales du système. Les facteurs d'importance permettent de hiérarchiser les éléments d'un système vis-à-vis de différents critères.

Le deuxième cas d'étude, est une approche basée sur la fiabilité qui permet de calculer la durée de vie moyenne de l'équipement, c'est-à-dire l'espérance du temps de bon fonctionnement à un instant donné. Cette information est une donnée essentielle pour déterminer la périodicité de la maintenance préventive optimale.

## **5.2-Etude d'un réseau électrique HT/MT/BT Oran-sud**

Le schéma de la figure 5.1 représente le réseau électrique HT/MT/BT de la Sonelgaz (Oran- Sud) [97]. Le système est essentiellement équipé d'un jeu de barres de puissance 60 kV. Les deux branches comprennent chacune une cellule disjoncteurs, une cellule sectionneurs, et une cellule transformateurs qui servent à abaisser le niveau de tension de la source à 30kv et 10 KV. Les demi-jeux de barres sont alimentés respectivement par les deux arrivées, le disjoncteur de couplage étant ouvert. La défaillance de l'une des deux sources, entraîne la fermeture du disjoncteur de couplage au même moment les demi jeux de barres sont

alimentés par l'autre source. En cas de défaut sur un demi jeu de barre (ou maintenance de celui-ci), une partie seulement des départs n'est plus alimenté.

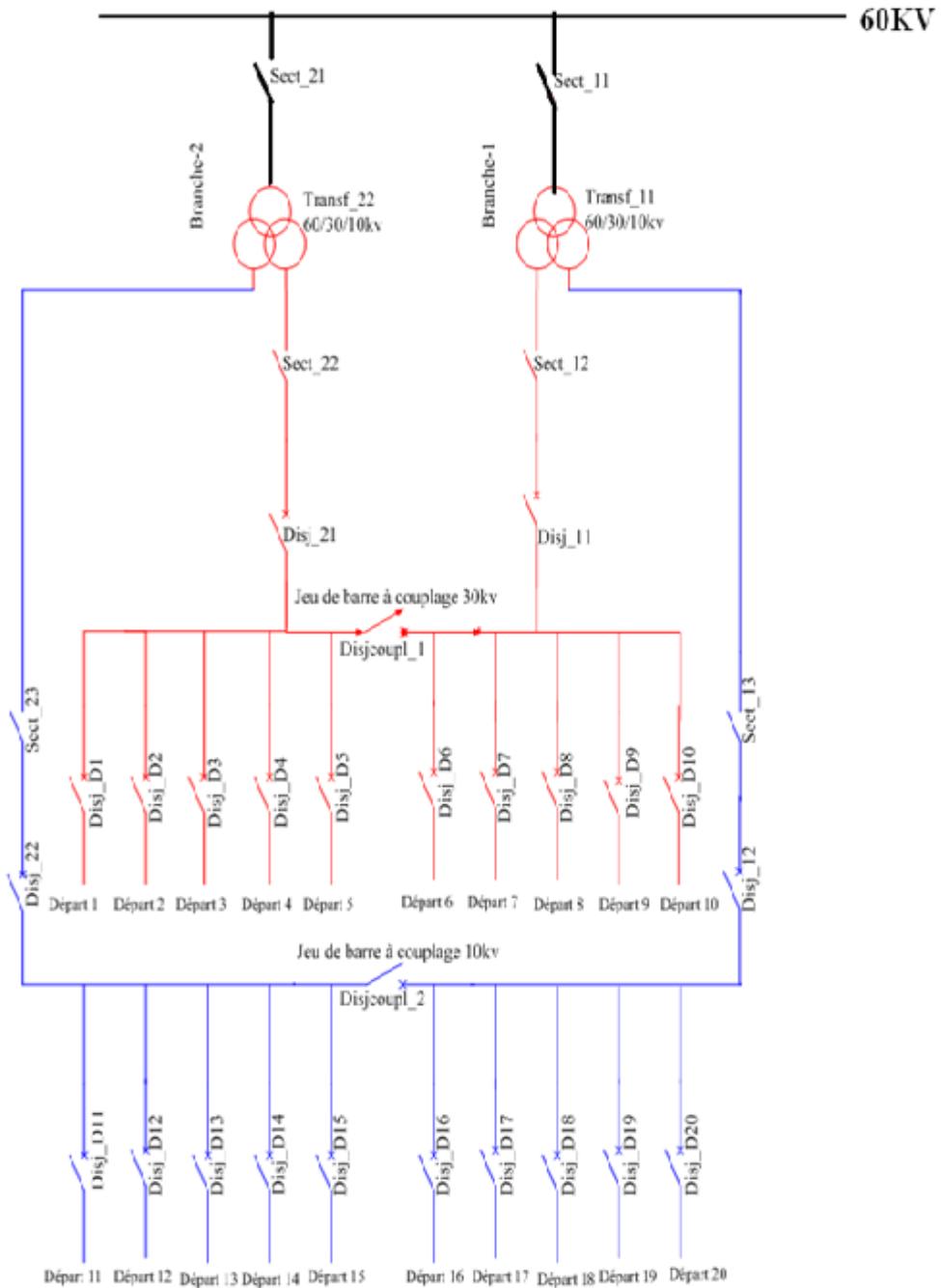


FIG. 5.1 – Schéma réseau de distribution électrique du sud d'Oran

La collecte des données est portée sur l'année 2013 et 2014 pour l'étude du réseau de distribution Ces données sont présentées dans l'annexe. Elle comprend : La date

d'intervention ; L'heure de l'incident ; La durée de défaillance ; La cause de défaillance ; Les départs non alimentés.

### **5.2.1-Analyse fonctionnelle du système**

Pour l'étude de notre réseau, l'analyse fonctionnelle est un préalable obligatoire. Elle consiste à raisonner en termes de besoins à satisfaire, exprimés sous forme de fonctions à remplir avec des critères de valeurs dans un environnement donné. Pour faire une étude pertinente de la fiabilité d'un système, il est impératif de connaître ses décompositions matérielle et fonctionnelle, les facteurs d'influence internes et externes qui concourent à l'amélioration de la fiabilité et ceux qui, au contraire, constituent une entrave et mènent vers des dysfonctionnements probables. L'analyse fonctionnelle permet, grâce à une très bonne prise de connaissance de l'ensemble des facteurs matériels, humains et environnementaux, de rendre l'étude de la fiabilité plus pertinente et plus juste. Pour cela, deux types d'analyse peuvent être envisagés : Une analyse fonctionnelle externe et une analyse fonctionnelle interne.[98].

#### **5.2.1.1. Expression et analyse du besoin**

La réduction du nombre de coupures électriques et de leurs durées fait appel à des équipements de redondance et de remplacement d'ouvrages. Ces techniques sont coûteuses et ne suffisent pas à elles seules pour résoudre tous les problèmes. Par conséquent, seule une étude pertinente pourrait garantir la fiabilité du réseau électrique. Cette étude permettra de déterminer les reconfigurations des schémas électriques en fonction de la disponibilité des ouvrages pour répondre aux besoins de continuité de fonctionnement. Elle définira la politique de maintenance optimale qui s'adapte le mieux aux besoins de l'exploitant et des clients dans le cadre d'une démarche de qualité et de productivité [99].

#### **5.2.1.2-Analyse fonctionnelle externe**

Lors de cette phase, on doit définir avec précision les limites du système étudié, ses situations de vie, ses milieux extérieurs et ses fonctions principales et de contraintes.

##### **a) Les limites du système**

Notre étude ne prendra en considération que les composants de base du réseau. Les connexions (fils) n'ont pas été concernées par cette étude.

**b) Situations de vie du système**

Les situations de vie du système étudié sont nombreuses et chacune d'elle peut faire l'objet d'une étude et peut être elle-même décomposés en plusieurs phases. Chaque phase correspond à une configuration spécifique du schéma électrique du système ou une séquence particulière du fonctionnement (par exemple le déclenchement d'un disjoncteur ou la manœuvre d'un sectionneur) mettant en jeu une combinaison d'ouvrages remplissant chacun une fonction définie. Dans notre étude, nous considérons la phase d'écoulement normal de puissance correspondante à la configuration de la figure 5.2. La puissance répartie sur les départs concernés selon un plan de répartition optimale des puissances mis en application par l'exploitant du réseau électrique [100].

**c) Milieux extérieurs et les fonctions du système**

-La recherche des milieux extérieurs pris en compte dans l'étude se fait par les situations de vie du système données sur la figure 5.2.

-Une fois tous les milieux extérieurs ayant une liaison avec le fonctionnement du système recensés. Il faut ensuite déterminer les fonctions du réseau. Il y'a deux sortes de fonction de service.

- La fonction principale : détermine les raisons pour lesquelles le système a été crée .Elle correspond à une relation entre deux milieux extérieurs. FP1 : Répartir le flux de puissance vers les demi-jeux de barre.

- Les fonctions contraintes (Tableau 5.1) [101].

Les fonctions contraintes	
FC1	Assurer la surveillance et le fonctionnement par l'opérateur
FC2	Résister aux aléas météorologiques
FC3	Permettre le Control des paramètres et fonctions du système par le
FC4	Respecter les normes.
FC5	les actions de sécurité par le pupitre de commande manuel
FC6	Résister aux aléas de consommation
FC7	Eliminer les défauts par la fonction maintenance
FC8	protéger le système des agressions internes
FC9	protéger le système des agressions extérieures
FC10	protéger L'environnement des Rejets et pollution du système
FC11	Respecter les procédures d'exploitation

Tableau 5.1- Les fonctions contraintes

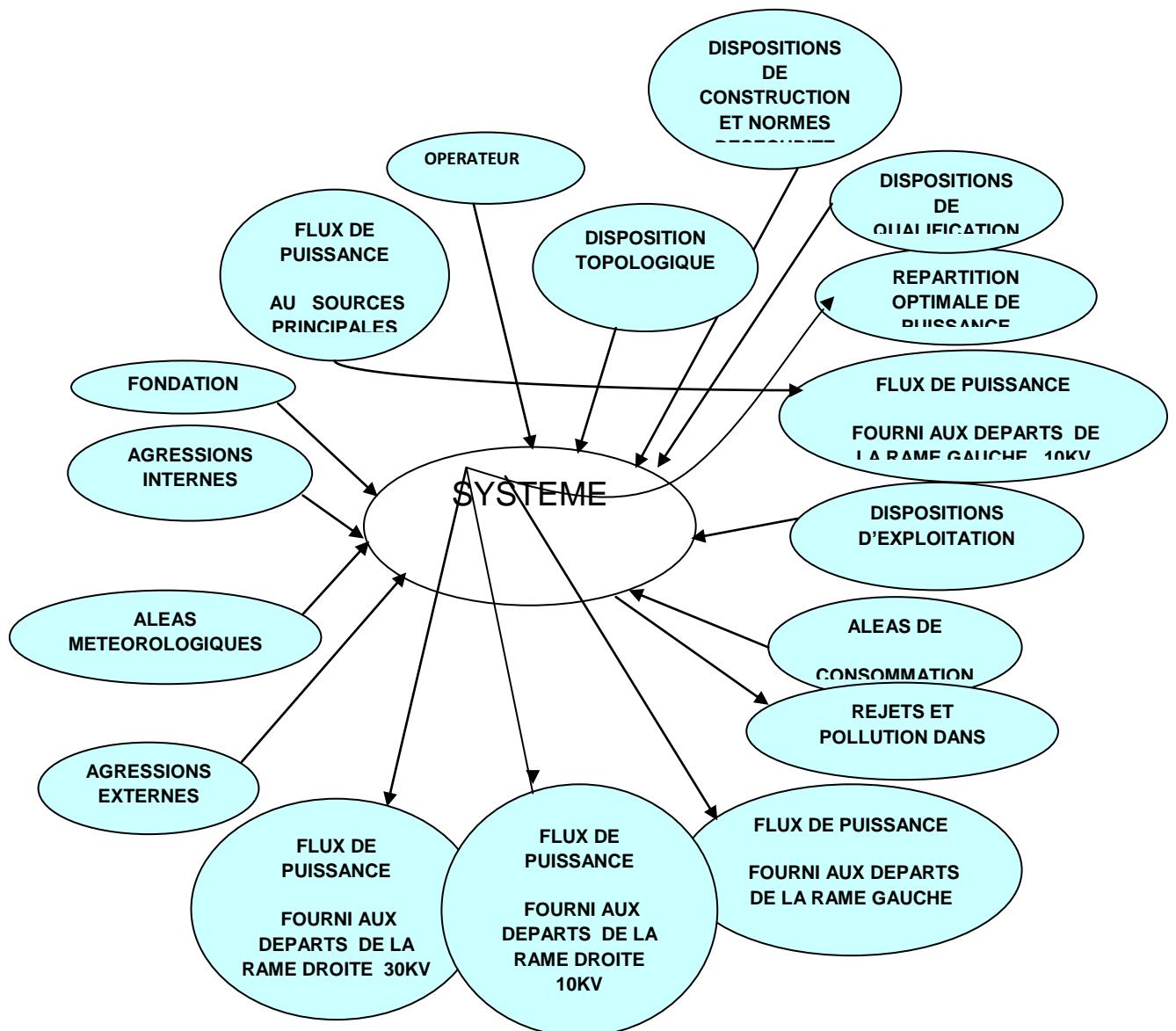


FIG. 5.2 – Le système avec ses milieux extérieurs

### 5.2.1.3-Analyse fonctionnelle interne

#### a) Edition du modèle

Après avoir créé tous les blocs d'un même niveau, on trace les liens graphiques (connections) qui permettent de relier les blocs entre eux via les connecteurs hiérarchiques (fig5.3).

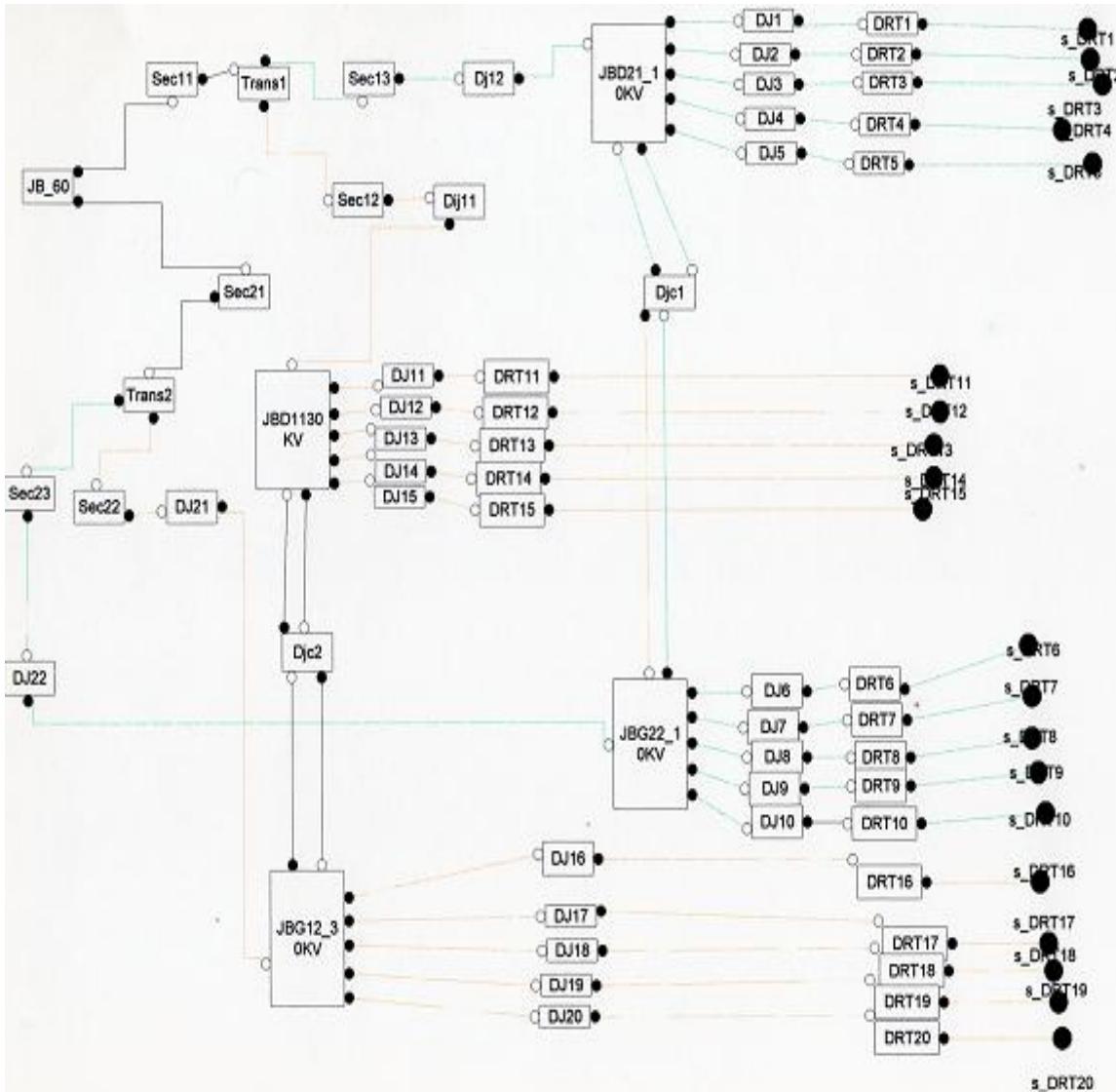


FIG. 5.3 – Modélisation initiale

### b) Décomposition matérielle

Le système global ou « Site » représentant le système dans son environnement a été décomposé en deux sous systèmes : le réseau de distribution 60/30/10KV et le milieu ‘Extérieur’, eux-mêmes décomposés en trois niveaux. L’étude concerne l’étage inférieur du découpage arborescent du système global dont les blocs sont montrés sur la figure 5.4.

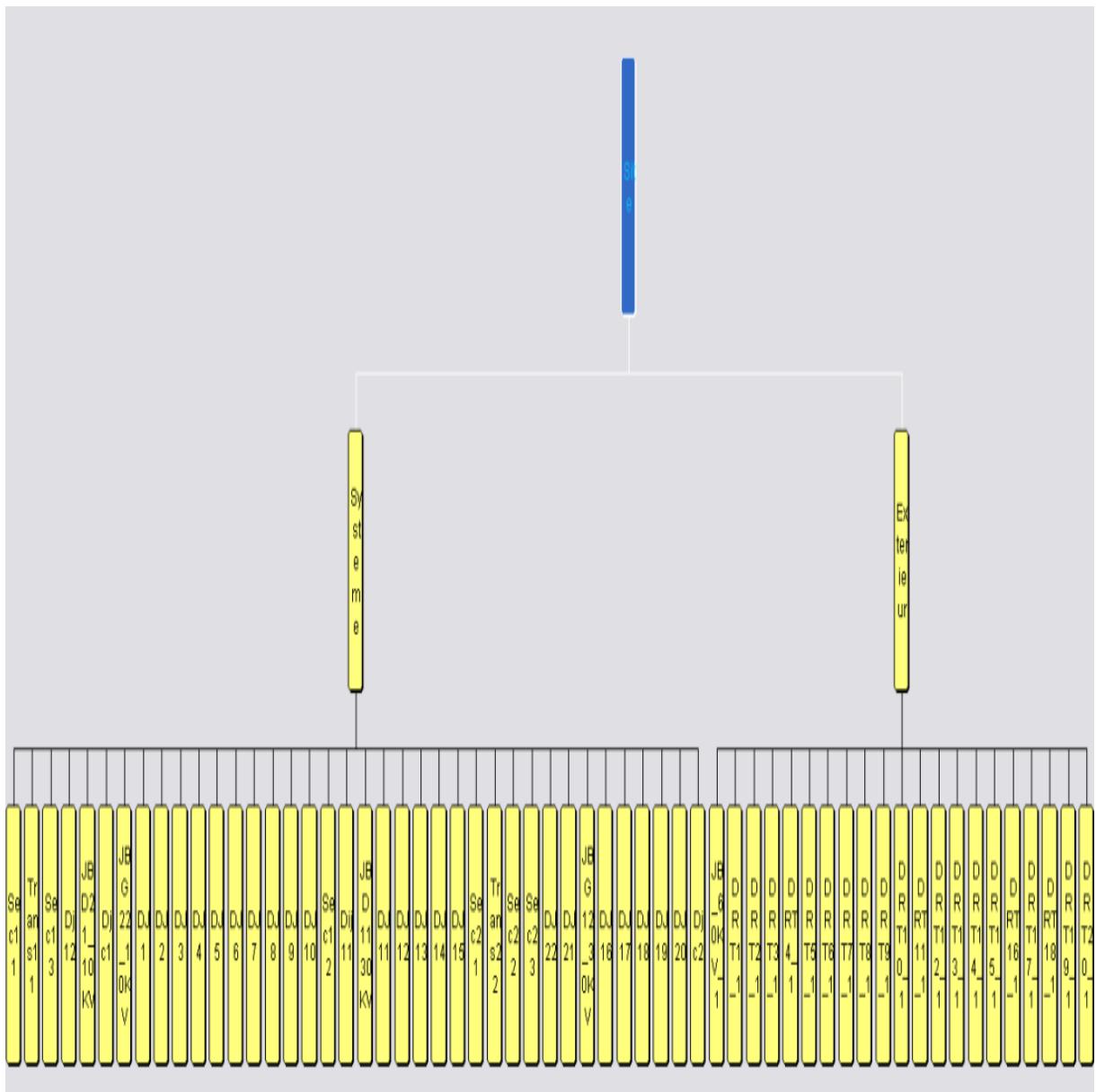


FIG. 5.4—L’arbre global (décomposition matérielle du système)

### c) Création des fonctions, des états et des polynômes des composants

Chaque composant du système modélisé est représenté par un bloc fonctionnel. Les blocs sont reliés entre eux par des liens hiérarchiques qui permettent de les structurer en arborescence. Ces liens sont des fonctions (les blocs jaunes). Une fonction a pour origine un ou un seul bloc fonctionnel par exemple, le composant transformateur\_2 (transf\_22) a deux fonctions de sorties, c'est alimenté le sect\_22 par 30kv et le sect\_23 par 10kv et sa fonction d'entrée est la fonction de sortie du bloc fonctionnel précédent qui représente sect\_21 (fig 5.5).

Les fonctions d'entrées et sorties sont reliées entre elles par une expression logique (polynômes) réalisés à l'aide de portes logiques ET et/ou OU (fig 5.6). Chaque bloc et chaque fonction peuvent avoir un état nominal (vert) ou absent (rouge) (fig5.7). L'état de sortie d'une fonction de sortie d'un bloc est le résultat d'un polynôme logique dont les variables sont les états des fonctions d'entrées de ce bloc et les états du bloc lui-même. (fig 5.8) [102,103].

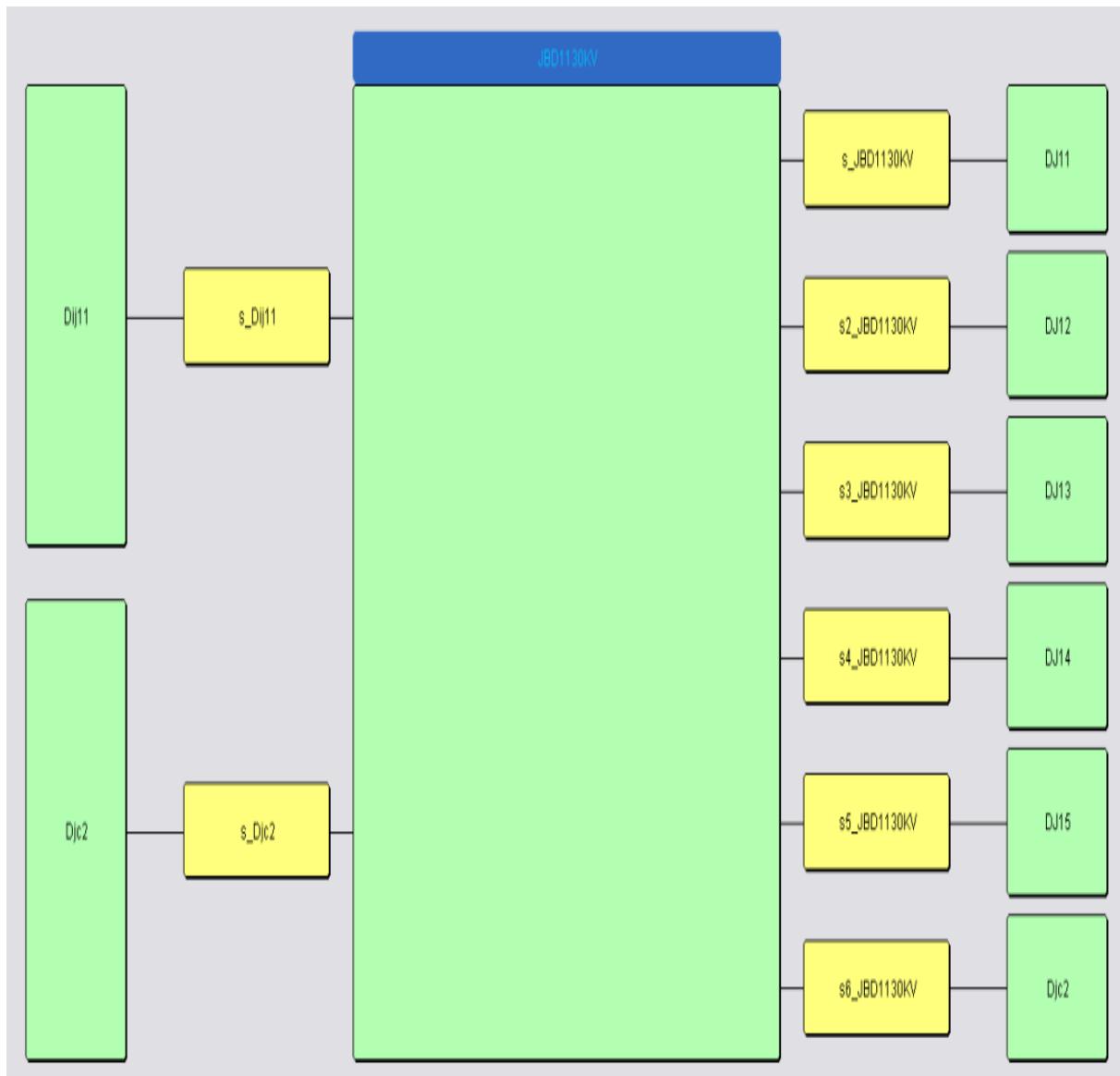


FIG. 5.5-Bloc fonctionnel et ses fonctions

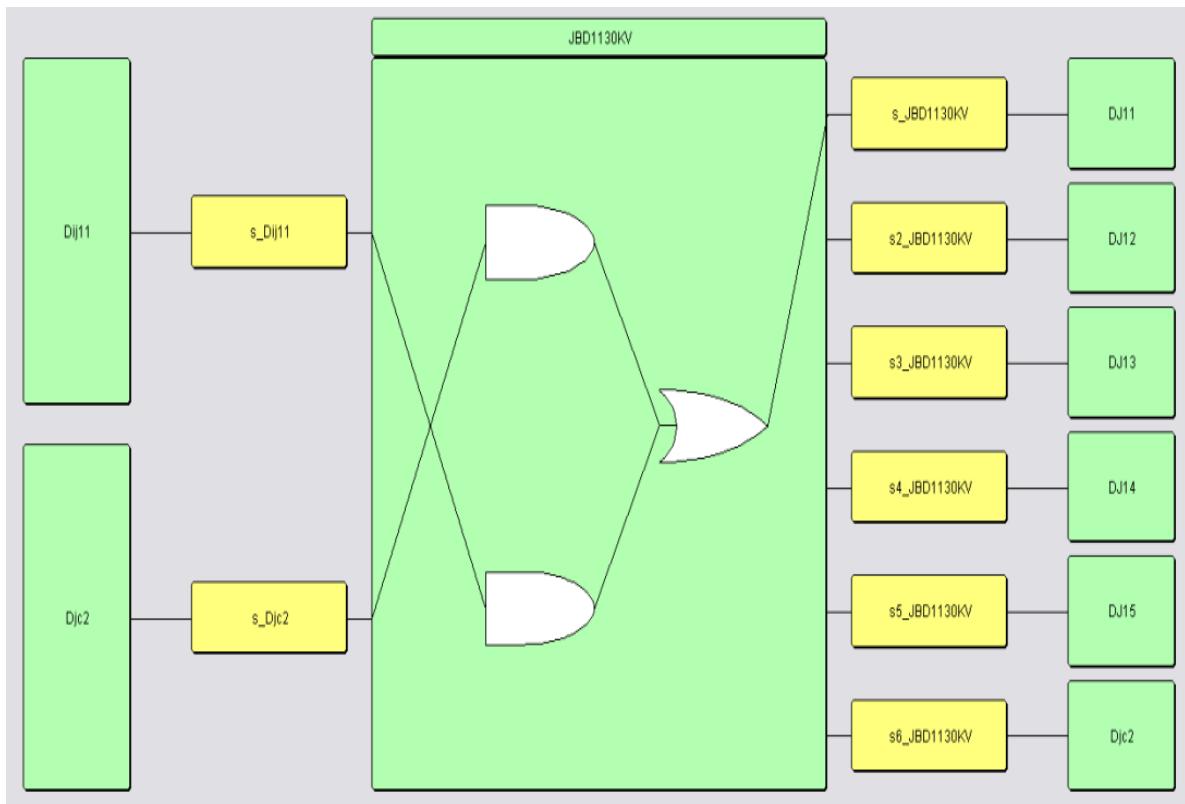


FIG. 5.6–Polynômes des fonctions

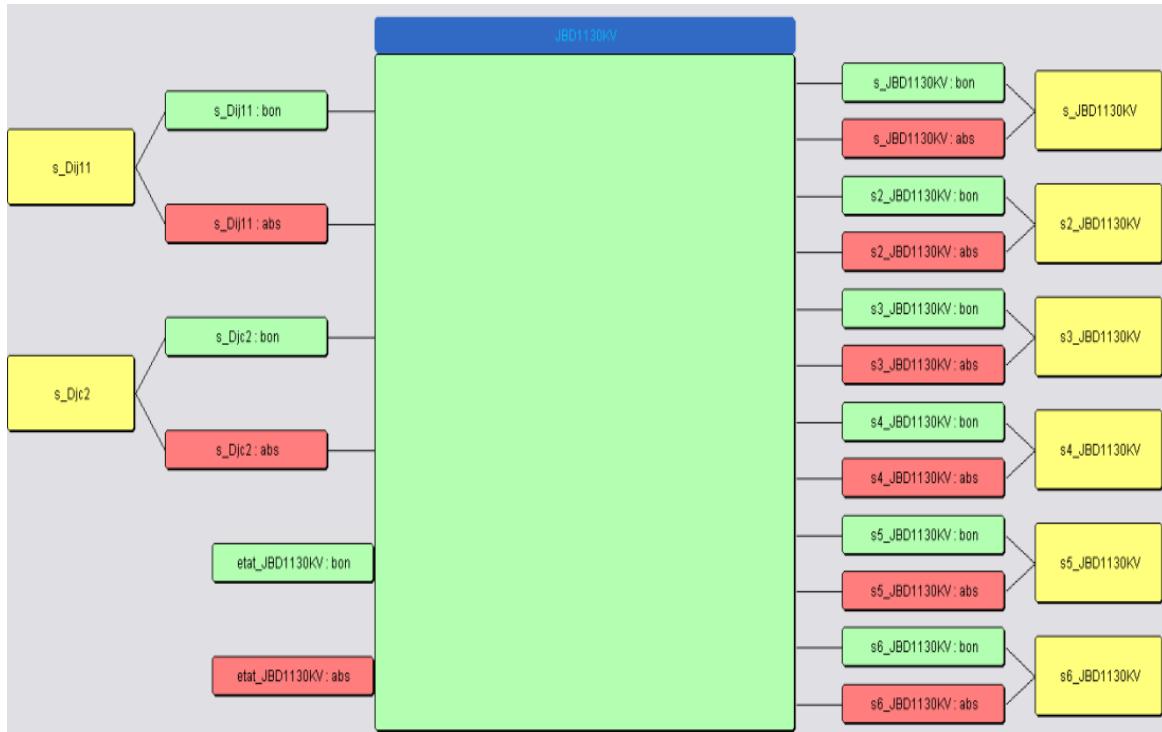


FIG. 5.7– Etats de bloc JBD1130KV

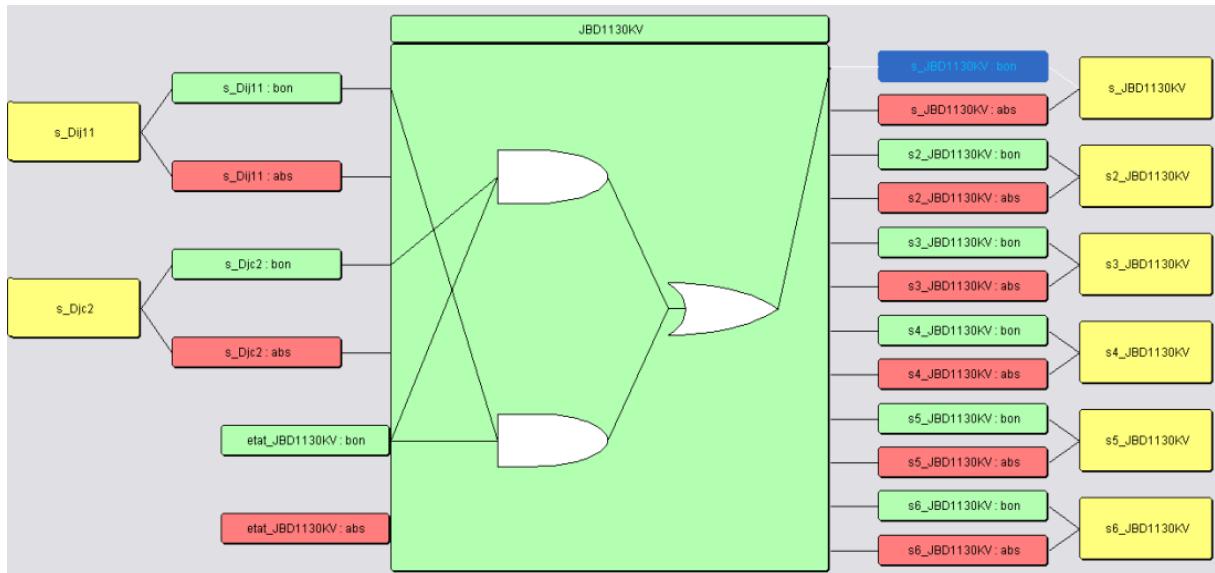


FIG. 5.8–Polynômes des états du bloc JBD1130KV

### 5.2.2-Modélisation par diagramme de fiabilité (RBD)

Le diagramme de fiabilité est une représentation graphique sous forme de boîtes ou de blocs. Il représente une démarche d'analyse par décomposition fonctionnelle du système en sous fonction ou mission .Le diagramme de fiabilité est construit en recherchant la mission de chaque sous ensemble qui permet d'atteindre la mission globale du système, les boîtes peuvent représenter des fonctions ou des composants.

Pour la génération à partir de la modélisation fonctionnelle (diagramme et calculs à partir des fonctions), Simfia propage en amont toutes les fonctions sorties du système et les substitue par le polynôme des blocs parcourus. A chaque fois qu'une fonction est substituée par son polynôme de fonctions causes, ce polynôme est multiplié par le bloc traversé (uniquement si ce bloc possède au moins un état de bloc). Lorsque l'on arrive sur une fonction entrée du système, elle est supprimée du polynôme résultant. On obtient ainsi un polynôme de blocs qu'il suffit de factoriser et d'absorber pour obtenir le diagramme de fiabilité.

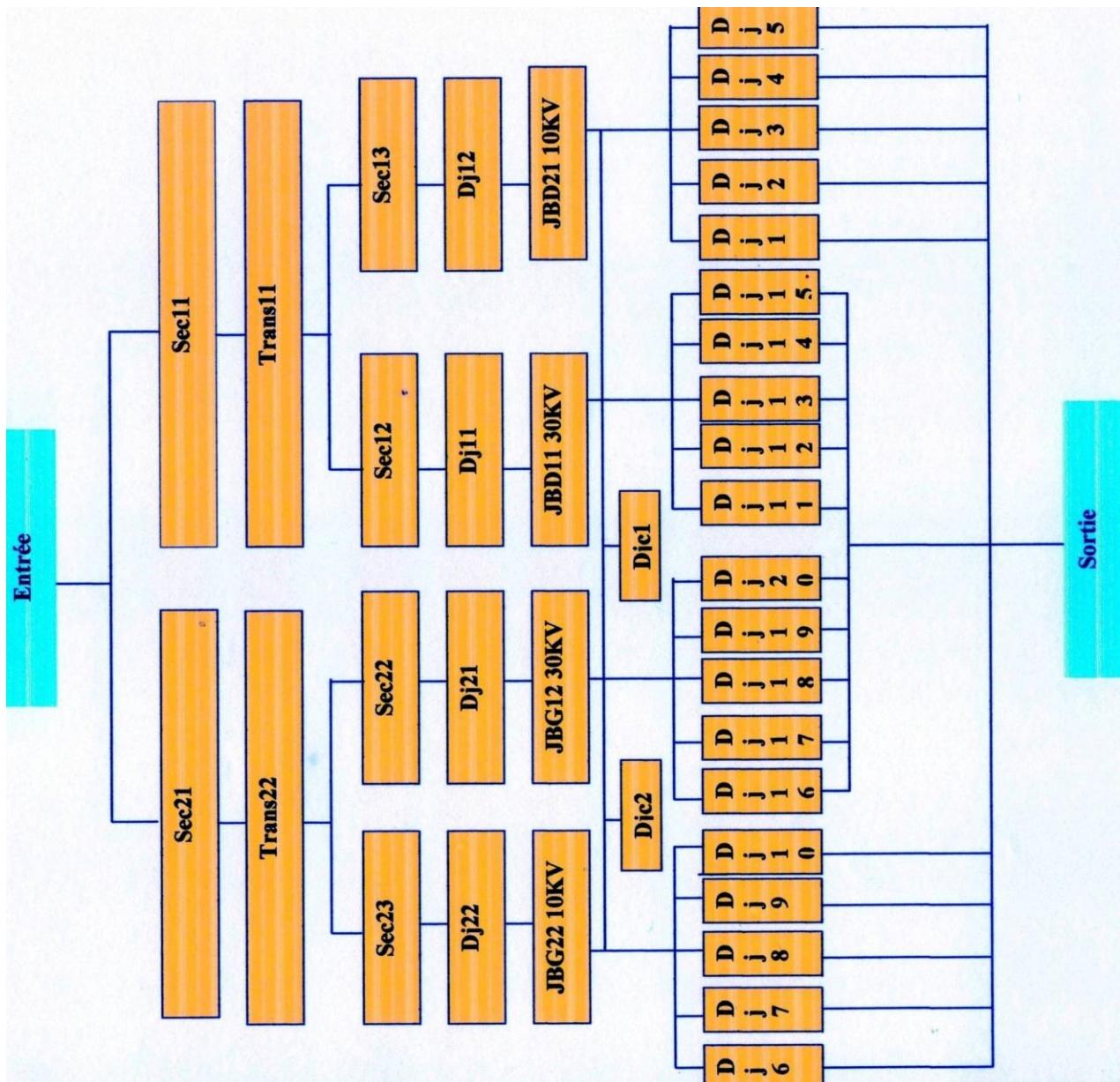


FIG. 5.9– Modélisation par diagramme de fiabilité

Après la simulation, le tracé de la courbe de fiabilité, permet de visionner le fonctionnement du système et de localiser le temps opportun pour entreprendre le processus de maintenance approprié.

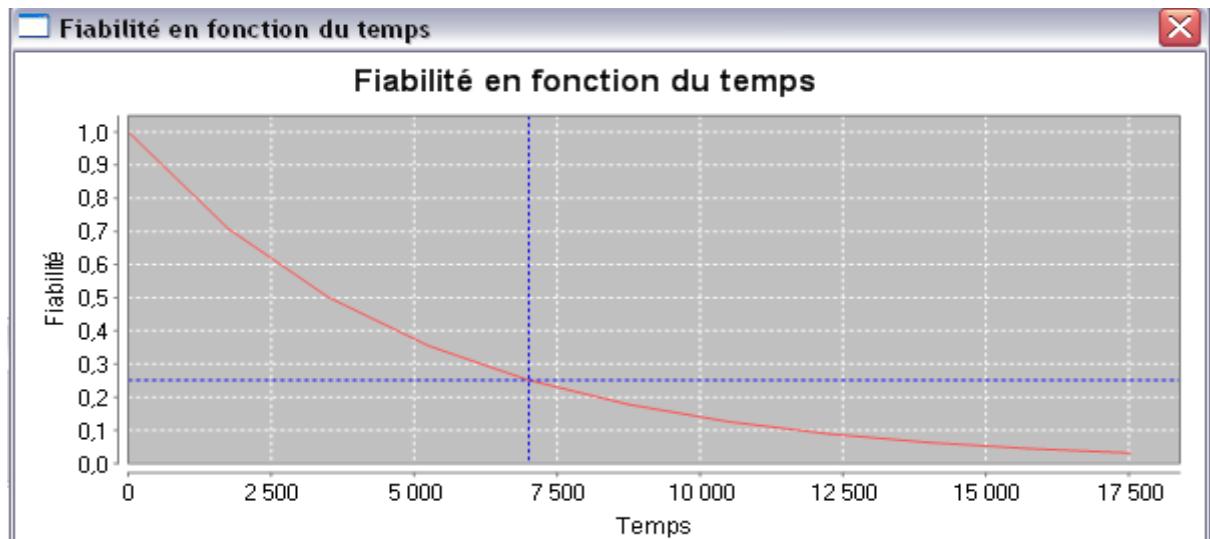


FIG. 5.10– Graphe de la fiabilité

On peut obtenir les indicateurs de maintenance de ce réseau en se basant sur les valeurs calculées pour des taux de coupures et de réparation des différents composants du réseau pris sur les références de la SONELGAZ et sont données dans l'annexe.

Afin d'atteindre notre objectif, nous avons calculé les indicateurs de performances qui figurent dans le tableau 5.2. Pour une production maximale, l'action de maintenance préventive va agir sur le critère de disponibilité et ceux –ci en maximisant MTBF.

Données	Valeurs
MTTF	610,259
MDT	2,036h
MUT	594,794 h
MTBF	611,680 h

Tableau 5.2- Indicateurs de maintenance du système

### 5.2.3-Facteurs d'importance

Cette étude a été ensuite complétée par l'évaluation des facteurs d'importance de Birnbaum, d'Importance Critique, de Vesely-Fussell, de Barlow-Proshan et de réduction de fiabilité de Worth afin de déterminer le ou les composants critiques pour le système. En effet, les facteurs d'importances permettent d'évaluer la contribution relative d'un composant à la

fiabilité ou la défiabilité du système. L'importance d'un composant dépend à la fois de sa fiabilité propre et de son rôle fonctionnel au sein du système et mesure la sensibilité du système au composant considéré et à ses caractéristiques.

Les valeurs de ces facteurs pour les composants du réseau sont données dans le tableau 5.3. Il en ressort de l'analyse de ces valeurs que c'est l'élément « Transformateur » qui constitue l'élément critique et qui nécessite une amélioration de ses performances de fiabilité. L'application des facteurs d'importance est la redéfinition des stratégies de maintenance de chaque composant [103,104].

Les composants	Birnbaum Transitoire	Importance Critique	Vesely-Fussell Transitoire	Barlow-Proschan Transitoire
sectionneur 11 branche 2	0,88246297	1,95E-03	7,23E-04	3,79E-07
sectionneur 21 branche 2	1,07E-04	7,75E-08	8,51E-05	4,61E-11
transformateur 11	<b>0,9998539</b>	<b>9,38E-02</b>	<b>9,21E-02</b>	<b>9,74E-02</b>
transformateur 22	<b>0.9965841</b>	<b>8,73E-02</b>	<b>9,60E-02</b>	<b>8,75E-02</b>
sectionneur 13 branche1-10kv	0,88490584	1,74300433	1,75192894	0,89971002
disjoncteur branche 1 - 10kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
sectionneur 13 branche 1-30kv	0,88250539	1,95E-03	2,21E-03	1,12E-06
disjoncteur 11 branche1 -30kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
sectionneur branche 2- 30kv	0,88250539	1,95E-03	2,21E-03	1,12E-06
disjoncteur_21 branche 2 -30kv	0,88239867	7,50E-06	8,50E-06	2,62E-11
disjoncteur 22 du branche2-10kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
demi jeu de barre de couplage 11 de la	0,88249755	0,02675491	0,03031727	1,07E-05
disjoncteur de couplage_1 branche 1 -	0,88251957	5,04E-03	5,71E-03	2,72E-06
demi jeu de barre de couplage 12-30kv	0,88249755	0,02675491	0,03031727	1,07E-05
demi jeu de barre 21 de la branche 1-10kv	0,88249755	0,02675491	0,03031727	1,07E-05
disjoncteur de couplage 2-10kv	0,88251957	5,04E-03	5,71E-03	2,72E-06

demi de jeu de barre de couplage 22-10kv	0,88249755	0,02675491	0,03031727	1,07E-05
disjoncteur de départ 1-30kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 3-30kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 4-30kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 2-30kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 5-30KV	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 6-30kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 7-30kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 8-30kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 8-30kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 10-30kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 12-10kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 13-10kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 14-10kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 15 -10kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 11-10kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 15-10kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 17-10kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 18-10kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 19-10kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
disjoncteur de départ 20-10kv	0,88254342	0,01684722	0,01908939	1,01E-05
source principale HT-60kv	0,88253496	0,0108756	0,01232314	6,24E-06

Tableau 5.3- . Valeurs des facteurs d'importance pour différents composants du système

Après l'étude complète du réseau et en tenant compte du calcul des facteurs d'importance, nous constatons que le transformateur de puissance est l'élément le plus défaillant du réseau. Ce qui nous amené à l'étudier séparément pour déterminer les différentes défaillances et d'en trouver les solutions adéquates [105].

### **5.3-Etudes des transformateurs de puissance**

Les transformateurs de puissance sont parmi les éléments les plus importants du réseau de transport et de distribution de l'électricité, leur place au sein de cette infrastructure est primordiale et critique. Ils sont normalement prévus pour fonctionner plus de 30 ans, ce qui fait de ces appareils l'une des machines les plus fiables construites par l'industrie électrique.

Les défaillances des transformateurs en service sont très contraignantes pour l'exploitation et le développement du réseau. Elles sont habituellement causées par des modes de défaillances électriques, thermiques et mécaniques ou d'autres incidents. Tout cela pousse à rechercher les meilleures façons pour faire face aux situations générées par les défaillances des transformateurs que ce soit en terme de dispositions visant à minimiser le taux de défaillances à travers l'amélioration continue de la maintenance et la prise en charge de la réparation des unités avariées.

Dans ce chapitre, nous cherchons à déterminer la périodicité de maintenance préventive optimale qui permettra de minimiser le coût moyen, par unité de temps, à long terme de la maintenance des transformateurs de puissance et à rendre ces appareils moins enclins à tomber en panne, pour cela nous proposons l'approche des traitements des données décrite au chapitre3. Cette démarche se base sur les outils mathématiques et statistiques qui permettent d'exploiter les données disponibles, de minimiser le coût moyen de maintenance à long terme, de déterminer la périodicité de maintenance optimale et de comprendre le comportement de l'équipement, puis de prévoir les fonctionnements futurs de ce dernier.

#### **5.3.1-Etude de données**

Afin de se rapprocher le plus possible de la réalité, nous considérons des données de défaillances de 109 transformateurs de puissance de moyenne tension 30kV et 10 kV de puissance 160 MVA à 630 MVA. Ces données sont fournies par la Société de Distribution de l'Electricité et du Gaz de l'Ouest (SONELGAZ) au cours de la période 2008 à 2013.

Les états du transformateur de puissance sont enregistrés depuis sa première mise en service jusqu'à sa panne. La figure 5.11 schématise l'âge de la panne de chaque équipement de l'échantillon.

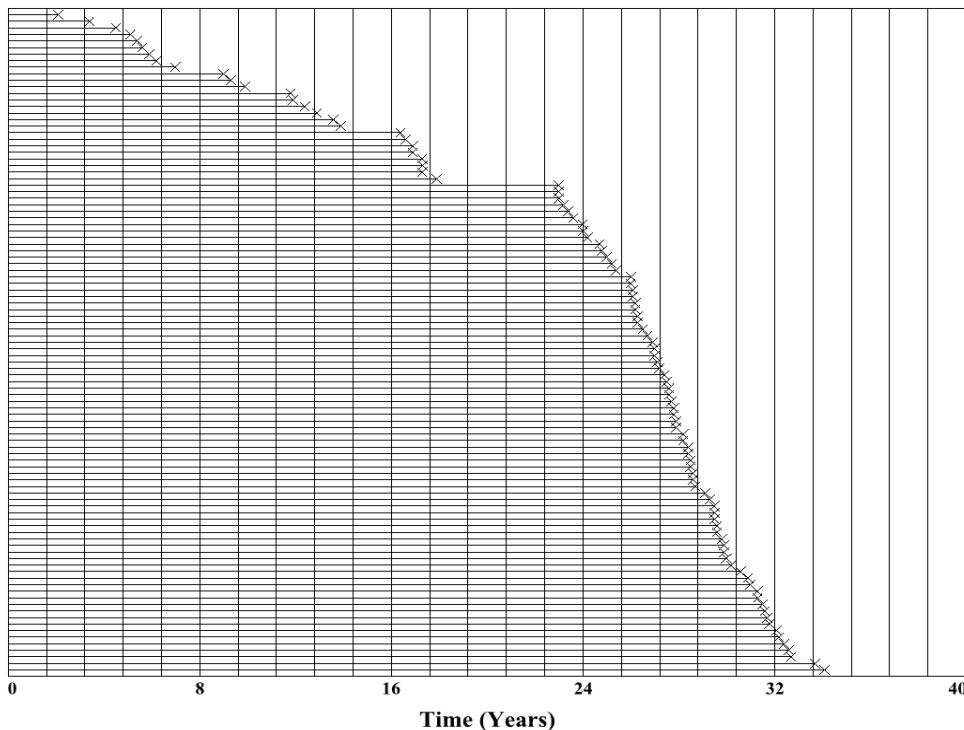


FIG. 5.11 –Données statistiques durant un intervalle de temps (2008–2013)

### **5.3.2-Modèles probabilistes**

Les résultats d'une politique de maintenance sont clairement tributaires du modèle de fiabilité choisi. Un tel modèle doit être suffisamment précis pour garantir une politique de maintenance appropriée à l'équipement. Ces modèles doivent décrire fidèlement le comportement des équipements pour assurer une cohérence des résultats théoriques avec la réalité. Il reste évident que le choix d'un modèle influence significativement les résultats d'optimisation finaux et leurs interprétations.

Actuellement, la Société SONELGAZ utilise la distribution de Weibull à deux paramètres afin d'analyser la fiabilité des transformateurs de puissance. Car, c'est la loi classique généralement utilisée dans les réseaux électriques pour modéliser la durée de vie d'un équipement. Or en la comparant à un modèle à 5 paramètres, basé sur un mélange additif de deux lois de Weibull on constate ses limites.

## 5.4-Estimation des lois de fiabilité

### 5.4.1-loi de Weibull

Selon la fonction de distribution cumulative illustrée à la figure 5.12, les données ne sont pas alignées ; ils forment plutôt une courbe. Nous pouvons conclure que la distribution de Weibull à 2- paramètres n'est pas en conformité avec ses données.

Cependant, la modélisation par le modèle de Weibull de la durée de vie des transformateurs de puissance n'est pas fine. Ainsi, d'autres modèles devraient être étudiés.

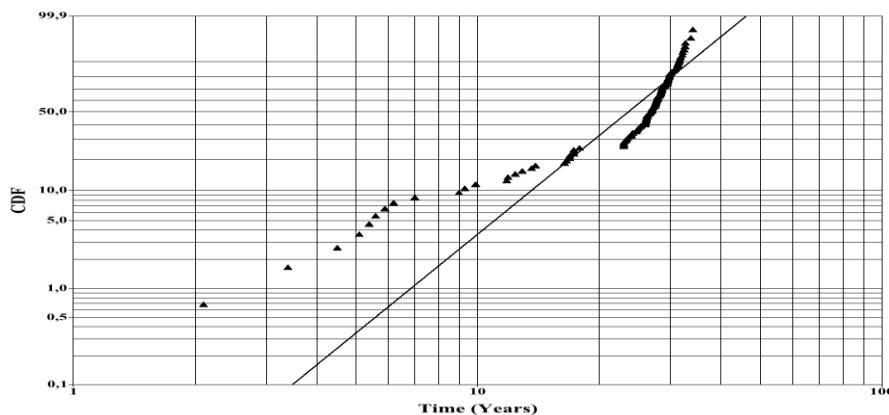


FIG. 5.12 – la fonction de distribution cumulative de Weibull à 2- paramètres

Nous estimons les paramètres de la loi de Weibull en maximisant la vraisemblance du modèle.

On trouve :

-le paramètre d'échelle  $\alpha$ (Années) = 26.9 ;

-le paramètre de forme  $\beta$ = 2.38 ;

Le paramètre de forme est une indication de l'âge des transformateurs de puissance. Le temps moyen du bon fonctionnement : MTTF(Années) = 23.58

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{26.9} \right)^{2.38} \right]$$

### 5.4.2-Mélange de deux Weibull

Dans la figure 5.13, nous montrons la courbe de mélange de deux lois de Weibull qui adapte beaucoup mieux les données. En effet, elle est capable de prendre en compte le mélange, la

concurrence ainsi que le changement de mode de défaillance ; en fonction de l'âge de fonctionnement de l'équipement contrairement au modèle de Weibull à deux paramètres. On parle alors de l'hétérogénéité des données des durées de vie.

L'aplatissement ultérieur du début de la courbe reflète la performance de la sous-population. Par contre, La fonction ajustée commence à courbé lorsque la sous-population plus vulnérable est épuisée par des défaillances sur le terrain.

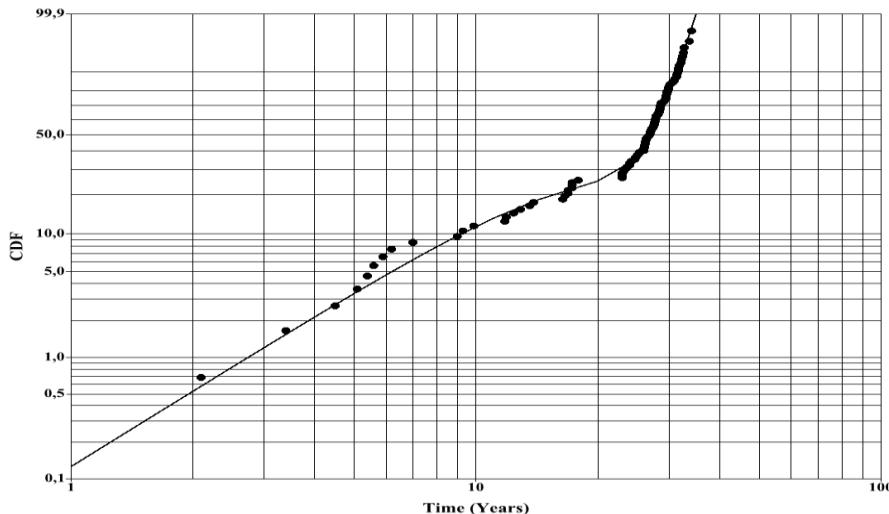


FIG.5.13 – la fonction de distribution cumulative de mélange de deux Weibull

Le tableau 5.4 présente les estimations du maximum de vraisemblance à cinq paramètres basé sur le mélange de deux lois de Weibull. Deux paramètres pour chaque composant de distribution de Weibull et une proportion  $p_j$  représentant le pourcentage des données des durées de vie provenant de chaque environnement  $j$ .

Selon le paramètre de forme, 22% de la population échoue en raison des défaillances précoce ou de jeunesse, (erreurs de fabrication) avec un MTTF égal à 11,03 années et 78% de la population défaille en raison du deuxième mode de défaillance avec un MTTF égal à 28,04 ans.

Méthode	$p$	$\alpha$ (Années)	$\beta$	MTTF(Années)
Sous population1	0.22	12.56	1.75	11.03
Sous population2	0.78	27.75	10.15	28.04

Tableau5.4 - Paramètres obtenue par la distribution mélange de Weibull

En se basant sur le tableau 5.4, la fonction de fiabilité des transformateurs de puissance peut s'écrire alors comme suit :

$$R(t) = 0.22 \exp \left[ -\left( \frac{t}{12.56} \right)^{1.75} \right] + 0.78 \exp \left[ -\left( \frac{t}{27.75} \right)^{10.15} \right]$$

La formule de la fiabilité  $R(t)$  peut être utilisée pour déterminer la périodicité de maintenance préventive optimale pour les transformateurs de puissance.

Le Tableau 5.5 représente les différentes périodicités de maintenance préventive basée sur les valeurs de la fiabilité calculées par les deux lois respectives.

Fiabilité	Périodicité de maintenance préventive (Année)	
	Loi de Weibull	Loi de mélange de Weibull
90%	9,43	10,46
70%	16,28	20,27
50%	23,09	25,52

Tableau 5.5- Périodicités de maintenance préventive basée sur la Fiabilité

Les résultats du tableau 5.5 et la figure 5.14 montrent que la distribution mélange de Weibull tend à surestimer la fiabilité des transformateurs de puissance donc à surestimer la périodicité de maintenance préventive ce qui réduit les coûts de maintenance et la probabilité de défaillance.

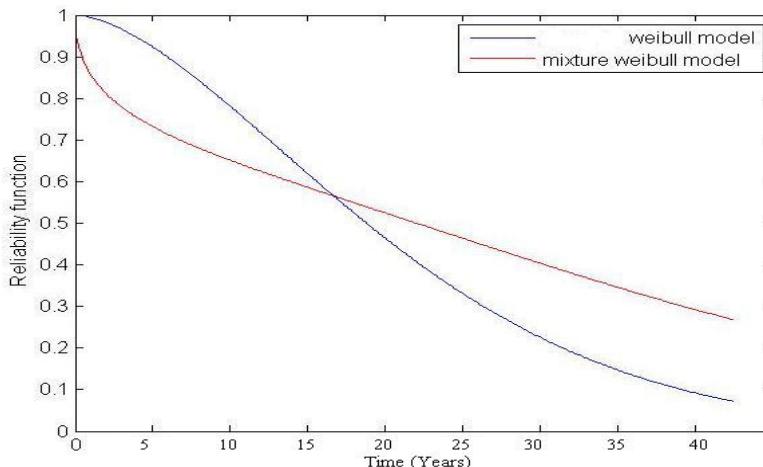


FIG.5.14 – Représentation de la fiabilité des deux modèles

où L est la vraisemblance maximisée et k le nombre de paramètres dans le modèle. Avec ce critère, la déviance du modèle (-2 \* log(L)) est pénalisée par 2 fois le nombre de paramètres. L'AIC représente donc un compromis entre le biais (qui diminue avec le nombre de paramètres) et la parcimonie (nécessité de décrire les données avec le plus petit nombre de paramètres possible).

Le meilleur modèle est celui possédant l'AIC le plus faible.

Critère d'information	Modèle Weibull	Loi de mélange de Weibull
AIC	721,42	707,97

Tableau 5.6-Résultat de l'AIC

### **5.5-Conclusion**

La modélisation du réseau HT/MT/BT issue de la SONELGAZ, nous a permis d'assurer la fiabilité de l'architecture du système en question.

L'utilisation du logiciel SIMFIA, a permis de réaliser un modèle de fonctionnement du système tenant compte de tous les facteurs d'influences et d'établir les liens fonctionnels entre les différents constituants dans le cadre de la phase de marche choisie.

L'évaluation des facteurs d'importance des composants du système ont permis de déterminer de hiérarchiser les éléments du système .

Le modèle mélange de Weibull est proposé pour modéliser les données de temps de défaillance des transformateurs d'un système électriques avec différents modes de défaillance et d'analyser la fiabilité. Le maximum de vraisemblance a été utilisé pour modéliser le système à l'étude. Basé sur des données de durée de vie des transformateurs de puissance de la Société nationale de l'électricité et du gaz (SONELGAZ), nous avons analysé et comparé la performance des deux modèles respectifs . L'utilisation de la fonction ajustée montre que la distribution mélange de Weibull est plus approprié pour la modélisation des transformateurs de puissance. Le résultat de l'analyse montre aussi que l'utilisation du mélange de Weibull surestime la fiabilité. En effet, elle est en mesure de spécifier les différents modes de défaillance. Notre analyse montre que 22% des transformateurs ont défailli avant 13 ans. En outre, la loi de weibull n'est pas en mesure de déterminer les défaillances précoce du transformateur .Cependant, une maintenance appropriée peut minimiser ces défaillances précoces et d'étendre de manière significative la durée de vie du transformateur.

outre, la loi de weibull n'est pas en mesure de déterminer les défaillances précoce du transformateur .Cependant, une maintenance appropriée peut minimiser ces défaillances précoces et d'étendre de manière significative la durée de vie du transformateur.

A travers ces chapitres nous avons exprimé les différentes étapes suivies pour répondre à la demande de la SONELGAZ. Pour rappel, celle-ci était engagé par le souhait d'étudier la portée des stratégies de maintenance, afin de déterminer la performance du réseau électrique. La modélisation du réseau HT/MT/BT issue de la SONELGAZ, nous a permis d'assurer l'amélioration de la fiabilité de l'architecture du système en question par un recensement de ses dysfonctionnements.

Une analyse fonctionnelle externe a permis de mettre en évidence les relations entre le réseau étudié et son milieu extérieur et de recenser toutes les fonctions de service et de contrainte. Une analyse fonctionnelle Interne a permis de réaliser un modèle de fonctionnement du système tenant compte de tous les facteurs d'influence internes et externes et d'établir les liens fonctionnels entre les différents constituants dans le cadre de la phase de marche choisie.

Le calcul des indicateurs de maintenance a contribué au diagnostic de défaillance en identifiant les points faibles et a ainsi fourni des éléments d'aide à la décision pour améliorer la conception et l'exploitation du système et la mise en place de plan de maintenance préventive efficace et évolutifs pour cet équipement.

Cette étude a été ensuite complétée par l'évaluation des facteurs d'importance de Birnbaum, d'Importance Critique, de Vesely-Fussell, de Barlow-Proshan et de réduction de fiabilité de Worth afin de déterminer le ou les composants critiques pour cette étude . En effet, les facteurs d'importances permettent d'évaluer la contribution relative d'un composant à la fiabilité ou la défiabilité du système. L'importance d'un composant dépend à la fois de sa fiabilité propre et de son rôle fonctionnel au sein du système et mesure la sensibilité du système au composant considéré et à ses caractéristiques.

En tenant compte du calcul des facteurs d'importance, nous constatons que le transformateur de puissance est l'élément le plus défaillant du réseau. Ce qui nous amené à l'étudier séparément. Pour cela, nous avons développé une approche fiabiliste basée sur l'analyse de la fiabilité de l'équipement en vue de déterminer la périodicité de maintenance préventive optimale.

Afin de parvenir à ce résultat, nous nous sommes basés sur les outils mathématiques et statistiques qui permettent d'exploiter les données disponibles et de comprendre le comportement de l'équipement, puis de prévoir les fonctionnements futurs de ce dernier. Cette démarche est basée sur la collecte des données fournis par la SONELGAZ.

La modélisation de l'instant de la première panne des transformateurs par la variable aléatoire T s'est faite par une comparaison entre la loi de Weibull et la loi mélange de Weibull.

L'analyse des résultats montre que l'utilisation de deux mélanges de loi de Weibull a surestimé la fiabilité des transformateurs de puissance. En effet, le mélange deux Weibull est en mesure de découvrir les différents modes de défaillance et une meilleure planification de la maintenance et réduction des pannes de notre réseau de distribution électrique.

L'évaluation des indicateurs prévisionnels de performances par les approches proposées ne permettent pas de prendre en compte des hypothèses très fines de modélisation telles que la gestion des ressources, la temporisation des processus, l'impact des défaillances sur les performances (fiabilité, production,...).

La perspective prioritaire est de chercher une méthode permettant d'optimiser la stratégie de maintenance d'un système. Cette nouvelle stratégie doit être adaptée aux conditions d'utilisation et aux contraintes budgétaires et sécuritaires.

Cette méthode, sera basée sur une modélisation comportementale du système permettant de prendre en compte des hypothèses sophistiquées, en décrivant les aspects dynamiques dus à l'occurrence des événements dont les caractéristiques évoluent dans le temps (défaillances, réparations, temporisations,...).

Le développement et la diffusion de ces techniques de modélisation et de simulation permettront de conduire au plus près ces simulations virtuelles comportementales qui, jointes à des traitements quantitatifs rigoureux, fourniront une connaissance à la fois précise et globale de tous les degrés de libertés associées aux trajectoires d'évolution opérationnelle des systèmes.

---

## **Bibliographie**

---

- [1]. Lyons, M., Adams, S., Woloshynowych, M., Vincent, C., 2004, Human reliability analysis in healthcare: A review of techniques, International Journal of Risk & Safety in Medicine, Vol.16, pp. 223–237.
- [2]. Benedetti, C. A. (2002). Introduction à la gestion des opérations (4e éd). Québec: Sylvain Ménard. 2002.
- [3]. Monchy, F. Maintenance Méthodes et Organisations (2e édition). Paris: Dunod (2003).
- [4]. H.P.Ramella. Maintenance des turbines à vapeur. Techniques de l'ingénieur, Référence BM4186. 2002.
- [5]. R. Dekker, Applications of maintenance optimization models : a review and analysis, Reliability Engineering and System Safety 51(1996), 229–240.
- [6]. I.W Burr. Statistical quality control methods. Marcel Dekker, 1976.
- [7] E. Deloux, B. Castanier, and C. Bérenguer. Construction d'un schéma de maintenance pour des systèmes soumis à des contraintes de stress. In 7<sup>ème</sup> Journée des Doctorants de l'Ecole Doctorale S.T.I.M., 2007.
- [8]. Devarun Ghosh, Sandip Roy, Maintenance optimization using probabilistic cost benefit analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2009; 22(4): 403-407.
- [9]. Deloux E., Castanier B., and Bérenguer C., Optimisation de la politique de maintenance pour un système à dégradation graduelle stressé, 7<sup>ème</sup> Congrès international pluridisciplinaire Qualité de Sûreté de Fonctionnement, 20, 21 et 22 mars 2007, volume 1, pages 142–149, Tanger (Maroc), 2007.
- [10]. Hafaifa Ahmed, Attia Daoudi and Kouider Laroussi, Application of fuzzy diagnosis in fault detection and isolation to the compression system protection. Control and Intelligent Systems ACTA Press, July 2011, vol. 39, no. 3, pp. 151-158.
- [11]. Anthony Kelly, Maintenance and the industrial organization. Plant Maintenance Management Set 2006 ; 3(1) : 3-8.
- [12].Marmier F, Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance sous contrainte de compétence: une approche dynamique, proactive et multicritère. Thèse de Doctorat, Université Franche-Comté, France.2007.

- [13]. Abbou R, Contribution à la mise en œuvre d'une maintenance centralisée : conception et optimisation d'un atelier de maintenance. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France. 2003.
- [14]. Alhouaij Ahmad, Contribution à l'optimisation de la maintenance dans un contexte distribué. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010.
- [15]. Pierre Cocheteux, Contribution à la maintenance proactive par la formalisation du processus de pronostic des performances de systèmes industriels. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I, 2010.
- [16]. W.J.Hopp, Y.L. Kuo, An optimal structured policy for maintenance of partially observable aircraft engine components. Naval Research Logistics, 45/4 : 335-352,1998.
- [17]. B.Castanier. Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle. Thèse de l'Université de Technologie de Troyes. 2002.
- [18]. C. Hohmann. Techniques de productivité. Editions d'organisation. 2009.
- [19].Moukhli Amir, Optimisation de la maintenance de roues de turbines hydroélectriques soumises à une dégradation par cavitation. Maitrise ès sciences appliquées, école polytechnique de Montréal, 2011.
- [20]. Nakajima S., La maintenance productive Totale : Mise en œuvre, AFNOR, 1989.
- [21].Nakajima S., La maintenance productive totale (TPM), nouvelle vague de la production industrielle, Afnor Gestion, 1987.
- [22]. E Garcia, H Guyennet, J.C Lapayre, N Zerhouni, A new industrial cooperative telemaintenance platform. Computers & Industrial Engineering, Volume 46, Issue 4, July 2004, Pages 851-864.
- [23]. Rasovska, I., Chebel-Morello, B., Zerhouni, N., Classification des différentes architectures en maintenance, 7e Congrès international de génie industriel, Québec, Canada, juin 2007.
- [24] – Hoyland A .and Rausand M., « System Reliability Theory - Models and Statistical Methods ». Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics – Applied probability Statistics, Section. John Wiley& sons.
- [25].H. Procaccia, E. Ferton, and M. Procaccia., Fiabilité et maintenance des matériels industriels réparables et non réparables. Tec et Doc ,2011.
- [26].A. Villemeur. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteurs humains, informatisation. Eyrolles, Paris, 1988.
- [27]. A. Kaufman, D. Grouchko, R. Cruon . Modèles mathématiques pour l'étude de la fiabilité des systèmes. Edition Masson. 1975.

- [28]. Pagès, A. et Gondran, M., Fiabilité des systèmes. Eyrolles. 1980.
- [29]. Xie M., Dai Y.S. & Poh K.L., Computing Systems Reliability: Models and Analysis , Kluwer Academic Publishers: New York, NY, U.S.A., April 2004.
- [30]. Di.cho et M. Parlar , Survey of maintenance model for multi unit système , europe&n journal of operation resaerch, vol 51 n 01 pp 1-23 . 1991.
- [31]. P.O'Connor, Practical reliability engineering. Willey 1986.
- [32].R.E. Barlow, F. Proschan, Theory for maintained system: distribution of time to first failure. Math. Oper. Res. pp.32–42.1976.
- [33]. Houssein Jaber, Conception architecturale haut débit et sûre de fonctionnement pour les codes correcteurs d'erreurs, Thèse de Doctorat, l'Université Paul Verlaine – Metz, 2009.
- [34]. Hédi Kaffel, La maintenance distribuée : Concept, Evaluation, Thèse de Doctorat, la Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec, 2001
- [35]. M. Rausand and A. Hoyland. System Reliability Theory-Models, Statistical Methods, and Applications. Wiley, second edition, 2004.
- [36].Benouareth Abdelouahab, Contribution à l'étude de la fiabilité des postes de distribution électrique (Application des processus Semi-Markoviens), Thèse de magister, Université M'hamed Bougara – Boumerdes, 2005.
- [37]. Vincent Cocquempot, Du diagnostic à la tolérance aux fautes, Université Lille 1
- [38]. G. Celeux, F. Corset, A. Lannoy, B. Ricard. Designing a Graphical Model for reventive Maintenance from Expert Opinions in a Rapid and Reliable.
- [39]. Mohieddine Benghrsallah, Recherche sur le fraisage des matériaux durs avec les matières de coupe modernes : Application à l'UGV des superalliages, Thèse de Doctorat, l'Université Badji Mokhtar. , Annaba, 2010.
- [40]. Dubois Benoît, Méthodologie de conception de magnétomètre dans une approche mécatronique Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2009.
- [41]. Antonin Bougerol, Modes de défaillance induits par l'environnement radiatif naturel dans les mémoires DRAMs : étude, méthodologie de test et protection, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2006
- [42].Jose F. Espiritu, David W. Coit, Upyukt Prakash, « Component criticality importance mesures for the power industry », Electric Power System Research 77 407-420.
- [43].Paul Beaucaire, Application des méthodes fiabilistes à l'analyse et à la synthèse des tolérances, Thèse de Doctorat, Université de Clermont –Ferrand.
- [44].Z. Birnbaum, “On the importance of different components in a multicomponent system,” in Multivariate Analysis II, P. R. Krishnaiah, Ed. Academic Press, 1969.

- [45].H. E. Lambert, "Fault tree for decision making in system analysis," Ph.D. dissertation, Lawrence Livermore Laboratory, 1975.
- [46].J. B. Fussell, "How to hand-calculate system reliability characteristics," IEEE Transactions on Reliability, vol. 24, pp. 169–174, 1975.
- [47].W. Vesely, "A time dependent methodology for fault tree evaluation," Nuclear Engineering and Design, vol. 13, pp. 337–360, 1970.
- [48]. Circulaire d'information, Méthodes de contrôle de la fiabilité pour les modifications apportées au calendrier de maintenance, Transport Canada, 2007.
- [49]. Daniel Noyes, François pérès, Exploitation du retour d'expérience pour l'amélioration des stratégies de maintenance.
- [50]. Suhner M-C., Sellali. B., Martinet S., Gabriel M., Richet D., Démarche de retour d'expérience et estimation de la fiabilité d'équipements de production dans le cadre de la MBF. 2ème congrès pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de Fonctionnement, Angers, France, P.421-428. 1997.
- [51]. H Benaicha, A Chaker, H Kateb- Etude de sûreté d'un réseau de distribution électrique (60/30/10 KV), Conférence Internationale sur la Maintenance, la Gestion, la Logistique et l'Electrotechnique, 14-16 décembre 2011, Dakar (Sénégal).
- [52]. Logiciel SIMFIA de SOFREETEN Version 2.
- [53]. Boudoukara Zohra, Méthodologie d'évaluation de maintenance pour les systèmes de production, Thèse de magister, École Normale Supérieure d'Enseignement Technique d'Oran, 2008.
- [54]. Villain B. Pitnerp P. Procaccia H., Probabilistic approaches to life prediction of nuclear plant structural components, EDF, 1996.
- [55]. Patrick Lyonnet, la maintenance mathématiques et méthodes, troisième édition, paris, 1992.
- [56]. Contributions to the theory of mathematical evolution. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A., vol. 185. pages 71–110.
- [57]. T. Hasumi, T. Akimoto, and Y. Aizawa, The Weibull-Log Weibull transition of the interoccurrence time statistics in the two-dimensional Burridge-Knopoff earthquake model, Physica A, vol. 388, pp. 483-490, 2009.
- [58]. D. N. P. Murthy, M. Xie, and R. Jiang, Weibull Models. New York: Wiley, 2004.
- [59]. R. Soland, Use of the Weibull Distribution in Bayesian Decision Theory, Research Analysis Corporation, McLean, VA, Report no. RAC-TP-225, 1966.

- [60]. Ouahiba Tebbi , Estimation des lois de fiabilité mécanique par les essais accélérées, Thèse de Doctorat , Université d'Angers, 2005.
- [61]. McLachlan G. et Peel D. (2000). Finite mixture models. Wiley-Interscience, New York.
- [62]. Titterington D. M., Smith A. F. M. et Makov U. E. Statistical analysis of finite mixture distributions. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- [63]. McLachlan G. J. et Basford K. E. (1988). Mixture models, volume 84 of Statistics : Textbooks and Monographs. Marcel Dekker Inc
- [64]. DNP. Murthy, M. Xie, R. Jiang , Weibull Models, (John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, 2004).
- [65]. P. Chapouille, Fiabilité et maintenabilité. Les techniques de l'ingénieur ; traité de l'entreprise industrielle, Edition Eyrolles1999.
- [66]. Pauline Beaumont, Optimisation des plans d'essais accélérés Application à la tenue en fatigue de pièces métalliques de liaison au sol, Thèse de Doctorat, Université de Nantes Angers Le Mans,
- [67]. P. Bruneau, M. Gelgon , F. Picarougne , Parsimonious reduction of gaussian mixture models with a variational-bayes approach. Pattern Recognition, 43(3):850–858, 2010.
- [68]. P. Bruneau, M. Gelgon , F. Picarougne , Aggregation of probabilistic pca mixtures with a variational-bayes technique over parameters. In 20th International Conference on Pattern Recognition, p. 702–705, 2010.
- [69]. F. Nielsen, V. Garcia, R. Nock , Gaussian mixture models via entropic quantization. In European Signal Processing Conference (Eusipco'2009), p. 2012–2016, 2009.
- [70]. J.F. Lawless, Statistical Models and Methods for Lifetime Data, second ed., Wiley, 2002.
- [71]. Titterington DM, Smith AFM, Makov UE. Statistical analysis of finite mixture distribution. Chichester: Wiley; 1985.
- [72]. Richardson S, Green PJ. On Bayesian analysis of mixtures with an unknown number of components. J R Stat Soc B 1997;59(4):731–92.
- [73]. R. Jiang, M.J. Zuo, H.X. Li, Weibull and inverse Weibull mixture models allowing negative weights, Reliability Engineering & System Safety, vol. 66 n. 3, December1999, pp. 227 – 234.
- [74]. Kececioglu D. Reliability and Life Testing Handbook. Vol. 1, Englewoods Cliffs, N.J., Prentice Hall, 1993, 9 17 p.

- [75].D. Cousineau, Fitting the three-parameter weibull distribution: review and evaluation of existing and new methods, Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. 16 n. 1, August 2009, pp. 281 – 288.
- [76].P. Norman, A. Archer, computational technique for maximum likelihood estimation with weibull models, IEEE Transactions on Reliability, vol. 29 n. 1, April 1980, pp. 57-62.
- [77]. S.Y. Jiang, D. Kececioglu, Maximum Likelihood Estimation from Censored-Data Mixed Weibull Distribution, IEEE Transactions on Reliability, vol. 41 n. 2, June 1992, pp. 248 – 255.
- [78]. Yincai Tang, Xiaoling WEI, Existence of maximum likelihood estimation for three-parameter log-normal distribution, IEEE Reliability, Maintenabilityand safety, ICRMS 2009.8th international conference , 2009 , pp. 305 – 307.
- [79]. S. W. Ng, Y. S. Lee, Variable Dimension Newton–Raphson Method, IEEE Transactions on circuits and systems, Vol. 47, N. 6, June 2000, pp. 809 – 817.
- [80].M.R. Hervung & al, Newton-Raphson algorithm for load-flow calculation in transmission and distribution networks, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol. 134 n. 5, Semptember1987, pp.325-330.
- [81]. Donald A. Mumford, Robust Parameter Estimation for the Mixed Weibull (seven Parameter) Including the Method of Maximum Likelihood and the Method of Minimum Distance, Thesis, Air Force Institute of Technology, 1997.
- [82]. IEC 60076-1, Transformateurs de puissance - Partie 1 : Généralités, 2000.
- [83].T. Noda, H. Nakamoto, S.Yakoyama, Accurate modeling of core-type distribution transformers for electromagnetic transient studies, IEEE Transaction on power delivery, Vol.17, N°4, 2002.
- [84].Lefèvre. A, Contribution à la modélisation électromagnétique et thermique des transformateurs, Ecole polytechnique de Nante, 2006.
- [85]. Otmane Cherif Tahar, Etude des surtensions impulsionnelles dans les enroulements de transformateurs et leurs protections, Thèse de Doctorat, Université de Tizi Ouzou, 2008.
- [86]. Girgis. R., Bernesjo., M, Frimpong. G, Detailed performance of a 50 MVA transformer filled with a natural ester fluid versus mineral oil. CIGRE, 2010.
- [87]. José Mak and all, Transformer Fluid: A Powerful Tool for the Life Management of an Ageing Transformer Population, Proceedings of the TechCon 2000 Asia-Pacific.
- [88]. Alain Schenk, Surveillance continue des transformateurs de puissance par réseaux de neurones auto-organisés, Thèse de Doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne, 2001.

- [89]. Girgis. R., Bernesjo., M, Frimpong. G, Detailed performance of a 50 MVA transformer filled with a natural ester fluid versus mineral oil. CIGRE, 2010.
- [90]. T.Noda, H.Nakamato, S.Yokoyama, Accurate modeling of core- type distribution transformers for electromagnetic transient studies, IEEE Transaction on power Delivery, Vol.17, No.4, October2002.
- [91]. V. Sokolov, B.Vanin "Evaluation and Identification of Typical Defects and Failure-Modes of 110-750 KV Bushings", 2005 Conference notes/AVO NZ 2005.
- [92]. V. Sokolov "Failure Statistics. Transformer and Bushing Design Review. Typical Failures Modes and Failure Causes. What Can are Learned from Post Mortem Inspection", Fifth AVO New Zealand International Technical Conference 2006.
- [93]. CIGRE. Enquête internationale sur les défaillances en service des transformateurs de grande puissance. Electra (88), 21-42. 1983.
- [94]. Working Group 05 of CIGRE Study Commitee 12. An international survey on failures in large power transforms in service. Electra, 88 :21-48, 1983.
- [95]. CIGRE, Working Group 09 of CIGRE Study Committee 12. "Lifetime Evaluation of Transformers". Electra, 150 :38-52,October 1993.
- [96]. CIGRE, GUIDELINES for Life Management Techniques for Power Transformers. Working Group of CIGRE Study Committee 12-18.Draft Final Report Rev. 2. 22 june 2002.
- [97]. Boudoukara Z, Chaker A, Benaicha H, Bouzouada A, Taleb Bendiab R- Méthodes d'analyse des stratégies de maintenance par processus de Markov pour les systèmes électriques- 1<sup>ère</sup> journées sur l'Electrotechnique et l'Automatique-19 et 20 Décembre 2006- Oran 2006.
- [98]. H. Benaicha, A.Chaker, M.Khiat, « Modélisation d'un réseau électrique par l'arbre des défaillances » institut de maintenance et de sécurité industrielle, JNEA 2006.
- [99]. Benaicha H, Frioui Z, Chaker A, Khiat M- Les stratégies de maintenance d'un ensemble moteur électrique- onduleur- 1<sup>ère</sup> Conférence Nationale de Mécanique et d'industrie- Université de Mostaganem-29- 30 Novembre 2005.
- [100]. Benaicha H, Chaker A, Kateb H , Khiat M- Etude de la fiabilité, de la maintenabilité et de la disponibilité d'un poste d'interconnexion et de répartition de l'énergie électrique- 1<sup>ère</sup> Conférence Internationale sur l'Electrotechnique, l'Electronique, l'Automatique et la Maintenance- 16-17 Décembre 2008- Oran.
- [101]. Benaicha H, Chaker A, Kateb H , Khiat M- Etude de la fiabilité, de la maintenabilité et de la disponibilité d'un poste d'interconnexion et de répartition de l'énergie électrique- 1<sup>ère</sup>

Conférence Internationale sur l'Electrotechnique, l'Electronique, l'Automatique et la Maintenance- 16-17 Décembre 2008- Oran.

[102]. H.Benaicha, A. Chaker, H .Kateb, Z. Otsmani- Etude de sûreté d'un poste électrique (60/10KV) - 2èmes Journées Internationales d'Electrotechnique, de Maintenance et de Compatibilité Electromagnétique (2èmes JIEMCEM2010) - 25 au 27 Mai 2010 à Oran

[103]. H Benaicha, A Chaker, H Kateb- Etude de sûreté d'un réseau de distribution électrique (60/30/10 KV), Conférence Internationale sur la Maintenance, la Gestion, la Logistique et l'Electrotechnique, 14-16 décembre 2011, Dakar (Sénégal).

[104]. H Benaicha, M Khoja, A Chaker-Politique et stratégies de maintenance en Algérie, Conférence Internationale sur la Maintenance, la Gestion, la Logistique et l'Electrotechnique, 14-16 décembre 2011, Dakar (Sénégal).

[105]. A Benaicha, A Chaker, H Kateb, M Rahli, Dependability Distribution Substation 60/10 KV, 1<sup>er</sup> Conference on Modelling and Simulations (ICOMOS) ,12th -26th July, 2010.

[106]. Benaicha H, Chaker A, Weibull Mixture Model for Reliability Analysis, IREE (International, Review of Electric Engineering, Vol9,N°5, Octobre 2014.

[107]. Akaike, H., 1974. A new look at statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control AU-19: 716-722.

# Annexe 1

## Les données techniques relatives au réseau HT/MT d' Oran sud

**SONELGAZ DISTRIBUTION OUEST**  
**DIRECTION TECHNIQUE ELECTRICITE**

## **Les incidents importants de la DRD d'Oran de l'année 2012/2013**



## Annexe 2

### Les données relatives au réseau HT/MT d' Oran sud

Les indicateurs de maintenance des différents composants du réseau HT/MT est détaillée ci-dessous :

Matériel	Lamda $10^{-4}(\text{hr}^{-1})$	Temps de réparation (h)
Défaut disjoncteur de couplage	1.54	4
Alimentation de source principale 60kv	1.64	68
Défaut des câbles	1.65	29
Défaut de sectionneur	1.70	2
Défaut de disjoncteur	1.71	4
Défauts au conducteur MT en aval du transformateur	1.81	8
transformateur	1.98	6
Jeux de barres	1.14	32

## Annexe3

La collecte des données des transformateurs de puissance de moyenne tension 30kV et 10 kV de puissance 160 MVA à 630 MVA, fournies par la Société de Distribution de l'Electricité et du Gaz de l'Ouest (SONELGAZ) au cours de la période 2008 à 2013.

N° POSTE	PUIS KVA	TENS KV	ANNEE DE FABRIC	DATE DE MISE EN SERVICE	DATE D'AVARIE	motif
854	400	10	2004	09/02/2005	03/01/2008	surcharge
854	630	10	2004	03/01/2008	05/01/2008	defaut de fabrication (sous garantie)
670	400	10	2004	04/04/2005	08/07/2008	coupure enroulement MT
657	400	10	2004	07/07/2003	19/07/2008	Maintenance inadéquate
31	400	10	2005	28/03/2004	11/08/2008	coupure enroulement MT
539	400	10	1980	28/01/2004	30/08/2008	coupure enroulement MT
322	400	10	2000	15/07/2001	23/09/2008	Fuite d'huile
72	630	10	2004	03/01/2003	07/09/2008	coupure enroulement MT
292	400	10	2003	20/03/2004	12/11/2008	coupure enroulement MT
228	250	10	1992	21/06/1999	10/12/2008	Courant de fuite
301	250	10	1985	29/05/2000	18/12/2008	coupure enroulement MT
657	400	10	1978	19/07/2008	02/12/2008	defaut de fabrication (sous garantie)
81	20	10	2003	27/07/2004	03/09/2009	surcharge
66	400	10	2002	18/04/2004	18/01/2009	defaut de fabrication (sous garantie)
127	400	10	1980	04/04/2009	07/06/2009	coupure enroulement MT
993	400	10	2001	03/08/2003	30/06/2009	surcharge
379	250	10	1992	07/07/2002	25/07/2009	surcharge
668	630	10	2000	17/12/2000	25/07/2009	couple enroulement MT
61	630	10	2004	10/07/2009	11/07/2009	couple enroulement MT
11	250	10	2001	16/03/2002	16/08/2009	couple enroulement MT
209	400	10	2002	17/12/2002	04/10/2009	surcharge
440	160	10	1999	08/07/2007	04/10/2009	coupure enroulement MT
80	250	10	2002	23/02/2004	26/10/2009	surcharge
218	400	10	2003	09/03/2004	26/07/2009	coupure enroulement MT
239	400	10	2004	20/03/2004	07/11/2009	incendie
433	160	10	2003	18/09/2005	12/11/2009	coupure enroulement MT
338	250	10	1983	27/04/2003	02/02/2010	incendie
339	250	10	2002	08/02/2003	14/02/2010	coupure enroulement MT
716	20	10	2003	14/04/2009	02/07/2010	defaut de fabrication
187	250	10	2001	20/06/2004	16/07/2009	surcharge
56	250	10	1981	15/07/2001	25/08/2010	coupure enroulement MT
822	400	10	1984	26/02/2005	26/08/2010	couple enroulement MT
854	400	10	2003	05/01/2008	20/11/2010	fraude
281	200	10	2000	14/12/2004	27/12/2010	coupure enroulement MT
444	260	10	2001	24/01/2003	04/01/2011	incendie
324	400	10	1993	27/03/2004	17/02/2011	coupure enroulement MT
896	250	10	1996	08/03/2011	08/03/2011	sous garantie defaut de fabrication
61	630	10	2004	08/06/2004	18/01/2012	coupure enroulement MT
657	630	10	1982	02/12/2008	30/01/2012	fraude
369	20	10	1982	26/07/2002	07/07/2012	surcharge
899	250	10	1982	15/07/2003	24/06/2012	fraude
302	400	10	2005	05/04/2005	01/07/2012	coupure enroulement MT
803	250	10	1992	07/01/2008	15/07/2012	surcharge
237	400	10	2002	18/12/2011	01/07/2012	fraude
262	20	10	2003	17/03/2008	02/07/2012	coupure enroulement MT
193	400	10	2004	08/07/2004	17/07/2012	incendie
686	400	10	2004	09/02/2012	16/04/2012	incendie
127	400	10	2003	14/07/2007	03/08/2012	surcharge
362	250	10	2001	10/02/2003	06/08/2012	coupure enroulement MT
164	20	10	2001	22/11/2008	13/08/2012	coupure enroulement MT
35	250	10	2001	14/01/2003	12/07/2012	surcharge
85	250	10	2005	21/12/2005	14/08/2012	surcharge
297	630	30	2003	12/12/2004	03/01/2008	fraude
297	400	30	1980	14/04/1999	28/01/2008	surcharge
297	250	30	2002	22/02/2008	23/02/2008	Défaut de fabrication
297	630	30	1998	06/03/2008	07/03/2008	Maintenance inadéquate
297	400	30	1996	15/02/2007	18/01/2008	fraude
297	250	30	2004	13/04/2008	15/04/2008	Défaut de fabrication
297	630	30	2004	06/05/2008	09/05/2008	Maintenance inadéquate
297	400	30	2001	24/12/2002	03/06/2008	Fuite d'huile
297	630	30	1997	29/06/2004	17/06/2008	fraude
297	630	30	2001	25/11/2001	02/07/2008	coupure enroulement MT
297	160	30	2002	17/03/2005	14/07/2008	coupure enroulement MT
297	250	30	1987	23/07/2008	23/07/2008	Maintenance inadéquate
297	60	30	1992	02/12/2000	29/07/2008	Courant de fuite
297	160	30	1988	16/09/2002	16/09/2008	Courant de fuite
297	250	30	1987	25/05/2003	22/08/2008	coupure enroulement MT
297	630	30	2007	15/10/2007	30/09/2008	fraude
297	250	30	2001	28/04/1999	04/10/2008	fraude
297	630	30	2004	27/02/2005	13/11/2008	Courant de fuite
297	400	30	1978	05/08/2001	30/11/2008	fraude
297	250	30	1994	37/10/2001	03/12/2008	incconnu
297	60	30	1984	03/03/2002	18/01/2010	Courant de fuite
297	630	30	2000	23/07/2000	29/07/2009	fraude
297	630	30	2004	14/01/2009	11/03/2009	surcharge
297	160	30	1978	11/11/2003	15/04/2009	coupure enroulement MT
297	400	30	1982	26/02/2004	25/07/2009	coupure enroulement MT
297	250	30	2002	12/11/2008	30/07/2009	fraude
297	160	30	2000	22/10/2005	01/10/2009	coupure enroulement MT
297	160	30	2006	02/12/2009	03/12/2009	sous garantie defaut de fabrication
297	200	30	1998	12/02/2000	23/03/2010	coupure enroulement MT
297	400	30	2001	02/12/2009	15/02/2010	fraude
297	630	30	2004	10/02/2003	12/04/2010	couple enroulement MT
297	250	30	2001	25/09/2002	03/06/2010	fraude
297	400	30	2005	29/10/2006	16/07/2010	incendie
297	160	30	1992	10/02/2003	24/11/2010	coupure enroulement MT
297	400	30	1989	25/12/1999	05/01/2011	surcharge
297	630	30	2001	12/03/2011	13/03/2011	Défaut de fabrication
297	250	30	2002	03/04/2002	09/05/2011	surcharge
297	160	30	1986	10/02/2003	25/03/2012	coupure enroulement MT
297	630	30	1992	21/11/2000	03/02/2012	fraude
657	630	30	1982	12/01/2007	30/03/2012	coupe enroulement MT
61	250	30	2000	19/02/2001	18/02/2012	coupe enroulement MT
297	630	30	1982	12/01/2007	30/03/2012	fraude
297	160	30	1987	16/10/2003	01/04/2012	surcharge
297	250	30	1982	28/07/2005	34/07/2012	fraude
297	400	30	1999	09/06/2004	29/09/2012	coupe enroulement MT
302	400	30	1999	17/11/2005	15/07/2012	surcharge
803	250	30	1992	17/11/2005	21/07/2012	fraude
237	400	30	2002	08/01/2010	21/07/2012	surcharge
262	160	30	2000	18/05/2004	02/08/2012	coupure enroulement MT
153	20	30	2001	07/05/2004	07/05/2012	incendie
696	250	30	1999	14/03/2005	26/08/2012	incendie
539	400	10	1994	28/01/2004	30/08/2012	surcharge
322	400	10	2000	15/07/2001	04/09/2012	coupure enroulement MT
72	630	10	2001	03/08/2003	07/10/2012	Défaut de fabrication
292	400	10	1999	28/03/2004	12/11/2012	coupure enroulement MT
228	250	10	2009	27/05/2009	02/07/2012	incendie
301	250	10	2009	29/05/2009	18/12/2012	fraude
657	400	10	2006	19/07/2008	22/12/2012	fraude

