

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



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA
FACULTE DES HYDROCARBURES ET
DE LA CHIMIE



LABORATOIRE DE RECHERCHE SUR L'ELECTRIFICATION
DES ENTREPRISES INDUSTRIELLES
(LREEI)

MÉMOIRE

PRESENTE PAR :

Mr. BENOURETH ABDELOUAHAB

EN VUE DE L'OBTENTION DU TITRE DE
MAGISTER EN GENIE ELECTRIQUE
OPTION : *Equipements Electriques Industriels*

THEME

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA FIABILITE DES POSTES
DE DISTRIBUTION ELECTRIQUE (APPLICATION DES
PROCESSUS SEMI-MARKOVIENS)**

Soutenu publiquement le:

devant le jury composé de :

<i>M. M. Zelmat</i>	<i>Professeur à Univ. Boumerdes</i>	<i>Président</i>
<i>M. M. Bouguerra</i>	<i>Chargé de Cours à Univ. Boumerdes</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>M. H. Megloul</i>	<i>Maître de Conférences à Univ. Boumerdes</i>	<i>Examineur</i>
<i>M. D. Ouahdi</i>	<i>Maître de Conférences à Univ. Boumerdes</i>	<i>Examineur</i>
<i>M. R. Azouaou</i>	<i>Chargé de Cours à Univ. Tizi-Ouzou</i>	<i>Examineur</i>

BOUMERDES 2005

Remerciements

Tous les éloges et les remerciements sont à Allah l'un, le seul créateur et gouverneur de cet univers. Je souhaite que je pourrais le remercier de ce que je suis et pour tout ce qu'il m'a accordé bien qu'il ne puisse jamais être remercié assez.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance et gratitude à monsieur : Dr. M. Bouguerra, qui m'a donné la possibilité de réaliser ce mémoire dans les meilleures conditions, et qui a bien voulu diriger ce travail. Je remercie aussi vivement monsieur : Pr. M. Zelmat qui a voulu présider le jury d'examen. Je remercie également messieurs : Dr. D. Ouahdi, Dr. H. Megloulou et Dr. R. Azouaou qui ont bien voulu examiner ce travail.

Je tiens à remercier tous les membres de la famille : mon père, ma mère, mes frères et mes sœurs. Je ne terminerai pas sans oublier d'associer à mes remerciements ma grand-mère.

Liste des figures et des tableaux

- **Figures**

- Figure I.1** – Taux de défaillance en fonction du temps.
- Figure I.2** – Représentation du MTTF, MDT, MUT et MTBF.
- Figure I.3** – Relations de base entre deux blocs.
- Figure I.4** – Diagramme de fiabilité du système m/n.
- Figure I.5** – Diagramme en réseau représentant deux liens en série et en parallèle.
- Figure I.6** – Les quatre formes de base de l'analyse d'arbre de défaillances.
- Figure I.7** – Distribution de la loi exponentielle.
- Figure I.8** – Distribution de la loi normale.
- Figure I.9** – distribution de la loi log-normale.
- Figure I.10** – distribution de la loi gamma de paramètres (2,1).
- Figure I.11** – Principales propriétés de la distribution de Weibull.
- Figure II.1** – Schéma général du réseau électrique.
- Figure II.2** – Schématisation du transport et de la distribution.
- Figure I.3** – Les deux schémas de base d'un réseau radial (ou en antenne) et en boucle ouverte (ou coupure d'artère).
- Figure II.4** – Schéma de distribution en double dérivation.
- Figure II.5** – Schéma de principe d'un réseau maillé.
- Figure II.6** – Exemples des différents types de postes MT/BT.
- Figure II.7** – Représentation théorique du taux de pannes en fonction de la complexité.
- Figure III.1** – Evolution des collectes de données dans le domaine d'électricité.
- Figure III.2** – Représentation semi-logarithmique de la loi de Weibull.
- Figure III.3** – Tracé de la fonction empirique de distribution des défaillances.
- Figure III.4** – Histogramme de l'influence des facteurs climatiques sur la fiabilité des équipements électriques.
- Figure III.5** – Histogramme de l'influence des facteurs non-climatiques sur la fiabilité des équipements électriques.
- Figure IV.1** – CMTD pour les transitions d'un système à trois états.
- Figure IV.2** – CMTC du système à deux états.
- Figure IV.3** – Différents états et leurs transitions.
- Figure VI.4** – Graphe des états.
- Figure IV.5** – Graphe des états avec la représentation probabiliste.
- Figure IV.6** – Diagramme de Markov à N états.
- Figure IV.7** – Blocs-diagrammes de fiabilité pour des systèmes à trois composants.
- Figure IV.8** – Diagramme de transition d'état avec des défaillances indépendantes.
- Figure IV.9** – Diagramme de transition d'état avec partage-charge.
- Figure IV.10** – Diagramme de transition d'état pour un système à trois composants en parallèle.
- Figure IV.11.a** - Diagrammes de transition d'état pour un système de secours: cas de la fiabilité.
- Figure IV.11.b** – Diagrammes de transition d'état pour un système de secours: cas de la disponibilité.
- Figure V.1** – Schémas types des structures du R.A.E.

Figure V.2 – Schémas de principe des réseaux d'alimentation électrique.

Figure V.3 – Schéma représentatif des sources.

Figure V.4 – Graphe d'états et de transitions du processus semi-markovien.

Figure V.5 – Temps moyen de bon fonctionnement du système en fonction de P_m/d_m pour deux sources identiques.

Figure V.6 – Temps moyen de réparation du système en fonction de P_m/d_m pour deux sources identiques.

Figure V.7 – Disponibilité du système en fonction de P_m/d_m pour deux sources identiques.

Figure V.8 – Temps moyen de bon fonctionnement du système en fonction de P_m/d_m pour deux sources différentes.

Figure V.9 – Temps moyen de réparation du système en fonction de P_m/d_m pour deux sources différentes..

Figure V.10 – Disponibilité du système en fonction de P_m/d_m pour deux sources différentes.

Figure V.11 – Graphe d'états et de transitions du processus semi-markovien.

Figure V.12 – Temps moyen de bon fonctionnement du système en fonction de T_{adm}/T_d pour deux sources identiques.

Figure V.13 – Temps moyen de réparation du système en fonction de T_{adm}/T_d pour deux sources identiques.

Figure V.14 – Disponibilité du système en fonction de T_{adm}/T_d pour deux sources identiques.

Figure V.15 – Temps moyen de bon fonctionnement du système en fonction de T_{adm}/T_d pour deux sources différentes.

Figure V.16 – Temps moyen de réparation du système en fonction de T_{adm}/T_d pour deux sources différentes.

Figure V.17 – Disponibilité du système en fonction de T_{adm}/T_d pour deux sources différentes.

- **Tableaux**

Tableau I.1 - Classification des défaillances en fonction des effets.

Tableau I.2 - Principales caractéristiques des lois discrètes.

Tableau I.3 - Principales caractéristiques des lois continues.

Tableau III.1 - Comparaison entre la méthode qualitative et quantitative de collecte de données.

Tableau III.2 - Différentes valeurs de la variable aléatoire S_i .

Tableau III.3 - Différentes valeurs de la variable aléatoire ω_i .

Tableau III.4 - Exemple des estimations des taux de défaillances de quelques équipements.

Tableau III.5 - Exemple des estimations des taux de réparations de quelques équipements.

Tableau III.6 - Exemples d'indisponibilité du matériel pour réparation.

Tableau III.7 - résultats de l'expertise sur les facteurs climatiques.

Tableau III.8 - résultats de l'expertise sur les facteurs non-climatiques.

Tableau III.9 - Résultats de l'analyse pour les facteurs climatiques.

Tableau III.10 - Résultats de l'analyse pour les facteurs non-climatiques.

Tableau IV.1 - Quatre types des processus Markoviens.

Tableau IV.2 - Etats de Markov des systèmes à trois composants.

Tableau IV.3 - Etats de Markov pour les systèmes à deux composants.

Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I : Notions de fiabilité

I.1 Introduction.....	03
I.2 Notions de base dans le domaine de la fiabilité.....	04
I.2.1 Fonction de répartition et fonction de densité de probabilité.....	04
I.2.2 Fiabilité.....	05
I.2.3 Fonction du taux de défaillance.....	06
I.2.4 La maintenabilité.....	07
I.2.5 La disponibilité.....	08
I.2.6 Relations entre fiabilité, maintenabilité et disponibilité.....	08
I.2.7 La sécurité.....	08
I.2.8 Défaillance.....	09
I.2.9 Panne.....	11
I.2.10 Défaut.....	12
I.2.11 Relations fondamentales dans le domaine de la fiabilité.....	12
I.3 Techniques communes dans l'analyse de la fiabilité	14
I.3.1 Schémas blocs de fiabilité.....	14
I.3.2 Diagramme en réseau.....	16
I.3.3 Analyse d'arbre de défaillances.....	17
I.3.4 Simulation de Monte-Carlo.....	17
I.4 Amélioration de la fiabilité par la redondance.....	18
I.5 Optimisation de la maintenance par la fiabilité.....	19
I.6 Principales lois de probabilité utilisés en fiabilité.....	20
I.7 Recherche et synthèse bibliographique sur l'historique et les travaux récents publiés sur la fiabilité des systèmes de distribution de l'énergie électrique.....	24
I.8 Conclusion.....	28

Chapitre II: Notions sur les réseaux électriques et leur fiabilité

II.1 Introduction	29
II.2 L'industrie de l'électricité : Production.....	30
II.3 Caractéristiques des réseaux d'électricité.....	31
II.3.1 Les différentes fonctions du réseau électrique général	31
II.3.2 Les différents types de réseaux électriques.....	31
II.3.3 La planification des réseaux.....	34
II.3.4 Les topologies des réseaux électriques.....	34
II.4 Le plan de protection.....	38
II.5 Les postes de distribution de l'énergie électrique.....	39
II.5.1 Structure des postes.....	39
II.5.2 Postes de livraison MT et MT/BT.....	40
II.5.3 Eléments constitutifs d'un poste et leurs fonctions.....	40
II.6 Fiabilité des réseaux électriques.....	42
II.7 Degré de fiabilité.....	44
II.8 Fiabilité des équipements d'électricité électroniques.....	45

II.9 Conclusion	46
-----------------------	----

*Chapitre III:
Détermination des paramètres et des facteurs influant sur la fiabilité
des équipements électriques*

III.1 Introduction	47
III.2 Données requises pour des évaluations de la fiabilité des systèmes	48
III.3 Analyse du retour d'expérience.....	48
III.4 Classification des matériels	48
III.5 Source de données	50
III.5.1 Recherche bibliographique – les recueils de données de fiabilité	50
III.5.2 Les recueils de données en exploitation.....	51
III.5.3 Les compagnies de collecte.....	52
III.6 Données additionnelles.....	52
III.7 Les tests d'hypothèse en fiabilité.....	54
III.7.1 Principe des tests d'hypothèse sur des paramètres de fiabilité.....	54
III.7.2 Test de comparaison d'un taux de défaillance à une valeur spécifiée.....	54
III.7.3 Test de comparaison de deux taux de défaillance.....	55
III.7.4 Test de tendance Mann sur l'évolution d'un taux de défaillance.....	55
III.7.5 Test de comparaison d'une moyenne de durée de vie à une valeur donnée.....	56
III.8 Vérification de l'hypothèse de la distribution exponentielle du temps de fonctionnement sans défaillance	57
III.8.1 Détermination de la distribution du temps de fonctionnement sans défaillance	58
III.8.2 Critère de χ^2 pour la vérification du caractère exponentiel.....	59
III.8.3 Application du test de χ^2 pour vérifier le caractère exponentiel de la distribution du temps de fonctionnement sans défaillance.....	59
III.9 Taux de défaillance constant.....	60
III.10 Taux de réparation.....	64
III.11 Détermination des facteurs influant sur la fiabilité des équipements électriques.....	66
III.12 Conclusion.....	70

*Chapitre IV
Processus Markoviens et semi-Markoviens*

IV.1 Introduction.....	71
IV.2 Processus stochastiques.....	72
IV.3 Qui est Markov, et qu'elle est l'analyse de Markov?.....	73
IV.4 Processus fondamentaux de Markov.....	73
IV.4.1 Modèles Standards de Markov.....	73
IV.4.1.1 Chaîne de Markov à temps discret.....	74
IV.4.1.2 Chaîne de Markov à temps continue.....	76
IV.4.1.3 Temps discret, états continus.....	79
IV.4.1.4 Temps continu, états continus.....	80
IV.4.2 Modèles non-markoviens.....	80
IV.4.2.1 Processus semi-markovien.....	80
IV.5 Choix des Etats.....	81
IV.6 Modèles homogènes de Markov.....	82
IV.7 Le concept d'état et de transition.....	82
IV.8 Procédé général du modelage de Markov.....	85
IV.9 Interactions des défaillances.....	87
IV.9.1 Analyse de Markov.....	87

IV.9.2 Deux composants indépendants.....	88
IV.9.3 Systèmes à Partage-Charge.....	91
IV.9.4 Systèmes à plusieurs éléments.....	93
IV.9.5 Formulation de Markov à plusieurs éléments.....	93
IV.9.6 Disponibilité.....	95
IV.9.7 Redondance de secours.....	95
IV.10 Conclusion.....	98

Chapitre V

Etude de la fiabilité des postes de distribution électriques par l'application des modèles semi-Markoviens

V.1 Introduction	99
V.2 Principales structures des schémas des RAE des installations électriques	100
V.3 Calcul des paramètres de fiabilité de chaque structure.....	101
V.4 Calcul du temps moyen de bon fonctionnement des systèmes par la méthode semi-markovienne.....	101
V.5 Calcul du temps moyen de réparation des systèmes par la méthode semi-markovienne.....	102
V.6 Disponibilité des systèmes.....	102
V.7 Application des processus semi-markoviens pour la détermination de la périodicité optimale de maintenance préventive des sources de réserve des réseaux d'alimentation électrique.....	102
V.7.1 Graphe d'états et de transitions du système (RAE).....	102
V.7.2 Calcul des probabilités de transitions entre états.....	103
V.7.3 Calcul du temps moyen T_{e_i} d'occupation à l'état e_i	104
V.7.4 Calcul des probabilités stationnaires d'occupation à l'état e_i (P_i).....	105
V.7.5 Calcul du temps moyen de bon fonctionnement du système (RAE).....	105
V.7.6 Calcul du temps moyen de réparation du système (RAE).....	106
V.7.8 Simulation de la méthode.....	106
V.7.9 Interprétation des résultats	110
V.8 Application des processus semi-markoviens pour l'étude de l'influence du temps de déclenchement du disjoncteur de couplage dans les réseaux d'alimentation électrique.....	111
V.8.1 Graphe d'états et de transitions du système (RAE).....	111
V.8.2 Calcul des probabilités de transitions entre états.....	112
V.8.3 Calcul du temps moyen T_{e_i} d'occupation à l'état e_i	112
V.8.4 Calcul des probabilités stationnaires d'occupation à l'état e_i (P_i).....	113
V.8.5 Calcul du temps moyen de bon fonctionnement du système (RAE).....	114
V.8.6 Calcul du temps moyen de réparation du système (RAE).....	114
V.8.8 Simulation de la méthode.....	114
V.8.9 Interprétation des résultats.....	118
V.9 Conclusion.....	119
Conclusion générale	120
Références bibliographiques.....	122

Annexes

Annexe I.....	126
Annexe II.....	132

Introduction générale :

L'Algérie doit pouvoir compter sur un approvisionnement d'électricité fiable et efficace pour le bien-être des Algériens comme pour le développement économique du pays. L'énergie électrique est beaucoup plus qu'un simple produit. C'est le sang de l'économie et de notre qualité de vie. Répondre aux espérances de la société pour une alimentation électrique disponible partout et peu coûteuse n'est pas simplement une option. Puisque le monde rentre à l'ère digitale, notre dépendance de la qualité d'alimentation en énergie électrique se développera en conséquence. L'infrastructure de notre système d'alimentation en énergie électrique et les stratégies et les politiques doivent changer.

Avec la croissance explosive du monde électronique, vient une demande accrue sans interruption d'une électricité extrêmement fiable des centres de calculs, des centres de transmission, et des équipements de fabrication à semi-conducteur, etc. Essentiellement, les clients ne veulent aucune panne de puissance, même pendant des périodes de la maintenance. Quelques secondes de panne de puissance ou même une baisse de tension peuvent causer à une compagnie des millions de Dollars aussi bien qu'une perte incalculable de réputation et d'un nombre significatif de clients. La fiabilité prend encore une nouvelle importance. Afin d'apporter une disponibilité élevée aux utilisateurs, une super source fiable d'énergie est une obligation. L'une des manières les plus économiques pour obtenir une alimentation d'énergie fortement fiable est la redondance.

Les exigences de la sûreté d'alimentation en énergie électrique et de la perfection de l'exploitation du réseau, donnent toujours nécessité à faire des études de fiabilité du système d'alimentation électrique qui tiennent compte de tous les critères techniques et conceptuels de ses éléments constitutifs.

La fiabilité est l'analyse des défaillances, de leurs causes et conséquences. C'est la caractéristique la plus importante de la qualité du produit car les choses doivent fonctionner d'une manière satisfaisante avant de considérer d'autres attributs de qualité. Habituellement, des mesures de performance particulières peuvent être incluses dans l'analyse de la fiabilité par le fait que si la performance est en dessous d'un certain niveau, on peut dire qu'une défaillance se produit. La fiabilité est une caractéristique fondamentale de tout système, installation ou produit. Cette caractéristique dépend de sa conception et de son exploitation. Pour qu'un système fonctionne correctement, il faut comprendre :

- ne pas tomber en panne (fiabilité),
- ne pas connaître de pannes dangereuses (sécurité),
- être en bon état de fonctionnement le plus souvent possible (disponibilité),
- être réparable rapidement (maintenabilité).

Le but de la maintenabilité est d'étendre la vie du matériel, ou au moins le temps moyen à la prochaine défaillance dont la réparation peut être coûteuse. En outre, on s'attend à ce que les politiques pertinentes de maintenance puissent réduire la fréquence des interruptions de service et les nombreuses conséquences indésirables de telles interruptions. La maintenance est juste l'un des dispositifs pour garder ou, au besoin, améliorer le niveau de la fiabilité des composants et des systèmes. D'autres incluent la croissance de la capacité du système, renforcent la redondance et utilisent des composants plus fiables.

Au delà des actions de maintenance courantes, l'amélioration de la fiabilité peut être obtenue par la réalisation de solutions purement techniques (redondance par exemple).

Cependant, ces alternatives sont fortement capitalistiques et nécessitent l'élaboration de modèles mathématiques permettant d'évaluer leur impact en vue d'une prise de décision rationnelle. Dans le cas général, l'estimation des indices de la fiabilité se fait sur la base de données statistiques tirées de l'historique des pannes des différents équipements de l'unité et de leurs durées de réparation.

L'objectif de ce travail objet de ce mémoire est donc une présentation d'une approche de modélisation de la fiabilité des postes de distribution de l'énergie électrique par la méthode de l'analyse de Markov. Le présent travail se compose de cinq chapitres et 2 annexes.

Le premier chapitre est essentiellement un chapitre descriptif des différentes notions qu'on peut rencontrer en étudiant la fiabilité des systèmes, à savoir la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité ainsi que la relation entre elles. Puis, on décrit les différentes méthodes (les plus répandues) utilisées pour l'évaluation de la fiabilité des différents systèmes telles que la méthode des schémas blocs, le diagramme en réseau, l'analyse d'arbre de défaillance et la simulation de Monte-Carlo. Ce chapitre se terminera par une synthèse bibliographique des différents travaux scientifiques réalisés dans l'étude de la fiabilité des réseaux d'alimentation électrique et en particulier sur les postes de distribution.

Les différents types de réseaux électriques (production, transport et transmission), leurs topologies, le degré de fiabilité fourni par chaque topologie, leur plan de protection ainsi que la structure des postes de distribution de l'énergie électrique et leurs éléments constitutifs vont être étudiés dans le deuxième chapitre. La fiabilité des réseaux électriques en général va être discutée sous différents aspects : la conception, l'exploitation du réseau ainsi que sa protection.

Les calculs prévisionnels de fiabilité ont pour objet de vérifier le niveau de fiabilité d'un système en fonction des données de fiabilité de ses constituants et de son architecture matérielle. Les données d'entrées sont issues de diverses sources: retours d'expérience, banques de données de fiabilité (IEEE, MIL-HDBK 217, NPRD), etc. Dans le troisième chapitre on trouvera les différentes méthodes de collecte de données, les méthodes de calcul des différents indices de fiabilité à partir des données pratiques ainsi que la méthode de vérification du caractère exponentiel de la fonction densité des défaillances des équipements électriques. En fin, une étude d'expertise pour déterminer les paramètres climatiques et non-climatiques qui ont le plus d'influence sur la fiabilité des équipements électriques va être présentée.

L'analyse de Markov fournit des moyens d'analyser la fiabilité et la disponibilité des systèmes dont les composants montrent des dépendances fortes. Dans le quatrième chapitre on va étudier les différents modèles standards de Markov ainsi qu'une description du modèle semi-markovien. Les différentes applications et méthodes de calcul de l'analyse de Markov dans le domaine de la fiabilité vont être décrites aussi.

Dans le cinquième et dernier chapitre nous allons aborder le volet estimation des paramètres de fiabilité, qui requière une importance considérable dans une étude de fiabilité étant donné que la qualité des modèles présentés dépendra de la qualité de l'estimation des paramètres de fiabilité. La fiabilité des postes de distribution de l'énergie électrique est visée en utilisant des méthodes d'analyse de Markov. Ces méthodes qui se prêtent le mieux à ce type de systèmes et tiennent compte des dépendances des défaillances de la structure choisie.

Chapitre I

Notions de fiabilité

I.1 Introduction :

La fiabilité est une discipline qui étudie les risques de défaillance d'un dispositif quelconque: c'est un peu la science des défaillances, qui fait appel à la fois à des théories mathématiques se perfectionnant sans cesse à des connaissances d'ordre technologique et à l'expérience.

En effet, il est certain que la fiabilité est née de l'introduction, dans des études de pannes autrefois menées de façon empirique, des théories de statistiques et de probabilités; mais on ne doit pas perdre de vue que la fiabilité est fondée sur l'expérience et qu'elle doit toujours s'appuyer sur la technologie.

La fiabilité a été un facteur de performance reconnu depuis au moins 50 ans. Pendant la deuxième guerre mondiale, l'équipe du missile V-1, commandée par Dr. Wernher von Braun, a développé ce qui était probablement le premier modèle de fiabilité [52]. Le modèle a été basé sur une théorie avancée par Eric Pieruschka que si la probabilité de survie d'un élément est $1/x$, alors la probabilité qu'un ensemble de n éléments identiques survivra est $(1/x)^n$. la formule dérivée de cette théorie s'appelle parfois la loi de Lusser (Robert Lusser est considéré comme le pionnier de la fiabilité) mais plus fréquemment est connue comme la formule de la fiabilité pour un système série : $R_s = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n$.

La fiabilité est devenue dans les années soixante la science des défaillances. C'est le 9 avril 1962 que le mot même de « Fiabilité » a été admis par l'Académie Française des Sciences pour traduire l'anglais « Reliability » [59]. La définition qui a été alors donnée par l'académie est la suivante :

« Grandeur caractérisant la sécurité de fonctionnement, ou mesure de la probabilité de fonctionnement d'un appareillage selon des normes prescrites ».

Dans la pratique, on constate l'existence de plusieurs définitions de la fiabilité. Au sens commun, la notion de fiabilité correspond à la confiance de l'utilisateur dans le matériel qu'il utilise. Au sens large, cette discipline (Science des défaillances) peut couvrir les domaines d'activité suivants :

- L'analyse de défaillance des systèmes.
- La fiabilité opérationnelle.
- Les banques de données de fiabilité.
- Les essais de fiabilité.
- La fiabilité prévisionnelle.
- Les méthodes prévisionnelles de fiabilité et de sécurité.
- L'assurance de la fiabilité.

I.2. Notions de base dans le domaine de la fiabilité :

Ici, on présente les différentes notions de base qu'on peut rencontrer en étudiant la fiabilité des systèmes :

I.2.1 Fonction de répartition et fonction de densité de probabilité :

On appelle fonction de répartition de la variable aléatoire X la probabilité pour que X prenne une valeur inférieure à x :

$$F_X(x) = P\{X < x\} \quad (\text{I.1})$$

Ici l'argument x peut prendre toute valeur réelle. La fonction de répartition possède les propriétés suivantes: avec la croissance de x la fonction $F_X(x)$ ne décroît pas, autrement dit si $x_2 > x_1$, alors :

$$F_X(x_2) \geq F_X(x_1) \quad (\text{I.2})$$

Elle admet les limites suivantes :

$$F_X(+\infty) = \lim_{x \rightarrow +\infty} F_X(x) = 1, \quad F_X(-\infty) = \lim_{x \rightarrow -\infty} F_X(x) = 0 \quad (\text{I.3})$$

La probabilité pour que X prenne une valeur inférieure à b et supérieure à a , autrement dit, la probabilité de l'inégalité : $a \leq X < b$, est calculée d'après la formule :

$$P\{a \leq X < b\} = F_X(b) - F_X(a) \quad (\text{I.4})$$

Pour tout c on a l'égalité :

$$P\{X = c\} = F_X(c+0) - F_X(c) \quad (\text{I.5})$$

Ainsi, si la fonction $F_X(x)$ est continue au point c , la probabilité pour que X prenne exactement la valeur c est égale à zéro. Si au point c la fonction $F_X(x)$ admet une discontinuité, la probabilité pour que X prenne la valeur c est donnée par la grandeur du saut de cette fonction en ce point. Toute fonction de $F(x)$ non décroissante, pour laquelle :

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1, \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0 \quad (\text{I.6})$$

et pour tout x :

$$\lim_{z \rightarrow x-0} F(z) = F(x) \quad (\text{I.7})$$

peut être considérée comme une fonction de répartition. Si l'on peut trouver une fonction $f_X(x)$, telle que pour toutes les valeurs de x on a l'égalité :

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(z) dz, \quad (\text{I.8})$$

on dit que la grandeur X est continue; on appelle $f_X(x)$ la densité de probabilité de X . Pour la densité de probabilité on a l'égalité :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) dx = 1 \quad (\text{I.9})$$

Et pour tous a et b :

$$P\{a \leq X < b\} = \int_a^b f_X(x) dx; \quad (\text{I.10})$$

Pour les valeurs de x pour lesquelles la dérivée $F'_X(x)$ existe, on a :

$$f_X(x) = F'_X(x) \quad (\text{I.11})$$

I.2.2 Fiabilité :

C'est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction donnée sans défaillance pendant un temps donné dans des conditions d'emploi d'environnement données [5]. Nous la désignons par $R(t)$.

Le terme « dispositif » est ici employé pour désigner tout composant, sous-système, système ou équipement que l'on peut considérer individuellement et essayer séparément. Par « fonction requise » on entend une fonction ou un ensemble de fonctions d'une entité dont l'accomplissement est considéré comme nécessaire pour la fourniture d'un service donné.

Au sens mathématique, la fiabilité est généralement caractérisée ou mesurée par la probabilité que l'entité accomplisse une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données, pendant une durée donnée; suivant les entités, la notion de période de temps devra être remplacée par celle de nombre de cycles, de la distance parcourue,....

Donc, la fonction *de fiabilité* $R(t)$ est la probabilité qu'un système fonctionnera avec succès sans défaillance dans l'intervalle à partir du temps 0 au temps t .

$$R(t) = P(T > t), t \geq 0 \quad (\text{I.12})$$

Où T est une variable aléatoire représentant le temps de la défaillance ou bien le temps jusqu'à la défaillance. La probabilité de défaillance, ou la non-fiabilité, est alors :

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T \leq t), \quad (\text{I.13})$$

qui est connue comme la fonction de distribution *de* T . Si la variable aléatoire *du temps jusqu'à la défaillance* T a une fonction *de densité* $f(t)$, donc :

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx \quad (\text{I.14})$$

La fonction de densité peut être mathématiquement décrite comme :

$$\lim_{Dt \rightarrow 0} P(t < T < t + Dt) \quad (\text{I.15})$$

Ceci peut être interprété comme la probabilité que le temps *de défaillance* T sera entre le moment t et le prochain intervalle de fonctionnement, $t + Dt$. Les trois fonctions, $R(t)$, $F(t)$ et $f(t)$

sont étroitement liées l'une l'autre. Si l'une d'entre elles est connue, tous les autres peuvent être déterminées. L'aptitude contraire sera dénommée « défiabilité », sa mesure est notée $\bar{R}(t)$:

$$\bar{R}(t) = 1 - R(t) \quad (\text{I.16})$$

Il est important de bien distinguer :

- Ø La fiabilité opérationnelle (ou fiabilité observée ou estimée) qui résulte de l'observation et de l'analyse du comportement d'entités identiques dans des conditions opérationnelles.
- Ø La fiabilité prévisionnelle (ou fiabilité prédite) qui estime une fiabilité future à partir des considérations sur la conception du système et la fiabilité de ses composants.
- Ø La fiabilité extrapolée, qui résulte d'une extension, par extrapolation définie ou par interpolation de la fiabilité opérationnelle à des durées ou des conditions de contraintes différentes.

A titre d'exemple, afin d'illustrer la définition stricte de la fiabilité, on considère une entité telle un disjoncteur. Appliquons au disjoncteur la définition habituelle de la fiabilité :

- Ø Les termes « aptitude à accomplir les fonctions requises » signifient aptitude d'un disjoncteur à établir, supporter de façon continue et interrompre dans les conditions normales du circuit ainsi que d'établir, de supporter pendant une durée spécifiée et d'interrompre des courants dans des conditions anormales du circuit telles que celles du court-circuit.
- Ø Par « conditions données » on entend les conditions spécifiées au service qui correspondent aux contraintes que le disjoncteur doit supporter (conditions d'environnement, contraintes mécaniques et électriques) et le nombre de manœuvres qu'il doit effectuer pendant un temps donné.
- Ø Le « temps donné » est l'intervalle de temps entre deux opérations de maintenance programmées.

Le temps moyen jusqu'à la défaillance (*MTTF*) est défini comme la valeur prévue de temps de vie avant qu'une défaillance se produise. Supposons que la fonction de fiabilité pour un système est donnée par $R(t)$, le *MTTF* peut être calculé comme :

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (\text{I.17})$$

1.2.3 Fonction du taux de défaillance :

La fonction du taux de défaillance ou la fonction de risque [61], est très importante dans l'analyse de la fiabilité parce qu'elle indique le taux de vieillissement du système. La définition de la fonction du taux de défaillance est donnée comme suit :

$$I(t) = \lim_{Dt \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + Dt)}{Dt \cdot R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{I.18})$$

La quantité $I(t) \cdot dt$ représente la probabilité qu'un dispositif d'âge t tombera en panne dans le petit intervalle du temps t à $t+dt$. L'importance de la fonction du taux de défaillance est qu'elle indique le taux de changement dans le comportement du vieillissement d'une population de composants au cours de la vie. Par exemple, deux conceptions peuvent fournir une même fiabilité à un point particulier de temps, mais les courbes du taux de défaillance peuvent être très différentes.

I.2.4 La maintenabilité :

Quand un système ne fonctionne pas d'une manière satisfaisante, la réparation est normalement effectuée pour détecter et corriger l'anomalie. Le système est restauré à l'efficacité opérationnelle en faisant un réglage ou en substituant un composant.

La maintenabilité c'est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou établie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits, soit achevée au temps t , sachant que l'entité est défaillante au temps $t = 0$:

$$M(t) = P[\text{la maintenance de } E \text{ est achevée au temps } t], \quad (\text{I.19})$$

Le concept de maintenabilité est apparu pour la première fois aux Etats-Unis dans l'armée américaine en 1954 [39].

La maintenabilité est définie comme la probabilité qu'un système tombé en panne sera restauré à un état de fonctionnement au cours d'une période de temps donnée quand la maintenance est exécutée selon des procédures et des ressources prescrites.

D'une façon générale, la maintenabilité est la probabilité d'isoler et de réparer un défaut dans un système en un temps donné. Posons que T est le temps de réparation ou le temps total d'arrêt. Si le temps de réparation T a une fonction de densité $g(t)$ alors la maintenabilité, $M(t)$ est définie comme la probabilité que le système tombé en panne sera de retour en service au temps t , c.-à-d.,

$$M(t) = P(T \leq t) = \int_0^t g(x).dx \quad (\text{I.20})$$

L'aptitude contraire sera dénommée « immaintenabilité »; sa mesure est notée $\overline{M}(t)$:

$$\overline{M}(t) = 1 - M(t) \quad (\text{I.21})$$

Cette notion ne concerne que les systèmes réparables. En d'autres termes, la maintenabilité caractérise l'aptitude d'un système à reprendre l'accomplissement de sa fonction (ou ses fonctions) après une défaillance.

Une mesure importante souvent utilisée dans les études de maintenance est le temps moyen de réparation (*MTTR*) ou le temps moyen d'arrêt. Le *MTTR* est la valeur prévue du temps de réparation.

I.2.4.1 Les politiques de maintenance : on distingue :

I.2.4.1.1 La maintenance préventive : elle vise à diminuer la probabilité de défaillance d'un système. Pour cela elle s'appuie sur :

- **La maintenance systématique :** qui consiste à changer suivant un échéancier établi à l'avance des éléments jugés comme trop usagés.
- **La maintenance conditionnelle :** c'est une maintenance préventive qui demande d'effectuer un diagnostic avant de remplacer l'élément visité.

I.2.4.1.2 La maintenance corrective : elle s'applique après la panne. En effet, des méthodes de dépannage rapide peuvent être appliquées [40].

I.2.5 La disponibilité :

Un autre concept important associé à la fiabilité est la disponibilité du système. C'est une mesure qui tient compte de la fiabilité et de la maintenabilité. La disponibilité c'est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné.

La fonction de disponibilité d'un système, dénotée par $A(t)$ est définie comme la probabilité que le système est disponible au temps t . Différente de la fiabilité qui se concentre sur une période où le système est exempt de défaillances, la disponibilité concerne un point de temps auquel le système ne soit pas à l'état de défaillance. Mathématiquement,

$$A(t) = P [\text{Le système est disponible au temps } t], \quad (\text{I.22})$$

La fonction de disponibilité, qui est une fonction complexe du temps, a une expression équilibrée ou asymptotique simple. En fait, habituellement nous sommes principalement concernés par des systèmes fonctionnant depuis longtemps. La disponibilité d'état d'équilibre ou asymptotique est donnée par :

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (\text{I.23})$$

L'aptitude contraire sera dénommée « indisponibilité »; sa mesure est notée $\bar{A}(t)$:

$$\bar{A}(t) = 1 - A(t) \quad (\text{I.24})$$

I.2.6 Relations entre fiabilité, maintenabilité et disponibilité:

Une fiabilité parfaite (c.-à-d., aucune défaillance, jamais, pendant la vie du système) est difficile à réaliser. Même lorsqu'un " bon " niveau de fiabilité est réalisé, quelques défaillances sont prévues. Les effets des défaillances sur les coûts de disponibilité des systèmes réparables peuvent être réduits au minimum avec un " bon " niveau de *maintenabilité*. Un système qui est fortement maintenable peut être remis au plein fonctionnement dans un minimum de temps avec un minimum dépense de ressources. La valeur de la disponibilité est un compromis entre la durée moyenne pour laquelle le produit est disponible pour effectuer ces fonctions et le temps de non-fonctionnement pour cause de panne, réparation, etc. Cela implique que la fiabilité du produit soit mise en balance avec les performances du service de maintenance afin d'obtenir la même valeur de disponibilité dans tous les cas.

I.2.7 La sécurité :

C'est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques [59]. La sécurité est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité E évite de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

I.2.8 Défaillance :

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. Afin de préciser cette notion de défaillance, on réalise plusieurs classifications des défaillances :

I.2.8.1 Classification en fonction de leur manifestation :

I.2.8.1.1 Défaillance progressive : défaillance due à une évolution dans le temps des caractéristiques d'une entité.

Note : en général, une telle défaillance peut être prévue par un examen ou une surveillance antérieurs.

I.2.8.1.2 Défaillance soudaine : défaillance qui ne se manifeste pas par une perte progressive des performances et qui n'aurait pas pu être prévue par un examen ou une surveillance antérieurs.

I.2.8.2 Classification en fonction de leur amplitude :

I.2.8.2.1 Défaillance partielle : défaillance résultant de la 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.

Note : les limites correspondant à cette catégorie sont des limites spéciales spécifiées à cette fin.

I.2.8.2.2 Défaillance complète : défaillance résultant de la déviation d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées telle qu'elle entraîne une disparition complète de la fonction requise.

Note : les limites correspondant à cette catégorie sont des limites spéciales spécifiées à cette fin.

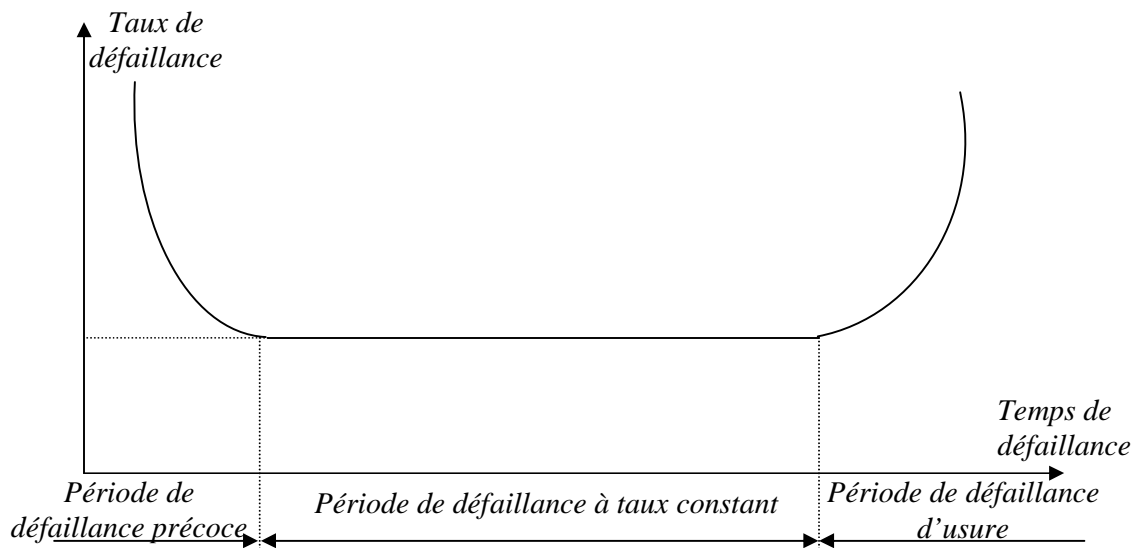


Figure I.1 : Taux de défaillance en fonction du temps.

1.2.8.3 Classification en fonction de leur date d'apparition dans la vie du système :

Considérons un ensemble d'entités réputées identiques et en fonctionnement depuis un temps initial. On définit le taux de défaillance comme la proportion, ramenée à l'unité de temps, des entités qui, ayant survécu jusqu'à un instant t arbitraire, ne sont plus en vie à l'instant $t+\Delta t$. Par passage à la limite, on obtient un taux de défaillance instantané qui est fonction de t . Il est fréquent que des entités présentent un taux de défaillance en fonction du temps suivant une courbe dite « en baignoire » ; voir la figure I.1.

Trois périodes sont ainsi définies :

- **Période de défaillance précoce :** période éventuelle, au début de la vie d'une entité, commençant à un instant donné et pendant laquelle le taux de défaillance décroît rapidement en comparaison du taux de défaillance de la période suivante.
- **Période de défaillance à taux de défaillance constant :** période éventuelle de la vie d'une entité pendant laquelle les défaillances apparaissent avec un taux sensiblement constant. Cette période est aussi parfois appelée durée de vie utile.
- **Période de défaillance d'usure :** période éventuelle de la vie d'une entité pendant laquelle le taux de défaillance augmente rapidement en comparaison de la période précédente.

Les définitions sont alors les suivantes :

s **Défaillance précoce (ou de jeunesse) :** défaillance qui survient au début de la vie d'une entité et dont le taux d'apparition est rapidement décroissant.

Note : le début de vie est compté à partir d'un instant spécifié : sortie de chaîne de fabrication, livraison.

s **Défaillance à taux constant :** défaillance qui apparaît avec un taux sensiblement constant pendant la durée de vie utile du matériel.

Note : elle est généralement catalectique.

s **Défaillance d'usure :** défaillance qui apparaît avec un taux rapidement croissant.

Note : elle est généralement due à des processus inhérents à l'entité (processus de détérioration, de corrosion,...)

1.2.8.4 Modes de défaillance :

Il est important d'introduire le concept du mode de défaillance : « un mode de défaillance est l'effet par lequel une défaillance est observée » [59].

Ainsi, à chaque défaillance d'un composant, 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 composant ont des effets sur les fonctions de celui-ci, le mode de défaillance sera dénommé du nom de l'effet.

A titre d'exemple, on considère un disjoncteur dont on a défini les fonctions précédemment. Les principaux modes de défaillance sont :

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

- S amorçage à la terre (interne).
- S amorçage à la terre (externe).
- S amorçage entre pôles (interne).
- S amorçage entre pôles (externe).
- S franchissement d'un pôle ouvert (interne).
- S franchissement d'un pôle ouvert (externe).

Ces modes de défaillance sont relatifs aux défaillances dites majeurs d'un disjoncteur, c'est-à-dire, celles qui entraînent la disparition d'une ou plusieurs de ses fonctions fondamentales.

I.2.8.5 Classification en fonction des effets :

Les défaillances survenant dans un système sont susceptibles d'avoir des effets très différents. Certaines défaillances n'affectent pas directement les fonctions du système et ne nécessitent qu'une action corrective qui ne pose pas de problème; d'autres affectent la disponibilité du système ou la sécurité. Dans une certaine mesure, on peut donc parler de conséquences mineures, significatives, critiques, catastrophiques (voir tableau I.1)

<i>Défaillance mineure</i>	<i>Défaillance qui nuit au bon fonctionnement d'un système en causant un dommage négligeable au dit système ou à son environnement sans toutefois présenter de risque pour l'homme.</i>
<i>Défaillance significative</i>	<i>Défaillance qui nuit au bon fonctionnement d'un système sans toutefois de dommage notable, ni présenter de risque important pour l'homme.</i>
<i>Défaillance critique</i>	<i>Défaillance qui entraîne la perte d'un (ou des) fonction(s) essentielles d'un système ou à son environnement en ne présentant, toutefois, qu'un risque négligeable de mort ou de blessure.</i>
<i>Défaillance catastrophique</i>	<i>Défaillance qui occasionne la perte d'une (ou des) fonction(s) essentielles d'un système ou à son environnement et/ou entraîne, pour l'homme, la mort ou des dommages corporels.</i>

Tableau I.1: Classification des défaillances en fonction des effets.

I.2.9 Panne :

La panne est « l'inaptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ». Après apparition d'une défaillance, on considère donc que l'entité est en panne; une panne résulte toujours d'une défaillance.

Cette constatation prête parfois à discussion. On peut théoriquement imaginer l'existence d'une panne sans qu'il y ait une cessation de l'aptitude à accomplir une fonction requise – et donc défaillance – si l'entité n'a jamais été apte à fonctionner. Ce-ci pourrait être dû à une erreur de conception. Remarquons d'une part qu'il est rare qu'une entité n'ait pas été au moins implicitement reconnue et, d'autre part, qu'il suffit d'admettre l'existence de la défaillance et de sa cause : l'erreur de conception.

Bien évidemment, les classifications des pannes sont semblables à celles des défaillances. Il existe cependant une classification spécifique aux pannes ; elle est fonction de l'aptitude des pannes à être constatées :

- **Panne intermittente** : panne d'une entité subsistant pendant une durée limitée après laquelle l'entité redevient apte à accomplir une fonction requise sans avoir été soumise à une opération de maintenance corrective.
- **Panne fugitive** : panne d'une entité qui est intermittente et difficilement constatable.
- **Panne permanente** : panne d'une entité qui persiste tant que n'ont pas eu lieu des opérations de maintenance corrective.
- **Panne latente** : panne qui existe mais qui n'a pas encore été détectée. On parle parfois de « panne cachée »

En outre, une panne est souvent caractérisée par :

Son état (de panne) : ou état de l'entité, caractérisé par son aptitude à accomplir la fonction requise.

Son mode de panne : ou effet par lequel une panne est observée.

1.2.10 Défaut :

On considère comme défaut, tout écart entre une caractéristique d'une entité et la caractéristique voulue, cet écart dépassant des limites d'acceptabilité dans des conditions données. Ainsi, le défaut est plutôt défini comme une non-conformité à des objectifs ou des clauses de spécifications.

Tout défaut conduit-il à une défaillance? Non, un défaut constaté au niveau du système ou un défaut d'un composant du système peut parfaitement ne pas affecter l'aptitude d'un système à accomplir une fonction requise.

Inversement, toute défaillance conduit-elle à un défaut? Oui, bien évidemment, puisque la cessation de l'aptitude de l'entité à accomplir une fonction requise est indiscutablement liée à un écart entre la caractéristique réelle et la caractéristique expirée de la fonction, il convient en effet de ne pas caractériser la défaillance par les effets immédiats et la panne par l'état de l'entité à plus long terme.

1.2.11 Relations fondamentales dans le domaine de la fiabilité :

1.2.11.1 Définitions du MTTF, MTTR, MUT, MDT, MTBF :

MTTF : durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance (Mean Time To Failure).

MTTR : durée moyenne de réparation (Mean Time To Repair).

MUT : durée moyenne de fonctionnement après réparation (Mean Up Time).

MDT : durée moyenne d'indisponibilité (Mean Down Time). Cette durée correspond aux phases suivantes :

- s Détection de la panne.
- s Réparation de la panne.
- s Remise au service.

Le MDT traduit en fait la moyenne des durées des indisponibilités consécutives à des défaillances.

MTBF : durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée (Mean Time Between Failure). Le temps moyen entre défaillances (MTBF) est une autre mesure importante dans les systèmes réparables. Ceci implique que le système est tombé en panne et a été réparé. Comme le MTTF et le MTTR; le MTBF est une valeur prévue d'une variable aléatoire du temps entre défaillances. Mathématiquement, $MTBF = MTTR + MTTF$.

Les différentes notions sont illustrées par le schéma suivant :

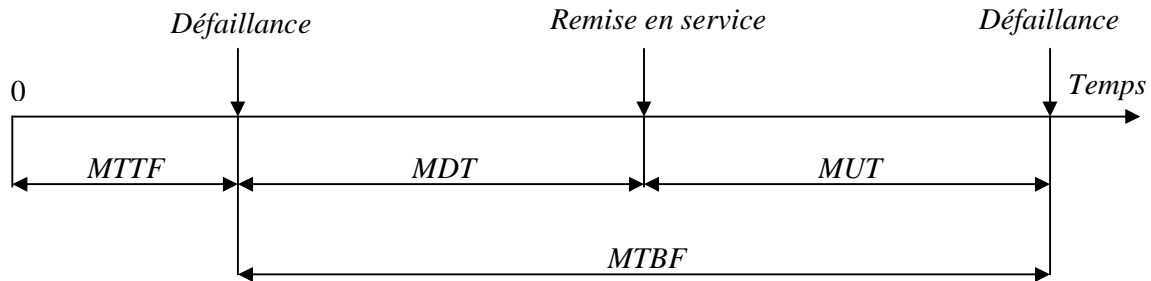


Figure I.2 : Représentation du MTTF, MDT, MUT et MTBF.

I.2.11.2 Quelques commentaires :

- s Le MUT est différent du MTTF, lorsqu'un système est remis en service après réparation, tous les composants n'ont pas été nécessairement réparés et le MUT caractérise la durée moyenne de fonctionnement d'un système qui aurait été réparé avant la remise en service.
- s On a la relation : $MTBF = MUT + MDT$.
- s Une autre signification est parfois donnée à MTBF : Moyenne des temps de bon fonctionnement. Cette définition est celle que donnons au MTTF ou au MUT. Cependant, pour de nombreux systèmes, MDT est faible devant MUT, la différence entre MTTF et MTBF est donc également faible.

I.2.11.3 Temps moyen de bon fonctionnement et temps moyen de réparation :

Soit T la variable aléatoire mesurant la durée de bon fonctionnement du système. La définition de la fiabilité s'écrit alors : $R(t) = P(T > t)$. La fonction de répartition $F(t)$ de la variable aléatoire T s'écrit alors :

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - R(t) \quad (I.25)$$

$F(t)$ représente la probabilité de défaillance sur $[0, t]$. La densité de défaillance $f(t)$, si elle existe vaut donc :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (I.26)$$

On en déduit alors le temps moyen de bon fonctionnement, s'il existe :

$$MTTF = \int_0^{\infty} t.f(t).dt = -\int_0^{\infty} t.\frac{dR(t)}{dt}.dt \quad (I.27)$$

D'où en intégrant par partie :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t).dt - [t.R(t)]_0^{\infty} \quad (I.28)$$

Et on a $MTTF < +\infty$

$$\Rightarrow MTTF = \int_0^{\infty} R(t).dt \quad (I.29)$$

Et de la même manière :

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)].dt \quad (I.30)$$

I.3. Techniques communes dans l'analyse de la fiabilité :

Il y a beaucoup de techniques dans l'analyse de la fiabilité. Les techniques les plus répandues dans les systèmes de calcul sont: la méthode des schémas blocs de fiabilité, les diagrammes en réseau, l'analyse d'arbre de défaillances et la simulation de Monte Carlo. Un autre outil analytique répandu et important, le modèle de Markov, sera introduit au chapitre 4.

I.3.1 Schémas blocs de fiabilité :

Un schéma bloc de fiabilité est l'un des outils conventionnels et le plus commun de l'analyse de la fiabilité des systèmes. Un avantage important d'utiliser l'approche du schéma bloc de fiabilité est la facilité de l'expression et de l'évaluation de la fiabilité.

Un schéma bloc de fiabilité montre la structure de la fiabilité du système. Il se compose de différents blocs et chaque bloc correspond à un module ou à une fonction du système. Ces blocs sont connectés l'un l'autre par certaines relations de base, tels que les séries et les parallèles. La relation série entre deux blocs est montrée par la figure I.3.a et parallèle par la figure I.3.b.

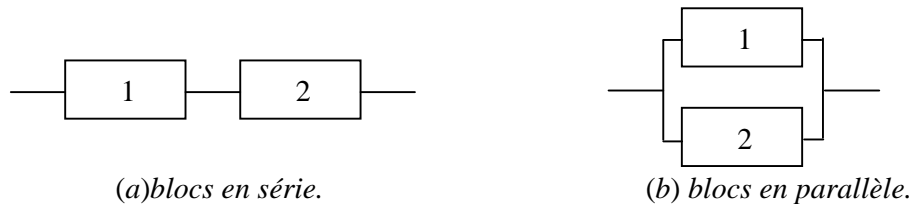


Figure I.3: relations de base entre deux blocs.

Soit un système S composé de n composants C_i . On note T_i , R_i , F_i : la durée de vie, la fonction de fiabilité et la fonction de défaillance de chacun des composants. Donc nous supposons dans ce paragraphe que les défaillances des différents composants du système sont indépendantes.

I.3.1.1 Système à structure série :

Un système présente une structure série si la défaillance de l'un de ses composants entraîne celle du système. La durée de vie du système S est définie par la donnée de conception R. on a ainsi, d'après la définition de l'indépendance des événements « $T_i > t$ » :

$$P(T > t) = P(T_1 > t \text{ et } T_2 > t \text{ et } \dots \text{ et } T_n > t) = P(T_1 > t) \cdot P(T_2 > t) \cdot \dots \cdot P(T_n > t) \quad (\text{I.31})$$

D'où l'on obtient :

$$R(t) = \prod_1^n R_i(t) \quad (\text{I.32})$$

I.3.1.2 Système à structure parallèle :

Un système présente une structure parallèle si l'état de marche d'un seul de ses composants entraîne celle du système. De la définition, résulte que le système est défaillant si chacun des composants est défaillant. La fonction de défaillance $F(t)$ est définie par :

$$\begin{aligned} F(t) &= P(T \leq t) = P(T_1 \leq t \text{ et } T_2 \leq t \text{ et } T_3 \leq t \text{ et } \dots \text{ et } T_n \leq t) \\ &= P(T_1 \leq t) \cdot P(T_2 \leq t) \cdot P(T_3 \leq t) \cdot \dots \cdot P(T_n \leq t) \end{aligned} \quad (\text{I.33})$$

d'où l'on déduit :

$$F(t) = \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (\text{I.34})$$

Puis :

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (\text{I.35})$$

I.3.1.3 Système à structure mixte :

Dans certains cas, un système qui n'est ni à structure série ni à structure parallèle, peut-être considéré comme étant à une structure composée, soit une série de sous-systèmes tels que chacun d'eux soit à structure série ou parallèle, soit une structure parallèle de sous-systèmes tels que chacun d'eux soit à structure série ou parallèle.

De tels systèmes peuvent ensuite se composer par série ou par parallèle pour définir d'autres systèmes plus complexes. Dans tous les cas, les formules qui précèdent permettent, par regroupement suivant ces sous-systèmes et par utilisation d'un calcul auxiliaire, de trouver les fonctions F et R pour le système mixte considéré.

Les blocs en structure série ou parallèle peuvent être fusionnés dans un nouveau bloc avec l'expression de la fiabilité des équations ci-dessus. En utilisant de telles combinaisons, n'importe quel système en série-parallèle peut être par la suite fusionné à un bloc et sa fiabilité peut être facilement calculée en utilisant à plusieurs reprises ces équations.

En outre, une bibliothèque pour des schémas blocs de fiabilité peut être construite afin d'inclure d'autres configurations ou relations. La description des notations supplémentaires est nécessaire et des formules particulières pour évaluer ces blocs doivent être obtenues et ajoutées à la bibliothèque. Un tel exemple est le système *simple m - parmi- n suivant*:

I.3.1.4 La configuration parallèle m/n :

Un système à n éléments est en configuration "parallèle m/n" (m < n) si ce système est en état de bon fonctionnement quand au moins m éléments parmi les n sont en fonctionnement (ex: logique majoritaire 2/3). Le diagramme de fiabilité est donné par la figure I.4. On suppose que les n éléments du système sont identiques et caractérisés par une fiabilité individuelle r et un taux de défaillance λ constant. Le nombre de composants en bon fonctionnement à l'instant t est donc régi par une loi binomiale de paramètres r et n. Les principales caractéristiques de fiabilité sont les suivantes [53]:

$$R_s = \sum_{k=m}^{k=n} C_n^k r^k (1-r)^{n-k} \tag{I.36}$$

avec: $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$

$$MTBF = \frac{1}{I} \left[\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \dots + \frac{1}{m} \right] \tag{I.37}$$

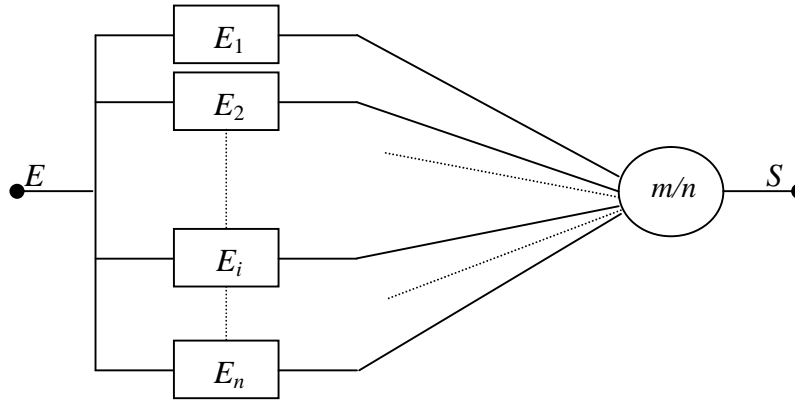


Figure I.4: Diagramme de fiabilité du système m/n.

Un système à n composants qui fonctionne (ou est "bon") si et seulement si au moins m composants des n fonctionnent (ou sont bons) s'appelle un système m-parmi-n:G. Un système à n composants qui tombe en panne si et seulement si au moins m des n composants tombent en panne s'appelle un système de m-parmi-n:F. En se basant sur ces deux définitions, un système m-parmi-n:G est équivalent à un système (n-m+1)-parti-n:F. Puisque la valeur de n est habituellement plus grande que la valeur de m la redondance est généralement établie par un système m-parmi-n [60]. Les deux systèmes parallèle et série sont des cas spéciaux du système m-parmi-n. Un système série est équivalent à un système 1-parmi-n:F et à un système n-parmi-n:G tandis qu'un système parallèle est équivalent à un système n-parmi-n:F et à un système 1-parmi-n:G.

I.3.2 Diagramme en réseau :

Les diagrammes en réseau sont généralement utilisés en représentant les réseaux de transmission composés de différents liens. La plupart des applications du réseau sont dans le domaine des transmissions. Le calcul de la fiabilité du réseau est l'application primaire des diagrammes en réseau.

Le but d'un réseau est d'exécuter des programmes en connectant les différents sites qui contiennent le traitement des éléments et des ressources. Pour les diagrammes simples du réseau,

le calcul n'est pas complexe et des schémas fonctionnels de fiabilité peuvent alternativement être utilisés. Par exemple, la figure I.5 montre les diagrammes en réseau qui sont connectés par des liens séries ou parallèles.

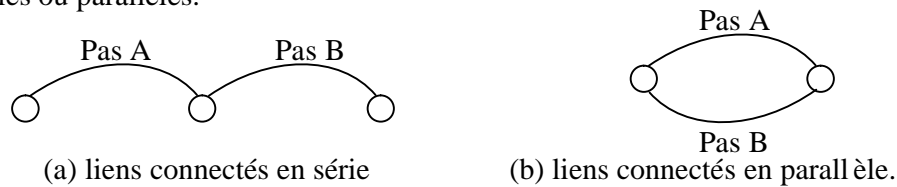


Figure I.5: Diagramme en réseau représentant deux liens en série et en parallèle.

La figure I.5 peut être alternativement représentée par les schémas blocs de fiabilité si nous visualisons chaque lien comme un bloc, représentés par la figure I.3. Le choix du schéma bloc de fiabilité ou du diagramme en réseau dépend de la convenance de leur usage et leur description pour certains problèmes particuliers. Habituellement, le schéma bloc de fiabilité est principalement utilisé dans un système modulaire qui se compose de beaucoup de modules indépendants et chaque module peut être facilement représenté par un bloc de fiabilité. Le diagramme en réseau est souvent utilisé dans les systèmes gérés en réseau où les nœuds du processus sont connectés et communiqués par des liens, tels que le système de calcul distribué, les réseaux d'une vaste zone locale et les chaînes de transmission radio etc.

1.3.3 Analyse d'arbre de défaillances :

L'analyse d'arbre de défaillances est un outil commun dans l'analyse de sûreté des systèmes. Elle a été adaptée dans un ensemble d'applications de la fiabilité. Un diagramme d'arbre de défaillances est le modèle graphique fondamental dans l'analyse d'arbre de défaillances. Tandis que le schéma bloc de fiabilité est le succès orienté d'une mission, l'arbre de défaillances montre quelles sont les combinaisons des défaillances des composants qui auront comme conséquence une défaillance du système. Le diagramme d'arbre de défaillances représente les relations logiques 'ET' et 'OU' parmi divers événements de défaillance. Plusieurs formes représentent différentes significations. En général, quatre formes de base correspondant à quatre relations sont montrées par la figure I.6.

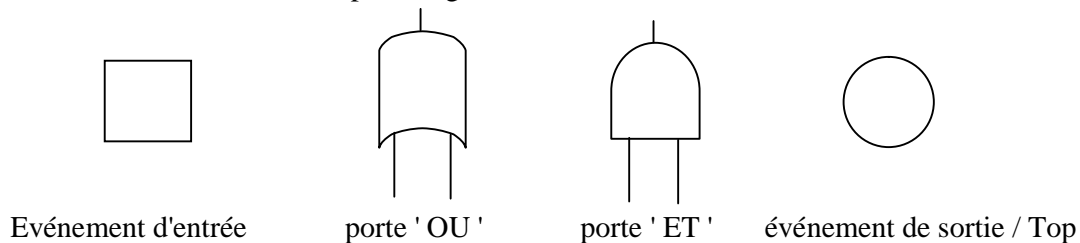


Figure I.6: Les quatre formes de base de l'analyse d'arbre de défaillances.

Puisque toutes les relations logiques peuvent être transformées en une combinaison de 'ET' et de 'OU', le statut d'événement de sortie / top peut être dérivé par le statut d'événements d'entrée et les connexions des portes logiques. Un diagramme d'arbre de défaillances peut décrire la propagation de la défaillance dans un système. Cependant, les systèmes complexes peuvent montrer un comportement de défaillance beaucoup plus complexe, y compris des modes de défaillance multiples et des modes de défaillance dépendants. Ces défaillances auront différents effets sur les résultats de la mission. L'analyse d'arbre de défaillances de base ne supporte pas ce type de modelage. D'ailleurs, la réparation et l'entretien sont deux opérations importantes dans l'analyse du système qui ne peuvent pas être exprimées facilement en utilisant une formulation d'arbre de défaillance.

I.3.4 Simulation de Monte-Carlo :

Dans une simulation de Monte-Carlo, un modèle de fiabilité est évalué à plusieurs reprises en utilisant des valeurs de paramètres tirés d'une distribution particulière. La simulation de Monte-Carlo est souvent employée pour évaluer la moyenne des temps de bon fonctionnement pour les systèmes complexes. Ici, les étapes suivantes s'appliquent :

1. Simuler les nombres aléatoires pour chaque variable aléatoire requise dans le modèle de simulation.
2. Evaluer la fonction désirée.
3. Répéter les étapes 1 et 2 n fois, pour obtenir *les n échantillons* de la fonction désirée. Par exemple, les temps de défaillance du système seront $T(1), T(2), \dots, T(n)$.
4. Estimer le paramètre désiré. Par exemple, la valeur prévue du temps de défaillance du système peut être obtenue à partir :

$$E(t) = \overline{MTBF} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T(i) \quad (\text{I.38})$$

5. Obtenir une estimation de la précision de l'estimation, telle que l'écart type d'échantillon de la valeur estimée.

La simulation de Monte-Carlo peut traiter une variété de modèles des systèmes qui ont des configurations complexes et des taux de défaillances. Cependant, la simulation de Monte-Carlo exige souvent le développement d'un programme opérateur, à moins que la configuration du système ajuste un modèle standard. Elle exige également des temps de traitements prolongés si des calculs précis et convergents sont désirés.

I.4. Amélioration de la fiabilité par la redondance :

I.4.1 Définitions : le terme de redondance est un terme général, qui s'emploie lorsqu'un équipement ou un composant peut remplacer un autre équipement ou composant qui est défaillant. Toute structure autre que la structure série peut être considérée comme redondante. En ce sens, certains composants peuvent être défaillants, sans pour autant que le système cesse d'être utilisable. Par contre, une structure série ne présente aucune redondance.

De façon plus particulière, la redondance est une technique d'amélioration de la fiabilité, qui consiste à disposer en parallèle deux ou plusieurs composants, sous-structures ou équipements complets. La théorie de la fiabilité des systèmes permet d'évaluer dans chaque cas la fiabilité qu'on obtiendra en procédant ainsi, lors de la conception d'un système.

Une méthode commune pour améliorer la performance de la fiabilité d'un système est par la redondance des composants, par exemple, plus d'un transformateur dans une sous-station. Typiquement, chaque composant de l'ensemble redondant a la capacité suffisante, peut-être basé sur une estimation de secours, pour supporter le chargement maximal que le système peut être appelé à fournir. Une telle pleine redondance est pertinente en améliorant la performance de la fiabilité du système mais elle est habituellement tout à fait chère. Si le chargement du système est variable, la possibilité existe pour réduire les coûts en ramenant la capacité des composants redondants aux niveaux moins que le demandé [28], pour satisfaire le chargement maximal du système et où ils souffriraient de ce fait une surcharge. Une surcharge pourrait avoir comme conséquence une interruption réelle de la charge ou peut-être seulement une certaine perte de la vie du composant surchargé, selon le schéma de protection en service. On peut distinguer deux types de redondances :

I.4.2 Redondance active : dans le cas de la redondance active, tous les composants du système fonctionnent en permanence, ni lorsqu'ils ne sont pas indispensables, compte tenu de l'état de l'ensemble des composants [33]. Les durées de vie des composants sont mutuellement indépendantes en probabilité. Ce-ci suppose cependant qu'un composant a la même fiabilité qu'il assure seul une certaine fonction ou que d'autres le déchargent en partie de son travail.

I.4.3 Redondance passive : la redondance passive consiste à prévoir des composants ou des sous-structures « en réserve », non utilisés tant que le besoin ne s'en fait pas sentir. Si une interruption du fonctionnement du système est acceptable, la mise en service de ces éléments se fera manuellement, par commutation de circuit ou par remplacement des éléments défectueux; dans le cas contraire, une commutation automatique peut être prévue.

On admet généralement que les éléments non utilisés ne sont pas soumis à avarie; le taux d'avarie d'un composant redondant dépend du fait qu'il a ou non été mis en service (et, dans le premier cas de son âge, lequel est différent de celui du système), et par conséquent de l'état des autres composants du système. L'étude de la redondance passive est très liée à celle de l'entretien des équipements. En particulier, si la mise en service des éléments redondants se fait non pas par une simple commutation mais par remplacement physique des éléments défectueux, le problème du nombre d'éléments redondants à prévoir n'est autre que celui du stock de pièces de rechanges à constituer pour l'entretien du système [15].

I.4.4 Redondance optimale : en construisant un système en vue d'une utilisation donnée, on peut se poser le problème de la redondance optimale c'est à dire du choix du nombre de composants redondants à mettre en place pour rendre maximale ou minimale une certaine fonction qui correspond à un certain critère. Ces critères peuvent être :

- s la fiabilité du système elle-même, ceci pour un nombre total donné de composants.
- s le coût total pour une fiabilité fixée, avec une contrainte sur le nombre de composants.
- s ou encore un critère de poids, de volume, etc....

On sait depuis Pareto que l'optimisation de plusieurs fonctions économiques à la fois peut, du point de vue mathématique, ne pas avoir de sens. Généralement, on se donne une et une seule fonction économique et un ensemble de contraintes, et le problème consiste alors à trouver l'optimum (maximum ou minimum suivant le cas) de la fonction économique en respectant les contraintes. Dans certains cas, on peut étendre ces problèmes d'optimisation à ce qu'on nomme une optimisation avec paramétrage, c'est-à-dire étudier l'évolution de l'optimum en faisant varier un paramètre, voir plusieurs.

Un grand nombre de problèmes d'optimisation peuvent être posés à partir de la notion du système redondant. En particulier, on peut se donner comme fonction à optimiser la fiabilité du système ou le nombre de composants et des contraintes ou spécifications sur les coûts, mais à la place des coûts on pourrait tout aussi bien considérer des poids ou des volumes ou tout autre aspect physique ou technique. La recherche de la redondance optimale sera guidée par l'intérêt de chercher une amélioration au niveau des composants et non pas au niveau de la structure complète ou même des sous-structures.

I.5. Optimisation de la maintenance par la fiabilité :

La méthode O.M.F. (optimisation de la maintenance par la fiabilité), a pour but:

- * réduire globalement les coûts;

- * assurer la traçabilité des analyses réalisées et des choix retenus en vue des évolutions ultérieures;
- * introduire les mécanismes permettant la réactualisation de la maintenance (y compris sa réduction);
- * adapter la maintenance aux enjeux en fonction du niveau de tension, du type de blocs de coupure et des conditions locales (cas des réseaux électriques).

Donc l'intérêt de cette méthode est de proposer une approche analytique et probabiliste s'appuyant sur les techniques de sûreté de fonctionnement (analyse de fiabilité des équipements). Les différentes étapes de la méthode O.M.F. sont:

- * analyse fonctionnelle.
- * retour d'expérience, fiabilité.
- * A.M.D.E.C.
- * criticité des défaillances.
- * touches de maintenance.
- * sélection et regroupement des tâches.

a. L'analyse fonctionnelle : elle permet de relier les sous-composants aux fonctions de l'équipement et ainsi de juger de l'importance des conséquences des défaillances.

b. Le retour d'expérience : le traitement des bases de données d'avaries issues du retour d'expérience apporte des informations qualitatives sur les modes de défaillance et leurs effets, et permet dans certains cas de quantifier les taux de défaillance par composant et par mode. Le recours aux jugements d'experts pour ces estimations apporte non seulement des résultats, lorsque le retour d'expérience est insuffisant, mais aussi une comparaison et une validation de ces taux de défaillance. Les valeurs des taux de défaillance et les fréquences retenues se retrouvent dans le tableau A.M.D.E.C.

c. L'A.M.D.E.C. : cette technique analytique largement utilisée dans les études de sûreté de fonctionnement a pour objet la description détaillée de toutes les défaillances. Un tableau A.M.D.E.C (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités) est généralement constitué des rubriques répertoriées au tableau ci-dessous:

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Effets de la défaillance	Gravité	Fréquence	Criticité	Observations

d. La criticité des défaillances : la dernière étape du tableau A.M.D.E.C clos l'analyse de fiabilité en notant la criticité des défaillances de chaque composant par le produit [21]:

$$\text{Criticité} = \text{Fréquence} \times \text{Gravité}.$$

e. Les tâches de maintenance : le principe est de rechercher la ou les tâches de maintenance susceptibles de détecter un mode de défaillance précédemment identifié. Des périodes de maintenance sont estimées en fonction de la vitesse d'évolution du phénomène physique (le mode) à détecter. Les tâches de maintenance sont également notées en fonction de leur efficacité à détecter un mode donné et de leur facilité de mise en œuvre. Le produit de ces deux caractéristiques de maintenance conduit à l'applicabilité de la tâche.

I.6. Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité :

Nous présentons ici quelques propriétés des principales lois utilisées en fiabilité.

I.6.1 Lois discrètes :

Dénomination de la distribution	Valeurs possibles	Probabilités	Moyenne	Variance
Binomiale	0, 1, 2, ..., n	$P_n(m) = C_n^m p^m q^{n-m}$	np	npq
Hypergéométrique	0, 1, ..., min(M, n)	$P_m = \frac{C_M^m C_{N-M}^{n-m}}{C_N^n}$	$n \frac{M}{N}$	$\frac{M(N-M)n(N-n)}{N^2(N-1)}$
De poisson	0, 1, 2, ...	$P_m = \frac{I^m}{m!} e^{-I}$	λ	λ
Géométrique	0, 1, 2, ...	$P_m = pq^{m-1}$	$\frac{1}{p}$	$\frac{q}{p^2}$

Tableau I.2: Principales caractéristiques des lois discrètes.

a. Loi binomiale : considérons un expérimental dont l'ensemble des événements se réduit à $\{A, \bar{A}, \Phi, \Omega\}$. Soient p la probabilité de réalisation de A et (1-p) celle de \bar{A} . La variable aléatoire discrète X représentant le nombre de réalisations de l'événement A au cours de n expériences est distribuée suivent une loi binomiale de paramètres (p, n) telle que :

$$P(X=k) = C_n^k p^k (1-p)^{n-k} \quad 0 \leq k \leq n \quad 0 \leq p \leq 1 \quad (I.39)$$

On en déduit la fonction de répartition :

$$F(k) = P(x \leq k) = \sum_{i=0}^k C_n^i p^i (1-p)^{n-i} \quad (I.40)$$

puis :

$$E[X] = n.p; S^2[X] = n.p.(1-p) \quad (I.41)$$

En fiabilité, on rencontrera cette loi lorsqu'un dispositif a une probabilité γ de défaillance à la sollicitation. Au bout de n sollicitations, le nombre de défaillances est distribué suivent une loi binomiale B(γ , n).

Lorsque $n \rightarrow \infty$ et que $n.p$ reste constant, la loi binomiale tend vers une loi de Poisson de paramètre $m = n.p$. L'approximation est bonne dès que $n > 10$ et $p < 0.1$ [39].

Lorsque $n \rightarrow \infty$, la loi binomiale tend vers une loi normale de moyenne $m = n.p$ et de variance $s^2 = n.p.(1-p)$. L'approximation est bonne pour $p = 1/2$ et mauvaise lorsque $p < 1/(n+1)$ ou $p > n/(n+1)$ et en dehors de l'intervalle $[m-3s, m+3s]$.

b. Loi de Poisson : la loi de Poisson est une loi à un paramètre positif m défini par :

$$P(X = k) = e^{-m} \cdot \frac{m^k}{k!} \quad (I.42)$$

On en déduit la fonction de répartition:

$$F(k) = \sum_{i=0}^k e^{-m} \cdot \frac{m^i}{i!} = 1 - \frac{\Gamma(k+1, m)}{k!} \tag{I.43}$$

avec $G(k+1, m) = \int_0^m t^k \cdot e^{-t} \cdot dt$ fonction gamma incomplète.

D'où :

$$E[X] = m \text{ et } S^2[X] = m \tag{I.44}$$

I.6.2 Lois continues : ici, nous étudions six principales lois utilisées en fiabilité. Le tableau ci-dessous regroupe les principales caractéristiques de ces lois, $Y(t)$, représente la fonction d'Heaviside définie par :

$$\begin{cases} Y(t) = 0 & \text{pour } t < 0 \\ Y(t) = 1 & \text{pour } t \geq 0 \end{cases} \tag{I.45}$$

Lois	Densité de probabilité	Moyenne	Variance
Exponentielle	$\lambda \cdot e^{-\lambda t} \cdot Y(t)$ $\lambda > 0$	$1/\lambda$	$1/\lambda^2$
Normale	$\frac{1}{s\sqrt{2p}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t-a}{s}\right)^2\right) Y(t)$ $\sigma > 0$	a	σ^2
Log-normale	$\frac{1}{ts\sqrt{2p}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t-a)}{s}\right)^2\right) Y(t)$ $\sigma > 0$	$\exp(a+\sigma^2/2)$	$e^{2a+s^2} (e^{s^2} - 1)$
De Weibull	$\frac{b}{h} \left(\frac{t-g}{h}\right)^{b-1} \exp\left(-\left(\frac{t-g}{h}\right)^b\right) Y(t); \eta > 0, \beta > 0$	$\eta^2 \Gamma(1+1/\beta) + \gamma$	$\eta^2 [\Gamma(1+2/\beta) - \Gamma^2(1+1/\beta)]$
Gamma	$\frac{1}{\Gamma(b)} l^b t^{b-1} e^{-l t} Y(t)$ $\beta > 0, \lambda > 0$	β/λ	β/λ^2
Du khi deux	$\frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma(n/2)} t^{\frac{n-2}{2}} \exp\left(-\frac{t}{2}\right) Y(t); v \text{ entier} > 0$	v	2v

Tableau 3 : Principales caractéristiques des lois continues.

a. Loi exponentielle : la loi exponentielle est très fréquemment utilisée en fiabilité car elle est une des seules qui permettent de réaliser les calculs. Le taux de défaillance d'un élément dont la distribution des temps de bon fonctionnement est une loi exponentielle, est constant et égale à λ , il s'avère que cette hypothèse est assez souvent réaliste.

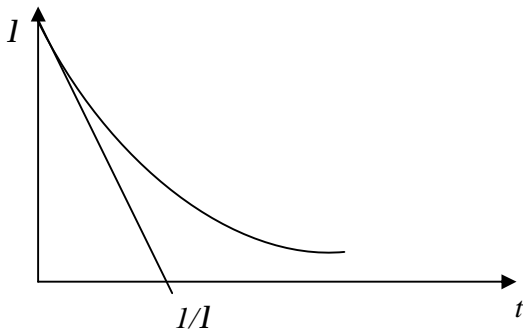


Figure I.7: distribution de la loi exponentielle.

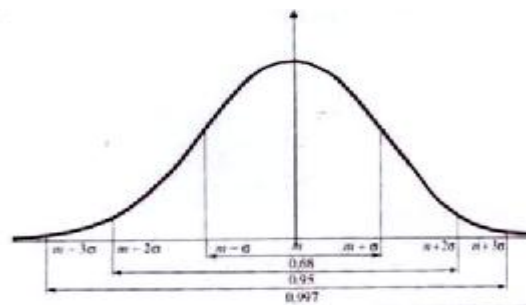


Figure I.8: distribution de la loi normale.

b. Loi normale : la loi normale ou loi de Gauss est symétrique par rapport à la moyenne m . Une loi normale de moyenne m et d'écart type σ sera notée $N(m,\sigma)$. La loi $N(0,1)$ est appelée loi normale réduite. Si x suit une loi normale $N(m,\sigma)$, $Y = (x-m)/\sigma$ suit une loi normale réduite.

c. Loi log-normale : une variable aléatoire est distribuée suivant une loi log-normale si son logarithme est distribué suivant une loi normale $N(a,b)$.

La somme de deux variables indépendantes distribuées normalement étant normale, il en résulte que le produit de deux variables indépendantes distribuées log-normalement est distribué suivant une loi log-normale. Pour les petites valeurs de b , la loi est presque normale. On utilisera souvent cette loi pour traiter les problèmes d'incertitudes sur les données.

d. Loi de Weibull : γ est le paramètre de position et il est généralement nul. Lorsque $\alpha=0$ et $\beta=1$, on retrouve la loi exponentielle. La loi de Weibull est très intéressante car en jouant sur les différents paramètres, on peut représenter un grand nombre de distributions expérimentales.

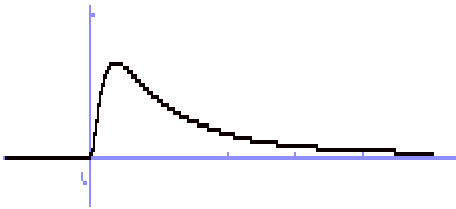


Figure I.9: distribution de la loi log-normale.

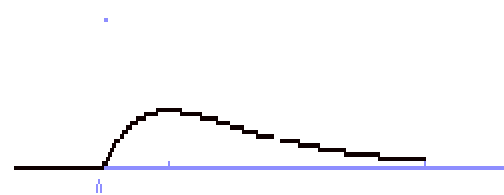


Figure I.10: distribution de la loi gamma de paramètres (2,1).

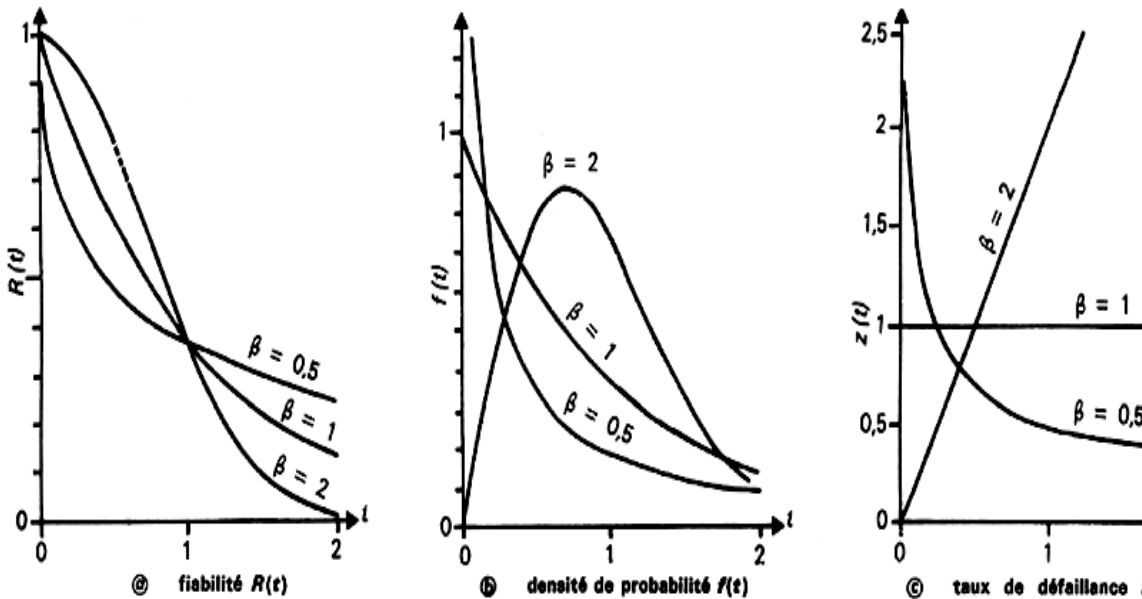


Figure I.11: Principales propriétés de la distribution de Weibull.

e. La loi gamma : d'après le tableau numéro 3, la répartition de la loi gamma s'écrit :

$$F(t) = \frac{\int_0^t 1^b x^{b-1} e^{-1x} dx}{\Gamma(b)} \tag{I.46}$$

Lorsque le paramètre β est entier, la loi s'appelle loi d'Erlang et :

$$F(t) = 1 - e^{-\beta t} \sum_{k=1}^b \frac{(t)^{k-1}}{(k-1)!} \quad (\text{I.47})$$

Lorsque $\beta = 1$, on trouve la loi exponentielle.

f. Loi du Khi-deux : considérons v variables normales réduites X_i indépendantes. On montre alors que $X_n = \sum_{i=1}^n X_i^2$ suit une loi du Khi-deux de paramètre v . Il en résulte que $X_{v_1} + X_{v_2}$ suit une loi du Khi-deux de paramètre $v_1 + v_2$ si toutes les variables aléatoires X_i sont indépendantes. S'il existe p relations linéaires entre les variables, on doit remplacer v par $v-p$. C'est pourquoi l'on appelle le paramètre v : degré de liberté. La loi du Khi-deux est liée à la loi gamma. Posons en effet $k = (v/2)-1$ et $y=t/2$, on obtient alors la densité d'une loi gamma :

$$f(y) = \frac{y^k e^{-y}}{\Gamma(k+1)} \quad (\text{I.48})$$

La fonction de répartition de la loi du Khi-deux est tabulée de manière à donner les valeurs $\chi_{\alpha}^2(v)$ telles que :

$$\int_0^{\chi_{\alpha}^2(v)} \frac{t^{\frac{n-2}{2}} e^{-\frac{t}{2}}}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} dt = \alpha \quad (\text{I.49})$$

$\chi_{\alpha}^2(v)$ est donc une fonction décroissante de α et une fonction croissante de v .

I.7. Recherche bibliographique sur les travaux publiés sur la fiabilité des systèmes de distribution de l'énergie électrique :

Avant les années 60, la fiabilité des systèmes d'alimentation en énergie électrique proposée a été souvent estimée en extrapolant l'expérience obtenue à partir des systèmes existants et en employant des méthodes de la "règle du pouce" (règle empirique permettant d'évaluer grossièrement ce que devraient être les performances d'un système) pour prévoir la fiabilité de nouveaux systèmes. Pendant les années 60, un travail considérable a été fait dans le domaine de la fiabilité des systèmes d'alimentation de l'énergie électrique et quelques excellents papiers ont été publiés. Les publications les plus significatives étaient deux papiers publiés par un groupe de Westinghouse Electric Corporation et Public Service and Gas Company authors [20, 43]. Ces articles ont introduit le concept de l'environnement d'une fluctuation pour décrire le taux de défaillance des composants du système de transmission d'énergie électrique. Mais les techniques présentées étaient des approximations qui ont fourni des résultats avec une différence de quelques pourcents de ceux obtenus en utilisant des techniques plus théoriques, telles que des processus de Markov.

La référence [14] présente une méthodologie qui permet de tenir en compte des coûts d'exploitation (calculés à partir des indices de fiabilité) dans la définition de la fonction objective à minimiser, où une nouvelle formulation du problème de la conception optimale des réseaux radiaux de distribution a été présentée. La méthodologie tient compte de l'investissement initial et des coûts d'exploitation en quantifiant la qualité de l'alimentation après conception. Cette méthode est basée sur des estimations. L'article [36] décrit la méthodologie employée dans la compagnie "Merlin Gerin" pour surveiller la fiabilité et la maintenabilité pendant le cahier des charges, la conception, la validation et la vie utile du matériel de protection et de contrôle. Le calcul de la fiabilité du matériel de la dernière génération des dispositifs numériques disponibles a été fait en utilisant le Military Handbook 217 où on a utilisé la méthode du FMECA qui est la

première étape principale pour savoir la façon comment le matériel peut avoir des défauts de fonctionnement. Mais l'utilisation des données du MIL HDBK 217 peut avoir comme conséquence des résultats pessimistes que la réalité.

La référence [1] décrit une technique analytique et une approche de simulation de Monte Carlo pour déterminer les indices de la fiabilité des systèmes de distribution de l'énergie électrique. La méthode analytique proposée est basée sur la technique du 'dispositif des étapes' de sorte que l'impact du vieillissement du matériel puisse être incorporé au modèle. La méthode du 'dispositif des étapes' a été employée pour convertir le processus non-Markovien en un processus de Markov. L'impact du vieillissement du matériel peut être représenté en supposant une distribution non exponentielle (par exemple log-normale) pour les temps de fonctionnement et de défaillance des équipements. La référence [4] illustre une technique pour l'évaluation de la fiabilité des systèmes radiaux complexes de distribution. Un système radial complexe de distribution est réduit à une série de postes de distribution généraux en utilisant des réseaux équivalents de fiabilité. Des équations de base sont employées pour calculer les différents indices du point de charge. Les évaluations de la fiabilité pour plusieurs systèmes de distribution pratiques de test ont montré que cette technique est meilleure que l'approche conventionnelle du FMEA, car elle évite la procédure exigée de trouver les modes de défaillance et leur effet sur les points de charge individuels ce qui résulte en une réduction significative du temps de calcul.

Pour améliorer la fiabilité d'alimentation en énergie électrique, l'attention est accordée à augmenter le niveau de l'automatisation des systèmes de distribution. Une partie importante de cette automatisation est la restauration automatique du service, qui est désignée habituellement sous le nom de la restauration automatique du service de secours. En cas d'une défaillance du système, la restauration automatisée peut rapidement récupérer la charge qui a été déconnectée en transférant automatiquement celle-ci à une autre partie du système. La restauration de la charge dans des systèmes de distribution est traditionnellement exécutée en ouvrant / fermant deux types de commutateurs, c.-à-d., sectionner et ouvrir normalement des commutateurs de connexion. Avec l'introduction des fonctions d'automatisation de l'alimentation aux systèmes de distribution, il est nécessaire d'évaluer quantitativement l'effet de ces fonctionnements automatiques sur la fiabilité de l'alimentation du consommateur, et de comparer l'amélioration résultante de la fiabilité au coût requis pour la réaliser. Dans [27] on a proposé une technique en trois étapes pour évaluer l'impact de la restauration automatique sur la fiabilité du système de distribution de l'énergie électrique. La première étape évalue les indices de fiabilité du système avec son niveau initial d'automatisation de la restauration du service. La deuxième étape analyse comment les indices de fiabilité de l'abonné sont affectés en remplaçant des actions manuelles de restauration par des fonctionnements automatisés de reprise de charge. La dernière étape étudie comment la charge non-servie peut être restaurée par la reconfiguration du réseau en utilisant les lignes de connexion supplémentaires automatisées, et puis évalue comment les indices de fiabilité peuvent être améliorés en fournissant les voies d'accès de transfert de charge automatisées supplémentaires. Tandis que [9] examine les améliorations de la fiabilité réalisées en utilisant une stratégie de restauration à deux étapes plutôt qu'une stratégie de restauration à simple étape après l'apparition du défaut. Dans une stratégie à deux étapes, une première étape restaure rapidement un ensemble limité des consommateurs à l'aide des commutateurs automatisés. Une étape antérieure restaure les consommateurs supplémentaires à l'aide des commutateurs manuels. Les stratégies sont comparées en utilisant un algorithme prédictif d'évaluation de la fiabilité. Un modèle prédictif peut ne pas refléter le vrai comportement futur du système.

Une ligne aérienne d'alimentation électrique peut être considérée comme une collection de composants dont chacun contribue d'une façon particulière à sa fiabilité donc un système aérien de distribution est une collection de telles lignes. Ainsi, le travail [55] traite le système de distribution comme une entité holistique avec le but de mesurer le comportement des défaillances comme une indication d'amélioration ou de détérioration de la fiabilité. La comparaison est faite en utilisant des études de cas d'un grand réseau urbain et d'un vaste système rural basées sur l'analyse de la tendance, la statistique de Laplace et les limites de confiance. Une analyse comparative est faite pour déterminer si les temps entre les arrivées des événements de défaillance du système semblent exponentiels et cependant, peuvent être modélés comme processus homogène de Poisson (HPP) ou si ceux-ci devaient être traités comme des événements d'un processus de Poisson non homogène (NHPP). Le papier [8] récapitule l'optimisation de la fiabilité et l'élaboration des méthodes mathématiques et numériques pour l'évaluation de la fiabilité du système de distribution de l'énergie électrique en tenant compte des caractéristiques particulières liées à sa maintenance, où la fiabilité et la disponibilité d'une zone d'alimentation d'énergie a été analysée sous différentes variantes qui dépendent de la maintenabilité et des tests périodiques appliqués au système d'alimentation pour améliorer sa fiabilité.

Les soucis actuels sont la plupart du temps liés respectivement aux champs des algorithmes efficaces, au temps de calcul et à l'exactitude des méthodes employées. Néanmoins, les dimensions des systèmes de plus en plus grandes, le matériel électrique non homogène, et l'exigence élevée des clients représentent de nouvelles conditions qu'ils doivent être réunies par les concepteurs pour satisfaire des modèles précis s'agrandissent. Dans [30] on trouve une contribution au niveau du modelage de la sûreté de fonctionnement de la structure des systèmes d'alimentation de l'énergie électrique avec les réseaux de Pétri (RP). Une nouvelle méthodologie d'évaluer la fiabilité des systèmes de distribution en considérant l'impact des défaillances des systèmes de la génération et de la transmission (G&T) est présentée dans [35]; les systèmes de G&T sont représentés par un réseau équivalent fictif dont les paramètres sont obtenus par la simulation non séquentielle de Monte Carlo. Le réseau équivalent de G&T est alors connecté au réseau de distribution et est analysé en utilisant la théorie des ensembles de coupe minimale. Les indices traditionnels de distribution (par exemple SAIFI, SAIDI, etc...) aussi bien que les indices du coût de perte de charge sont détaillés pour mesurer la contribution des systèmes de G&T et de distribution sur les indices du système global (donc les résultats peuvent être des approximations grâce à l'utilisation du système équivalent). L'étude présentée en [11] analyse et compare différentes méthodes (analyse d'arbre de défaillances, processus de Markov, Simulation de Monte-Carlo, Méthodes quantitatives et numériques d'analyse) d'évaluation de la fiabilité pour les systèmes de distribution de moyenne tension. Cette étude a une connotation pratique (systèmes de distribution de Turin de 27kV, 22kV et 6.3kV) et a été destinée à comparer différentes méthodes en considérant les effets de leurs hypothèses de simplification. Après la description et la comparaison de la base théorique, chaque technique proposée a été mise en application et employée pour évaluer des indices de fiabilité des réseaux d'illustration. Mais ses résultats ne peuvent être généralisés puisque chaque configuration a ses propres propriétés.

Les générateurs distribués (GD), comme les cellules à fuel et les piles solaires, etc., vont être installés à côté de la demande des systèmes d'alimentation. Cependant, quand un GD qui a une grande capacité est déconnecté du réseau de distribution par une défaillance, une violation des contraintes opérationnelles, telles que la capacité actuelle de la ligne et la chute de tension, peut se produire. Du point de vue de la fiabilité du système, une configuration robuste du système pour des déconnexions soudaines des GDs du réseau de distribution doit être déterminée, puisque les opérateurs du système ne peuvent pas contrôler la connexion en ligne des GDs au

réseau de distribution. Ces sources peuvent réduire le nombre de défauts et/ou de durées de défaut pour des consommateurs résidants dans leurs zones de protection, et de ce fait augmenter la fiabilité du service. On a proposé dans [48] une procédure pour trouver des positions optimales des commutateurs dans les postes de distribution équipés des générateurs d'énergie électrique distribués, en utilisant un algorithme génétique particulièrement adapté. Les commutateurs stratégiquement mis augmentent la fiabilité du système en réduisant le nombre de consommateurs affectés par le défaut. Le niveau de l'amélioration dépend du nombre et de la taille des générateurs distribués, du nombre de commutateurs mis au poste de distribution, et des positions des générateurs et des commutateurs dans le poste de distribution. Tandis que dans [26], les auteurs proposent un algorithme pour déterminer la configuration à minimum de perte d'un système de distribution avec des GDs tout en maintenant la fiabilité du système. A savoir, dans l'algorithme proposé, les éventualités N-1 pour les GDs sont considérées comme contrainte opérationnelle. Mais l'application des nouveaux algorithmes doit se faire avec prudence puisque ils peuvent mener à des résultats non désirés.

Le papier [57] développe un ensemble de modèles composés d'évaluation de la fiabilité des systèmes de distribution qui peuvent être appliqués à un système de type non-radial. Les modèles développés reflètent l'effet des sous-stations de distribution, des systèmes de distribution primaires, et de l'interaction entre les deux. D'abord, les évaluations de la fiabilité pour cinq configurations de sous-station de distribution minimale sont faites par l'utilisation de la technique de l'ensemble des coupes minimales (Les coupes minimales représentent les plus petites combinaisons d'événements dont la réalisation simultanée entraîne celle de l'événement indésirable). Ensuite, l'interaction entre les systèmes de la sous-station de distribution et de la distribution primaire est modélisée selon le comportement de déclenchement des disjoncteurs des postes d'alimentation. Enfin, la contribution des indices de la fiabilité évalués à partir du système de distribution primaire est ajoutée aux deux effets précédents, et alors les modèles composés d'évaluation de la fiabilité du point de charge sont développés. Cette méthode nécessite la connaissance judicieuse de notre configuration.

L'installation des dispositifs de protection tels que les commutateurs, les disjoncteurs, les fusibles et les sectionneurs est considérée généralement comme une pratique pour améliorer la fiabilité; cependant, il devrait arriver que les composants supplémentaires puissent également augmenter l'exposition aux défaillances qui pourraient mener à la dégradation de la fiabilité. En plus du fait que PLUS n'implique pas nécessairement meilleur, le système de distribution est sujet également à la loi des rendements décroissants. L'étude de cas présentée dans le papier [6] combine les sous-stations de distribution et les postes distribution dans une analyse pour évaluer la fiabilité de l'alimentation à un emplacement du consommateur. Cette approche inclut l'impact de coupure de(s) poste(s) de distribution et des composants des sous-stations. Le but est de trouver le point optimal où l'ajout du prochain composant ajoute une valeur au lieu de soustraire une valeur. L'article [10] présente une nouvelle méthode pour calculer la distribution de probabilité des indices de fiabilité. Les sommes aléatoires introduites par l'aspect aléatoire du nombre d'occurrences des défaillances dans l'intervalle de temps de l'analyse sont traitées en utilisant une approche à caractéristique des fonctions de base. La convolution directe des fonctions de densité de probabilité est évitée par le recours aux propriétés du processus composé de Poisson. En outre, les transformées discrètes directes et inverses de Fourier sont utilisées pour tenir compte du traitement de n'importe quel type de distribution de probabilité. La méthode proposée fournit un calcul des distributions et des moments de probabilité pour les indices locaux et globaux de fiabilité, mais elle souffre qu'elle puisse fournir des résultats approximatifs qui est du au recours à un autre processus équivalent.

I.8. Conclusion :

Dans ce premier chapitre sont montrés :

- Les différentes notions de base telles que la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité ainsi que la relation entre elles;
- Les différents modes des pannes et des défaillances;
- Les différentes méthodes (les plus répandues) utilisées pour l'évaluation de la fiabilité des différents systèmes : méthode des schémas blocs, diagramme en réseau, analyse d'arbre de défaillance et la simulation de Monte-Carlo;
- Un aperçu des principales lois de probabilité utilisées en fiabilité;
- Une recherche bibliographique des travaux scientifiques faits dans le domaine de l'étude de la fiabilité des réseaux électriques et en particulier des postes de distribution de l'énergie électrique, ces derniers qui vont être l'objet de cette étude présentée dans ce travail.

Chapitre II

Notions sur les réseaux électriques et leur fiabilité

II.1 Introduction :

Les réseaux électriques ont fait bien du chemin depuis la centrale construite par Edison en 1882, qui desservait environs 10 km² dans la ville de New York [45]. Ils couvrent aujourd'hui des villes entières et de vastes régions. Dans les pays industrialisés, la demande s'accroît pour une électricité propre et peu polluante, alimentant les appareils modernes de la vie quotidienne, et dans les pays en développement, cette énergie est l'une des clés de la prospérité future d'un grand nombre de régions.

La société moderne en est venue à compter sur une électricité fiable comme une ressource essentielle pour la sécurité nationale; la santé et le bien-être; les communications; les finances; le transport; l'approvisionnement en eau et en nourriture; le chauffage, la climatisation et l'éclairage; l'informatique et l'électronique; le commerce, et même les divertissements et les loisirs. Bref, à peu près tous les aspects de la vie moderne dépendent de l'électricité. Les clients ont fini par s'attendre à ce que celle-ci soit presque toujours disponible lorsqu'ils en ont besoin, rien qu'en appuyant sur un bouton. La plupart ont bien sûr été touchés par des pannes locales causées par un orage, un véhicule qui avait heurté le poteau d'une ligne de transport ou une équipe de construction qui avait endommagé accidentellement un câble. Les pannes d'électricité généralisées, comme celle du 14 août 2003 aux Etats-Unis et au Canada, sont rares, mais elles peuvent survenir lorsque les dispositifs de protection de la fiabilité cessent en grand nombre de remplir leur rôle. Offrir un service électrique fiable représente un défi technique de taille. En effet, il faut surveiller, évaluer et coordonner en temps réel la production électrique de milliers de génératrices, faire circuler l'électricité dans un réseau interconnecté de lignes de transport et, enfin, fournir du courant à des millions d'abonnés grâce à un réseau de distribution.

II.2 L'industrie de l'électricité : Production :

La production d'électricité se fait au moyen de trois types de centrales conventionnelles :

- hydraulique (utilisant de l'eau pour faire tourner les turbines qui alimentent le générateur produisant un courant électrique)
- thermique (utilisant la vapeur d'eau sous pression produite par la combustion de sources d'énergie fossiles pour faire tourner les turbines)
- nucléaire (utilisant la vapeur d'eau sous pression produite par les réactions d'éléments radioactifs pour faire tourner les turbines).

A ces filières s'ajoutent de nouvelles sources de production, comme le vent, le soleil, etc., qui alimentent souvent directement les générateurs. Pour des raisons technologiques, économiques et sociopolitiques, la composition d'un parc d'équipements de production est généralement assez diversifiée [17].

Comme on le voit dans figure II.1, l'électricité est produite dans des génératrices à une tension relativement faible (de 10 000 à 25 000 volts), au moyen de diverses sources d'énergie telles que le charbon, le pétrole, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire, hydraulique, géothermique et photovoltaïque. Certaines génératrices sont la propriété des entreprises de services publics qui alimentent le consommateur; d'autres appartiennent à des producteurs d'énergie indépendants (PEI) ou aux abonnés eux-mêmes, en particulier les gros clients industriels. L'électricité produite par les génératrices est portée à une tension plus élevée pour son transport général dans les lignes. Le fait d'exploiter des lignes de transport à haute tension (de 230 000 à 765 000 volts) permet de réduire les pertes d'électricité résultant de l'échauffement des conducteurs et de faire voyager l'énergie de façon peu coûteuse sur de grandes distances. Les lignes de transport sont interconnectées dans des postes de manoeuvre et des sous-stations, pour former un réseau de lignes et de postes qu'on appelle le réseau électrique. L'électricité se propage dans le réseau interconnecté des lignes de transport qui relient les génératrices aux charges conformément aux lois de la physique, c'est-à-dire le long des «lignes de moindre résistance», un peu comme l'eau circule dans un réseau de canaux. Lorsque l'électricité arrive près d'une station de distribution, on abaisse la tension pour pouvoir la distribuer aux abonnés. Le réseau de production - transport d'électricité est principalement un réseau à courant alternatif (CA), par opposition au courant continu (CC), car il est plus facile et moins coûteux de convertir la tension dans les réseaux à CA. Certains grands clients industriels ou commerciaux reçoivent un courant de tension intermédiaire (de 12 000 à 115 000 volts), mais la plupart des abonnés résidentiels utilisent des tensions de 110 et 220 volts.

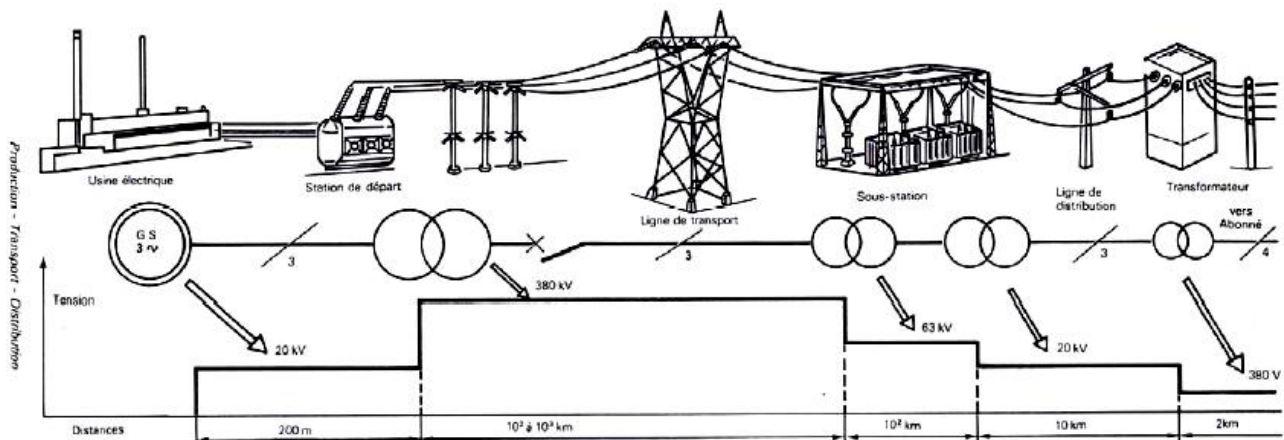


Figure II.1: Schéma général du réseau électrique.

II.3 Caractéristiques des réseaux d'électricité :

Une fois produite, il n'est pas économiquement rentable d'emmagasiner l'énergie électrique. Elle doit être produite au moment où la demande se manifeste sur le réseau, qui doit donc avoir accès, à tout instant, à une puissance suffisante pour répondre à la demande.

Un réseau électrique doit fonctionner et être géré comme un système intégré. Les niveaux de tension et la fréquence du système doivent être strictement maintenus à l'intérieur de certains écarts. Pour assurer l'intégrité physique du système, l'équilibre entre l'offre et la demande, ou entre la production et la distribution, doit être maintenu en tout temps.

Il n'existe aucun lien entre l'énergie fournie par une source donnée et l'énergie consommée par un appareil donné. Le réseau agit, en quelque sorte, comme un outil d'agrégation pour l'ensemble de l'électricité fournie (l'offre) et il distribue cette électricité aux centres de consommation (demande).

En raison de ces caractéristiques, il doit nécessairement y avoir une coordination étroite entre les étapes de production, les étapes de transport et celles de distribution pour assurer le bon fonctionnement des réseaux d'électricité.

Dans la structure traditionnelle de l'industrie, il existe un certain niveau d'interdépendance entre réseaux voisins. Ces interconnexions entre réseaux se font pour des raisons économiques (réduire les coûts, maintenir la fiabilité, permettre des échanges d'énergie, etc.).

II.3.1 Les différentes fonctions du réseau électrique général :

Les principales fonctions du réseau général sont d'assurer la mise en commun de tous les moyens de productions et le transit de puissance entre ces moyens de production et les différents utilisateurs. Des dispositions sont prises afin qu'un incident ou une avarie sur une unité de production ou une ligne de transport n'entraîne en général pas de répercussions au niveau des utilisateurs. Le degré de sécurité recherché entraîne naturellement des conséquences sur les coûts. Des règles de gestion sont fixées aux unités de production, de transport ou de distribution pour rechercher l'optimum entre sécurité et prix de revient. On distingue ainsi plusieurs niveaux de réseaux classés par tension qui assurent diverses fonctions spécifiques.

II.3.2 Les différents types de réseaux électriques :

Il ne suffit pas de produire le courant électrique dans les centrales, il faut aussi l'amener jusqu'à l'utilisateur final. Ainsi pour atteindre l'adéquation entre la production et la consommation, qui se traduit en fin par la performance économique, la structure électrique d'un pays est généralement décomposée en plusieurs niveaux correspondant à différents réseaux électriques. Il est à noter qu'il n'existe aucune structure unique à travers le monde, et que le découpage en plusieurs réseaux avec les niveaux de tension associés peut être différent selon les pays. Mais en général, le nombre de niveaux de tensions est limité à trois; d'ailleurs en 1983 la publication CEI 38 a formulé des recommandations pour les niveaux de tension des réseaux 50 et 60 Hz [50].

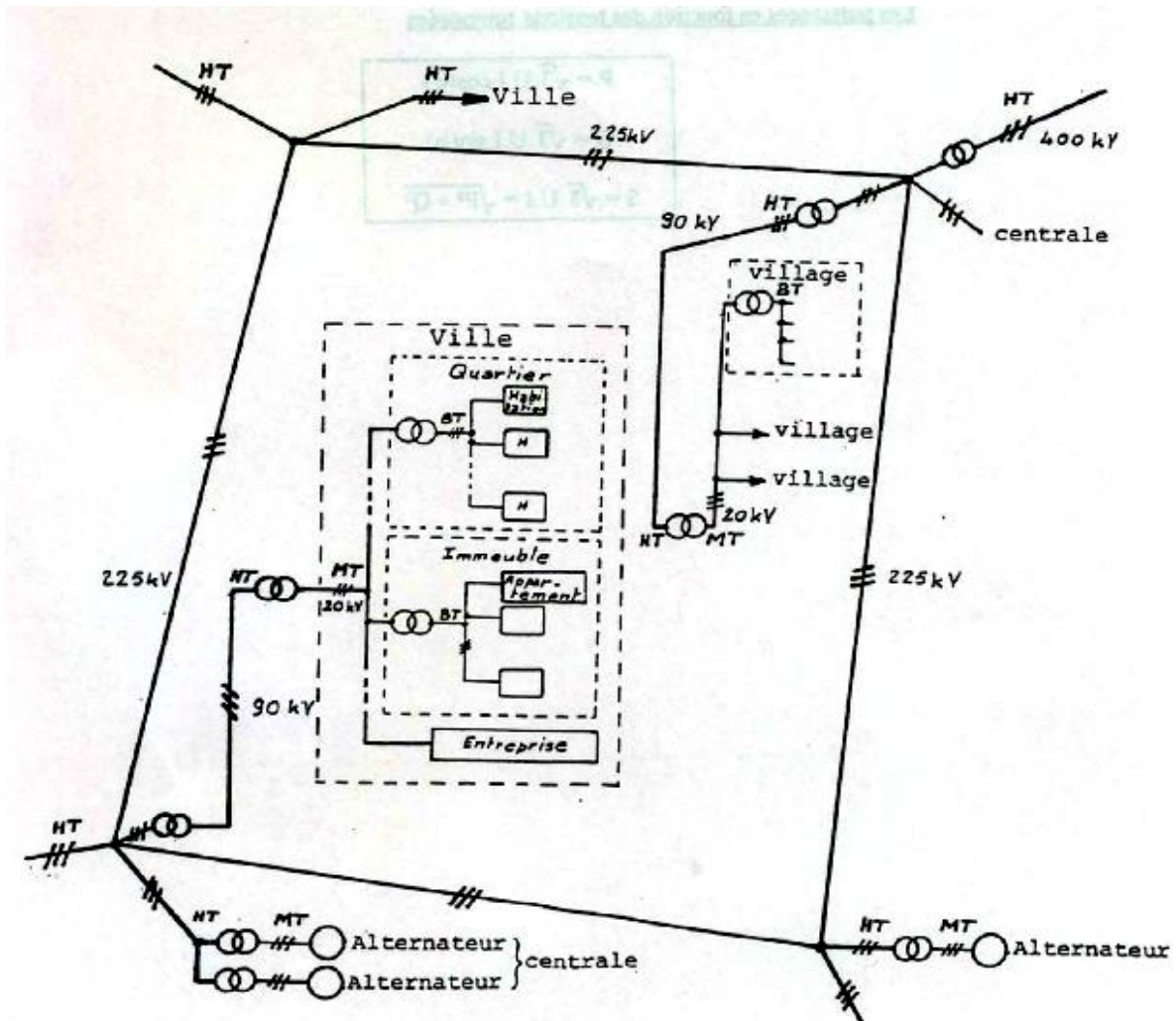


Figure II.2: Schématisation du transport et de la distribution.

II.3.2.1 Le réseau de transport et d'interconnexion :

La dispersion géographique entre les lieux de production et les centres de consommation, l'irrégularité de cette consommation et l'impossibilité de stocker l'énergie électrique nécessitent un réseau électrique capable de la transporter sur de grandes distances et de la diriger. Ses lignes atteignent des milliers de kilomètres, par exemple 20 000 Km pour le réseau 400 kV français. La finalité de ce réseau est triple :

- une fonction de "transport" dont le but est d'acheminer l'électricité des centrales de production aux grandes zones de consommation;
- une fonction "d'interconnexion nationale" qui gère la répartition de l'offre en orientant la production en fonction de la répartition géographique et temporelle de la demande;
- une fonction "d'interconnexion internationale" pour gérer des flux d'énergie entre les pays en fonction d'échanges programmés ou à titre de secours.

En général, seuls quelques abonnés à très forte consommation sont raccordés sur ces réseaux. La structure de ces réseaux est essentiellement de type aérien. Les tensions sont généralement comprises entre 225 et 400 kV, quelques fois 800 kV (ex : 765 kV en Afrique du sud). L'utilisation de ces tensions élevées est liée à un objectif économique. En effet pour, une

puissance donnée, les pertes en ligne par effet Joule sont inversement proportionnelles au carré de la tension : $p = k / U^2$, avec U = tension du réseau, k = une constante fonction de la ligne. De plus, les puissances transportées sont telles que l'utilisation d'une tension basse entraînerait des sections de câbles tout à fait inadmissibles. L'usage des tensions élevées se trouve donc imposé malgré les contraintes d'isolement qui se traduisent par des coûts de matériel plus importants, la solution la plus facile étant l'utilisation de lignes aériennes. Dans tous les cas, le choix d'une tension de transport est avant tout un compromis technico-économique, fonction des puissances à transporter et des distances à parcourir.

L'aspect sûreté est fondamental sur ces réseaux. En effet toute défaillance à ce niveau entraîne d'importants défauts d'alimentation pour l'ensemble des points de consommation. Ainsi en 1965, 30 millions de personnes ont été privées d'électricité pendant 12 heures aux Etats-Unis. Les protections de ces réseaux doivent donc être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence.

II.3.2.2 Le réseau de répartition :

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation. Ces centres de consommation sont :

- soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT,
- soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HT. Dans un pays, le nombre de ces abonnés est très faible (ex: 600 en France) [50]. Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, l'industrie chimique, le transport ferroviaire,...

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Dans ce domaine, les politiques de respect de l'environnement et de protection des sites (zones protégées) s'opposent souvent à la construction des lignes. En conséquence, la pénétration du réseau de répartition jusqu'aux zones à forte densité de population est de plus en plus difficile et coûteuse. Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 25 kV et 275 kV. Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux.

II.3.2.3. Le réseau de distribution MT :

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de répartition aux points de moyenne consommation (supérieure à 250 KVA en France). Ces points de consommation sont :

- soit du domaine public, avec accès aux postes de distribution publique MT/BT,
- soit du domaine privé, avec accès aux postes de livraison aux abonnés à moyenne consommation. Le nombre de ces abonnés ne représente qu'un faible pourcentage du nombre total des consommateurs livrés directement en BT. Ils sont essentiellement du secteur tertiaire, tels les hôpitaux, les bâtiments administratifs, les petites industries, ...

La structure est de type aérien ou souterrain. Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre quelques kilovolts et 40 kV. Les protections sont moins sophistiquées que dans le cas des réseaux précédents.

II.3.2.4. Le réseau de distribution BT :

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution MT aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique. Ce réseau permet d'alimenter un nombre très élevé de consommateurs correspondant au domaine domestique. Sa structure, de type aérien ou souterrain, est souvent influencée par l'environnement. Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 100 et 440 V.

II.3.3 La planification des réseaux :

La mise en place et l'évolution de la structure d'un réseau d'alimentation électrique d'un pays correspond aux opérations de planification. Pour les réseaux de transport et de répartition, ces opérations sont généralement centralisées, car :

- les décisions menant à une modification de la structure de tels réseaux, par exemple l'introduction d'un nouveau poste HT/MT, imposent la prise en compte de nombreux paramètres techniques et économiques;
- le nombre de ces paramètres avec leurs interactions éventuelles nécessite l'assistance d'outils informatiques, l'utilisation de base de données et de systèmes experts. Pour les réseaux de distribution MT et BT, la planification est par contre souvent décentralisée.

II.3.4 Les topologies des réseaux électriques :

Par topologie d'un réseau électrique il faut comprendre l'ensemble des principes (schéma, protection, mode d'exploitation) utilisés pour véhiculer l'énergie électrique en distribution publique. Dans la pratique, pour un distributeur, définir une topologie revient à fixer un certain nombre d'éléments physiques en tenant compte de critères liés à des objectifs visés et/ou à des contraintes techniques. Ces éléments étant fortement corrélés entre eux, le choix d'une topologie est toujours le résultat de compromis technico-économiques. La traduction graphique d'une topologie sera ici un schéma de type unifilaire simplifié.

II.3.4.1 Les critères de choix d'une topologie :

Le choix d'une topologie répond à des objectifs :

- assurer la sécurité des personnes et des biens,
- obtenir un niveau de qualité de service fixé,
- assurer le résultat économique souhaité.

Mais il doit aussi se soumettre à des impératifs :

- être en adéquation avec la densité d'habitat et/ou de consommation, aussi appelée densité de charge qui joue un rôle de plus en plus prépondérant. Exprimée en MVA/Km², cette densité permet d'appréhender les différentes zones géographiques de consommation en terme de concentration de charge. Une des segmentations utilisées par certains distributeurs consiste à définir deux types de zones de consommation :
 - zone à faible densité de charge : < 1 MVA/Km²,
 - zone à forte densité de charge : > 5 MVA/km².
- tenir compte de l'étendue géographique, du relief et des difficultés de construction,
- satisfaire aux contraintes d'environnement, en particulier climatiques (températures minimale et maximale, fréquence des orages, neige, vent, etc.) et respect du milieu.

II.3.4.2 Eléments dépendants de la topologie choisie :

Il est important de remarquer que :

- le choix du courant de court-circuit a des répercussions sur la tenue des matériels utilisés sur le réseau,
- le choix de la (ou des) valeur(s) de tension est toujours le résultat d'un compromis entre les coûts de réalisation et d'exploitation du réseau,
- le choix du niveau d'isolement des matériels obéit généralement à des normes internationales et/ou nationales,
- le choix d'une distribution en aérien ou en souterrain influe beaucoup sur le coût d'installation et la qualité de service (ex: coût d'une tranchée / sensibilité aux défauts fugitifs...). En MT, dans les pays industrialisés, ce choix peut être synthétisé en trois cas :
 - milieu urbain à forte densité avec une distribution souterraine,
 - milieu suburbain à forte densité avec une distribution souterraine ou aéro-souterraine,
 - milieu rural à faible densité avec une distribution aérienne.

Cependant il est à noter qu'historiquement, pour des raisons de coûts d'installation, de nombreux milieux urbains sont en distribution aérienne, c'est le cas au Japon et aux Etats-Unis.

II.3.4.3 Les différents schémas des réseaux électriques :

Plusieurs topologies existent :

- topologie boucle fermée,
- topologie boucle ouverte, de type maillé simplifié,
- topologie boucle ouverte,
- topologie radiale.

D'autres topologies sont aussi appliquées, par exemple la double dérivation. Bien qu'aucune ne soit «normalisée», les distributeurs s'appuient sur deux topologies de base : radiale et boucle ouverte.

a. Schéma radial : ce schéma est aussi appelé en antenne. Son principe de fonctionnement est à une seule voie d'alimentation. Ceci signifie que tout point de consommation sur une telle structure ne peut être alimenté que par un seul chemin électrique possible. Il est de type arborescent (figure II.3). Cette arborescence se déroule à partir des points d'alimentation, qui sont constitués par les postes de distribution publique HT/MT ou MT/MT. Ce schéma est particulièrement utilisé pour la distribution de la MT en milieu rural. En effet, il permet facilement, et à un moindre coût, d'accéder à des points de consommation de faible densité de charge (≈ 10 kVA) et largement répartis géographiquement (≈ 100 km²).

b. Schéma en boucle ouverte : il est aussi appelé coupure d'artère. Son principe de fonctionnement est à deux voies d'alimentation. Ceci signifie que tout point de consommation sur cette structure peut être alimenté par deux chemins électriques possibles, sachant qu'en permanence seul un de ces deux chemins est effectif, le secours étant réalisé par cette possibilité de bouclage (disjoncteur de couplage). Dans un tel schéma, il y a toujours un point d'ouverture dans la boucle (d'où le nom de boucle ouverte aussi utilisé pour cette solution), ce qui revient à un fonctionnement équivalent à deux antennes. Le schéma de type unifilaire est évidemment une boucle sur laquelle sont connectés les points de consommation (figure II.3) qui peuvent être des postes de distribution publique MT/BT, et/ou des postes de livraison pour un abonné en MT. Chaque point (entre 15 et 25 points par boucle) est raccordé sur la boucle par deux interrupteurs

MT. Tous ces interrupteurs sont fermés, excepté l'un d'eux qui constitue le point d'ouverture de la boucle et définit le chemin d'alimentation pour chaque point de consommation. Ce point d'ouverture peut être déplacé dans la boucle, en particulier lors des manœuvres de reconfiguration de réseau faisant suite à un défaut. Très souvent ce schéma est associé à une distribution de type souterrain. Il est typiquement utilisé en milieu urbain à forte densité.

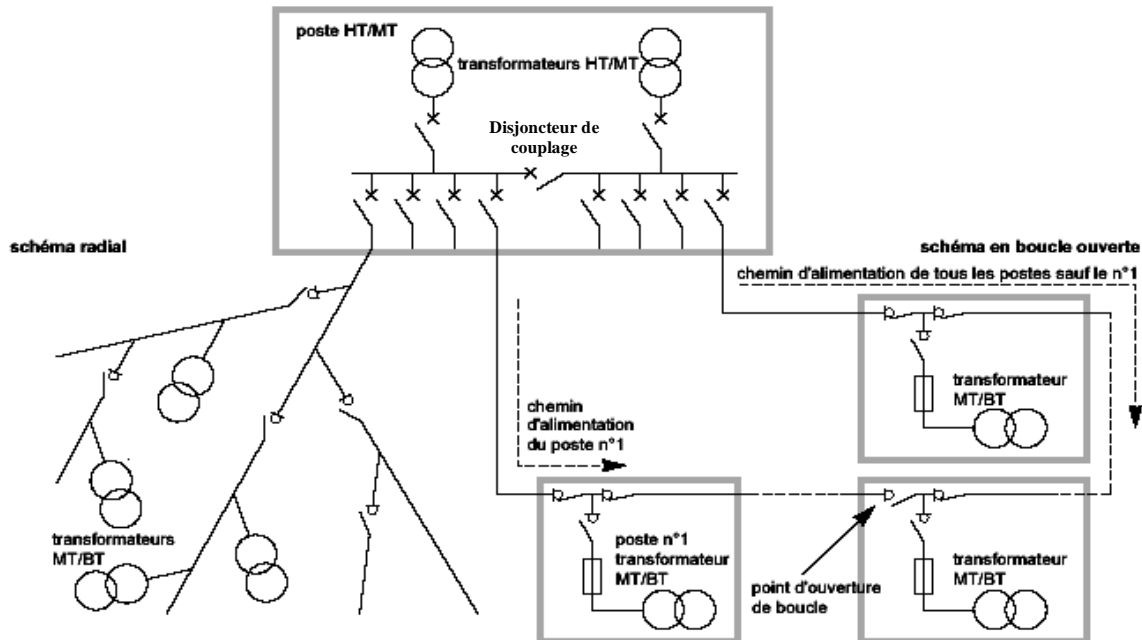


Figure II.3: Les deux schémas de base d'un réseau radial (ou en antenne) et en boucle ouverte (ou coupure d'artère).

c. Schéma en double dérivation : ce schéma peu utilisé, il est présenté par la figure II.4. Le principe mis en œuvre est le suivant :

- le réseau MT est dédoublé, il comporte deux circuits A et B normalement en permanence sous tension,
- tout poste MT/BT est raccordé sur les deux câbles MT («A» et «B»), mais n'est effectivement connecté qu'à un seul câble (interrupteur MT fermé sur le câble «A»),
- est équipé d'un automatisme local simple,
- en cas de défaut sur le câble «A», l'automatisme détecte l'absence de tension sur ce câble, vérifie la présence d'une tension sur le câble «B» et donne alors des ordres d'ouverture pour un interrupteur MT puis de fermeture pour l'autre interrupteur MT.

d. Schéma maillé :

Les réseaux maillés sont des réseaux où les liaisons forment des boucles réalisant une structure semblable aux mailles d'un filet (figure II.5). Cette structure nécessite que toutes les liaisons soient capables des surcharges permanentes ou momentanées (généralement vingt minutes [24], c'est-à-dire le temps de procéder à certaines manœuvres, tant sur la structure du réseau que sur les moyens de production – éventuellement de consommation). Les transits de puissance sur les branches élémentaires dépendent principalement des réactances des éléments du circuit; on ne peut les modifier qu'en ouvrant certaines liaisons ou en répartissant les départs d'un même poste sur des jeux de barres électriquement séparés.

La structure maillée est très généralement utilisée pour le transport. Cependant, au niveau THT, la nécessité de maintenir les courants de court-circuit à un niveau acceptable conduit de plus en plus les exploitants à "démailler" de façon permanente le réseau 225 kV en un certain nombre de "poches" indépendantes les unes des autres à ce niveau de tension et alimentées par des sources 400/225 kV appartenant à un réseau maillé. Les mêmes raisons conduiront, dans les prochaines années, à déboucler le réseau 400 kV en certains points. Il n'en demeure pas moins que les réseaux maillés procurent généralement un haut niveau de sécurité, mais au prix d'un coût élevé. Il ne faut cependant pas oublier qu'un réseau maillé permet de substantielles par la mise en commun de ceux-ci, en permettant, non seulement de parer de manière immédiate à toute défaillance d'un groupe, même de puissance élevée, mais également d'utiliser à chaque instant ceux qui présentent les coûts d'exploitation les moins élevés.

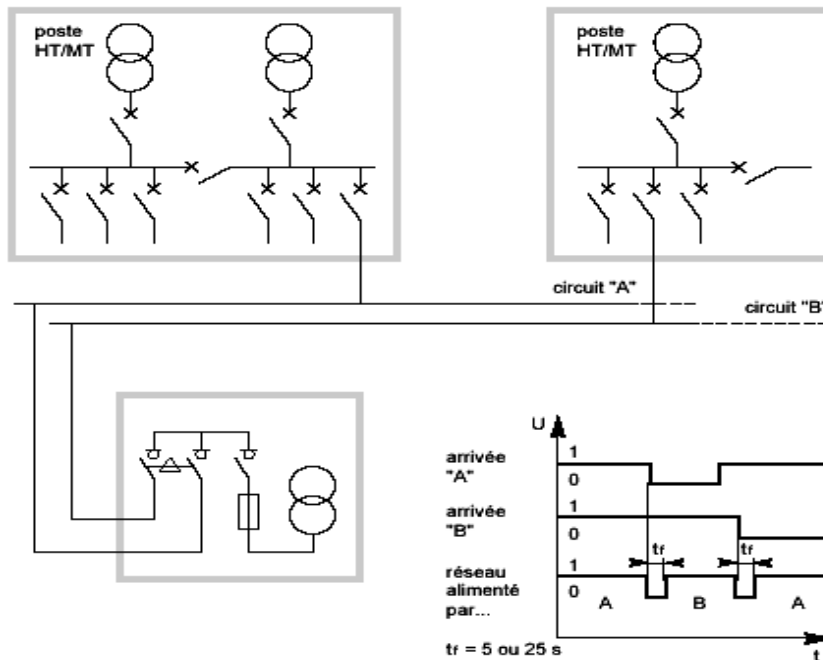


Figure II.4: Schéma de distribution en double dérivation.

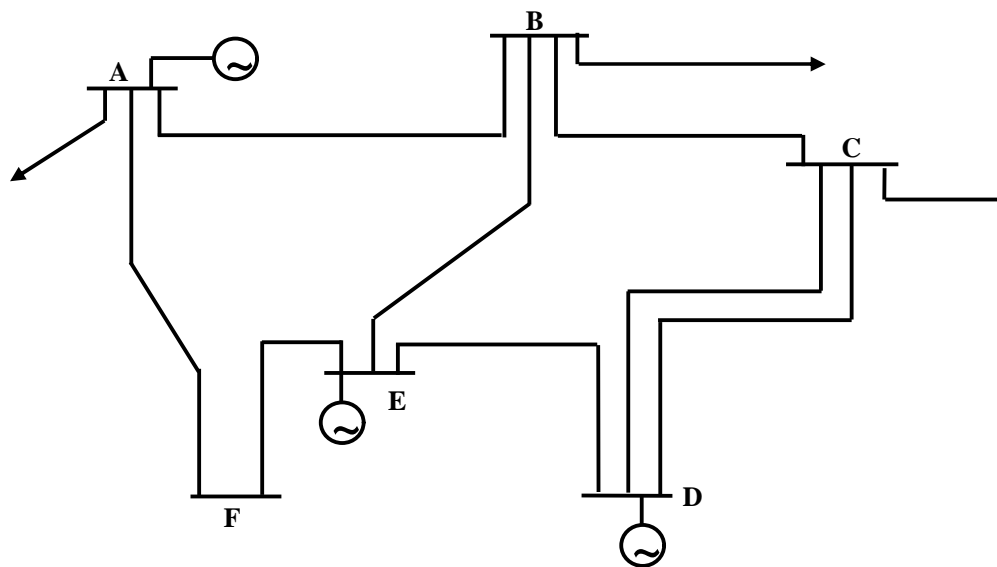


Figure II.5: Schéma de principe d'un réseau maillé.

II.4 Le plan de protection :

La structure électrique d'un pays correspond à un ensemble de réseaux électriques. Un réseau électrique peut lui-même être décomposé en zones. Chacune de ces zones est généralement protégée par un disjoncteur en association avec des dispositifs de détection (capteur de mesure: transformateur de courant, de tension,...), de protection et de contrôle-commande (relais de protection), et de déclenchement (actionneurs). L'ensemble de ces éléments constitue une chaîne de protection qui assure l'élimination de la partie défaillante du réseau en cas de défaut. Son rôle est d'assurer la sécurité en protégeant contre les défauts d'isolement entre phases ou entre phase-terre, et contre les surcharges prolongées. En particulier, la chaîne de protection doit réduire les conséquences d'un défaut de court-circuit, à savoir les risques d'incendie, d'explosion, de détérioration mécanique,Le plan de protection d'un réseau est l'ensemble de ces chaînes de protection, intégrant les matériels mis en œuvre, mais aussi l'organisation du fonctionnement entre eux. Cette organisation du plan de protection, y compris les temps de déclenchement des disjoncteurs associés, définit la durée maximale de passage des courants de défaut aux différents points du réseau électrique. L'efficacité d'un plan de protection dépend de plusieurs critères: la fiabilité, la sélectivité, la rapidité, la sensibilité, l'évolutivité.

II.4.1 La fiabilité :

Ce critère situe le niveau de qualité en ce qui concerne la sécurité des personnes et des biens, en particulier face aux dangers d'électrocution par élévation du potentiel des masses. De ce fait, bien qu'une unité de protection soit rarement sollicitée, lors d'un défaut elle doit agir efficacement, et ce durant de nombreuses années. Ce critère affecte directement la performance du réseau, ainsi par exemple toute interruption de la distribution doit être "justifiée" car elle provoque une perte d'exploitation pour les consommateurs... et pour le distributeur.

II.4.2 La sensibilité :

Ce critère a également une signification en terme de sécurité et d'économie: il traduit la facilité de détecter de faibles courants de défauts sans être sensible aux phénomènes transitoires dus au réseau (manœuvres) ou aux effets électromagnétiques environnants, donc avant l'existence d'un risque pour les personnes et les biens, et cela sans déclenchement intempestif.

II.4.3 La sélectivité :

Ce critère est surtout pris en compte sur le plan économie d'exploitation, puisqu'il indique dans quelle mesure il est possible de maintenir en service le maximum du réseau lorsqu'un de ses éléments est affecté d'un fonctionnement anormal. Dans la pratique, il conduit à éliminer cet élément défectueux et seulement celui-ci.

II.4.4 La rapidité :

Ce critère a, comme le précédent, une incidence économique : il permet de limiter les dégâts dus aux arcs électriques et aux courants de court-circuit, en particulier il réduit les risques d'incendie et les coûts de réparation.

II.4.5 L'évolutivité :

Ce critère, qui intéresse essentiellement le distributeur, indique le niveau prévu d'évolutions (possibilités et facilités) pour le plan de protection en fonction des modifications de la topologie du réseau.

Parmi tous ces critères, la sélectivité est celui qui conduit à des solutions techniques plus particulières selon les pays. Elles dépendent de deux choix initiaux des distributeurs d'énergie :

- celui du schéma de liaison du neutre à la terre, à partir duquel sont notamment définies les protections contre les défauts à la terre ;
- et celui du principe de sélectivité dont le plus usité, appelé sélectivité ampèrechronométrique, repose sur une association de la valeur du courant de défaut (sélectivité ampèremétrique) à une valeur du temps de déclenchement (sélectivité chronométrique).

II.5 Les postes de distribution de l'énergie électrique :

Les différentes branches des réseaux (lignes aériennes, souterraines, transformateurs) sont interconnectées au niveau d'un certain nombre de nœuds dénommés "postes". La partie centrale de chaque poste est constituée par un ou plusieurs jeux de barres exploités à une tension déterminée et auxquels chaque branche est raccordée par l'intermédiaire d'un appareil de coupure qui permet de la séparer du réseau. La présence de plusieurs jeux de barres exploités à la même tension dans un poste permet de répartir éventuellement les différentes lignes sur chacun d'eux, ce qui conduit à disposer de plusieurs "sommets électriques" dans ce poste si l'on déconnecte électriquement ces deux jeux de barres [24]. Cette possibilité est fréquemment utilisée pour modifier la topologie des réseaux (figure II.6).

II.5.1 Structure des postes :

L'ensemble des appareils de coupure ou d'isolement (disjoncteurs et sectionneurs), ainsi que l'appareillage de mesure et de protection propre à une liaison, sont regroupés dans une "cellule". Outre les jeux de barre, un poste comporte donc autant de cellules que de liaisons qui y sont raccordées. Le plus souvent, un poste comporte un, deux, voir trois jeux de barres. Il est ainsi possible de constituer des nœuds, ou des sommets séparés, que l'on peut éventuellement relier entre eux par l'intermédiaire d'une liaison courte, comportant des organes de coupure et d'isolement (disjoncteurs et sectionneurs), et appelée couplage.

Un deuxième jeu de barres se justifie non seulement parce qu'il permet une meilleure exploitation du réseau (deux sommets séparables au lieu d'un seul), mais aussi parce qu'il est pratiquement indispensable à la sécurité de fonctionnement du réseau. La défaillance d'un jeu de barres rend en effet indispensable l'ensemble des liaisons qui y sont raccordées, et revêt donc un caractère particulièrement grave pour le fonctionnement du réseau si l'on ne dispose pas d'un second jeu de barres utilisable en secours. Il est par ailleurs nécessaire à moins d'accepter de se priver de la totalité d'un poste, donc de l'ensemble des liaisons qui y sont raccordées, de disposer de deux jeux de barres pour les soumettre alternativement aux opérations d'entretien indispensables.

Actuellement, certains postes 400 kV, sur lesquels sont raccordées des centrales nucléaires, comportent un jeu de barre en anneau constitué de 4 tronçons reliés par des disjoncteurs (figure II.6). Il est ainsi possible de constituer des sommets séparés, ce qui facilite l'exploitation du réseau et permet d'améliorer encore la sécurité, le risque de défaillance simultanée de deux

tronçons étant pratiquement exclu. Cette disposition particulière a été adoptée en raison des fortes puissances unitaires des groupes nucléaires.

II.5.2 Postes de livraison MT et MT/BT : dans le cas général, il s'agit d'un poste MT/BT. Ça peut être également sans transformation, un poste alimentant un sous-réseau MT sur lequel se trouvent raccordés les postes MT/BT d'utilisation.

II.5.3 Eléments constitutifs d'un poste et leurs fonctions : un poste MT/BT comprend essentiellement:

- Les appareillages MT principaux,
- Le transformateur MT/BT,
- L'appareillage de protection BT,
- Le comptage.

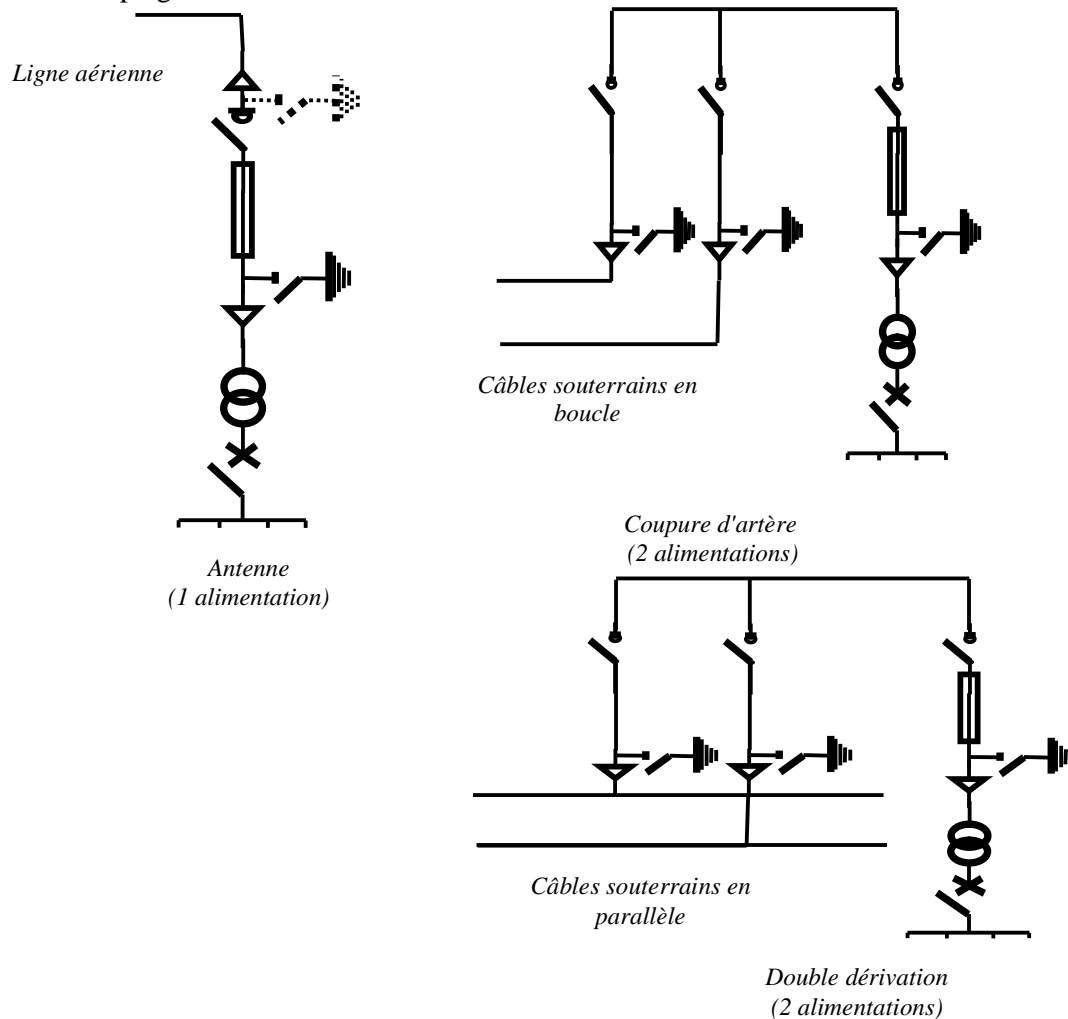


Figure II.6: Exemples des différents types de postes MT/BT.

II.5.3.1 Principaux appareillages d'un poste MT/BT :

L'appareillage isole, commande ou protège tout ou partie d'un réseau MT. C'est l'importance et la réparation de la puissance fournie qui déterminent l'emploi d'un appareillage particulier et sa

présence au niveau du poste. L'appareillage est installé en "cellules" constituant un "tableau" ou un poste. Ces cellules peuvent être de deux types:

- Cellule à enveloppe métallique (type protégé),
- Cellule de type "ouvert", dont les appareillages sont visibles depuis l'extérieur de la cellule.

Les principales cellules sont les cellules d' "arrivée-réseau" et les cellules de protection.

a. Cellule "arrivée-réseau" : elles permettent le raccordement du poste MT au réseau. Exploitées par le distributeur, elles appartiennent à l'utilisateur qui en assume l'entretien. Les appareils de séparation ou de coupure y sont accompagnés du côté des câbles:

- De dispositifs de contrôle de présence de tension,
- D'un dispositif de mise à la terre des câbles MT, (sectionneur de terre, ...),
- Eventuellement d'indicateurs de surintensité.

Ces cellules sont en général au nombre de deux, réunies par un jeu de barres.

b. Cellules "protection générale" : connectées au jeu de barres commun, elles sont équipées d'un interrupteur associé à des fusibles MT, ou d'un disjoncteur; le choix de la solution est déterminé par la puissance à transformer. Les solutions comportant un disjoncteur sont retenues quand la puissance dépasse:

- 1250 kVA en 20 kV,
- 800 kVA en 15 kV,
- 630 kVA en 10 kV,
- 400 kVA en 5,5 kV.

La cellule de protection générale assure la mise hors tension de l'installation de l'utilisateur en cas de défaut ou de travaux sur son circuit MT. Dans le cas de l'utilisation d'un disjoncteur les protections sont réglées sur la plus petite des valeurs $0,8 I_{ccb}$ ou $8 I_n$, avec une temporisation réglée en général sur 0,2 secondes. I_n est ici égale à la somme des intensités susceptibles d'être appelées par l'installation. Ces réglages sont effectués par le distributeur et inaccessibles à l'utilisateur.

II.5.3.2 Transformateur MT/BT :

Il est destiné à adapter le niveau de tension du réseau au niveau souhaité pour l'utilisation. Les caractéristiques du transformateur sont fonction de la puissance et du rapport de transformation, du choix du régime du neutre en BT et des règles de protection contre l'incendie. Le transformateur de puissance est l'un des dispositifs les plus importants et les plus chers d'un réseau du système d'alimentation. La fiabilité du transformateur est essentielle pour secourir le fonctionnement du système, en particulier étant donné qu'ils sont si chers, une grande unité de 400-kv peut excéder 2 millions d'Euros.

On peut utiliser le transformateur pour séparer ou isoler des portions de réseaux ayant même tension. A chaque fois que l'on doit adapter une tension alternative, on fait appel au transformateur qui a un excellent rendement surtout aux fortes puissances.

II.5.3.3 Les appareils de protection :

Le fusible : un fusible est un appareil de connexion dont la fonction est d'ouvrir par la fusion d'un de ses éléments (conçus et calibrés à cet effet) le circuit dans lequel il est inséré. Il interrompt le courant lorsque celui-ci dépasse, pendant un temps suffisant, une valeur précisée.

Le relais électromagnétique : le relais électromagnétique assure la protection contre les courts-circuits. En cas de surintensité brutale, l'armature mobile est attirée et elle commande l'ouverture des contacts. Le réglage s'effectue en augmentant ou en diminuant l'entrefer.

Le disjoncteur différentiel : ce disjoncteur est utilisé, en particulier, chez les abonnés, il a pour rôle d'assurer :

- la protection des circuits contre les surintensités dues aux surcharges ou aux courts-circuits
- la protection des personnes contre les contacts indirects (fuites de courant à la terre)

II.5.3.4 Comptage :

Le comptage mesure les quantités d'énergie livrée et la puissance appelée selon les modalités du contrat tarifaire. L'évolution de la tarification de l'électricité entraîne l'adaptation de la composition des tableaux de comptage, dont les caractéristiques diffèrent selon le niveau de puissance appelée.

II.6 Fiabilité des réseaux électriques :

L'exploitation fiable du réseau électrique est complexe et exigeante pour deux raisons fondamentales:

- En premier lieu, l'électricité voyage à la vitesse de la lumière (186 000 milles ou 297 600 kilomètres par seconde) et il n'est pas économique de la stocker en grandes quantités. Par conséquent, il faut produire l'électricité à l'instant où elle est consommée.
- En second lieu, on ne peut pas modifier le débit d'un courant alternatif (CA) comme on le fait pour celui d'un liquide ou d'un gaz en ouvrant ou en fermant une vanne sur un tuyau, ou l'aiguiller comme un appel dans un réseau téléphonique interurbain. Conformément aux lois de la physique, l'électricité voyage librement dans tous les circuits qui relient les génératrices aux charges : elle se divise pour parcourir tous les circuits du réseau connectés entre eux, en proportion inverse de l'impédance (résistance plus réactance) de chaque circuit.

Assurer la fiabilité du réseau est une tâche complexe qui exige des exploitants formés et compétents, des ordinateurs et des moyens de communication très perfectionnés ainsi qu'une conception et une planification soigneuses. Pour assurer la fiabilité du réseau de transport, on a des normes de planification et d'exploitation fondées sur les sept grands concepts suivants :

a. Équilibrer constamment la production et la demande d'énergie : pour permettre aux abonnés de consommer en tout temps autant d'électricité qu'ils le veulent, il faut prévoir ou « répartir » la production des génératrices de manière à satisfaire continuellement aux nouvelles demandes, en général sur une base horaire. Ensuite, on adapte les prévisions à l'intérieur d'une heure, parfois au moyen de contrôles de production automatiques, pour s'assurer que la production correspond toujours à la demande réelle. La demande est assez prévisible et on la représente sous forme d'une courbe quotidienne.

Si la production et la demande ne concordent pas, il s'ensuit une augmentation (lorsque la production excède la demande) ou une diminution (lorsque la production est inférieure à la demande) de la fréquence du réseau électrique à CA (fréquence nominale de 50 cycles par seconde ou 50 hertz). Les variations de fréquence minimales ou aléatoires sont normales et surviennent lorsque les charges apparaissent et disparaissent et que les génératrices modifient leur production en fonction de la demande. Toutefois, de grands écarts de fréquence peuvent faire fluctuer la vitesse de rotation des génératrices, ce qui cause des vibrations capables d'endommager les aubes des turbines des génératrices et d'autres équipements. Des fréquences extrêmement basses peuvent déclencher un «délestage» automatique et mettre ainsi des blocs d'abonnés hors circuit pour prévenir un affaissement total du réseau électrique. Un tel déséquilibre entre la production et la demande peut aussi se produire lorsque le réseau réagit à des perturbations majeures en se séparant en « enclaves » distinctes; toute enclave ainsi créée peut connaître un excès ou un déficit de production par rapport à la demande qu'elle enregistre.

b. Équilibrer la production et la demande de puissance réactive pour maintenir les tensions prévues : tout au long du jour, on doit ajuster les sources de puissance réactive, telles que les batteries de condensateurs et les génératrices, pour maintenir les tensions dans un intervalle de sécurité applicable à tous les équipements électriques du réseau (postes, lignes de transport et appareils des abonnés). La plupart des génératrices sont munies de régulateurs de tension qui augmentent ou diminuent la production de la puissance réactive afin de conserver les tensions aux valeurs prévues. Une tension trop basse peut provoquer l'instabilité ou l'affaissement du réseau électrique et, au niveau de la distribution de la tension, causer des dommages aux moteurs et des défaillances aux équipements électroniques. Une tension trop haute peut dépasser les capacités d'isolement des équipements et provoquer de dangereux arcs électriques (des contournements).

c. Surveiller le débit du courant dans les lignes de transport et les autres conducteurs pour veiller à ce que les limites thermiques (échauffement) ne soient pas dépassées : les lignes, les transformateurs et d'autres équipements conduisant l'électricité sont chauffés par le courant qui les traverse. Ce dernier doit être limité pour que l'équipement ne surchauffe ni ne s'endommage. Dans le cas des lignes aériennes de transport d'énergie, le réchauffement fait que le métal conducteur s'étire ou prend de l'expansion et que les lignes se rapprochent du sol. La température ambiante, le vent et d'autres facteurs ont aussi une incidence sur le conducteur. Il faut limiter le courant qui passe dans les lignes aériennes pour éviter que celles-ci ne s'affaissent sur des obstructions, telles que des arbres ou des lignes téléphoniques, ou ne soient plus conformes aux dégagements minimums requis entre les lignes sous tension et les autres objets (si une ligne sous tension est située trop près d'un autre objet, elle peut provoquer un court-circuit ou un «contournement», lequel peut déclencher un incendie ou endommager l'équipement).

d. Maintenir le réseau dans un état stable : étant donné que le réseau électrique est interconnecté et dynamique, il faut observer des limites de stabilité électrique. Les problèmes de stabilité peuvent surgir très rapidement – en quelques cycles seulement (un cycle dure 1/50^e de seconde) – ou plus lentement, en quelques secondes ou minutes. Il faut avant tout s'assurer de répartir la production, ainsi que le courant et la tension qui en résultent, de façon à ce que le réseau soit stable en tout temps (une partie de l'interconnexion de l'Est américain est devenue instable le 14 août 2003, ce qui a entraîné des pannes en cascade sur un vaste territoire). Les limites de stabilité, comme les limites thermiques, sont exprimées en quantités maximales d'électricité que les lignes peuvent véhiculer en toute sécurité.

e. Exploiter le réseau de manière à ce qu'il demeure dans un état stable même s'il survient un impondérable, tel que la perte d'une génératrice ou d'une installation de transport clé (le « critère N moins 1 ») : le principe d'organisation centrale d'une gestion fiable de l'électricité consiste à prévoir les impondérables. Les caractéristiques uniques de l'électricité font que les problèmes, lorsqu'ils surgissent, peuvent s'étendre et s'aggraver très rapidement si des dispositifs de protection appropriés ne sont pas en place. Ce principe signifie qu'il faut toujours exploiter le réseau de façon à ce qu'il demeure fiable (généralement à l'intérieur des seuils d'urgence pour le courant et la tension et des limites de stabilité établies) après la perte de la plus importante génératrice ou installation de transport (le « pire impondérable »); c'est ce qu'on appelle le « critère N-1 ». De plus, lorsqu'il se produit effectivement un impondérable, les exploitants sont tenus de déterminer et d'évaluer sans tarder les pires impondérables qui pourraient encore arriver, compte tenu de la nouvelle situation, et de prendre promptement les mesures nécessaires pour que le réseau demeure opérationnel et sûr advenant l'apparition de l'un de ces impondérables. Actuellement, quelques parties du réseau pourraient continuer de fonctionner malgré la perte simultanée de deux installations ou plus (c.-à-d., « N-2 ») [25].

f. Concevoir, planifier et conserver un réseau fiable : l'exploitation d'un réseau électrique fiable exige beaucoup plus qu'une surveillance et une gestion en temps réel. Conception, planification, entretien et analyse sont nécessaires pour que le réseau puisse être exploité de façon fiable sans dépasser les limites de sécurité. La planification à court terme permet d'organiser les activités de la journée et de la semaine à venir; la planification à long terme vise principalement à offrir des ressources de production et une capacité de transport adéquates pour que le réseau puisse supporter de graves impondérables sans subir des pannes en cascade étendues et incontrôlables.

g. Se préparer aux situations d'urgence : les exploitants doivent prendre les mesures décrites ci-dessus pour planifier et exploiter un réseau électrique fiable, mais des situations d'urgence peuvent quand même se produire à cause de facteurs externes, tels que des phénomènes météorologiques violents, une erreur humaine ou une défaillance d'un équipement, qui débordent les critères de conception, de planification ou d'exploitation. Advenant l'un de ces événements rares, l'exploitant doit disposer de procédures d'urgence pour une gamme plausible de scénarios d'urgence. Pour faire face aux défaillances du réseau qui provoquent une panne, il faut disposer de procédures et de capacités pour utiliser des génératrices en mesure de redémarrer le réseau après une panne générale (sans source d'énergie extérieure) et coordonner les opérations de manière à ce que le réseau retrouve le plus vite possible un état normal et fiable.

II.7 Degré de fiabilité :

Compte tenu des risques d'incidents qui peuvent affecter le fonctionnement du réseau, on ne peut envisager de l'exploiter sans une certaine marge de sécurité. Il est évident que le choix de cette marge de sécurité résulte d'un compromis technico-économique.

D'une manière tout à fait générale, le réseau est construit et exploité de manière à ce que la perte d'un ouvrage (ligne, câble, transformateur,...), consécutive à une avarie, n'ait pas de répercussions sur la continuité du service. Il s'agit de la règle dite "n-1". La perte simultanée de deux ouvrages dans une même région n'est généralement pas envisagée [24] (la situation sera alors dite "n-2"); on estime donc implicitement que la probabilité d'un tel événement est suffisamment faible pour que l'on puisse la négliger. L'application de la règle "n-1" conduit en particulier à alimenter les postes sources des réseaux MT (postes HT/MT) par au moins deux lignes. Par ailleurs, ces postes sont le plus souvent équipés d'au moins deux transformateurs,

pour qu'en cas de défaillance de l'un d'entre eux, la totalité de la puissance appelée puisse être reprise par les autres, au prix éventuellement d'une surcharge aux heures de pointe.

II.8 Fiabilité des équipements d'électricité électroniques :

La transition de la technologie électromécanique vers l'électronique pour les composants du réseau d'électricité incite les sociétés d'électricité à considérer maintenant avec attention la fiabilité de ces produits. Le fait est que l'expérience issue d'une histoire plus que centenaire de développement avec des composants électromécaniques n'est pas intégralement applicable aux composants électroniques puisque les deux produits ne sont pas sujets aux mêmes types de pannes.

II.8.1 Complexité :

Ainsi, afin de partager cette population hétérogène en plusieurs sous-ensembles de populations homogènes, il est nécessaire d'établir une classification s'appuyant sur la complexité. A ce point, il faut faire face à un autre problème: combien de classes faut-il définir? Une première tentative peut consister à définir une échelle de complexité continue en attribuant tout simplement un poids à chaque fonction et en additionnant tous les poids. Si l'on tente de tracer la courbe du taux de panne en fonction de la complexité on obtient la courbe de la figure ci-dessous (figure II.7) [18]:

Il s'agit d'un résultat expérimental obtenu à partir de données de fiabilité connues et qui s'exprime sous forme d'une relation non-linéaire entre complexité et fiabilité prévisionnelle, bien qu'il n'ait pas été possible de trouver une expression mathématique simple pour cette courbe. Ce type d'approche s'avère cependant trop compliqué à appliquer en pratique, essentiellement à cause de la difficulté à évaluer la "complexité" et, d'autre part, à apprécier les faibles variations du taux de panne. La meilleure solution est certainement de diviser la population considérée en "classes" de complexité, groupant les niveaux de fiabilité de sorte que le taux de panne ne varie pas de plus de 0.5% ou 1% par an d'une classe à une autre. Ce type de classification facilite l'interprétation des données collectées sur le terrain tout en favorisant la réduction du coût de l'opération.

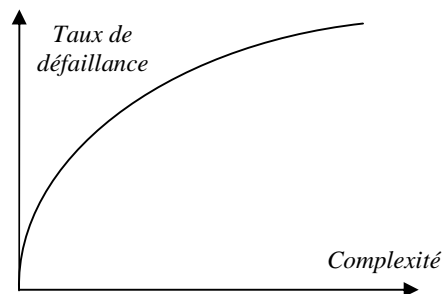


Figure II.7: Représentation théorique du taux de pannes en fonction de la complexité.

II.8.2 Autre aspect : le logiciel :

Un autre aspect important concerne la fiabilité des logiciels embarqués dans le matériel. En effet, comme les produits spécifiques comportent à la fois, du matériel et du logiciel, il est important d'évaluer comment le logiciel peut avoir une influence sur la fiabilité globale du produit. Il existe cependant une très grosse différence entre matériel et logiciel: le logiciel ne s'use pas. Ainsi la fiabilité du logiciel dépend seulement de la manière dont ce dernier a été réalisé et non pas du temps passé en exploitation.

La prédiction de la fiabilité est bien sûr très importante pour le constructeur, en particulier quand le niveau de fiabilité fait partie des prescriptions du produit et que des résultats d'exploitation ne sont pas disponibles. La norme MIL-HDBK 217 est bien connue et largement utilisée mais elle souffre, pour ce type d'application, d'une approche "pessimiste" qui donne des prévisions telles que le produit apparaît en théorie moins fiable qu'il ne l'est en réalité sur le terrain. De plus, de légères variations des paramètres peuvent entraîner d'importantes variations du résultat final, si bien que très souvent les résultats obtenus à partir de bases de données différentes peuvent être difficilement comparables. Il est certain qu'un système d'évaluation de la fiabilité ajoute des coûts: la rédaction des fiches, la maintenance et l'analyse de la base de données demandent de ressources humaines et informatiques alors que le produit impliqué peut être bon marché et au très large diffusion. Les avantages de l'évaluation de la fiabilité doivent donc mis en balance avec le coût global du système de collecte et d'analyse. L'informatique apporte certainement une aide mais il faut remarquer que la première étape est un enregistrement manuel des données. Les expériences récentes indiquent que le meilleur compromis consiste à réaliser des enquêtes par échantillonnage sur un sous-ensemble de la population choisi pour sa représentabilité [18].

II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, sont montrés :

- Les différents types de réseaux électriques : production, transport et de transmission;
- La topologie des réseaux électriques et le degré de fiabilité fourni par chaque topologie;
- Le plan de protection des réseaux électriques;
- La structure des postes de distribution de l'énergie électrique et leurs éléments constitutifs;
- La fiabilité des réseaux électriques en général a été discutée sous différents aspects : la conception, l'exploitation (les différentes règles à respecter pour garder notre réseau en état fiable) du réseau ainsi que sa protection;
- La fiabilité des nouveaux équipements électroniques utilisés dans les réseaux électriques.

Chapitre III Détermination des paramètres de fiabilité et des facteurs influant sur la fiabilité des équipements électriques

III.1 Introduction :

Des données de fiabilité des équipements électriques sont normalement obtenues à partir des enquêtes sur site des rapports de défaillances des équipements individuels industriels et commerciaux. La raison de conduire une étude doit fournir des réponses aux questions critiques concernant les caractéristiques de défaillance des équipements électriques dans les installations industrielles et commerciales.

Des techniques spécialisées d'évaluation et de modélisation de la fiabilité permettent de décliner en contraintes les objectifs de conception. L'analyse prévisionnelle de la fiabilité détermine le taux de défaillance de chaque composant de l'équipement dans les conditions réelles d'utilisation. Pour cela, des bases de données de fiabilité telles que le Military Handbook 217 (MIL-HDBK-217), ou le recueil du CNET (RDF 93) sont utilisées. Elles permettent le calcul de la fiabilité d'un circuit comportant plusieurs composants. Si nécessaire, le concepteur modifie le taux de chargement de certains d'entre eux, ou utilise des composants à haute durée de vie garantie (c'est le cas pour les condensateurs chimiques par exemple).

III.2 Données requises pour des évaluations de la fiabilité des systèmes :

Les données requises pour des évaluations quantitatives de la fiabilité des systèmes dépendront dans une certaine mesure de la nature du système étant étudié et du détail de l'étude. En général, elle exige les deux données sur la performance des différents composants ainsi que les temps requis pour faire divers fonctionnements de commutation. Les données des composants du système qui sont généralement nécessaires sont récapitulées comme suit :

- Taux de défaillance (Taux de coupure) liés à différents modes de défaillance des composants.
- Le temps (moyen) prévu pour réparer ou substituer un composant défaillant.
- Taux programmé de coupure (maintenance) des composants.
- Durée (moyenne) prévue d'un événement de coupure programmé.

III.3 Analyse du retour d'expérience :

Pour avoir un retour d'expérience significatif, il est nécessaire, lorsque la fiabilité est très bonne, d'avoir un parc très important d'équipements mis en service. Il est alors possible d'analyser les données de défaillance en exploitation. Cette analyse du retour d'expériences est fondamentale pour :

- mesurer la fiabilité opérationnelle des équipements ;
- valider les études de sûreté réalisées pendant la conception ;
- cumuler l'expérience technique pour progresser ;
- disposer d'une base de dialogue entre le constructeur et l'exploitant.

Le retour d'expérience repose sur une collecte fiable et ordonnée des informations relatives aux incidents en clientèle. La fiabilité opérationnelle (calculée sur le retour d'expérience) n'est pertinente que si la défaillance est détectable, détectée et enregistrée. Les données de défaillance, issues d'un parc d'équipements qui n'ont pas de fonctions d'auto-surveillance ou dont la maintenance périodique est peu fréquente, peuvent ne pas être représentatives de la fiabilité réelle.

Les données de fiabilité opérationnelle sur un parc de protections numériques sont pertinentes du fait de l'auto-surveillance. Il a été constaté que la fiabilité opérationnelle était au moins supérieure d'un facteur de 10 à la fiabilité prévisionnelle (calculée à partir du recueil de données MIL-HDBK-217E). Cet écart provenait vraisemblablement des recueils de données de fiabilité volontairement pessimistes et parfois anachroniques (les technologies et la qualité des composants électroniques évoluant très rapidement). Les dernières mises à jour des recueils de données de fiabilité ont considérablement réduit l'écart entre les résultats de fiabilité opérationnelle et prévisionnelle. Aujourd'hui, le MTBF correspondant au déclenchement intempestif ou au non-fonctionnement de la protection atteint plusieurs centaines d'années [37]. L'évolution des collectes de données au fil des années est représentée par la figure III.1.

III.4 Classification des matériels :

Evaluer la fiabilité nécessite d'avoir défini la nature du matériel et son utilisation. Pour cela, on a l'habitude de distinguer quatre familles de matériels :

III.4.1 Les composants électroniques : à l'origine de cette nouvelle discipline qu'est la fiabilité, les composants électroniques se sont complexifiés et diversifiés. Des ensembles formés de tels

composants se retrouvent dans la plupart des systèmes industriels, et les techniques de traitement spécifiques se sont d'abord développées pour ces matériels [2].

Si l'on considère que les composants élémentaires, alors on peut dire qu'ils ont pour caractéristiques:

- d'être non-réparables,
- de constituer des échantillons de matériels identiques,
- de fournir des échantillons de taille élevée.

Progression dans la collecte de données électriques

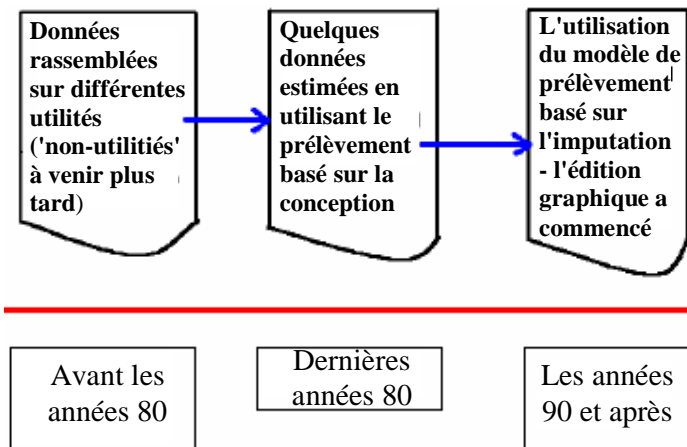


Figure III.1: Evolution des collectes de données dans le domaine d'électricité.

III.4.2 Les composants programmables : ils regroupent l'ensemble des matériels utilisant un programme (cartes, microprocesseurs, contrôle commande). La difficulté de description de ces matériels réside dans la séparation à faire entre:

- le "hard", les composants physiques (électronique, mémoire, connectique, câblerie...),
- le "logiciel", à caractère immatériel dont la complexité, la qualité, la conception, la réalisation et le contrôle génèrent également des pannes.

III.4.3 Les matériels électromécaniques actifs : ces matériels sont largement répandus dans toutes les branches de l'industrie, qu'elle soit nucléaire, pétrolière ou chimique par exemple, et constituent la partie active des circuits fluides (eau, vapeur, gaz...) des chaînes de production (fabrication, montage...), d'ensembles industriels. Contrairement aux matériels électroniques, ils ont pour caractéristiques :

- d'être réparables,
- de constituer des populations de matériels variés,
- d'être composés d'un grand nombre de pièces élémentaires,
- de fournir des échantillons de taille réduite.

Pour le matériel de type électromécanique, les principales difficultés peuvent se résumer par les considérations suivantes: Comment doit-on considérer un matériel réparé? Est-ce une remise à neuf, le matériel a-t-il la mémoire des pannes, sont-elles indépendantes? Souvent, des hypothèses doivent être prises pour débloquer les calculs de fiabilité et considérer une nouvelle jeunesse après réparation. Le fait qu'un matériel se compose d'un nombre important de pièces élémentaires introduit une complexité de description des défaillances (nombre de modes de défaillances important). Un amalgame de lois de comportement par pièce élémentaire rend théoriquement aléatoire la défaillance de l'ensemble. De plus, on observe plus généralement des

dégradations de performances plutôt que des pannes franches. En fin, les petites tailles d'échantillons gênent toujours le statisticien impatient. En effet, des observations longues peuvent parfois améliorer la qualité des échantillons, mais dépasser le cadre d'une étude, d'une observation ou d'une enquête, et surtout rendre peu homogène l'observation lorsque les conditions d'exploitation changent.

III.4.4 Les matériels mécaniques passifs : précisons d'abord cette notion: il s'agit essentiellement d'éléments de supportage, de pièces de structures d'assemblages (soudure), de tuyauterie, d'enceintes (bâches, ballon...) que les sollicitations vont amener à travailler essentiellement en fatigue et/ou en transitoire. Les paramètres qui influent de manière prépondérante sur le comportement de ces matériels sont les agressions externes et les contraintes internes liées aux conditions de fonctionnement (température, pression, chocs, vibrations...). Ces matériels sont caractérisés par :

- Une identification difficile du point de vue des limites,
- Une description délicate,
- La prise en compte de facteurs extérieurs (coup de «bélier», choc thermique, âge, vibration, contrainte oligo-cyclique...),
- La rareté des événements observables,
- Les tailles d'échantillons toujours réduites.

III.5 Source de données :

Le problème que rencontre généralement l'analyste qui réalise une étude de sûreté de fonctionnement de matériel ou de système est d'estimer des paramètres de fiabilité sur les matériels constituant le système qu'il étudie. Il est donc amené à s'intéresser à :

- Rechercher des données événementielles d'ordre qualitatif pour une analyse aussi complète que possible du fonctionnement du matériel (plus exactement du dysfonctionnement du matériel), telles que celles réclamées par l'AMDEC, les arbres d'événement, les événements initiateurs,.... ;
- Rechercher des paramètres de fiabilité d'ordre quantitatif pour calculer la fiabilité des matériels, puis à l'aide de la méthode adaptée et de logiciels disponibles, la fiabilité des systèmes.

III.5.1 Recherche bibliographique – les recueils de données de fiabilité : la méthode la plus simple pour obtenir une donnée consiste bien entendu à aller chercher cette donnée dans un ouvrage spécialisé. Malheureusement, l'emploi de tels documents se révèle souvent difficile. Cette difficulté peut être due à diverses causes :

- D'abord, le champ d'application des recueils disponibles ne recouvre pas nécessairement le domaine auquel on s'intéresse. En général, les nombreux documents existants concernent soit des applications militaires (armes, missiles, etc.), soit des applications aéronautiques. Extrapoler les données qu'ils contiennent à des domaines radicalement différents est souvent risqué, voir impossible ;
- Ensuite, les matériels que l'on rencontre lors de l'étude d'un système ne sont pas nécessairement tous évoqués dans les documents: de nombreuses lacunes existent. Cela est surtout vrai pour des matériels nouveaux et n'existent pas encore sur le marché, ou des matériels trop spécifiques à une industrie ;
- Enfin, ces ouvrages dans leur grande majorité, présentent des défauts intrinsèques qui n'en facilitent pas l'emploi. Par exemple, on trouve rarement mention d'indications sur les échantillons ayant servi de base de données aux statistiques (durée et année de collecte, nombre de matériels observés, nombre et type de défaillances relevées, etc.),

les paramètres autres que le taux de défaillance en fonctionnement ne sont qu'exceptionnellement évoqués (taux de défaillance par mode, par gravité, à la sollicitation, taux de réparation, d'indisponibilité), les intervalles de confiance ne sont pas toujours indiqués, les matériels concernés sont très mal définis quant à leurs limites physiques, à leurs caractéristiques constructives et à leurs conditions de fonctionnement.

Malgré ces difficultés, l'utilisation de ces documents constitue souvent la seule voie d'accès aux données que l'on cherche. A titre d'exemple, il paraît utile d'en citer quelques-uns, parmi les plus souvent répandus :

- Military Handbook 217 B (sigle MIL-HDBK 217 B). Ce document américain s'applique aux composants électroniques employés sur des équipements militaires.
- Tables AVCO (Etats-Unis). Relativement anciennes, elles fournissent des valeurs de taux de défaillance en fonctionnement pour des matériels très divers; on en trouve la liste dans les bulletins du 9^{ème} symposium sur la Fiabilité et le Contrôle de Qualité (1963).
- IEEE Standard 493-1997 (Etats-Unis) – IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. Comme son titre l'indique, ce document concerne la conception des matériels électriques des installations industrielles et commerciales.
- NPRD1 (Etats-Unis) – Non electronic parts reliability data (1978)- Analysis Center-Rome Air Development Centre (RADC). Cette mise à jour assez récente du document appelé RADC. TR 75/22 concerne principalement les matériels mécaniques et électromécaniques employés par l'armée américaine.
- NRPDS – Base de données brutes des centrales nucléaires américaines. L'interrogation de cette banque peut être obtenue sur un terminal via les réseaux téléphoniques internationaux.
- Annexe IV de WASH 1400 : cette annexe regroupe les valeurs des paramètres de fiabilité retenues par le professeur Norman RASMUSSEN et son équipe pour effectuer les applications numériques des méthodes développées dans leur étude sur la sûreté des réacteurs nucléaires américains.
- Wissenschaftliche Berichte – Ausfallratensammlung (ex- République Fédérale d'Allemagne) IRSW8 (1973). Ce document élaboré par l' "Institut für Reaktor Sicherheit" est destiné à la quantification des analyses probabilistes de la sûreté portant sur les réacteurs nucléaires allemands; il s'applique exclusivement aux matériels mécaniques et électromécaniques.
- Le recueil de Données de Fiabilité du CENT (Centre National d'Etudes des télécommunications en France) est très largement orienté vers le matériel électronique dont il donne les taux de fiabilité paramétrés (en fonction des conditions externes d'utilisation).
- OREDA (Off shore RELiability DAta) est un recueil européen concernant les matériels des compagnies pétrolières. Il a l'avantage de proposer des valeurs de références issues de plusieurs sources, et ayant fait l'objet d'un consensus.
- EIREDA (European Industry RELiability DAta handbook) – Ce document est une compilation et une synthèse de paramètre de fiabilité des principaux matériels des centrales nucléaires européennes, issu d'un traitement de la base de données CEDB, (Component Event Data Bank) du centre de recherche de la communauté européenne JRC (Joint Research Center) à Ispra (Italie).

III.5.2 Les recueils de données en exploitation : la méthode la plus directe pour évaluer la fiabilité des matériels consiste à observer leur comportement dans les conditions réelles d'exploitation et à relever toutes les données événementielles qui, après traitement, donneront

accès aux paramètres recherchés. Cette méthode a plus l'avantage de s'intéresser aux matériels sur lesquels on peut agir (modification – maintenance – exploitation). C'est aussi la méthode la plus longue et qui nécessite un investissement initial. Citons quelques-unes des tâches la caractérisant :

- Choix des objectifs à atteindre (quels paramètres de fiabilité en seront tirés?),
- Choix du matériel pris en compte et des sites concernés (type et nombre),
- Définition de la collecte (fiches de défaillance, de fonctionnement, signalétique) et des questions-réponses qui constituent les données brutes,
- Personnel nécessaire (nombre et qualification),
- Informatique de collecte, de contrôle et de traitement,
- Recueils de données,
-

III.5.3 Les compagnies de collecte : vu l'importance des moyens à mettre en œuvre pour l'obtention d'un recueil de données en exploitation (coût, délais, organisation, informatique), une version plus légère consiste en une compagnie de collecte caractérisée par :

- collecte limitée à un ou plusieurs sites,
- durée limitée (quelques mois),
- équipe réduite travaillant sur place,
- informatique plus légère (l'utilisation de micro-ordinateur portable est une bonne solution souvent utilisée),
- délais de réalisation plus rapide car l'étude de conception et son application en sont réduites.

Les deux problèmes qui subsistent sont de bien définir le contenu de la collecte et d'estimer le mieux possible la durée de la compagnie de collecte afin de rassembler un échantillon suffisant de défaillances.

III.6 Données additionnelles :

III.6.1 Comment déterminer les méthodes de collecte de données additionnelles? l'étape suivante consiste à identifier la manière de collecter les données additionnelles nécessaires. On peut utiliser à cette fin des méthodes de collecte de données quantitatives et qualitatives, ainsi que des approches analytiques déductives et inductives.

Les méthodes de collecte de données quantitatives et qualitatives ont chacune leurs points forts et leurs points faibles et se prêtent à répondre à différents types de questions, comme il est souligné au tableau III.1.

III.6.2 Nature des données secondaires : données secondaires = recyclage. Les données primaires sont les nouveaux éléments d'information qui ont été recueillis pour les fins spécifiques d'une recherche particulière. Les données secondaires sont les données primaires d'une certaine recherche qui sont réutilisées par une nouvelle étude [19].

III.6.3 Quand utiliser les données secondaires? certaines conditions amènent à l'utilisation des données secondaires :

- les ressources financières disponibles: il est moins onéreux d'utiliser des données existantes,
- le temps disponible : les données existent, il n'est pas nécessaire de les cueillir,

- la redondance des collectes de données: les données existent (parfois dans des volumes impossibles à reproduire — fichier de cessation d'emploi, par ex.), pourquoi les recueillir,
- la retour dans le passé: il est souvent impossible de retourner dans le passé pour reconstruire la mesure (seulement par rappel).

	<i>Méthodes quantitatives</i>	<i>Méthodes qualitatives</i>
Utilisation	Dénombrer les «qui, quoi, quand, où, combien» et mesurer la fréquence.	Analyser qualitativement le «comment » et «pourquoi».
Exemples	Interviews standardisées; enquêtes recourant à des questions d'objet limité; observation.	Interviews libres et dirigées; enquêtes recourant à des questions d'objet limité; observation; interprétation de documents.
Points forts	<ul style="list-style-type: none"> • Fournissent des « données fermes » quantitatives, exactes et précises pour prouver que certains problèmes existent. • Peuvent vérifier les relations statistiques entre un problème et ses causes apparentes. • Peuvent fournir un vaste coup d'oeil sur une population entière. • Permettent des comparaisons. • Mettent en place des informations de base qui peuvent servir à évaluer l'impact. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fournissent une compréhension approfondie du contexte d'un programme/projet afin d'interpréter des données quantitatives. • Fournissent des aperçus sur les attitudes, croyances, motifs et comportements d'un petit échantillon de population • Mettent en place des informations de base qui peuvent servir à évaluer des issues qualitatives. • Sont utiles en cas de limitation de fonds et de temps. • Sont utiles pour obtenir des parties prenantes un retour de l'information.
Points faibles	<ul style="list-style-type: none"> • Peuvent être précises, mais sans mesurer ce que l'on voulait. • Ne peuvent expliquer les causes sous-jacentes de situations données. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sont généralement non représentatives; ne permettent pas les généralisations. • Risquent de porter la marque des idées préconçues des interviewers, observateurs et informateurs.

Tableau III.1: comparaison entre la méthode qualitative et quantitative de collecte de données.

III.6.4 Avantages et inconvénients :

Avantages :

- approche exploratoire efficace pour un nouveau sujet d'intérêt,
- pré-mesure utile pour préparer une nouvelle cueillette primaire,
- démonstration convaincante de théories alternatives (à partir des mêmes données),
- vérification des conclusions d'autres chercheurs,
- frais de recherche réduits,
- minimisation de l'investissement en temps,
- permet au chercheur de se concentrer sur l'analyse plutôt que sur les problèmes de collecte de données,
- permet des structures de preuve plus complexes.

Inconvénients :

- inhibe la créativité des chercheurs, surtout au plan des indicateurs (puisqu'il faut réutiliser les définitions existantes) — hégémonie idéologique?
- facilite les recherches a-théoriques,
- distance entre les objectifs primaires et secondaires: niveaux de mesure inadéquats, indicateurs manquants, etc.
- données plus vieilles,
- pas de contrôle sur la cueillette,
- difficulté à établir la fiabilité des données.

III.7. Les tests d'hypothèse en fiabilité :

III.7.1 Principe des tests d'hypothèse sur des paramètres de fiabilité : la réalisation d'un test d'hypothèse sur un paramètre de fiabilité (ex: p , λ , MTBF, ...) repose sur l'application d'une règle de décision concernant la validité d'une hypothèse initiale, notée H_0 (ex: identité du taux de défaillance opérationnel d'un dispositif avec une valeur spécifiée, égalité des durées de vie moyenne de deux dispositifs différents, etc.).

Le principe de la règle de décision est le suivant: à partir des résultats observés sur un échantillon donné (ex: nombre de défaillances enregistrées, durées de vie individuelles, ...), on définit une frontière critique relativement à une statistique d'échantillonnage déterminée $D(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ telle que la probabilité pour cette statistique de sortir de la frontière critique lorsque l'hypothèse H_0 est vraie soit égale à une faible valeur consentie et notée α (ex: 5%, 1%, 0.1%, ...) [53]. A l'issue du test, deux situations peuvent se présenter:

- La statistique d'échantillonnage est à l'intérieur de la frontière critique: on accepte alors l'hypothèse H_0 ;
- La statistique d'échantillonnage est à l'extérieur de la frontière critique: on rejette alors l'hypothèse H_0 .

L'hypothèse H_0 est dite hypothèse nulle. La probabilité α est appelée risque de 1^{ère} espèce: c'est la probabilité (faible) de refuser à tort, à l'issue du test l'hypothèse H_0 alors que celle-ci serait vraie.

La statistique d'observation $D(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ est appelée fonction de discrimination.

III.7.2 Test de comparaison d'un taux de défaillance à une valeur spécifiée : position du problème: on dispose de résultats d'essais (ou de données provenant du retour d'expérience) sur un échantillon de dispositifs à taux de défaillance constant mais de valeur inconnue. Au vu de ces résultats, peut-on admettre, sous un risque de 1^{ère} espèce α , que ce taux de défaillance est compatible avec une valeur spécifiée λ_0 (hypothèse H_0)?

En désignant par T la durée opératoire cumulée et r le nombre de défaillances observées, on détermine les limites (λ_i , λ_s) de l'intervalle bilatéral au niveau de confiance $(1-\alpha)$ sur le taux de défaillance inconnu λ , soit :

$$I_i = \frac{c_{\alpha/2}^2(2r)}{2T} \text{ et } I_s = \frac{c_{(1-\alpha)/2}^2(2r+2)}{2T} \quad (\text{III.1})$$

Les bornes λ_i et λ_s ainsi calculées déterminent la frontière critique d'acceptation. La sanction du test est donc la suivante:

- Si $\lambda_i < \lambda_0 < \lambda_s$ (λ_0 à l'intérieur de la frontière critique): on accepte l'hypothèse $H_0 \Rightarrow \lambda = \lambda_0$;
- Si $\lambda_0 < \lambda_i$ ou $\lambda_0 > \lambda_s$ (λ_0 hors de la frontière critique): on rejette l'hypothèse $H_0 \Rightarrow \lambda \neq \lambda_0$

Exemple: sur une opération cumulée de 20000 heures, 6 défaillances ont été enregistrées sur des dispositifs électriques du même type. Peut-on admettre, sous un risque de 1^{ère} espèce α de 10%, que ce taux de défaillance est compatible avec une valeur spécifiée $\lambda_0 = 10^{-4}/H$ (hypothèse H_0)? La table des fractiles du χ^2 (voir annexe II) donne : $\chi^2_{0.5}(12) = 5.23$ et $\chi^2_{0.95}(14) = 23.7$

$$\text{D'où: } I_i = \frac{5.23}{2 \times 20000} = 1.31 \times 10^{-4} / H \quad \text{et} \quad I_s = \frac{23.7}{2 \times 20000} = 5.92 \times 10^{-4} / H$$

Donc: $\lambda_0 = 10^{-4}/H < \lambda_i \Rightarrow$ on rejette l'hypothèse H_0 (λ est probablement supérieure à la valeur spécifiée).

III.7.3 Test de comparaison de deux taux de défaillance :

Position du problème: on dispose de données opérationnelles sur deux populations de dispositifs à taux de défaillance constants mais inconnus. Sur la base de ces données, peut-on admettre, au risque de 1^{ère} espèce α , que les taux de défaillance des deux types de dispositifs sont identiques (hypothèse H_0)?

Données disponibles pour la 1^{ère} population: $T_1 =$ durée opératoire cumulée, $r_1 =$ nombre total de défaillances.

Données disponibles pour la 2^{ème} population: $T_2 =$ durée opératoire cumulée, $r_2 =$ nombre total de défaillances.

Dans l'hypothèse où l'hypothèse H_0 est vraie ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_0$), on montre que le rapport des 2 estimateurs ponctuels λ_2^*/λ_1^* est une variable de Fisher-Snedecor à $2r_1$ et $2r_2$ de degrés de liberté

$$\text{dans cet ordre. Autrement dit : } \frac{I_2^*}{I_1^*} = \frac{r_2/T_2}{r_1/T_1} = F_{2r_1, 2r_2}$$

La frontière critique d'acceptation de l'hypothèse H_0 , sous un risque de 1^{ère} espèce α , est donc déterminée par les fractiles de cette variable de Fisher-Snedecor sous les seuils respectifs $\alpha/2$ et $(1-\alpha)/2$.

La sanction du test est alors la suivante:

- Si $F_{2r_1, 2r_2}(\alpha/2) \leq \frac{r_2/T_2}{r_1/T_1} \leq F_{2r_1, 2r_2}((1-\alpha)/2)$: on accepte l'hypothèse H_0 ($\lambda_1 = \lambda_2$)
- Si $\frac{r_2/T_2}{r_1/T_1} \leq F_{2r_1, 2r_2}(\alpha/2)$ ou $\frac{r_2/T_2}{r_1/T_1} \geq F_{2r_1, 2r_2}((1-\alpha)/2)$: on rejette l'hypothèse H_0 ($\lambda_1 \neq \lambda_2$).

Exemple: on dispose de 2 couples de données : ($T_1 = 4000$ heures, $r_1 = 8$ défaillances) et ($T_2 = 9000$ heures, $r_2 = 14$ défaillances). Peut-on admettre, sur un risque de 1^{ère} espèce de α de 10%, l'hypothèse H_0 ($\lambda_1 = \lambda_2$)?

La table des fractiles de la loi du Fisher-Snedecor à 16 et 28 degrés de liberté dans cet ordre donne (voir annexe II) : $F_{16, 28}(0.05) = 0.45$ et $F_{16, 28}(0.95) = 2.02$.

Comme $\frac{r_2/T_2}{r_1/T_1} = \frac{14/9000}{8/4000} = 0.78$ est compris entre 0.45 et 2.02, on peut accepter l'hypothèse H_0 .

III.7.4 Test de tendance Mann sur l'évolution d'un taux de défaillance : soit un parc de n équipements réparables en exploitation. Les instants d'apparition des défaillances sur chaque équipement individuel sont supposés connus, par exemple à laide de compteurs horaires montés sur les équipements.

L'objectif du test de Mann est de tester, sur l'ensemble du parc, l'hypothèse H_0 d'un taux de défaillance constant au cours du temps, contre l'hypothèse alternative H_1 : λ croissant ou décroissant.

Le principe du test est le suivant: on désigne par "j" un index caractérisant l'équipement n^0 : j et on note $t_{i,j}$ l'instant d'apparition de la "i^{ème}" défaillance (mesurée à partir de sa mise en exploitation) sur cet équipement.

Soit j_m le nombre total de défaillances relevées sur l'équipement n^0 : j pour la période d'exploitation considérée.

On calcule les durées des j_m intervalles entre défaillances successives sur l'équipement n^0 j, soit:

$$d_{1,j} = t_{1,j} - t_{0,j}, \dots, d_{i,j} = t_{i,j} - t_{i-1,j}, \dots, d_{j_m,j} = t_{j_m,j} - t_{j_m-1,j} \quad (III.2)$$

Pour i fixé, on fait le décompte de la quantité $N_{i,j}$ correspondant au nombre de valeurs $d_{k,j}$, supérieures à $d_{i,j}$ avec $k > i$, on procède de la même sorte sur les valeurs de i allant de 1 jusqu'à j_m-1 et on pose: $N_j = \sum_i N_{i,j}$

Lorsque l'hypothèse H_0 est vraie (λ constant), la variable aléatoire N_j obéit à une distribution symétrique caractérisée par:

- Une espérance mathématique: $E(N_j) = j_m (j_m - 1)/4$
- Une variance : $Var(N_j) = (2j_m + 5)(j_m - 1) (N_j)j_m/72$

On effectue cette opération sur tous les équipements du parc, de $j = 1$ à $j = n$.

Dans l'hypothèse où H_0 est vraie (λ constant), la quantité $t^* = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} [N_j - E(N_j)]}{\sqrt{\sum_j Var(N_j)}}$ suit une loi de

Student à $n = \left(\sum_j j_m - 1 \right)$ degrés de liberté.

La frontière critique d'acceptation de l'hypothèse H_0 , sous un risque de 1^{ère} espèce α , est ainsi déterminée par les fractiles de la loi de Student à v d.d.l. (voir annexe II) sous les seuils respectifs de $\alpha/2$ et de $(1-\alpha)/2$.

La sanction du test est donc la suivante:

- Si $t_n(a/2) \leq t^* \leq t_n((1-a)/2)$: on accepte l'hypothèse H_0 (λ constant)
- Si $t^* < t_n(a/2)$ on rejette H_0 (présomption d'un λ croissant, traduisant un phénomène d'usure)
- $t^* \geq t_n((1-a)/2)$: on rejette l'hypothèse H_0 (présomption d'un λ décroissant, traduisant un déverminage)

III.7.5 Test de comparaison d'une moyenne de durée de vie à une valeur donnée :

Position du problème: on dispose de résultats d'essais (ou de données opérationnelles) sur un échantillon de n dispositifs dont la durée de vie est de type normal, mais dont la moyenne et la variance sont inconnues. Au vu des durées de vie ($x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$) observées sur les n dispositifs, peut-on admettre, sous un risque de 1^{ère} espèce α , que la moyenne de durée de vie est compatible avec une valeur spécifiée m_0 (hypothèse H_0)?

En désignant par \bar{x} la moyenne arithmétique des x_i et par s^2 l'estimateur non biaisé de la variance de la loi normale, on détermine les limites m_i et m_s de l'intervalle bilatéral au niveau de confiance $(1-\alpha)$ sur la moyenne, soit:

$$m_i = \bar{x} - t_{1-\alpha/2}(n) \frac{s}{\sqrt{n}} \text{ et } m_s = \bar{x} + t_{1-\alpha/2}(n) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{III.3})$$

avec $t_{1-\alpha/2}(n) =$ fractile au seuil $1-\alpha/2$ de la variable de Student à $v=n-1$ d.d.l.

Les bornes m_i et m_s déterminent la frontière critique d'acceptation.

La sanction du test est donc la suivante:

- Si $m_i < m_0 < m_s$ (m_0 à l'intérieur de la frontière critique): on accepte l'hypothèse $H_0 \Rightarrow m = m_0$;
- Si $m_0 < m_i$ ou $m_0 > m_s$ (m_0 hors de la frontière critique): on rejette l'hypothèse $H_0 \Rightarrow m \neq m_0$

Note: en l'absence de normalité, le test peut encore être mis en œuvre sous la condition : $n > 30$.

III.8 Vérification de l'hypothèse de la distribution exponentielle du temps de fonctionnement sans défaillance :

Le problème se pose de vérifier l'hypothèse suivant laquelle la probabilité de fonctionnement sans défaillance $f(t) = e^{-\lambda t}$. Nous rapportons plus bas un critère de vérification de cette hypothèse. Chaque critère concret peut distinguer, avec un niveau élevé de certitude et pour un nombre limité de données relatives aux essais de fiabilité, la distribution exponentielle d'un nombre restreint d'autres distributions.

Papier à échelle exponentielle: Sur ce papier, la famille des fonctions de répartition:

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda(t-a)} & \text{pour } t \geq a \\ 0 & \text{pour } t < a \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

est représenté sous forme de : 1/2 droites : $y = \lambda(x-a)$, $x \geq a$, où $x = t$, $y = -\ln(1-F)$, on obtient la distribution exponentielle dans le cas particulier où $a = 0$. On doit rejeter l'hypothèse du caractère exponentielle de la distribution dans le cas où le graphique de la fonction empirique s'écarterait notablement du rayon de la droite $y = \lambda x$; $x \geq 0$ passant par l'origine des coordonnées. Il est alors utile d'avoir en vue que la famille tri-paramétrique des distributions de Weibull pour laquelle :

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda(t-a)^p} & \text{pour } t \geq a \\ 0 & \text{pour } t < a \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

donne des probabilités de courbes de la forme $y = \lambda(t-a)^p$. Sur la figure III.2, on représente les graphiques de ces courbes; le cas I correspond à $p > 1$, le cas II à $p = 1$ et le cas III à $p < 1$. On doit rejeter l'hypothèse suivant laquelle la fonction de distribution est de la forme III.4 en faveur de l'hypothèse suivant laquelle la fonction de distribution donnée par la formule III.5 quand la fonction empirique de distribution, a sa convexité orientée vers le haut ($p < 1$) ou vers le bas ($p > 1$).

La construction de la fonction empirique de distribution est effectuée de la façon suivante: on prend en considération tous les instants d'apparition des pannes t_1, \dots, t_d . Le flux des instants des pannes est Poissonien d'intensité NI , les variables aléatoires $S_1 = Nt_1$, $S_2 = N(t_2 - t_1), \dots$

$S_d = N(t_d - t_{d-1})$ où N est le nombre total d'équipements, ont une fonction de distribution de la forme III.5 où $a = 0$. La fonction empirique de distribution est construite d'après la formule [22]:

$$F_{emp}(t) = \frac{d(t)}{d}, \tag{III.6}$$

où $d(t)$ est le nombre de $S_i < t$ et d est le nombre global de pannes observées.

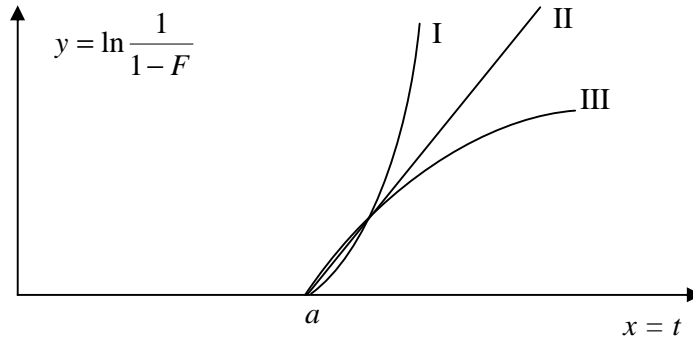


Figure III.2: représentation semi-logarithmique de la loi de Weibull.

III.8.1 Détermination de la distribution du temps de fonctionnement sans défaillance :

Référons-nous aux données collectées qui sont à l'annexe I. A partir de ces données on peut trouver les différents S_i (en jours) connaissant les dates des différentes pannes. Ces durées (S_i) sont présentées dans le tableau qui suit (t est pris entre 01/01/1990 et 15/07/2001 et le nombre d'équipements est 20) :

$S_1=1140$	$S_2=140$	$S_3=1440$	$S_4=700$	$S_5=980$	$S_6=220$	$S_7=1560$	$S_8=280$
$S_9=20$	$S_{10}=3080$	$S_{11}=880$	$S_{12}=1720$	$S_{13}=240$	$S_{14}=1060$	$S_{15}=2600$	$S_{16}=620$
$S_{17}=80$	$S_{18}=2760$	$S_{19}=920$	$S_{20}=1520$	$S_{21}=40$	$S_{22}=840$	$S_{23}=3040$	$S_{24}=1220$
$S_{25}=100$	$S_{26}=80$	$S_{27}=780$	$S_{28}=20$	$S_{29}=180$	$S_{30}=2140$	$S_{31}=1020$	$S_{32}=100$
$S_{33}=2200$	$S_{34}=1200$	$S_{35}=2140$	$S_{36}=240$	$S_{37}=800$	$S_{38}=120$	$S_{39}=1320$	$S_{40}=1160$
$S_{41}=300$	$S_{42}=880$	$S_{43}=480$	$S_{44}=1420$	$S_{45}=140$	$S_{46}=600$	$S_{47}=600$	$S_{48}=780$
$S_{49}=120$	$S_{50}=300$	$S_{51}=760$	$S_{52}=400$	$S_{53}=1880$	$S_{54}=2180$	$S_{55}=440$	$S_{56}=0$
$S_{57}=380$	$S_{58}=1920$	$S_{59}=60$	$S_{60}=120$	$S_{61}=920$	$S_{62}=1460$	$S_{63}=360$	$S_{64}=320$
$S_{65}=1140$	$S_{66}=40$	$S_{67}=420$	$S_{68}=200$	$S_{69}=820$	$S_{70}=120$	$S_{71}=160$	$S_{72}=480$
$S_{73}=640$	$S_{74}=100$	$S_{75}=120$	$S_{76}=680$	$S_{77}=880$	$S_{78}=740$	$S_{79}=100$	$S_{80}=920$
$S_{81}=20$	$S_{82}=200$	$S_{83}=1860$	$S_{84}=100$	$S_{85}=260$	$S_{86}=1800$	$S_{87}=1640$	$S_{88}=720$
$S_{89}=680$	$S_{90}=440$	$S_{91}=160$	$S_{92}=1340$	$S_{93}=1340$	$S_{94}=240$	$S_{95}=1820$	$S_{96}=20$
$S_{97}=860$	$S_{98}=380$	$S_{99}=240$	$S_{100}=140$	$S_{101}=1520$	$S_{102}=1020$	$S_{103}=20$	$S_{104}=40$
$S_{105}=60$	$S_{106}=220$	$S_{107}=260$	$S_{108}=160$	$S_{109}=260$	$S_{110}=100$	$S_{111}=100$	$S_{112}=120$
$S_{113}=960$	$S_{114}=180$	$S_{115}=20$	$S_{116}=80$				

Tableau III.2: différentes valeurs de la variable aléatoire S_i .

Après l'application de la méthode citée ci-dessus, le tracé de la fonction empirique de distribution a la forme montrée dans la figure III.3. Donc, on voit bien (figure III.3) que la concordance avec l'hypothèse d'une loi de distribution exponentielle de la distribution est très bonne. Il reste à faire un test d'hypothèse pour la vérification.

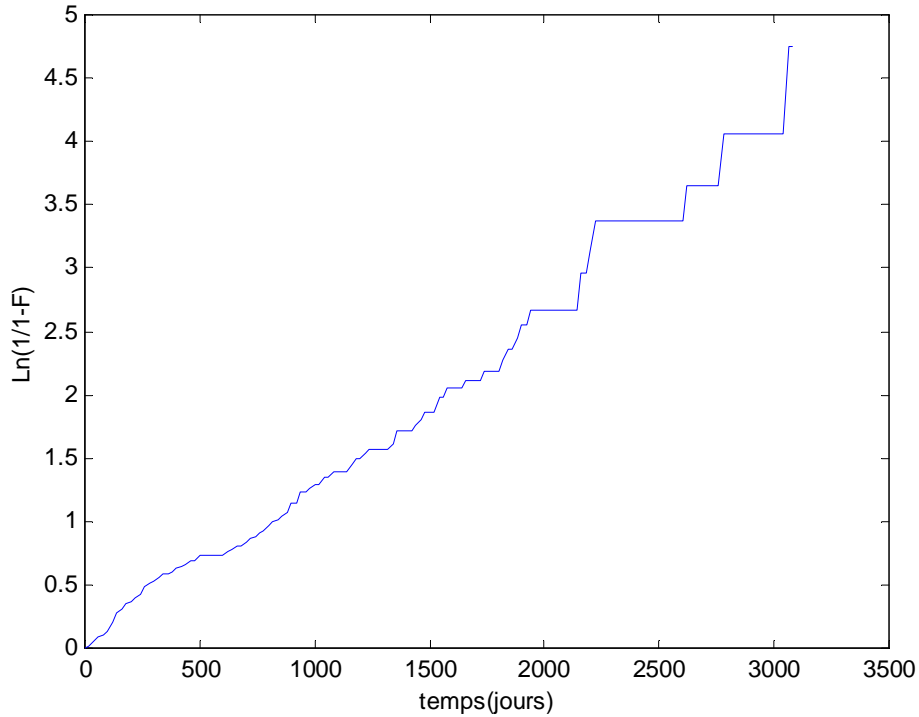


Figure III.3: Tracé de la fonction empirique de distribution des défaillances.

III.8.2 Critère de χ^2 pour la vérification du caractère exponentiel :

Soit $t_1, \dots, t_{d(t)}$: les instants des pannes. Les variables aléatoires $w_i = \frac{t_i}{T}$ où t_i sont les instants d'apparition des pannes, forment un échantillon ordonné $d(t)$ de variables aléatoires indépendantes uniformément distribuées dans l'intervalle $[0,1]$. Partageons l'intervalle $[0,1]$ en k parties égales, alors en moyenne : $\frac{d(T)}{k}$ points ω_i parmi $d(T)$ tombent dans chacun de ces k intervalles ($d(t)$ est le nombre de pannes jusqu'au temps t). Soit d_i le nombre observé de points ω_i tombés dans le i -ème intervalle. Comme on sait que la statistique :

$$y_T = \sum_{i=1}^k \frac{(d_i - \frac{d(T)}{k})^2}{\frac{d(T)}{k}} \tag{III.7}$$

suit une distribution proche de χ^2 à $(k-1)$ degrés de liberté, si seulement les nombres d_i sont suffisamment grands [22]. L'hypothèse du caractère exponentiel de la distribution est rejetée avec un seuil de signification α , s'il s'avère que :

$$y_T > c_{1-\alpha}^2 (k-1) \tag{III.8}$$

III.8.3 Application du test de χ^2 pour vérifier le caractère exponentiel de la distribution du temps de fonctionnement sans défaillance :

Toujours, Référons-nous aux données collectées qui sont à l'annexe I. De ces données, utilise les 100 premières pannes (à partir de 01/01/1990) donc les différentes valeurs des ω_i sont listées dans le tableau suivant (tableau III.3):

$\omega_1=0.0144$	$\omega_2=0.0162$	$\omega_3=0.0344$	$\omega_4=0.0432$	$\omega_5=0.0556$	$\omega_6=0.0584$	$\omega_7=0.0781$	$\omega_8=0.0816$
$\omega_9=0.0819$	$\omega_{10}=0.1208$	$\omega_{11}=0.1319$	$\omega_{12}=0.1536$	$\omega_{13}=0.156$	$\omega_{14}=0.1700$	$\omega_{15}=0.2029$	$\omega_{16}=0.2107$
$\omega_{17}=0.2117$	$\omega_{18}=0.2466$	$\omega_{19}=0.2582$	$\omega_{20}=0.2774$	$\omega_{21}=0.2779$	$\omega_{22}=0.2888$	$\omega_{23}=0.3272$	$\omega_{24}=0.3426$
$\omega_{25}=0.343$	$\omega_{26}=0.3449$	$\omega_{27}=0.3547$	$\omega_{28}=0.3550$	$\omega_{29}=0.3573$	$\omega_{30}=0.3843$	$\omega_{31}=0.3972$	$\omega_{32}=0.3984$
$\omega_{33}=0.426$	$\omega_{34}=0.4414$	$\omega_{35}=0.4684$	$\omega_{36}=0.4715$	$\omega_{37}=0.4816$	$\omega_{38}=0.4831$	$\omega_{39}=0.4997$	$\omega_{40}=0.5144$
$\omega_{41}=0.518$	$\omega_{42}=0.5293$	$\omega_{43}=0.5354$	$\omega_{44}=0.5533$	$\omega_{45}=0.5551$	$\omega_{46}=0.5627$	$\omega_{47}=0.5702$	$\omega_{48}=0.5801$
$\omega_{49}=0.5816$	$\omega_{50}=0.5854$	$\omega_{51}=0.5950$	$\omega_{52}=0.6001$	$\omega_{53}=0.6238$	$\omega_{54}=0.6513$	$\omega_{55}=0.656$	$\omega_{56}=0.6569$
$\omega_{57}=0.661$	$\omega_{58}=0.6860$	$\omega_{59}=0.6867$	$\omega_{60}=0.6882$	$\omega_{61}=0.6998$	$\omega_{62}=0.718$	$\omega_{63}=0.7228$	$\omega_{64}=0.7269$
$\omega_{65}=0.741$	$\omega_{66}=0.7418$	$\omega_{67}=0.7471$	$\omega_{68}=0.7496$	$\omega_{69}=0.7600$	$\omega_{70}=0.7615$	$\omega_{71}=0.763$	$\omega_{72}=0.7696$
$\omega_{73}=0.777$	$\omega_{74}=0.7789$	$\omega_{75}=0.7804$	$\omega_{76}=0.7890$	$\omega_{77}=0.8002$	$\omega_{78}=0.8095$	$\omega_{79}=0.8108$	$\omega_{80}=0.8224$
$\omega_{81}=0.8226$	$\omega_{82}=0.8252$	$\omega_{83}=0.8487$	$\omega_{84}=0.8499$	$\omega_{85}=0.8532$	$\omega_{86}=0.8759$	$\omega_{87}=0.8967$	$\omega_{88}=0.9058$
$\omega_{89}=0.914$	$\omega_{90}=0.9199$	$\omega_{91}=0.9219$	$\omega_{92}=0.9389$	$\omega_{93}=0.9558$	$\omega_{94}=0.9588$	$\omega_{95}=0.9818$	$\omega_{96}=0.9821$
$\omega_{97}=0.992$	$\omega_{98}=0.9977$	$\omega_{99}=0.9982$	$\omega_{100}=1.000$				

Tableau III.3: différentes valeurs de variable aléatoire ω_i .

Prenons $k = 10$, donc d_i va prendre les valeurs suivantes:

- $d_1 = 9$ pour $0 \leq \omega_i < 0.1$
- $d_2 = 5$ pour $0.1 \leq \omega_i < 0.2$
- $d_3 = 8$ pour $0.2 \leq \omega_i < 0.3$
- $d_4 = 10$ pour $0.3 \leq \omega_i < 0.4$
- $d_5 = 7$ pour $0.4 \leq \omega_i < 0.5$
- $d_6 = 12$ pour $0.5 \leq \omega_i < 0.6$
- $d_7 = 10$ pour $0.6 \leq \omega_i < 0.7$
- $d_8 = 15$ pour $0.7 \leq \omega_i < 0.8$
- $d_9 = 11$ pour $0.8 \leq \omega_i < 0.9$
- $d_{10} = 13$ pour $0.9 \leq \omega_i \leq 1$

Donc après calcul, on trouve $y_T = 7.8000$, et on d'après la table de la loi du χ^2 (voir annexe II): $c_{0.3}^2(9) = 6.393$ et $c_{0.5}^2(9) = 8.343$

C'est-à-dire que $y_T = 7.8 > c_{0.3}^2(9)$ donc on peut accepter l'hypothèse du caractère exponentiel de la fonction de distribution du temps de fonctionnement sans défaillance avec un degré de confiance de 0.7 c'est-à-dire de 70%. Ainsi, on peut supposer que la fonction de distribution de fonctionnement sans défaillance de notre matériel suit une loi exponentielle.

III.9 Taux de défaillance constant :

III.9.1 Hypothèse : toute la difficulté d'emploi de $R(t)$ est l'ignorance de la fonction $\lambda(t)$ qui

bloque l'intégration de l'expression :
$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t I(t).dt\right)$$

L'une des hypothèses très largement admise est de considérer : $\lambda(t) = \lambda = C^{st}$. Hypothèse qui conduit à : $R(t) = \exp(-\lambda t)$

Ceci signifie que le matériel suit une loi exponentielle de paramètre unique λ (taux de défaillance constant), c'est-à-dire que les défaillances sont indépendantes du temps ou aléatoires. Malgré tout, la connaissance de λ (ainsi simplifiée par l'hypothèse) ne peut se faire que par l'évaluation

d'un estimateur \hat{I} du taux de défaillance λ qui reste inconnu.

III.9.2 Observation en exploitation : l'observation peut conduire à l'estimation \hat{I} de λ par la relation simple : $\hat{I} = \frac{r}{T}$

r : nombre de défaillances observées.

T : paramètre d'observation (nombre d'heures de fonctionnement ou d'arrêt, nombre de sollicitations ou de démarrages, ...).

Le suivi en exploitation aura donc deux objectifs :

- collecter les données événementielles afin d'en tirer les défaillances souhaitées (en fonctionnement, à l'arrêt, par mode, par conséquence.....) ;
- mesurer le paramètre d'observation correspondant aux défaillances choisies.

Application : prenons quelques exemples d'équipements de l'annexe I et déterminons leurs taux de défaillances. Pour le turbogénérateur on prend les 14 premières dates des défaillances pour pouvoir ensuite faire des tests avec la loi du χ^2 .

<i>Equipement</i>	<i>Nombre de pannes détectées r</i>	<i>Temps de fonctionnement (en heures)</i>	<i>Estimation du taux de défaillance \hat{I} (déf/h)</i>
<i>Turbogénérateur</i>	14	20116	0.00069944
<i>CVCF</i>	7	96338	0.00007266
<i>Transformateur NB-113 A</i>	2	214620	0.000009318
<i>Disjoncteur UNB-201A</i>	4	214620	0.000018637
<i>Diesel de secours MG n°: 2</i>	4	214620	0.000018637

Tableau III.4: Exemple des estimations des taux de défaillances de quelques équipements.

III.9.3 Estimation du taux de défaillance : on admet généralement trois catégories de taux de défaillance :

Taux de défaillance en fonctionnement : $\hat{I} = \frac{r}{T}$

r : nombre de défaillances découvertes en fonctionnement.

T : nombre d'heures de fonctionnement.

Taux de défaillance à l'arrêt : $\hat{I}_a = \frac{r_a}{T_a}$

r_a : nombre de défaillances découvertes à l'arrêt.

T_a : nombre d'heures d'arrêt.

Taux de défaillance à la sollicitation : $\hat{g} = \frac{r}{S}$

r : nombre de défaillances découvertes en fonctionnement.

S : nombre de sollicitations.

Remarque : le taux de défaillance estimé \hat{I} est parfois remplacé par son inverse : $\frac{1}{\hat{I}} = \frac{T}{r}$ ce qui

représente en fait la durée moyenne de fonctionnement du matériel exprimée en heures, par exemple.

III.9.4 Détermination d'un intervalle de confiance pour $\hat{\lambda}$: la distribution du χ^2 est utilisée en général pour calculer un intervalle de confiance de l'estimateur de λ suivant certaines hypothèses :

- les événements sont distribués selon une loi à taux de défaillance constant λ ,
- les éléments défaillants sont remplacés au fur et à mesure de leurs pannes,
- on se donne un seuil de confiance $1 - (\alpha_1 + \alpha_2)$; ($\alpha_1 = \alpha_2$ pour les intervalles de confiance bilatéraux).

Données du problème et notations : on étudie une population de n équipements pendant une durée t_0 . Soit $T = nt_0$ la durée cumulée de l'essai. On a observé r défaillances pendant t_0 . Soit k la variable aléatoire représentant le nombre de défaillances. θ représente le temps de fonctionnement.

On recherche les dates θ_i et θ_s (d'où λ_{inf} et λ_{sup}) satisfaisant aux seuils de confiance α_1 et α_2 :

$$\alpha_1 = P[k \geq r \text{ pour } \theta = \theta_s] \tag{III.9}$$

$$\alpha_2 = P[k \leq r \text{ pour } \theta = \theta_i] \tag{III.10}$$

k étant le nombre de pannes intervenant pendant $(0, t_0)$ pour tout autre essai remplissant les mêmes conditions. Modifiant (III.6) pour l'amener à une forme identique à (III.7) :

$$1 - \alpha_1 = P[k \leq r - 1 \text{ pour } \theta = \theta_s] \tag{III.11}$$

d'où le système à résoudre :

$$1 - \alpha_1 = P[k \leq r - 1 \text{ pour } \theta = \theta_s]$$

$$\alpha_2 = P[k \leq r \text{ pour } \theta = \theta_i]$$

Il faut évaluer ces probabilités. Par hypothèse, nous sommes dans le cas d'une distribution exponentielle des temps de bon fonctionnement. Donc la distribution des fréquences des événements suit une loi de Poisson [2]. La fonction de répartition de Poisson :

$$P [x \leq k] = F(k) = \frac{(I t)^k}{k!} e^{-I t} \tag{III.12}$$

avec : k : nombre d'événements.

t : temps d'observation.

λ : taux de défaillance de la loi exponentielle associée ($\lambda = \text{constant}$).

$F(k)$ représente la probabilité d'avoir k défaillances pendant la durée t . Dans notre cas, nous

disposons d'un estimateur de λ : $\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{q}} \Rightarrow I T = \frac{nt_0}{\hat{q}}$

Le développement de la probabilité (2) conduit à :

$$P[k \leq r, \text{ pour } q = q_i] = \sum_{k=0}^r \frac{1}{k!} \left(\frac{nt_0}{q} \right)^k e^{-\frac{nt_0}{q}} \tag{III.13}$$

$$d'où : P[k \leq r] = P[k = 0] + P[k = 1] + \dots + P[k = r] \tag{III.14}$$

On pose le changement de variable : $y = \frac{nt_0}{q} \Rightarrow P[k \leq r] = \sum_{k=0}^r e^{-y} \cdot \frac{y^k}{k!}$ (III.15)

Nous nous proposons de réduire cette expression grâce à la remarque mathématique :

$$\int_y^\infty e^{-t} \frac{t^r}{r!} dt = e^{-y} \frac{y^r}{r!} + \int_y^\infty e^{-t} \frac{t^{r-1}}{(r-1)!} dt$$
 (III.16)

et on a: $\int_y^\infty e^{-t} \frac{t^r}{r!} dt = e^{-y} \left[1 + y + \dots + \frac{y^r}{r!} \right] = \sum_{k=0}^r e^{-y} \frac{y^k}{k!} dt$ (III.17)

Pour le second changement de variable, on pose $y = \frac{m}{2}$

On cherche en fait à retomber sur la loi de χ^2 , qui est tabulée, soit :

$$P[k \leq r] = \int_{2y}^\infty e^{-\frac{m}{2}} \frac{m^r}{r! 2^{(r+1)}} dm = \int_{2y}^\infty e^{-\frac{m}{2}} \frac{m^r}{2^{r+1} (r+1)} dm$$
 (III.18)

Cette transformation est possible par la loi gamma dans le cas où la variable est entière, soit : $\Gamma(r+1) = r!$

La fonction qui reste à exprimer est précisément la fonction de la distribution du χ^2 à $2(r+1)$ degrés de liberté, et l'intégrale du second membre représente la probabilité d'avoir χ^2 ($2r+2$) inférieur à $2y$. D'où la relation :

$$P[k \leq r, \text{ pour } q \text{ donné}] = P \left[\chi^2 (2r+2) > \frac{2nt_0}{q} \right]$$
 (III.19)

On a donc : $a_2 = P \left[\chi^2 (2r+2) > \frac{2nt_0}{q_i} \right]$ (III.20)

$$1 - a_1 = P \left[\chi^2 (2(r-1)+2) > \frac{2nt_0}{q_s} \right] = P \left[\chi^2 (2r) > \frac{2nt_0}{q_s} \right]$$
 (III.21)

Pour un seuil de confiance de $1 - (\alpha_1 + \alpha_2)$, on calcul les bornes θ_i et θ_s soit :

$$q_i = \frac{2nt_0}{c_{1-a_2}^2 (2r+2)} \quad \text{et} \quad q_s = \frac{2nt_0}{c_{a_1}^2 2r}$$
 (III.22)

Ce qui donne les taux de défaillance inférieur et supérieur :

$$I_{\text{inf}} = \frac{c_{1-a_2}^2 (2r)}{2nt_0} = \frac{c_{1-a_2}^2 (2r)}{2T}$$

$$I_{\text{sup}} = \frac{c_{a_1}^2 (2r+2)}{2T}$$
 (III.23)

Application : trouvons l'intervalle de confiance pour les taux de défaillances des équipements cités dans la section précédente pour des taux de risque de 10% (en utilise toujours la table de la loi du χ^2 de l'annexe II).

Turbogénérateur:

$$I_{\text{inf}} = \frac{c_{0.5}^2 (2 \times 14)}{2T} = \frac{16.93}{2 \times 20116} = 0.000420809 \quad 1/h$$

$$I_{\text{sup}} = \frac{c_{0.95}^2 (2 \times 14 + 2)}{2T} = \frac{43.773}{2 \times 20116} = 0.001088014 \quad 1/h$$

CVCF:

$$I_{\text{inf}} = \frac{c_{0.5}^2 (2 \times 7)}{2T} = \frac{6.57}{2 \times 96338} = 0.000034098 \quad 1/h$$

$$I_{\text{sup}} = \frac{c_{0.95}^2 (2 \times 7 + 2)}{2T} = \frac{26.296}{2 \times 96338} = 0.0001364771 \quad /h$$

Transformateur NB-113 A:

$$I_{\text{inf}} = \frac{c_{0.5}^2 (2 \times 2)}{2T} = \frac{0.71}{2 \times 214620} = 0.000001654 \quad 1/h$$

$$I_{\text{sup}} = \frac{c_{0.95}^2 (2 \times 2 + 2)}{2T} = \frac{12.592}{2 \times 214620} = 0.0000293351 \quad /h$$

Disjoncteur UNB-201A:

$$I_{\text{inf}} = \frac{c_{0.5}^2 (2 \times 4)}{2T} = \frac{2.73}{2 \times 214620} = 0.00000636 \quad 1/h$$

$$I_{\text{sup}} = \frac{c_{0.95}^2 (2 \times 4 + 2)}{2T} = \frac{18.307}{2 \times 214620} = 0.000042649 \quad 1/h$$

Diesel de secours MG n°2:

$$I_{\text{inf}} = \frac{c_{0.5}^2 (2 \times 4)}{2T} = \frac{2.73}{2 \times 214620} = 0.00000636 \quad 1/h$$

$$I_{\text{sup}} = \frac{c_{0.95}^2 (2 \times 4 + 2)}{2T} = \frac{18.307}{2 \times 214620} = 0.000042649 \quad 1/h$$

III.10 Taux de réparation :

Ce paramètre exprime la probabilité pour qu'un équipement donné E, qui a été en panne pendant un temps t, retrouve son aptitude à remplir sa fonction dans l'unité de temps qui suit. Dans le cas d'un équipement non réparable, on procède à un remplacement et on parle de taux de substitution. Mathématiquement, on définit le taux de réparation par :

$$m = \lim_{h \rightarrow 0} \left[\frac{1}{h} \times \text{Probabilité (E soit réparé entre t et t + h sachant qu'il a été en panne entre 0 et t)} \right]$$

III.10.1 Taux de réparation indépendant du temps : si l'on fait l'hypothèse que μ est

indépendant du temps, on obtient un estimateur \hat{m} par : $\hat{m} = \frac{r}{T_r}$ où r désigne le nombre de réparations et T_r le temps de réparation.

On définit : $\frac{1}{\hat{m}} = t$ la durée moyenne de réparation.

Application : prenons quelques exemples d'équipements de l'annexe I et déterminons leurs taux de réparation.

Equipement	Nombre réparations effectuées r	Temps de réparation T_r (en heures)	Estimation du taux de réparation \hat{m} (rép/h)
Turbogénérateur	99	5499	0.018003273
CVCF	6	2425	0.001474226
Transformateur NB-113 A	2	216	0.009259259
Disjoncteur UNB-201A	4	192	0.020833333

Tableau III.5: exemples des estimations des taux de réparations de quelques équipements.

III.10.2 Indisponibilité d'un matériel pour réparation : l'indisponibilité d'un matériel se caractérise par la probabilité de trouver ce matériel en réparation suite à une défaillance, soit:

$$P = \frac{\text{Nombre d'heures de réparation}}{\text{Nombre d'heures de fonctionnement}} \quad \text{(III.24)}$$

Cette probabilité peut être exprimée par le rapport des heures perdues dues aux défaillances sur les heures prévues de fonctionnement si aucune défaillance n'était survenue. En prenant les notations suivantes:

N: nombre de défaillances (donc de réparations).

T: nombre d'heures de fonctionnement.

τ_i : durée moyenne de réparation de la défaillance i .

τ : durée moyenne de réparation soit $\tau = \frac{1}{N}(t_1 + t_2 + t_3 + \dots)$

Exprimons ce rapport par l'expression ci-dessous:

$$P = \frac{\sum t_i}{T} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}{T} \quad \text{(III.25)}$$

En multipliant et en divisant le numérateur ($\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \dots$) par N, l'expression devient:

$$P = \frac{\sum t_i}{T} = \frac{N}{T} (t_1 + t_2 + t_3 + \dots) \quad \text{(III.26)}$$

En remarque que $\frac{1}{N}(t_1 + t_2 + t_3 + \dots)$ n'est autre que la durée de réparation moyenne τ et que

$$\frac{N}{T} \text{ est le taux de défaillance constant moyen } \lambda, \text{ l'expression devient : } P = \frac{Nt}{T} = \lambda \tau$$

Application : prenons quelques exemples d'équipements de l'annexe I et déterminons leurs taux de réparation.

Equipement	Nombre d'heures de réparation	Nombre d'heures de fonctionnement	Indisponibilité du matériel pour réparation
Turbogénérateur	5499	20116	0.273364486
CVCF	2425	96338	0.02517197
Transformateur NB-113 A	216	214620	0.001006429
Disjoncteur UNB-201A	192	214620	0.000984604

Tableau III.6: exemples d'indisponibilité du matériel pour réparation.

III.11 Détermination des facteurs influant sur la fiabilité des équipements électriques:

L'étude de la pratique d'exploitation des équipements électriques ainsi que la recherche théorique et expérimentale de la fiabilité ont montré que le fonctionnement fiable des équipements électriques dépend de plusieurs facteurs. L'analyse de ces derniers permet de déterminer la capacité d'influence de chaque facteur sur leur fiabilité [51]. La République Algérienne démocratique et populaire est située sur une zone avec différentes conditions climatiques où la température peut atteindre jusqu'à 50 °C en été et - 7 °C en hiver. La spécificité de ces conditions climatiques exige une fiabilité accrue des équipements électriques, en particulier leur protection contre les vents de sable et la variation de la température du milieu ambiant.

Il est nécessaire aussi de faire une recherche sur les facteurs non-climatiques influant sur la fiabilité des équipements électriques où presque 35 % des défaillances de ces installations est dû au non-respect des périodes d'entretien des équipements électriques ainsi que la non-correspondance de construction de ces équipements avec les conditions d'exploitation [7].

Lors de l'exploitation des équipements électriques, peuvent apparaître plusieurs défaillances où l'influence climatique prend une place primordiale. A titre d'exemple, la résistance d'isolation des équipements électriques qui est un facteur aléatoire et qui varie avec le temps subit une influence directe des facteurs climatiques [12]. La variation des conditions climatiques en Algérie dans différentes périodes de l'année entraîne des variations périodiques des paramètres d'isolation des équipements électriques. Au Nord du pays, en hiver et en automne, l'humidité accrue diminue le niveau de la résistance d'isolation, ce qui entraîne différentes défaillances et en particulier la diminution de la durée de service de l'équipement électrique. Au sud du pays, les vents de sable entraînent une diminution de la durée de service des équipements, en particulier les moteurs électriques dépourvus d'une protection contre les vents de sable voient leur fiabilité diminuée : principalement l'augmentation de la vitesse de frottement et en particulier dans les parties mobile du moteur, ce qui diminue sa durée de service.

On distingue aussi une grande influence des facteurs non-climatiques lors des processus d'exploitation des équipements électriques [12], en particulier :

- Une faible organisation des systèmes d'entretien et de maintenance des équipements;
- Le non-respect des normes d'exploitation;
- Le non-respect des périodes planifiées d'entretien des équipements.

Ce problème s'aggrave où on constate l'inexistence d'un système de collecte et de traitement de données statistiques sur la fiabilité des équipements, ce qui entraîne des difficultés importantes pour l'analyse de la fiabilité de ces derniers. Sur la base de l'étude des conditions d'exploitation des équipements électriques en Algérie, différents facteurs ont été dégagés pouvant influencer sur la fiabilité de ces équipements, ces facteurs ont été divisés en 2 groupes :

1. facteurs dépendant des conditions climatiques : haute température du milieu ambiant, variation de la température, vent de sable, vent, pluie.
2. facteurs non-climatiques : qui dépendent de près ou de loin du personnel exploitant : Non-respect des périodes planifiées d'entretien des équipements, non-respect de la durée de service nominale des équipements, la non-correspondance de la construction avec les conditions d'exploitation, les défauts de montage, ...

Afin de déterminer le niveau d'influence des ces différents facteurs sur la fiabilité des équipements électriques, il a été décidé de réaliser une enquête d'expertise avec les différents spécialistes (chefs de service technique, ingénieurs, techniciens, agents de maîtrise,...) ayant des connaissances sur les particularités des conditions d'exploitation des équipements électriques en Algérie. Les résultats de l'enquête et du traitement des informations reçues sont représentés sur les tableaux III.7, III.8, III.9 et III 10. Le traitement de ces informations a été réalisé à l'aide de la méthode de la corrélation des rangs [3]. Les niveaux d'influence des différents facteurs ont été représentés sur des histogrammes (figures III.4 et III.5) où l'axe des abscisses représente les facteurs et l'axe des ordonnées représente le rang d'influence.

Facteur	Rang															
	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆	e ₇	e ₈	e ₉	e ₁₀	e ₁₁	e ₁₂	e ₁₃	e ₁₄	e ₁₅	e ₁₆
Haute température du milieu ambiant	2	2	2	3	3	1	2.5	1.5	2.5	1	1.5	1.5	3	3	1.5	1.5
Variation de la température	3	3.5	3	3	2	3	2.5	3	2.5	2.5	2.5	3	2	1.5	1.5	3
Vent de sable	1	1	1	1	1	2	1	1.5	1	2.5	1.5	1.5	1	1.5	3	1.5
Vent	5.5	5	4	5.5	5.5	4	4	4	4	5	4	5	4	4	4	4
Neige	4	3.5	5.5	4	4	5.5	5.5	5.5	5.5	4	5	4	5.5	5.5	5	5
Pluie	5.5	6	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	6	6	6	5.5	5.5	6	6

Tableau III.7: résultats de l'expertise sur les facteurs climatiques.

e : expert.

Facteur	Rang															
	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆	e ₇	e ₈	e ₉	e ₁₀	e ₁₁	e ₁₂	e ₁₃	e ₁₄	e ₁₅	e ₁₆
Non-correspondance de la conception avec les conditions d'exploitation	4.5	3.5	2	2	1	2	5	1	2	2.5	1.5	3.5	1.5	2.5	3.5	2.5
Défaut de fabrication des équipements	6.5	8.5	5	3.5	9	6	6	5	3	3.5	4	5	9	6	8	5
Défaut de montage	9	8.5	6.5	5.5	8	7	8	7	6	5	1.5	8.5	7.5	5	7	7.5
Non-respect de la durée nominale de fonctionnement des équipements	8	6	3.5	3.5	7	3	7	6	4.5	4	5	1.5	1.5	2.5	1.5	2.5
Défaut dus au personnel exploitant	2.5	6	8	8	2.5	5	9	8	7	6	7	8.5	3.5	8.5	9	6
Défaut dans l'isolation	6.5	6	6.5	7	6	4	4	3	4.5	8.5	6	7	3.5	4	3.5	4
Manque du personnel	2.5	2	9	9	4	8	2	4	8	7	8.5	6	5	7	5.5	7.5
Non-respect de la période planifiée d'entretien	1	1	1	1	2.5	1	1	2	1	1	3	1.5	3.5	1	1.5	1
Manque d'équipements de rechange dans le stock	4.5	3.5	3.5	5.5	5	9	3	9	9	8.5	8.5	3.5	6	8.5	5.5	9

Tableau III.8: résultats de l'expertise sur les facteurs non-climatiques.

Analyse statistique	Facteur influant					
	Haute température du milieu ambiant x_1	Variation de la température x_2	Vent de sable x_3	Vent x_4	Neige x_5	Pluie x_6
Somme des rangs	31.5	42.0	23.0	71.5	77.0	91.0
Evaluation du rang	1.96	2.62	1.44	4.47	4.81	5.69
Rang	II	III	I	IV	V	VI

Tableau III.9 : Résultats de l'analyse pour les facteurs climatiques.

ANALYSE STATISTIQUE	Facteur influant								
	Non-correspondance de la conception avec les conditions d'exploitation	Défaut de fabrication des équipements	Défaut de montage	Non-respect de la durée nominale de fonctionnement des équipements	Défaut dus au personnel exploitant	Défaut dans l'isolation	Manque du personnel	Non-respect de la période planifiée d'entretien	Manque d'équipements de rechange dans le stock
Somme des rangs	40.5	92.0	107.5	67.0	104.5	88.0	95.0	24.0	101.5
Evaluation du rang	2.53	5.75	6.72	4.19	6.53	5.50	5.94	1.50	6.43
Rang	II	V	IX	III	VIII	IV	VI	I	VII

Tableau III.10 : Résultats de l'analyse pour les facteurs non-climatiques.

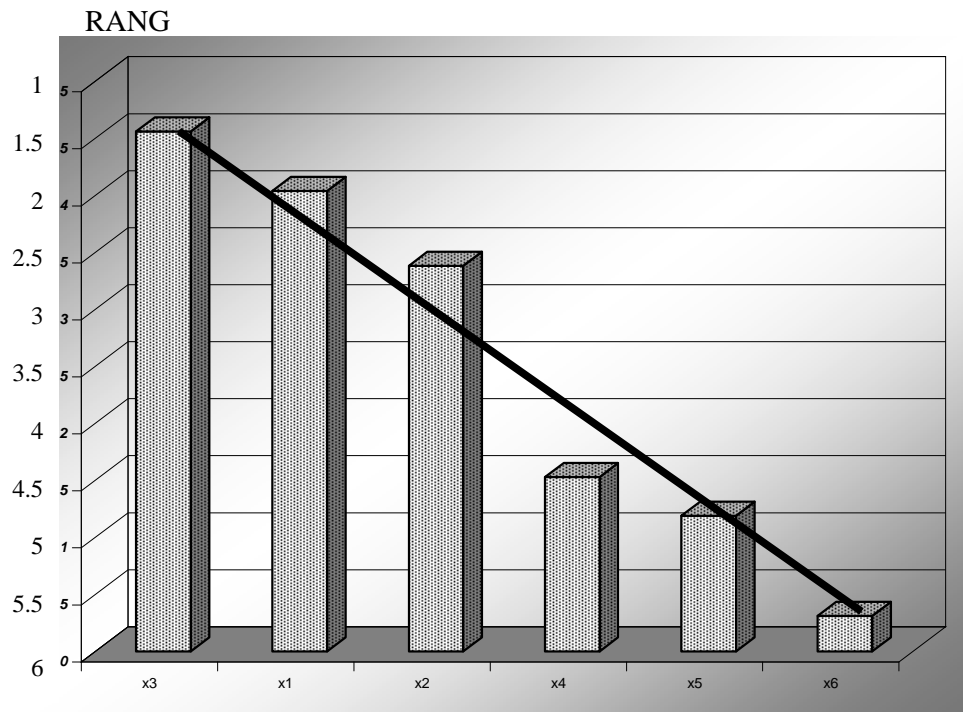


Figure III.4 : Histogramme de l'influence des facteurs climatiques sur la fiabilité des équipements électriques.

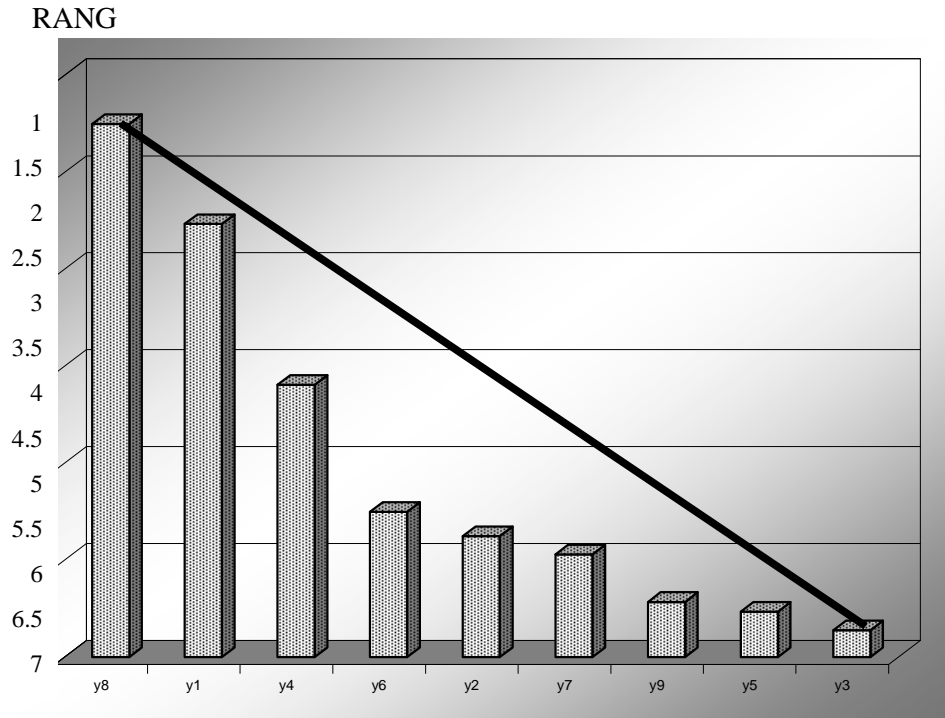


Figure III.5 : Histogramme de l'influence des facteurs non-climatiques sur la fiabilité des équipements électriques.

Afin de vérifier le niveau de concordance des informations, on a utilisé le coefficient de concordance W [3]. Ce dernier est déterminé d'après les formules suivantes :

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} \cdot m^2 (n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T_j} \quad (\text{III.27})$$

où : $T_j = \frac{1}{12} \sum_{t_j} (t_j^3 - t_j)$ (III.28)

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m x_{ij} - \frac{1}{2} (n+1) \right]^2 \quad (\text{III.29})$$

où : t_j : nombre de répétitions du $i^{\text{ème}}$ rang.
 x_{ij} : rang du facteur, donné par l'expert.

Sur la base de la formule III.27, le coefficient de concordance W a été trouvé égal à 0.87 pour les facteurs climatiques et 0.74 pour les facteurs non-climatiques. On remarque que le niveau de concordance de l'enquête en fonction de la valeur de W est appréciable.

Afin de vérifier que les informations reçues ont un caractère non-aléatoire, on a utilisé le critère de c^2 , ce critère a une distribution avec un nombre de degré de liberté de $n-1$ et il est déterminé comme suit [3] :

$$c^2 = m(n-1)W \quad (\text{III.30})$$

où : m : nombre d'experts interpellés, n : nombre de facteurs.

Dans notre cas :

$c^2 = 69,60$ lors de l'analyse des facteurs climatiques

$c^2 = 60,16$ lors de l'analyse des facteurs non-climatiques.

D'après la table de c^2 (voir annexe II), la valeur de c^2 pour un niveau de confiance de 5 % et un degré de liberté $n-1$ de 5 = 11,5 lors de l'analyse des facteurs climatiques. Tandis que la valeur de c^2 pour un niveau de confiance de 5 % et un degré de liberté $n-1$ de 8 = 15,5 lors de l'analyse des facteurs non-climatiques.

D'après les résultats obtenus on peut conclure que :

- Les facteurs climatiques qui ont le plus d'influence sur la fiabilité des équipements électriques sont : le vent de sable, la haute température du milieu ambiant et la variation de la température.
- Les facteurs non-climatiques qui ont le plus d'influence sur la fiabilité des équipements électriques sont : le non-respect de la période planifiée d'entretien, la non-correspondance de la conception avec les conditions d'exploitation et le non-respect de la durée nominale de fonctionnement des équipements.

III.12 Conclusion :

Dans ce chapitre :

- Différentes méthodes de collecte de données sont montrées ainsi que la détermination des différents paramètres caractéristiques pour l'évaluation de la fiabilité.
- Une connaissance de la fiabilité des équipements électriques est une considération importante dans la conception et le fonctionnement des systèmes de distribution d'énergie industriels et commerciaux. Les caractéristiques de défaillance de différentes pièces d'un équipement électrique (c.-à-d., les composants) peuvent être partiellement décrites par les statistiques de fiabilité de base suivantes :
 - § Taux de défaillance, souvent exprimé comme le nombre de défaillances par an par composant (défaillances par unité d'un an);
 - § Le temps d'arrêt à la réparation ou de substitution d'un composant après qu'il est tombé en panne en service, exprimé en heures (ou minutes) par défaillance; et
 - § Dans quelques cas spéciaux, la probabilité de démarrage (ou de fonctionnement) est utilisée.
- On a pu démontrer et avec un test de vérification le caractère exponentiel de la fonction de distribution des défaillances des équipements électriques d'après des statistiques ramenées de l'industrie.
- Les facteurs climatiques et non-climatiques qui ont le plus d'influence sur la fiabilité des équipements électriques ont été déterminés (vent de sable et non-respect de la période planifiée de l'entretien respectivement).
- La méthode qui utilise une étude d'expertise est utilisée afin de cibler la recherche sur la fiabilité des équipements, en particulier lors du manque d'un système de collecte et de traitement de données (notamment en Algérie).
- Ces résultats vont être utilisés dans le dernier chapitre pour évaluer la fiabilité des postes de distribution de l'énergie électrique.

Chapitre IV *Processus Markoviens et semi-Markoviens*

IV.1 Introduction :

Plusieurs techniques analytiques puissantes pour l'évaluation des performances des systèmes électriques (et beaucoup d'autres systèmes) sont basées sur la théorie *des chaînes de Markov*. Une chaîne de Markov est un cas spécial *d'un processus de Markov* qui est lui-même un cas spécial *d'un processus aléatoire*.

Pendant beaucoup d'années, des modèles de Markov et des méthodes d'analyse de Markov ont été relégués à la liste exotique des techniques stochastiques de modelage mais rarement utilisées, au moins pour des buts de fiabilité et de maintenabilité. La promulgation de la norme 61508 du CEI sur la sûreté fonctionnelle ayant rapport avec la sûreté des systèmes électriques / électroniques / électroniques programmables a sensiblement revitalisé l'analyse de Markov en exigeant l'analyse de divers modes de défaillances disparates d'une perspective de sûreté de fonctionnement. Les méthodes également suscitent plus d'attention parce que les outils d'aujourd'hui de logiciels informatiques facilitent des analyses complexes de Markov pour les exécuter que dans le passé.

Dans la fiabilité, la maintenabilité et la sûreté (FMS) la technique stochastique de modelage est employée pour décrire une exploitation du système en ce qui concerne le temps. La défaillance et les temps de réparation des composants deviennent typiquement les variables aléatoires. Le processus de Markov permet les calculs de la disponibilité sans le besoin de la solution exigée par une analyse de Monte-carlo.

IV.2 Processus stochastiques :

Quand on examine l'évolution d'un processus régi par les règles de la probabilité, on observe *un processus stochastique*. Un processus stochastique (ou processus aléatoire) est une séquence X_1, X_2, \dots, X_N de variables aléatoires fondées sur le même ensemble fondamental S [42]. Les valeurs possibles des variables aléatoires sont appelées les états possibles du processus. La variable X_t représente l'état du processus au temps t (on dit aussi l'observation au temps t). Les différentes variables aléatoires en général ne sont pas indépendantes les unes des autres. Ce qui fait réellement l'intérêt des processus stochastiques est la dépendance entre les variables aléatoires.

Processus aléatoire (stochastique) \equiv famille de variables aléatoires $X(t)$ où t est un paramètre d'indexation (habituellement le temps).

L'étude des processus stochastiques concerne l'analyse d'une collection de variables aléatoires, de leur interdépendance, de leur changement avec le temps, et de leur comportement limite, et autres. Dans l'étude des processus stochastiques, il est utile d'établir deux catégories distinctes :

a) Stationnaire : Un processus stationnaire est un processus pour lequel la distribution demeure la même avec le temps.

b) évolutionnaire (Non stationnaire) : Un processus évolutionnaire peut être défini en tant qu'un processus qui n'est pas stationnaire et il évolue avec le temps.

Pour spécifier entièrement un processus stochastique, il suffit de spécifier :

1. la loi de probabilité de la première variable aléatoire X_1 , qui spécifie donc l'état du processus lors de la première observation.
2. pour toute valeur de $t > 1$, la probabilité conditionnelle $P(X_t=j | X_1=i_1, \dots, X_{t-1}=i_{t-1})$

Un modèle stochastique prévoit un ensemble de résultats possibles pesés par leurs hasards ou probabilités. Le mot " stochastique " dérive du grec, viser ou deviner, et il signifie " aléatoire " ou " chance ". " Sûr ", " déterministe " ou " certain " sont les antonymes. De tels modèles doivent être jugés seulement sur l'utilité du modèle pour le but prévu [46]. L'observateur choisit de modéliser le phénomène comme stochastique ou déterministe. Le choix dépend du but de l'observateur; le critère pour juger ce choix est toujours l'utilité du modèle pour le but prévu. Pour être utile, un modèle stochastique doit refléter tous les aspects du phénomène à l'étude. En outre, le modèle doit permettre la réduction de prédictions et implications importantes au sujet du phénomène.

Il y a beaucoup de genres de processus aléatoires. Deux des caractéristiques de distinction les plus importantes d'un processus aléatoire sont si les valeurs que le processus aléatoire peut prendre sont continues sur un certain intervalle et si le paramètre d'indexation est continu ou discret.

Classification des processus aléatoires :

- (1) l'espace d'état : - état continu – $X(t)$ peut prendre n'importe quelle valeur sur un intervalle continu fini ou infini ou un ensemble de tels intervalles.
 - état discret – $X(t)$ a seulement un nombre fini ou comptable de valeurs possibles $\{s_0, s_1, \dots, s_i, \dots\}$
 - habituellement désigné sous le nom *d'une chaîne*.
- (2) paramètre d'indexation (appelé temps) :

- temps discret - les temps autorisés dans lesquels des changements en valeur peuvent se produire sont finis ou comptables ($X(t)$ peut être représenté comme un ensemble $\{X_i\}$)
- temps continu - les changements peuvent se produire n'importe où dans un intervalle fini ou infini sur l'axe de temps ou l'ensemble de tels intervalles.
 - souvent appelé un processus *aléatoire*.

Presque tous les systèmes sont dynamiques en nature. Le modèle de Markov est un outil puissant pour résoudre de tels problèmes dynamiques. Son processus stochastique est une séquence des résultats X_t , où t prend les valeurs d'un espace de paramètres T . L'ensemble de tous les résultats possibles et distincts de toutes les expériences dans un processus stochastique s'appelle son *espace d'état* et normalement est dénoté par Ω . Ses éléments s'appellent *les états*. Si l'espace d'état Ω est discret, alors le processus s'appelle un processus à états discrets. Si non, il s'appelle un processus à états continus.

IV.3 Qui est Markov, et qu'elle est l'analyse de Markov?

Andrei A. Markov diplômé de l'université de Saint Petersburg en 1878 et plus tard est devenu un professeur. Ses premiers travaux se sont occupés principalement de la théorie et l'analyse des nombres, les fractions continues, les limites des intégrales, la théorie d'approximation et la convergence des séries. Il a plus tard appliqué les fractions continues à la théorie des probabilités.

On se rappelle en particulier de Markov pour ses études sur les chaînes de Markov. Ces chaînes sont des ordres de variables aléatoires dans lesquelles la future variable est déterminée par la variable actuelle mais sont indépendantes de la manière par laquelle l'état actuel a résulté de ses prédécesseurs. Ce travail a lancé la théorie des processus stochastiques [46].

L'analyse de Markov regarde une séquence d'opérations et analyse la tendance d'un événement d'être suivi par d'autres. En utilisant cette analyse, on peut produire un nouvel ordre d'événements aléatoires mais relatifs, qui ressemblent à l'original. Le modèle de Markov suppose que le futur est indépendant du passé indiquant le présent. En utilisant Markov, la variable aléatoire est indexée au temps, qui peut être discret ou continu. Beaucoup d'événements aléatoires sont affectés par ce qui s'est produit auparavant. Par exemple, le temps d'aujourd'hui a l'influence sur ce que sera le temps le lendemain. Ils ne sont pas des événements totalement indépendants.

IV.4 Processus fondamentaux de Markov :

Le modèle de Markov est une autre technique largement répandue dans l'analyse de la fiabilité. Il surmonte la plupart des inconvénients des autres techniques et il est plus flexible pour être mis en application dans l'analyse de la fiabilité pour différents systèmes de calcul.

IV.4.1 Modèles Standards de Markov :

Il y a quatre types de modèles standards de Markov correspondants à quatre types de processus de Markov classifiés selon leur espace d'état et les caractéristiques du temps comme le montre le tableau IV.1.

Type	Espace d'état	Espace du temps
1	Discret	Discret
2	Discret	Continu
3	Continu	Discret
4	Continu	Continu

Tableau IV.1: Quatre types de processus Markoviens.

IV.4.1.1 Chaîne de Markov à temps discret :

Espace d'état E fini, $E = \{1, \dots, N\}$,

Une chaîne de Markov est un processus aléatoire d'état discret dans lequel le seul état qui influence le prochain état est l'état actuel. Pour être plus précis: Chaîne de Markov à temps discret: X_{n+1} dépend seulement de X_n et non des autres X_i où $1 \leq i < n$.

$$\Pr\{X_{n+1}=s_i \mid X_n=s_j, X_{n-1}=s_k, \dots, X_1=s_1\} = \Pr\{X_{n+1}=s_i \mid X_n=s_j\} \quad (IV.1)$$

Cette équation est désignée sous le nom de *la propriété de Markov*, "On peut se contenter de retenir du passé uniquement le présent". C'est une proposition très vigoureuse, seulement peu de systèmes physiques peuvent satisfaire cette proposition dans un sens strict. Malgré cela, le processus de Markov est un modèle extrêmement utile pour de larges classes de systèmes.

Notons qu'aucune expérience ne peut montrer la validité complète de la proposition markovienne; par conséquent, aucun système physique ne peut être classifié absolument en tant que markovien ou non-markovien [29]. Maintenant la question importante est si le modèle de Markov est utile, parce qu'il fournit des résultats précis? Donc la proposition de Markov peut être justifiée, et l'investigateur peut apprécier la convenance analytique et informatique pas souvent trouvée dans les modèles complexes.

Considérons un système où les états devant le dernier état occupé également influencent le futur comportement. On peut encore spécifier la proposition markovienne pour ces systèmes en changeant la structure d'état. Supposons que les deux derniers états occupés, tous les deux influencent la transition au prochain état. Alors un nouveau processus peut être défini avec N^2 états - chaque état dans le nouveau processus correspondrait à une paire d'états successifs dans l'ancien processus. De cette redéfinition, cette propriété pourrait être satisfaite, mais aux dépens d'une augmentation considérable de la complexité de calcul. En littérature, ceci est également connu comme la malédiction de la dimensionnalité.

Le processus à états discrets désigné sous le nom de *la chaîne*, ainsi le processus de Markov à états discrets et à temps discret s'appelle habituellement la chaîne de Markov à temps discret (CMTD). Une chaîne générale à temps discret est une séquence de variables aléatoires discrètes $\{X_n, n=1,2,\dots\}$, dans laquelle X_{k+1} dépend de tous les résultats précédents X_1, X_2, \dots, X_k . L'analyse de ce type de chaînes peut facilement devenir non-maniable, particulièrement pour l'évaluation à long terme. Heureusement, dans beaucoup de situations pratiques, l'influence des premiers résultats sur les futurs résultats tend à diminuer rapidement avec le temps. On peut supposer que X_{n+1} dépend seulement des résultats i précédents, où $i \geq 1$ est un nombre fixe et fini. Dans ce cas-ci, trouver $\Pr\{X_{n+1}=j\}$, exige seulement les informations sur les i résultats précédents (du pas $n-i+1$ au pas n), c.-à-d.,

$$\Pr\{X_{n+1}=j \mid X_0=i_0, X_1=i_1, \dots, X_n=i\} = \Pr\{X_{n+1}=j \mid X_{n-i+1}=i_{n-i+1}, X_{n-i+2}=i_{n-i+2}, \dots, X_n=i\} \quad (IV.2)$$

On appelle ce type de chaînes *une chaîne de Markov d'ordre i*. Habituellement, nous nous référons simplement à la chaîne de Markov du premier ordre le nom de la chaîne de Markov. Pour ces chaînes, seulement leur présent (au temps n) a n'importe quelle influence sur leur futur (au temps $n + 1$). En d'autres termes, pour tout $n > 0$:

$$\Pr\{X_{n+1}=j \mid X_0=i_0, X_1=i_1, \dots, X_n=i\} = \Pr\{X_{n+1}=j \mid X_n=i\} \quad (IV.3)$$

La caractéristique essentielle d'un tel processus de Markov peut être considérée comme *sans mémoire*. Pour le côté droit de l'équation ci-dessus, on suppose que l'espace d'état Ω considéré est fini ou bien comptable infini. Définissons :

$$P_{ij}(n, n+1) = \Pr\{X_{n+1}=j \mid X_n=i\}, \quad n = 0, 1, \dots \quad (IV.4)$$

La probabilité conditionnelle $p_{ij}(n, n+1)$ s'appelle la probabilité *de transition* (d'un pas) de l'état i à l'état j au temps n . Les probabilités de transition à m pas au temps n sont définies par :

$$P_{ij}(n, n+m) = \Pr\{X_{n+m}=j \mid X_n=i\}, \quad n = 0, 1, \dots \quad (IV.5)$$

et la matrice de transition correspondante à m pas au temps n est $\mathbf{P}(n, n+m)$. La matrice de transition devrait satisfaire :

$$\mathbf{P}(m, n) = \mathbf{P}(m, l) \cdot \mathbf{P}(l, n), \quad m \leq l \leq n \quad (IV.6)$$

qui est équivalent à :

$$p_{ij}(m, n) = \sum_k p_{ik}(m, l) p_{kj}(l, n), \quad m \leq l \leq n \quad (IV.7)$$

Pour des chaînes de Markov à temps discret, le prochain état peut être identique à l'état actuel: $X_{n+1} = X_n$. Posons $p = \Pr[X_{n+1}=s_i \mid X_n=s_j]$ pour tout $n \geq 0$ (cela est vrai pour toutes les chaînes de Markov homogènes). La probabilité pour que X_{n+1} soit différent de X_n est $1-p$. La probabilité pour que X_{n+1} soit le même que X_n et X_{n+2} soit différent est $p \cdot (1-p)$. En général :

$$\Pr[X_{n+i} \neq s_i \ \& \ X_{n+i-1} = X_{n+i-2} = \dots = X_{n+1} = s_i \mid X_n = s_j] = p^{i-1}(1-p) \quad (IV.8)$$

Par conséquent, le nombre de transitions d'état entre les changements d'état est distribué géométriquement.

Un type spécial de chaîne de Markov est *le processus de vie ou de mort*, dans lequel les états prennent toutes les valeurs entières non négatives sur une gamme (probablement infinie); c'est-à-dire, $\{s_0, s_1, \dots, s_i, \dots\} = \{0, 1, \dots, i, \dots\}$. Dans ce cas, nous pouvant juste nous référer à s_i un i , et définir un processus de vie ou de mort comme: Si $X_n = i$, donc $X_{n+1} = i+1, i$ ou $i-1$, c.-à-d., les transitions d'état sont toujours entre les états voisins.

Exemple : Supposons qu'un système a trois états après chaque passage. Les états sont les états parfait, dégradé, et défaillant dénotés par les états 1, 2 et 3. L'état du passage actuel affectera juste l'état du prochain passage. La matrice d'une probabilité de transition à un pas est donnée par:

$$\begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 & 0.6 \end{bmatrix} \quad (IV.9)$$

C'est une chaîne de Markov à temps discret, à états discrets (CMTD) qui est construite par le graphe de transition de la figure IV.1. La matrice à deux pas de transition peut être obtenue comme :

$$P(0,2) = P(0,1) \times P(1,2) = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 & 0.6 \end{bmatrix}^2 = \begin{bmatrix} 0.56 & 0.27 & 0.17 \\ 0.38 & 0.37 & 0.25 \\ 0.22 & 0.35 & 0.43 \end{bmatrix} \quad (IV.10)$$

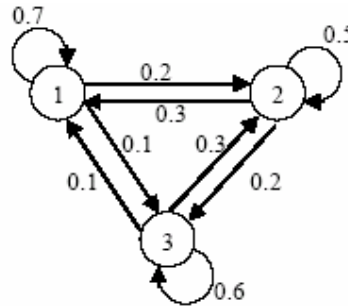


Figure IV.1: CMTD pour les transitions d'un système à trois états.

Ensuite, si le système reste initialement à l'état parfait, alors la probabilité que le système reste toujours à cet état après 2 passages devrait être $p_{11}(0,2) = 0.56$. La matrice à quatre pas de transition est :

$$P(0,4) = P(0,2) \times P(2,4) = \begin{bmatrix} 0.56 & 0.27 & 0.17 \\ 0.38 & 0.37 & 0.25 \\ 0.22 & 0.35 & 0.43 \end{bmatrix}^2 = \begin{bmatrix} 0.454 & 0.31 & 0.236 \\ 0.408 & 0.327 & 0.265 \\ 0.351 & 0.339 & 0.310 \end{bmatrix} \quad (IV.11)$$

La probabilité que le système ne reste pas à l'état de défaillance après que 4 passages ont lieu est:

$$1 - p_{13}(0,4) = 1 - 0.236 = 0.764. \quad (IV.12)$$

IV.4.1.2 Chaîne de Markov à temps continue :

Considérons un processus aléatoire à temps continu dans lequel le nombre de fois où les variables aléatoires $X(t)$ changent de valeur (le processus change d'état) est fini ou comptable. Posons t_1, t_2, t_3, \dots : les temps où le processus change d'état. Si on ignore combien de temps le processus aléatoire demeure dans un état donné, on peut regarder l'ordre $\{X_{t_1}, X_{t_2}, X_{t_3}, \dots\}$ comme un processus à temps discret inclus dans un processus à temps continu [41]. Une chaîne de Markov à temps continu est un processus aléatoire d'états discrets à temps continu tels que :

- le processus inclus à temps discret est une chaîne de Markov à temps discret, et
- le temps entre les changements d'état est une variable aléatoire avec une distribution sans mémoire.

Une fonction de distribution $F(\cdot)$ est sans mémoire si et seulement si

$$F_T(t) = F_T(t+t | T > t) \quad (IV.13)$$

Ceci indique que la distribution du temps jusqu'au prochain changement d'état n'est pas une fonction du temps depuis le dernier changement d'état. Nous pouvons redire ceci comme :

$$F_T(t) = \Pr[T \leq t + t | T > t] \quad (IV.14)$$

Utilisons la définition de la probabilité conditionnelle,

$$F_T(t) = \frac{\Pr[T \leq t+t \& T > t]}{\Pr[T > t]} = \frac{F_T(t+t) - F_T(t)}{1 - F_T(t)} \quad (IV.15)$$

divisons les deux côtés par t et calculons la limite quand $t \rightarrow 0$,

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{F_T(t)}{t} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{F_T(t+t) - F_T(t)}{t(1 - F_T(t))} \quad (IV.16)$$

$$F_T^\circ(0) = \frac{F_T^\circ(t)}{1 - F_T^\circ(t)} \quad (IV.17)$$

$$F_T^\circ(t) + F_T^\circ(0) \cdot F_T^\circ(t) - F_T^\circ(0) = 0 \quad (IV.18)$$

La solution de cette équation linéaire de premier ordre est :

$$F_T(t) = 1 - e^{-F_T^\circ(0)t} \quad (IV.19)$$

Par conséquent, la seule distribution sans mémoire à temps continu est la distribution exponentielle, et le temps entre les changements d'état dans une chaîne de Markov à temps continu est exponentiellement distribué.

Semblable au cas de la CMTD, le processus de Markov à états discrets et à temps continu s'appelle habituellement la chaîne de Markov à temps continu. Soit l'espace de temps $T = [0, \infty[$, un ensemble d'indices et considérons un processus stochastique à temps continu $\{X(t), t \geq 0\}$ qui prend des valeurs sur l'espace d'états discrets Ω . On dit que le processus $\{X(t), t \geq 0\}$ est une chaîne de Markov avec un temps continu si, pour chaque $s \geq 0$, $t > 0$ et chaque ensemble A , on a :

$$\Pr\{X(t+s) \in A | X(u), 0 \leq u \leq s\} = \Pr\{X(t+s) \in A | X(s)\} \quad (IV.20)$$

Particulièrement, pour chaque $s \geq 0$, $t > 0$ et chaque $i, j \in \Omega$, et chaque historique $x(u), 0 \leq u \leq s$,

$$\Pr\{X(t+s) = j | X(s) = i, X(u), 0 \leq u \leq s\} = \Pr\{X(t+s) = j | X(s) = i\} \quad (IV.21)$$

donc le processus $\{X(t)\}$ est appelé *une chaîne de Markov à temps continue (CMTC)*. Une CMTC est un processus stochastique ayant la propriété de Markov que la distribution conditionnelle du futur état, étant donné l'état actuel et tous les états du passé, dépend seulement de l'état actuel et est indépendant du passé. En outre, on définit :

$$p_{ij}(s, t) = \Pr\{X(t) = j | X(s) = i\}, 0 \leq s < t \quad (IV.22)$$

La probabilité conditionnelle $p_{ij}(s,t)$ est appelée fonction de probabilité de transition de l'état i à l'état j et la matrice $\mathbf{P}(s,t)$ est appelée la fonction de la matrice de transition. Semblable au CMTD, nous avons l'équation de Chapman-Kolmogorov comme :

$$p_{ij}(s,t) = \sum_k p_{ik}(s,u) p_{kj}(u,t), \quad 0 \leq s < u < t \quad (\text{IV.23})$$

Dans la notation matricielle, celle-ci peut être écrite comme :

$$\mathbf{P}(s,t) = \mathbf{P}(s,u) \cdot \mathbf{P}(u,t), \quad 0 \leq s < u < t \quad (\text{IV.24})$$

Quand les fonctions de probabilité de transition $p_{ij}(s,u)$ ne dépendent que de la différence $\Delta t = t - s$, c'est à dire,

$$p_{ij}(Dt) = \Pr\{X(Dt+s)=j \mid X(s)=i\}, \quad 0 \leq s < t \text{ pour tout } i,j \in \Omega, \quad (\text{IV.25})$$

la chaîne de Markov à temps continu $\{X(t)\}$ est dite *homogène*. Pour n'importe quelle chaîne de Markov homogène, l'équation de Chapman-Kolmogorov est exprimée comme :

$$p_{ij}(s+t) = \sum_k p_{ik}(s) p_{kj}(t), \quad s, t > 0 \quad (\text{IV.26})$$

Celle-ci peut être écrite sous la forme matricielle comme :

$$\mathbf{P}(s+t) = \mathbf{P}(s) \cdot \mathbf{P}(t), \quad s, t > 0 \quad (\text{IV.27})$$

où $\mathbf{P}(t) = \{p_{ij}(t)\}$ qui satisfait :

$$\mathbf{P}(t-s) = \mathbf{P}(s,t) \text{ pour } t > s \geq 0 \quad (\text{IV.28})$$

La dérivé de $\mathbf{P}(t)$ est définie comme [61] :

$$\mathbf{P}'(t) = [\mathbf{P}(t+h) - \mathbf{P}(t)] \cdot \left[\int_0^h \mathbf{P}(u) du \right]^{-1} \quad (\text{IV.29})$$

ce qui montre que $\mathbf{P}(t)$ est infiniment différentiable avec le respect de $t > 0$. Définissons $\mathbf{Q} \equiv \mathbf{P}'(0+)$. La matrice $\mathbf{Q} = \{q_{ij}\}$ s'appelle *générateur infinitésimal*. Celle-ci est d'importance fondamentale dans la théorie de la CMTC. Puisque $\mathbf{P}(0) = \mathbf{I}$, donc :

$$q_{ij} = \begin{cases} \lim_{h \rightarrow 0+} \frac{p_{ij}(h) - \delta_{ij}}{h} \geq 0, & i \neq j \\ \lim_{h \rightarrow 0+} \frac{p_{ii}(h) - 1}{h} \leq 0, & i = j \end{cases} \quad (\text{IV.30})$$

Puisque $\mathbf{P}(t)$ est différentiable, il s'ensuit de IV.30 que :

$$\mathbf{P}'(t) = \mathbf{P}(t) \mathbf{Q}, \quad t \geq 0 \quad (\text{IV.31})$$

Qui sont les systèmes d'équations linéaires ordinaires.

Exemple 2 : Supposons qu'un système a deux états: Bon et défaillant, dénotés par 1 et 2, respectivement. Supposons que la transition de l'état i à j suivent une distribution à temps continue, par exemple la distribution exponentielle,

$$F_{ij}(t) = 1 - \exp(-I_{ij}t), \quad i, j = 1, 2 \quad (IV.32)$$

La CMTC est décrite par la figure IV.2 :

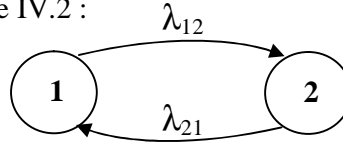


Figure IV.2: CMTC du système à deux états.

De la distribution exponentielle, on a :

$$p_{ij}(h) = 1 - \exp(-I_{ij}h), \quad i \neq j \quad (IV.33)$$

Puis, q_{ij} peut être écrite selon l'éq. 22, pour $(i \neq j)$:

$$\begin{aligned} q_{ij} &= \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{p_{ij}(h)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{1 - \exp(-I_{ij}h)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{\exp(-I_{ij}t) - \exp\{-I_{ij}(t+h)\}}{h \cdot \exp(-I_{ij}t)} \end{aligned} \quad (IV.34)$$

Posons $R_{ij}(t) = \exp(I_{ij}t)$. On a :

$$q_{ij} = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{R_{ij}(t) - R_{ij}(t+h)}{h \cdot R_{ij}(t)} = \frac{1}{R_{ij}(t)} \left[-\frac{d}{dt} R_{ij}(t) \right] = I_{ij} \quad (IV.35)$$

Cette solution est utile, et elle implique que pour la distribution exponentielle, q_{ij} est égal à son taux. Donc, l'équation de Chapman-Kolmogorov pour la figure IV.3 peut être écrite comme :

$$P_1'(t) = I_{21}P_2(t) - I_{12}P_1(t) \quad (IV.36)$$

et:

$$P_2'(t) = I_{12}P_1(t) - I_{21}P_2(t) \quad (IV.37)$$

Avec les conditions initiales (supposons que le système initialement soit à l'état bon) :

$$P_1(0) = 1, P_2(0) = 0$$

On obtient la fonction de la disponibilité comme suit :

$$A(t) = P_1(t) = \frac{I_{12}}{I_{21} + I_{12}} \exp\{-(I_{21} + I_{12})t\} + \frac{I_{21}}{I_{21} + I_{12}} \quad (IV.38)$$

IV.4.1.3 Temps discret, états continus :

Le modèle de Markov à états continus et à temps discret est applicable s'il y a les changements discrets du temps dans un environnement où les états du système sont continus sur un intervalle indiqué. Peu de travaux ont été faits dans ce domaine, et le modelage et le calcul multi-paramètre demeurent un problème difficile. Il y a deux raisons possibles: les données

numériques sont rarement disponibles, et la solution des équations différentielles partielles résultantes est trop complexe.

IV.4.1.4 Temps continu, états continus :

Les équations conventionnelles de diffusion tombent dans cette catégorie des modèles de Markov à temps continu et à états continus. Habituellement quand on parle de l'espace d'état du système, on essaye de le décrire en termes fixes. Dans la fiabilité, on parle des systèmes totalement opérationnels ou des systèmes défectueux. Une fois que nous introduisons le concept de l'opérabilité dégradée, il est facile d'imaginer un continuum d'états physiques dans lesquels le système peut exister. Il peut y avoir quelques autres applications avancées. Cependant, l'évaluation de ces équations sera coûteuse et plus impliquée. Ici aussi, peu de travaux ont été faits dans le domaine de l'état continu.

IV.4.2 Modèles non-markoviens :

La caractéristique commune de ces problèmes est que la propriété de Markov est non-valable tout le temps. Cette catégorie de problèmes désignée conjointement sous le nom *des modèles non-Markoviens*. On se contente ici de voir seulement les processus semi-Markoviens qui les plus intéressants des processus non-Markoviens.

IV.4.2.1 Processus semi-markoviens :

Bien que très semblables au modèle homogène Markov, les temps de transition et les probabilités (distributions) dépendent du temps par lequel le système a atteint l'état actuel. Ceci signifie que les taux de transition dans un état particulier dépendent du temps déjà passé dans cet état, mais qu'elles ne dépendent pas de la voie d'accès par laquelle l'état actuel a été atteint. Ainsi, les distributions de transition peuvent être non exponentielles. Une distribution non-exponentielle (telle que la normale ou de Weibull) peut être rapprochée comme un ensemble de distributions exponentielles. Dans ce cas-ci, même si les distributions sont non-exponentielles, et des modèles homogènes de Markov peuvent être utilisés. Cependant, les résultats sont approximatifs.

Une généralisation possible à la CMTC est de permettre *au temps de séjour* de suivre des distributions générales. C'est-à-dire, en posons $F_i(t)$ la distribution de temps de séjour quand le processus est à l'état i , on peut construire un processus stochastique $\{X(t)\}$ comme suit: si $X(0)=i$, alors le processus reste à l'état i pendant un certain temps avec la fonction de distribution $F_i(t)$. A la fin du temps de séjour, le processus se déplace à l'état j , qui peut être égal à i , selon la loi markovienne $\mathbf{P} = \{p_{ij}\}$. Le processus reste à l'état j pendant un certain temps avec la fonction de distribution $F_j(t)$ et se déplace alors à un certain état selon \mathbf{P} . Sous certaines conditions de régularité, on peut construire un processus stochastique en répétant le procédé précédent. On peut introduire une structure plus dépendante entre les temps de séjour. A savoir, quand $X(0)=i$, on choisit simultanément le prochain état j et le temps de séjour selon une distribution commune $F_{ij}(t)$. Etant donné le prochain état j , la distribution du temps de séjour est donnée par $F_{ij}(t)/F_{ij}(\infty)$. Après le temps de séjour, une transition à l'état j se produit. En même temps, le prochain état k aussi bien que le temps de séjour est déterminé selon une distribution commune $F_{jk}(t)$. Un processus stochastique construit de cette façon s'appelle *un processus semi-Markovien*.

Définition : Soit Ω l'espace d'état et soit $\{Y_n\}$ une séquence de variables aléatoires prenant des valeurs sur Ω . Soit $\{V_n\}$ une séquence de variables aléatoires prenant des valeurs sur $\mathbb{R}_+ = [0, \infty[$ et soit :

$$t_n = \sum_{k=0}^{n-1} V_k, n = 1, 2, \dots, \text{ avec } t_0 \equiv 0 \quad (\text{IV.39})$$

On définit $\tau(t) = \max \{n: \tau_n < t\}$, $t \geq 0$, le processus de renouvellement associé avec $\{V_n\}$. Ensuite, avec la notation précédente, supposons que :

$$\Pr\{Y_{n+1} = j, V_n \leq t \mid Y_0, \dots, Y_n = i; V_0, \dots, V_{n-1}\} = \Pr\{Y_{n+1} = j, V_n \leq t \mid Y_n = i\} \quad (\text{IV.40})$$

Pour tout $n = 0, 1, \dots; i, j \in \Omega$, et $t \geq 0$. Donc, le processus stochastique $\{X(t)\}$ défini par: $X(t) = Y_{\tau(t)}$, $t \geq 0$ est appelé un processus semi-Markovien. Pour un processus semi-Markovien, la distribution du temps $F_{ij}(t)$ satisfait l'équation suivante :

$$F_{ij}(t) = \sum_k p_{ik} \cdot p_{kj} \cdot F_{ik}(t) \otimes F_{kj}(t) \quad (\text{IV.41})$$

Où ' \otimes ' dénote la convolution des deux fonctions, définie comme :

$$F(t) \otimes G(t) = \int_0^t F(s)G(t-s)ds \quad (\text{IV.42})$$

En utilisant la transformée de Laplace-Stieltjes, la fonction précédente peut être simplifiée comme :

$$\tilde{F}_{ij}(s) = \sum_k p_{ik} \cdot p_{kj} \cdot \tilde{F}_{ik}(s) \tilde{F}_{kj}(s) \quad (\text{IV.43})$$

Où $\tilde{F}_{ij}(s)$ est la transformée de Laplace-Stieltjes de $F_{ij}(t)$.

Des modèles du processus semi-markovien sont également fréquemment employés dans la théorie de la fiabilité. Le modèle semi-markovien est un modèle probabiliste utile pour analyser les systèmes dynamiques complexes. Son comportement est semblable à celui d'un modèle de Markov pur. Avec des modèles semi-markoviens les temps de transition et les probabilités (distributions) dépendent du temps où le système a atteint l'état actuel. Ceci signifie que les taux de transition dans un état particulier dépendent du temps déjà passé dans cet état (temps de séjour) mais ils ne dépendent pas du chemin par lequel l'état actuel a été atteint. Ainsi les distributions de transition dans un processus semi-markovien peuvent être non exponentielles.

La théorie semi-markovienne implique les concepts d'état et de la transition d'état. Les statistiques les plus importantes du processus semi-markovien sont les probabilités d'intervalle de transition. L'approche semi-markovienne mène souvent à une réduction significative de l'ensemble des paramètres du modèle. On peut regarder un processus semi-markovien comme un processus dont les occupations successives d'état sont régies par les probabilités de transition d'un processus de Markov, mais dont le séjour dans n'importe quel état est décrit par une variable aléatoire entière qui dépend de l'état actuellement occupé, et sur l'état auquel la prochaine transition sera faite. Ainsi, aux instants de transition, le processus semi-markovien se comporte juste comme un processus de Markov.

IV.5 Choix des Etats :

Choix des états de pour un modèle de chaîne de Markov à temps discret ou à temps continu :

1. L'information contenue dans la définition de chaque état doit être suffisante pour nous permettre de déterminer le résultat qui suit.
2. Les états doivent contenir assez d'informations pour nous permettre de construire la matrice de probabilité de transition à simple pas P .
3. Les états ne devraient pas contenir trop d'informations, parce que c'est susceptible d'avoir comme conséquence plus d'états que nous n'avons besoin réellement. Ceci ne nous empêchera pas d'obtenir le(s) bonne(s) réponse(s); il peut seulement finir de coûter plus qu'il devrait.

IV.6 Modèles homogènes de Markov :

Une chaîne de Markov peut être décrite comme homogènes ou non-homogènes. Une chaîne de Markov homogène se caractérise par des taux de transition constants entre les états. Une chaîne de Markov non-homogène se caractérise par le fait que les taux de transition entre les états sont des fonctions du temps global, par exemple temps de mission écoulé.

Une des qualités importantes du modèle homogène de Markov est qu'il suppose que chaque système stochastique construit à partir d'un modèle homogène de Markov d'être encore un modèle homogène de Markov, seulement beaucoup plus grand. Ceci permet le calcul de la probabilité, de la fréquence et de la durée d'état par des opérations analytiques matricielles. L'inconvénient important du modèle homogène de Markov est l'utilisation exclusive de la distribution exponentielle négative pour toutes les durées stochastiques dans le système. Dans le cas des durées de réparation et de maintenance, ces distributions sont déjà fortement peu probables, mais dans le cas du temps de vie, elles ne peuvent pas être autre qu'incorrectes [58]. Utiliser une fonction de vie négative et exponentiellement distribuée fera toujours réagir le modèle de la maintenance préventive par une disponibilité globale abaissée, qui n'est sûrement pas le cas. Aussi, en raison de la restriction constante du taux de transition, le processus homogène de Markov ne devrait pas être employé pour modeler le comportement des systèmes qui sont soumis à des caractéristiques d'usure des composants. Des processus stochastiques généraux devraient être utilisés alors.

Néanmoins, le modèle homogène de Markov est très important ce qui est dû à son élégance de calcul. Une bonne compréhension des propriétés de base du modèle homogène de Markov est exigée pour comprendre d'autres modèles et méthodes employés dans l'évaluation de la fiabilité des systèmes.

IV.6.1 Limitations des modèles homogènes de Markov :

Les modèles homogènes de Markov sont limités par deux suppositions principales :

- On suppose que les transitions (probabilités) du changement d'un état à l'autre demeurent constantes. Ainsi, un modèle de Markov est utilisé seulement quand une supposition d'un taux de défaillance et d'un taux de réparation constants est justifiée.
- Les probabilités de transition sont déterminées seulement par l'état actuel et non pas par l'histoire du système. Ceci signifie qu'on suppose que de futurs états du système sont indépendants de tout sauf de l'état actuel du système.

IV.7 Le concept d'état et de transition :

On peut spécifier un système physique en donnant les valeurs du nombre de variables qui décrivent le système. Par exemple, un système chimique peut souvent être indiqué par les valeurs

de la température, de la pression, et du volume, tandis que la description instantanée d'un vaisseau spatial doit inclure sa position dans des coordonnées spatiales, sa masse, et sa vitesse. Ces variables critiques d'un système s'appellent les variables d'état. Quand les valeurs de toutes les variables d'état d'un système sont connues, nous pouvons dire que son état a été spécifié. Ainsi on peut dire que l'état d'un système c'est tout ce qui est nécessaire pour décrire le système à chaque instant. Au cours du temps, un système passe d'un état vers un autre et montre ainsi le comportement dynamique. De tels changements s'appellent des transitions d'état ou simplement les transitions.

IV.7.1 Probabilités de transition :

La condition de base pour définir un processus de Markov est de spécifier la probabilité de faire la prochaine transition d'état pour chaque état dans le processus et pour chaque temps de transition. Ainsi la quantité : $\Pr(S_{n+1}=j | S_n=i)$ doit être spécifiée pour, $1 \leq i, j \leq N$, et pour $n=0, 1, 2, \dots$ où i, j sont les indices d'état, et n est l'indice du temps discret. Notre notation permet la possibilité de changer chaque transition comme si des transitions successives étaient faites. On définit ainsi la probabilité de transition p_{ij} comme :

$$p_{ij} = \Pr(S_{n+1}=j | S_n=i) \quad 1 \leq i, j \leq N, n=0, 1, 2, \dots \tag{IV.44}$$

La probabilité de transition p_{ij} est la probabilité qu'un processus qui est actuellement à l'état i occupera l'état j après sa prochaine transition. Puisque la probabilité de transition p_{ij} est une probabilité, elle doit satisfaire la condition, $0 \leq p_{ij} \leq 1 \quad 1 \leq i, j \leq N$ et ce processus doit occuper un de ses N états après chaque transition,

$$\sum_{j=1}^N p_{ij} = 1 \quad i= 1, 2, \dots, N. \tag{IV.45}$$

Les N^2 probabilités de transition qui décrivent un processus de Markov sont conventionnellement représentées par une matrice de probabilité de transition de $N \times N$, généralement dénotée par \mathbf{P} dans la littérature, ayant des éléments :

$$\mathbf{P} = (p_{ij}) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & \dots & P_{NN} \end{bmatrix} \tag{IV.46}$$

Les matrices dont les éléments ne peuvent pas se trouver en dehors de la gamme (0,1) et dont les rangées s'additionnent à l'unité, tombent dans la catégorie spéciale des matrices connues sous le nom de matrices stochastiques. Puisque les rangées de la matrice de probabilité de transition s'ajoutent à un, seulement $N(N-1)$ paramètres sont nécessaires pour spécifier le comportement des probabilités de transition d'un processus de Markov à N états.

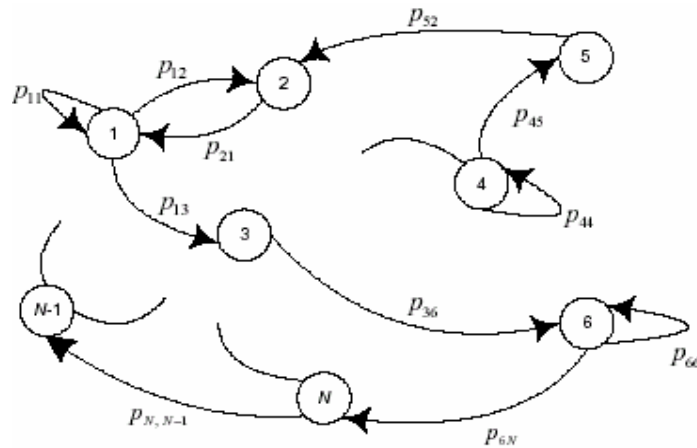


Figure IV.3: Différents états et leurs transitions.

La matrice de probabilité de transition d'un processus de Markov, et par conséquent du processus lui-même, peut être graphiquement représentée par un diagramme de transition comme celui représenté sur la figure IV.3. Chaque noeud est numéroté pour représenter un état du processus. Un segment de ligne ou de branche, dirigé est tracé de chaque noeud i à chaque noeud j , avec la probabilité de transition p_{ij} . Dans des exemples numériques, on emploie la convention que seulement ces segments de ligne dirigés correspondants aux probabilités de transition différentes de zéro seront montrés dans le diagramme de transition.

IV.7.2 Diagrammes de transition d'état :

Les diagrammes de transition d'état de Markov sont les représentations graphiques des états du système et les transitions possibles entre ces états. Ils fournissent une aide visuelle pour aider à comprendre les modèles de Markov. Un diagramme de transition d'état peut graphiquement représenter tous :

- Les états du système et leurs conditions initiales.
- Transitions entre les états du système et les taux de transition correspondants.

Les taux de transition sont remplacés par des probabilités de transition équivalentes en considérant que le temps de transition d'état est très petit (Δt). Ceci mène à une situation où le système peut demeurer à l'état actuel après le temps t avec une certaine probabilité. Ainsi, dans ce cas-ci, les probabilités de rester à l'état existant (taux de transition) sont également montrées dans le diagramme. Une configuration donnée du système est considérée, à n'importe quel temps, de se trouver dans l'un des plusieurs états possibles. Dans un diagramme simple, tous les états de fonctionnement et de défaillance du système et les transitions possibles entre eux sont montrées. Le diagramme de transition d'état montre les états du système en tant que différents noeuds et les transitions en tant que des flèches ou arcs.

IV.7.3 Graphes de Markov :

Pour tenir compte des dépendances entre les différents éléments d'un système, on construira un graphe dont les sommets correspondront aux différents états du système (si chaque élément a deux états : marche et panne et si le système a n éléments, le nombre maximum des états est 2^n) et dont les arcs correspondront aux transitions entre états. Sur ce graphe, chaque arc (i,j) est étiqueté par le taux de transition de l'état i à l'état j . Donnons-en un exemple très simple: on considère un système formé de deux éléments identiques en parallèle. Lorsque les deux

éléments fonctionnent, ils ont chacun un taux de défaillance λ . Lorsque l'un des deux éléments tombe en panne, l'autre admet alors un taux de défaillance plus grand $\lambda' > \lambda$. Il n'y a plus qu'un réparateur et le taux de réparation est μ . En notant 2 l'état du système où les deux éléments fonctionnent, 1 l'état du système où un seul élément fonctionne et 0 l'état du système où les deux éléments sont en panne, on a le graphe des états suivant :

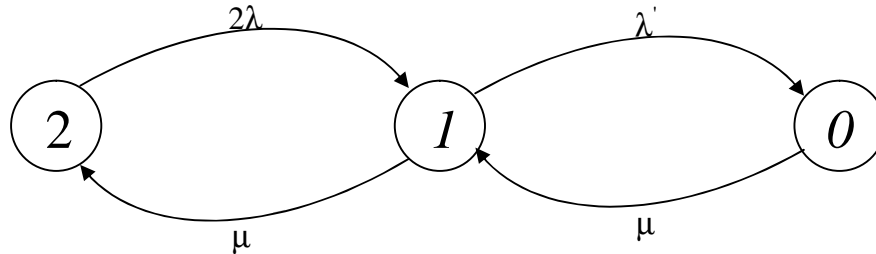


Figure IV.4: Graphe des états.

Cette représentation permet de tenir compte de la statique entre ces deux éléments. Si la probabilité de passer de l'état i à l'état j entre les instants t et $t + dt$ est $\lambda_{ij} dt + O(dt)$; alors λ_{ij} est le taux de transition entre les états i et j . Le taux de transition entre 2 et 0 est nul puisque la probabilité de passer de l'état 2 à l'état 0 entre t et $t + dt$ est :

$$(2\lambda dt) \cdot (\lambda' dt) = 2\lambda\lambda' \cdot (dt)^2$$

Remarque : un certain nombre d'auteurs donnent une représentation un peu différente des taux de transitions, ils représentent sur chaque arc (i,j) la probabilité de passer de l'état i à l'état j entre les instants t et $t + dt$. Dans ce cas, ils rajoutent une boucle en chaque sommet qui correspond à la probabilité de rester dans cet état entre t et $t + dt$. Le graphe des états de la figure IV.4 devient alors dans cette représentation le graphe des états suivant :

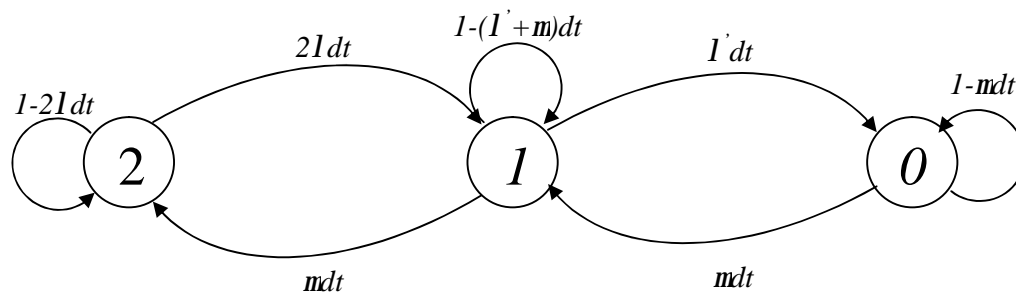


Figure IV.5: Graphe des états avec la représentation probabiliste.

IV.8 Procédé général du modelage de Markov :

Un processus de Markov est caractérisé par son espace d'état ainsi que les probabilités de transition avec le temps entre ces états. Les étapes de base dans le modelage et l'analyse sont décrites comme suit.

IV.8.1 Installation du modèle :

Dans la première étape, un diagramme d'état de Markov peut être développé en déterminant les états du système et les transitions entre ces états. Il inclut également l'étiquetage des états tels qu'opérationnel, dégradé ou défaillant. Il peut y avoir plusieurs états dans la catégorie dégradée. Les diagrammes d'état représentent tous les rapports internes possibles parmi les états et définissent les transitions permises d'un état à l'autre. En général, le diagramme d'état

se compose des noeuds et des liens, où les noeuds représentent les différents états et les liens représentent la transition entre les deux états connectés. Pour la CMTD, le temps entre les deux états est discret, qui est habituellement mit en tant que 1 unité. D'autre part, le temps entre les deux états est continu pour la CMTC. La chaîne de Markov peut être construite en traçant un diagramme d'état qui construit par des unités. Pour le processus semi-Markovien, la construction du modèle est plus complexe, elle comprend deux étapes. D'abord, le diagramme d'état est tracé comme la CMTD avec la matrice de probabilité de transition \mathbf{P} . Puis, le processus avec le temps continu est installé en mettant le temps passé dans une transition à partir de l'état i à l'état j a une fonction de distribution conditionnelle $F_{ij}(t)$.

IV.8.2 Equations de Chapman-Kolmogorov :

La deuxième étape convertit le diagramme d'état de Markov développé à l'étape précédente en un ensemble d'équations. Les équations bien connues pour les modèles de Markov sont les équations de Chapman-Kolmogorov.

IV.8.3 Résoudre les équations :

La solution des équations d'état est parfois compliquée. Une solution analytique des équations d'état est faisable seulement pour des problèmes simples. Heureusement, un certain nombre de techniques de solution existent, comme la solution analytique, la transformée de Laplace-Stieltjes, l'intégration numérique et l'évaluation assistée par ordinateur, qui peuvent simplifier cette tâche. La transformée de Laplace-Stieltjes fournit une voie commode pour résoudre des modèles plus simples. La solution des équations d'état de Markov utilisant cette approche concerne deux étapes :

- Les équations d'état sont transformées à leurs contreparties de Laplace.
- Les équations résultantes sont inversées pour obtenir leurs solutions au domaine du temps.

Si les temps de mission sont courts et si les taux de transition sont petits, alors on peut utiliser des approximations qui peuvent répondre aux exigences d'exactitude. Soit l'exemple est suivant: Considérons qu'un diagramme d'état peut être exprimé comme une séquence de transitions, comme montré dans la figure IV.6.

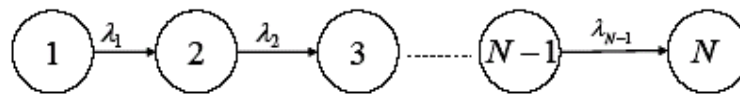


Figure IV.6: diagramme de Markov à N états.

La probabilité d'état pour le dernier état peut être donnée dans la transformée Laplace-Stieltjes par :

$$P_N(s) = \frac{I_1 I_2 \dots I_N}{(s + I_1)(s + I_2) \dots (s + I_N) s} \tag{IV.47}$$

En augmentant le dénominateur, en substituant cette expression dans l'équation pour $P_N(s)$ et puis en exécutant la longue division, on obtient :

$$P_N(s) = \frac{1}{s^{N+1}} \prod_{i=1}^N I_i - \frac{1}{s^N} \prod_{i=1}^N I_i \sum_{i=1}^N I_i + \dots \tag{IV.48}$$

Cette équation peut être facilement inversée en utilisant la transformée inverse de Laplace-Stieltjes et on a :

$$P_N(t) = \frac{t^N}{N!} \prod_{i=1}^N I_i - \frac{t^{N-1}}{(N-1)!} \prod_{i=1}^N I_i \sum_{i=1}^N I_i + \dots \tag{IV.49}$$

IV.9 Interactions des défaillances :

Dans l'analyse de fiabilité, peut-être la technique la plus dominante est celle d'estimer la fiabilité du système en termes de la fiabilité de ses composants [38]. Dans une telle analyse il est supposé fréquemment que les propriétés de défaillance et de réparation des composants sont mutuellement indépendantes. En réalité, ce n'est souvent pas le cas. Par conséquent, il est nécessaire de remplacer les simples produits des probabilités par des modèles plus sophistiqués qui tiennent compte des interactions des défaillances et des réparations des composants. Beaucoup d'interactions de défaillances des composants – telles que les systèmes avec des défaillances indépendantes - peuvent être modelées efficacement comme des processus de Markov, à condition que les taux de défaillance et de réparation puissent être rapprochés comme indépendants du temps.

IV.9.1 Analyse de Markov :

Nous commençons par la formulation de Markov en indiquant tous les états possibles d'un système. Un état est défini pour être une combinaison particulière de fonctionnement et de défaillance des composants. Ainsi, par exemple, si on a un système composé de trois composants, on peut facilement prouver qu'il y a huit combinaisons différentes de fonctionnement et de défaillance des composants et donc huit états. Ils sont énumérés dans le tableau IV.2, où *O* indique un composant opérationnel et *X* un composant défaillant. En général, un système avec *N* composants aura 2^N états de sorte que le nombre d'états augmente beaucoup plus rapidement que le nombre de composants.

Composant	Etat #							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>a</i>	<i>O</i>	<i>X</i>	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>O</i>	<i>X</i>
<i>b</i>	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>X</i>	<i>O</i>	<i>X</i>	<i>O</i>	<i>X</i>	<i>X</i>
<i>c</i>	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>	<i>X</i>	<i>O</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>

Note: *O*: opérationnel; *X*: défaillant.

Tableau IV.2: Etats de Markov des systèmes à trois composants.

Pour l'analyse qui suit nous devons savoir lesquels des états correspondent à la défaillance du système. Ceci, en revanche, dépend de la configuration dans laquelle les composants sont employés. Par exemple, trois composants pourraient être arrangés dans l'une des trois configurations représentées sur la figure IV.7. Si tous les composants sont en série, comme dans la figure IV.7.a, n'importe quelle combinaison d'une ou plusieurs défaillances des composants provoquera la défaillance du système. Ainsi, les états de 2 à 8 dans le tableau IV.2 sont des états de défaillance. Réciproquement, si les trois composants sont en parallèle comme dans la figure IV.7.b, chacun des trois composants doit tomber en panne pour que le système tombe en panne. Ainsi seulement l'état 8 est un état de défaillance du système. Finalement, pour la configuration montrée dans la figure IV.7.c les deux composants 1 et 2 ou le composant 3 doivent tomber en panne pour que le système tombe en panne. Ainsi, les états de 4 à 8 correspondent à la défaillance du système.

L'objet de l'analyse de Markov est de calculer $P_i(t)$, la probabilité que le système est à l'état *i* au temps *t*. Une fois que ceci est connu, la fiabilité du système peut être calculée comme une fonction du temps à partir de :

$$R(t) = \sum_{i \in O} P_i(t) \tag{IV.50}$$

où la somme est prise sur tous les états de fonctionnement (c.-à-d., sur les états pour lesquels le système n'est pas défaillant). Alternativement, la fiabilité peut être calculée à partir de :

$$R(t) = 1 - \sum_{i \in X} P_i(t) \tag{IV.51}$$

où la somme est sur les états pour lesquels le système est défaillant. Dans ce qui suit, nous indiquons l'état 1 comme l'état pour lequel tous les composants fonctionnent, et nous supposons qu'à $t = 0$ le système est à l'état 1. Donc,

$$P_1(0)=1, \tag{IV.52}$$

et

$$P_i(0)=0, \quad i \neq 1 \tag{IV.53}$$

Puisque à tout moment le système peut seulement être à un état, nous avons :

$$\sum_i P_i(t) = 1 \tag{IV.54}$$

où la somme est sur tous les états possibles.

Pour déterminer les $P_i(t)$, nous dérivons un ensemble d'équations différentielles, une pour chaque état du système. Ceux-ci désignés parfois sous le nom des équations de transition d'état parce qu'ils permettent aux $P_i(t)$ d'être déterminées en termes des taux auxquels des transitions sont faites à partir d'un état à l'autre. Les taux de transition se composent de superpositions des taux de défaillance des composants, des taux de réparation ou de tous les deux.

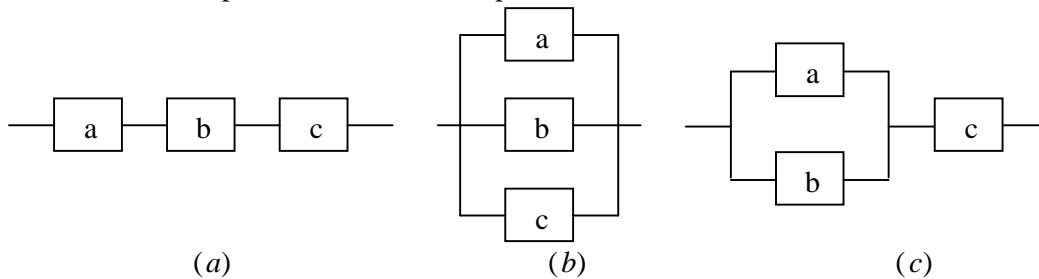


Figure IV.7: Blocs-diagrammes de fiabilité pour des systèmes à trois composants.

IV.9.2 Deux composants indépendants :

Un système à deux composants a seulement quatre états possibles, ceux énumérés dans le tableau IV.3. La logique des changements des états est mieux illustrée par un diagramme de transition d'état représenté sur la figure IV.8. Les taux de défaillance λ_a et λ_b pour les composants a et b indiquent les taux auxquels les transitions sont faites entre les états. Puisque $\lambda_a \Delta t$ est la probabilité qu'un composant tombera en panne entre les temps t et $t+\Delta t$, étant donné qu'il fonctionne à t (et similairement pour λ_b), nous pouvons écrire le net changement de la probabilité que le système sera à l'état 1 comme :

Composant	Etat #			
	1	2	3	4
a	O	X	O	X
b	O	O	X	X

Tableau IV.3: états de Markov pour les systèmes à deux composants.

$$P_1(t+\Delta t) - P_1(t) = -\lambda_a \Delta t P_1(t) - \lambda_b \Delta t P_1(t), \quad (IV.55)$$

Ou sous une forme différentielle :

$$\frac{d}{dt} P_1(t) = -I_a P_1(t) - I_b P_1(t) \quad (IV.56)$$

Pour dériver des équations pour l'état 2, nous observons d'abord que pour chaque transition hors de l'état 1 par défaillance du composant a, il doit y avoir une arrivée à l'état 2. Ainsi le nombre d'arrivées pendant Δt est $\lambda_a \Delta t P_1(t)$. Des transitions peuvent également être faites au-delà de l'état 2 pendant Δt ; elles seront dues aux défaillances du composant b, et elles apporteront une contribution de $-\lambda_b \Delta t P_2(t)$. Ainsi l'augmentation nette de la probabilité que le système sera à l'état 2 est donnée par :

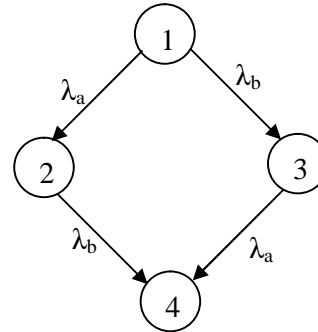


Figure IV.8: diagramme de transition d'état avec des défaillances indépendantes.

$$P_2(t+\Delta t) - P_2(t) = \lambda_a \Delta t P_1(t) - \lambda_b \Delta t P_2(t), \quad (IV.57)$$

Ou divisant par Δt et prenant la dérivée, nous avons :

$$\frac{d}{dt} P_2(t) = I_a P_1(t) - I_b P_2(t) \quad (IV.58)$$

Des arguments identiques peuvent être employés pour dériver l'équation pour $P_3(t)$. Le résultat est :

$$\frac{d}{dt} P_3(t) = I_b P_1(t) - I_a P_3(t) \quad (IV.59)$$

On peut dériver une équation, pour l'état 4. On note du diagramme que les transitions à l'état 4 peuvent venir comme une défaillance du composant b de l'état 2 ou comme défaillance du composant a de l'état 3; les transitions pendant Δt sont $\lambda_b \Delta t P_2(t)$ et $\lambda_a \Delta t P_3(t)$, respectivement. En conséquence, nous avons :

$$P_4(t+\Delta t) - P_4(t) = \lambda_b \Delta t P_2(t) + \lambda_a \Delta t P_3(t), \quad (IV.60)$$

Ou, également,

$$\frac{d}{dt} P_4(t) = I_b P_2(t) + I_a P_3(t) \quad (\text{IV.61})$$

L'état 4 s'appelle un état absorbant, puisqu'il n'y a aucune manière de sortir de cet état. Les autres états sont désignés sous le nom des états non-absorbants. A partir de l'antérieure dérivation nous voyons que nous devons résoudre quatre équations différentielles couplées ordinairement en temps afin de déterminer les $P_i(t)$. Nous commençons par l'Eq.IV.56 pour $P_1(t)$, elle ne dépend pas d'une autre $P_i(t)$. Par substitution, il est clair que la solution de l'Eq.IV.56 qui répond à la condition initiale, Eq.IV.52, soit :

$$P_1(t) = e^{-(I_a+I_b)t} \quad (\text{IV.62})$$

Pour déterminer $P_2(t)$, au premier lieu on insert l'Eq.IV.62 à l'Eq.IV.58,

$$\frac{d}{dt} P_2(t) = I_a e^{-(I_a+I_b)t} - I_b P_2(t) \quad (\text{IV.63})$$

Il en résulte une équation dans laquelle seulement $P_2(t)$ apparaît. En déplaçant le dernier terme au côté gauche, et en multipliant par un facteur d'intégration $e^{I_b t}$, nous obtenons :

$$\frac{d}{dt} [e^{I_b t} P_2(t)] = I_a e^{-I_a t} \quad (\text{IV.64})$$

En multipliant par dt , et intégrant l'équation résultante à partir du temps égale à zéro jusqu'au temps t , nous avons :

$$[e^{I_b t} P_2(t)]_0^t = I_a \int_0^t e^{-I_a t'} dt' \quad (\text{IV.65})$$

En effectuant l'intégrale du côté droit, et en utilisant l'Eq.IV.53 du côté gauche, et en la résolvant pour $P_2(t)$, nous obtenons :

$$P_2(t) = e^{-I_b t} - e^{-(I_a+I_b)t} \quad (\text{IV.66})$$

Des arguments complètement analogues peuvent être appliqués à la solution de l'Eq.IV.59. Le résultat est :

$$P_3(t) = e^{-I_a t} - e^{-(I_a+I_b)t} \quad (\text{IV.67})$$

On peut maintenant résoudre l'Eq.IV.60 pour $P_4(t)$. Cependant, il est plus avantageux de noter qu'il découle de l'Eq.IV.53 cela :

$$P_4(t) = 1 - \sum_{i=1}^3 P_i(t) \quad (\text{IV.68})$$

Par conséquent, en insérant les Eqs. IV.62, IV.63, et IV.67 dans cette dernière expression, rapporte la solution désirée :

$$P_4(t) = 1 - e^{-I_a t} - e^{-I_b t} + e^{-(I_a+I_b)t} \quad (\text{IV.69})$$

Avec les $P_i(t)$ connues, nous pouvons calculer la fiabilité. Ceci, naturellement, dépend de la configuration des deux composants, et il y a seulement deux possibilités, séries et parallèles.

Dans la configuration série n'importe quelle défaillance provoque la défaillance du système. Par conséquent :

$$R_s(t) = P_1(t) \quad (IV.70)$$

Ou

$$R_s(t) = e^{-(l_a+l_b)t} \quad (IV.71)$$

Puisque, pour la configuration parallèle les composants a et b doivent tomber ensemble en panne pour avoir la défaillance du système,

$$R_p(t) = P_1(t)+ P_2(t)+ P_3(t) \quad (IV.72)$$

Ou, en utilisant l'Eq.IV.68, nous avons :

$$R_p(t) = 1- P_4(t) \quad (IV.73)$$

Cependant,

$$R_p(t) = e^{-l_a t} - e^{-l_b t} - e^{-(l_a+l_b)t} \quad (IV.74)$$

Cette analyse suppose que le taux de défaillance de chaque composant est indépendant du taux de l'autre composant. Comme peut être vu sur la figure IV.8, les transitions 1 → 2 et 3 → 4, qui comportent la défaillance du composant *a*, ont le même taux de défaillance, quoique l'un ait lieu avec le composant *b* à l'état de fonctionnement et l'autre avec le composant *b* qui tombe en panne. Le même argument s'applique en comparant les transitions 1 → 3 et 2 → 4. Puisque les taux de défaillance – et donc les probabilités de défaillance – sont indépendants de l'état du système, elles sont mutuellement indépendantes. Par conséquent, pour des taux de défaillance constants les fiabilités dérivées des composantes sont :

$$R_l(t) = e^{-l t} \quad l = a, b \quad (IV.75)$$

Ainsi l'expression série, Eq.IV.71, se réduit à :

$$R_s(t) = R_a(t)R_b(t) \quad (IV.76)$$

et l'expression parallèle, Eq.IV.74, est :

$$R_p(t) = R_a(t) + R_b(t) - R_a(t)R_b(t) \quad (IV.77)$$

Ce sont justes les expressions dérivées auparavant pour les composants indépendants, sans utilisation des méthodes de Markov.

IV.9.3 Systèmes à Partage-Charge :

La valeur primaire des méthodes de Markov apparaît dans les situations dans lesquelles on ne peut plus assumer que les taux de défaillance des composants sont indépendants de l'état du système. Un des cas communs de la dépendance est dans les composants à partage-charge, qu'ils soient des générateurs électriques ou des pompes ou des valves mécaniques. Supposons, par exemple, que deux générateurs électriques partagent une charge électrique que l'un ou l'autre des générateurs a assez de capacité pour la satisfaire. Il est néanmoins vrai que si un générateur

tombe en panne, la charge additionnelle sur le deuxième générateur soit susceptible d'augmenter son taux de défaillance.

Pour modeler des défaillances de partage-charge, considérons de nouveau deux composants, a et b, en parallèle. Nous avons encore un système de quatre états, mais maintenant le diagramme de transition apparaît comme dans la figure IV.9. Ici I_a^* et I_b^* dénotent les taux de défaillance accrus provoqués par le chargement plus élevé après qu'une défaillance a eu lieu.

Les équations de Markov peuvent être dérivées quant aux défaillances indépendantes si les changements des taux de défaillance sont inclus. Comparant la figure IV.8 à IV.9, on voit que les généralisations résultantes des Eqs. IV.56, IV.58, IV.59 et IV.61 sont :

$$\frac{d}{dt} P_1(t) = -(I_a + I_b) P_1(t) \quad (IV.78)$$

$$\frac{d}{dt} P_2(t) = I_a P_1(t) - I_b^* P_2(t) \quad (IV.79)$$

$$\frac{d}{dt} P_3(t) = I_b P_1(t) - I_a^* P_3(t) \quad (IV.80)$$

et

$$\frac{d}{dt} P_4(t) = I_b^* P_2(t) + I_a^* P_3(t) \quad (IV.81)$$

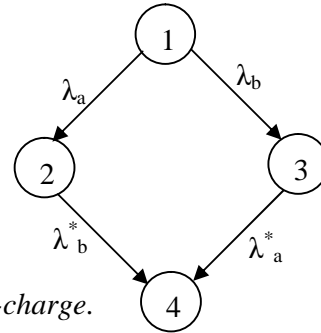


Figure IV.9: diagramme de transition d'état avec partage-charge.

La procédure de solution est également complètement analogue. Les résultats sont :

$$P_1(t) = e^{-(I_a + I_b)t} \quad (IV.82)$$

$$P_2(t) = e^{-I_b^* t} - e^{-(I_a + I_b^*)t} \quad (IV.83)$$

$$P_3(t) = e^{-I_a^* t} - e^{-(I_a^* + I_b)t} \quad (IV.84)$$

et

$$P_4(t) = 1 - e^{-I_a^* t} - e^{-I_b^* t} - e^{-(I_a + I_b)t} + e^{-(I_a + I_b^*)t} + e^{-(I_a^* + I_b)t} \quad (IV.85)$$

Finalement, puisque les deux composants doivent tomber ensemble en panne pour que le système tombe en panne, la fiabilité est égale à $1 - P_4(t)$, il en résulte :

$$R_p(t) = e^{-I_a^* t} + e^{-I_b^* t} + e^{-(I_a + I_b)t} - e^{-(I_a + I_b^*)t} - e^{-(I_a^* + I_b)t} \quad (IV.86)$$

Il est facilement vu si $I_a^* = I_a$ et $I_b^* = I_b$, là il n'y a aucune dépendance entre les taux de défaillance, et l'Eq.IV.86 se réduit à l'Eq.IV.74. Les effets du chargement accru sur un système redondant à partage-charge peuvent être vus graphiquement en considérant la situation dans

laquelle les deux composants sont identiques: $I_a = I_b = I$ et $I_a^* = I_b^* = I^*$. L'équation IV.86 se réduit alors à :

$$R(t) = 2e^{-I^*t} + e^{-2It} - 2e^{-(I+I^*)t} \quad (IV.87)$$

IV.9.4 Systèmes à plusieurs éléments :

Les modèles décrits dans les deux sections précédentes concernent les dépendances entre seulement deux composants. Afin de mettre en oeuvre les méthodes de Markov dans des situations réalistes, cependant, il est souvent nécessaire de considérer des dépendances entre plus de deux composants ou d'établir des modèles de dépendance dans des systèmes à beaucoup de composants. Dans cette section nous nous engageons d'abord à généraliser les méthodes de Markov pour la considération des dépendances entre plus de deux composants. Nous examinons alors comment établir des modèles de dépendances dans de plus grands systèmes dans lesquels certaines des défaillances des composants sont indépendantes des autres.

IV.9.5 Formulation de Markov à plusieurs éléments :

Le traitement de plus grands ensembles de composants par des méthodes de Markov est amélioré en exprimant l'ensemble couplé d'équations de transition d'état sous la forme d'une matrice. D'ailleurs, la matrice de coefficients résultante peut être employée pour vérifier l'uniformité de la formulation et pour gagner de la perspicacité dans les processus physiques en jeu.

Considérons un système avec trois composants en parallèle, comme représenté sur la figure IV.6.b. Supposons que c'est un système à partage-charge dans lequel le taux défaillance du composant augmente avec chaque défaillance d'un composant :

- λ_1 = taux de défaillance de composant avec aucune défaillance d'un composant,
- λ_2 = taux de défaillance de composant avec une défaillance d'un composant,
- λ_3 = taux de défaillance de composant avec deux défaillances d'un composant.

Si nous énumérons encore les états possibles du système dans le tableau IV.2, le diagramme de transition d'état apparaîtra comme dans la figure IV.10. De ce diagramme nous pouvons construire les équations pour les $P_i(t)$. Sous la forme matricielle, nous avons :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \\ P_4(t) \\ P_5(t) \\ P_6(t) \\ P_7(t) \\ P_8(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_1 & -2I_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_1 & 0 & -2I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_1 & 0 & 0 & -2I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & I_2 & 0 & -I_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & I_2 & 0 & -I_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_2 & I_2 & 0 & 0 & -I_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_3 & I_3 & I_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \\ P_4(t) \\ P_5(t) \\ P_6(t) \\ P_7(t) \\ P_8(t) \end{bmatrix} \quad (IV.88)$$

Où il y a maintenant $2^3 = 8$ états en tout. La généralisation à plus de composants est directe, à condition que la structure logique des dépendances soit assimilée.

L'équation IV.88 peut être employée pour illustrer une propriété importante de la matrice des coefficients, une qui sert d'aide en construisant l'ensemble des équations du diagramme de transition d'état. Chaque transition hors d'un état doit se terminer en un autre état. Ainsi, pour chaque entrée négative dans la matrice de coefficients, il doit y avoir une entrée positive dans la même colonne, et la somme des éléments dans chaque colonne doit être égale à zéro. Ainsi la matrice peut être construite systématiquement en considérant les transitions une par une. Si la transition provient de l' $i^{\text{ème}}$ état, le taux de défaillance est soustrait de l' $i^{\text{ème}}$ élément diagonal. Si la transition est vers le $j^{\text{ème}}$ état, le taux de défaillance est alors ajouté à la $j^{\text{ème}}$ rangée de la même colonne.

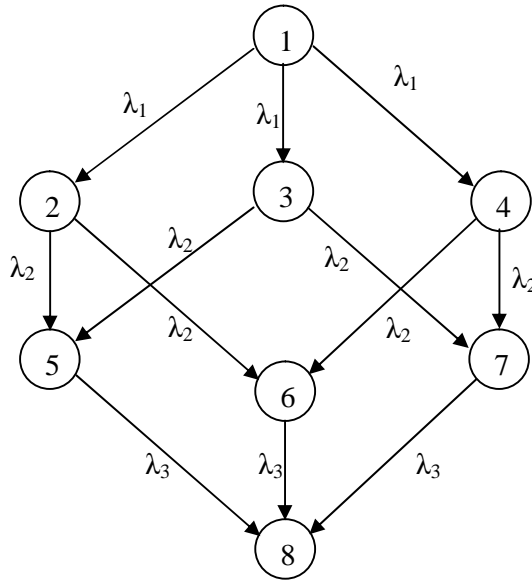


Figure IV.10: Diagramme de transition d'état pour un système à trois composants en parallèle.

Un deuxième dispositif de la matrice des coefficients implique la distinction entre les états opérationnels et de défaillance. Dans les calculs de fiabilité nous ne laissons pas un système pour être réparé une fois qu'il tombe en panne. Par conséquent, il ne peut y avoir aucune manière de partir d'un état de défaillance. Dans la matrice des coefficients ceci est indiqué par le zéro dans l'élément diagonal de chaque état de défaillance. Ce n'est pas le cas, cependant, lorsque la disponibilité plutôt que la fiabilité est calculée. Des calculs de disponibilité sont discutés dans la section suivante.

Pour de plus grands systèmes d'équations il est souvent plus commode d'écrire les équations de Markov sous la forme d'une matrice :

$$\frac{d}{dt} P(t) = M.P(t), \quad (IV.89)$$

Où P est un vecteur colonne avec les composants $P_1(t), P_2(t), \dots$, et M est désignée sous le nom de la matrice de transition de Markov. Au lieu de répéter l'ensemble entier d'équations comme dans l'Eq. IV.88, nous devons écrire seulement la matrice. Ainsi, par exemple pour l'Eq. IV.88 est :

$$M = \begin{bmatrix} -3I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_1 & -2I_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_1 & 0 & -2I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_1 & 0 & 0 & -2I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & I_2 & 0 & -I_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & I_2 & 0 & -I_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_2 & I_2 & 0 & 0 & -I_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_3 & I_3 & I_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (IV.90)$$

La dimension de la matrice augmente de la mesure de 2^N où N est le nombre de composants. Pour de plus grands systèmes, en particulier ceux où les composants sont réparés, les simples algorithmes de solution discutés plus tôt deviennent insurmontables. Au lieu de cela, des techniques générales de la transformée de Laplace peuvent être exigées. Si on ajoute les complications, telles que des taux de défaillance dépendants du temps, les équations peuvent exiger la solution par l'intégration numérique ou par simulation de Monte Carlo.

IV.9.6 Disponibilité :

Dans la disponibilité, comme dans la fiabilité, il y a la situation dans laquelle les défaillances des composants ne peuvent pas être considérées indépendantes l'un de l'autre. Ceux-ci incluent le partage-charge et les réseaux de réserve dans lesquels tous les composants sont réparables. Ils peuvent également inclure une variété d'autres situations dans lesquelles la dépendance est présentée par le nombre limité d'employés de réparation ou par les pièces de rechange qui peuvent être appelées pour mettre des composants dans l'ordre d'entretien. Ainsi, par exemple, la réparation de deux composants redondants ne peut pas être considérée indépendante si seulement un équipage est sur la station pour effectuer les réparations.

Les dépendances entre les taux de défaillance et de réparation des composants peuvent être approchées une autre fois de plus avec des méthodes de Markov, à condition que les défaillances soient indiquées, et que les taux de défaillance et de réparation sont indépendants du temps. Bien que nous ayons déjà traité la réparation des composants dans des calculs de fiabilité, il y a une différence fondamentale dans l'analyse qui suit. Dans des calculs de fiabilité, les composants peuvent être seulement réparés aussi longtemps que le système n'est pas tombé en panne; l'analyse se termine avec la première défaillance du système. Dans des calculs de disponibilité, nous continuons à réparer les composants après une défaillance du système afin de rapporter le système en marche, c.-à-d., pour le rendre disponible de nouveau.

La différence entre les calculs de Markov de fiabilité et de disponibilité pour des systèmes avec des composants réparables peut être illustrée mieux en termes de notion des matrices développée dans la section précédente.

IV.9.7 Redondance de secours :

Supposons que nous considérons la fiabilité d'un système de deux composants, formé d'une unité primaire et de secours. Nous supposons que les défaillances de commutation et la défaillance en mode 'attente' peuvent être négligées. Supposant que l'unité primaire peut être réparée avec un taux μ Puisqu'il y a seulement trois états avec des probabilités de non-zéro comme indiqué sur le tableau IV.2, le diagramme de transition d'état peut être tracé comme dans

la figure IV.11.a, où l'état 3 est l'état défaillant. La matrice de transition pour l'Eq. IV.89 est alors donnée par :

$$M = \begin{bmatrix} -I_a & m & 0 \\ I_a & -I_b - m & 0 \\ 0 & I_b & 0 \end{bmatrix} \quad (IV.91)$$

L'évaluation de la disponibilité de ce système implique une transition additionnelle d'état. Afin que le système puisse marcher de nouveau après que les deux unités étaient tombées en panne, on doit pouvoir réparer l'unité de secours. Ceci exige une transition supplémentaire de réparation de l'état 3 à l'état 2, comme indiqué dans la figure IV.11.b. La transition de réparation est représentée par deux termes additionnels dans la matrice de transition de Markov. Nous avons :

$$M = \begin{bmatrix} -I_a & m & 0 \\ I_a & -I_b - m & m \\ 0 & I_b & -m \end{bmatrix} \quad (IV.92)$$

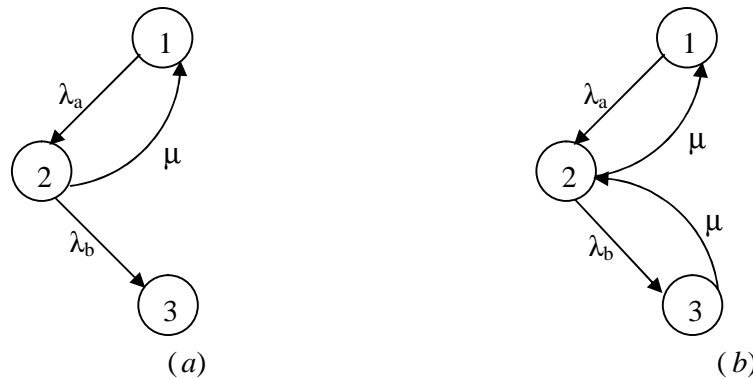


Figure IV.11: Diagrammes de transition d'état pour un système de secours :
(a) cas de la fiabilité, (b) cas de la disponibilité.

Ici on suppose que quand les deux unités sont tombées en panne, l'unité de secours sera réparée d'abord; nous supposons également que les taux de réparation sont égaux. Des cas plus généraux peuvent également être considérés.

Une différence importante peut être vue dans les structures des Eqs. IV.91 et IV.92. Dans l'Eq. IV.92 tous les éléments diagonaux sont des non-zéros. C'est une différence fondamentale avec les calculs de fiabilité. Dans des calculs de disponibilité le système doit toujours pouvoir être récupéré de n'importe quel état de défaillance. Ainsi il peut y avoir les éléments diagonaux des non-zéros, ceux-ci représenteraient un état défaillant absorbant ou inéluctable; la transition peut toujours être faite des états de fonctionnement par la défaillance des composants additionnels. La disponibilité du système est donnée par :

$$A(t) = \sum_{i \in O} P_i(t) \quad (IV.93)$$

Où la somme est sur les états opérationnels. Les équations de Markov, Eq.IV.89, peuvent être résolues en utilisant la transformée de Laplace ou d'autres méthodes pour déterminer $P(t)$, et l'Eq.IV.93 peut être évaluée pour la dépendance de temps détaillée du point de disponibilité.

Nous sommes habituellement intéressés à la disponibilité asymptotique ou à l'état d'équilibre, $A(t)$, plutôt qu'à une dépendance de temps. Cette quantité peut être calculée plus simplement. Nous notons que quand $t \rightarrow \infty$, la dérivé du côté droit de l'Eq.IV.89 disparaît et nous avons l'expression indépendante du temps :

$$M.P(\infty) = 0 \tag{IV.94}$$

Dans notre problème, ceci représente les équations simultanées :

$$-I_a P_1(\infty) + mP_2(\infty) = 0 \tag{IV.95}$$

$$I_a P_1(\infty) - (I_b + m)P_2(\infty) + mP_3(\infty) = 0 \tag{IV.96}$$

et

$$I_b P_2(\infty) - mP_3(\infty) = 0 \tag{IV.97}$$

Cet ensemble de trois équations n'est pas suffisant pour résoudre les $P_i(\infty)$. Puisque toute les matrices de transition de Markov sont singulières; c'est-à-dire, les équations sont linéairement dépendantes, rapportant seulement $N-1$ (dans notre cas deux) relations indépendantes. Ceci est facilement vu, parce qu'en ajoutant les Eqs. IV.95 et IV.97, résulte l'Eq.96. Le morceau nécessaire d'information additionnelle est que toutes les probabilités doivent s'additionner à l'unité :

$$\sum_i P_i(\infty) = 1 \tag{IV.98}$$

Dans cette situation dans laquelle nous prenons $\lambda_a = \lambda_b = \lambda$, notre problème est facilement résolu. Combinant les Eqs. IV.95, IV.97 et IV.98, on obtient :

$$P_1(\infty) = \left[1 + \frac{I}{m} + \left(\frac{I}{m} \right)^2 \right]^{-1} \tag{IV.99}$$

$$P_2(\infty) = \left[1 + \frac{I}{m} + \left(\frac{I}{m} \right)^2 \right]^{-1} \cdot \frac{I}{m} \tag{IV.100}$$

et

$$P_3(\infty) = \left[1 + \frac{I}{m} + \left(\frac{I}{m} \right)^2 \right]^{-1} \cdot \left(\frac{I}{m} \right)^2 \tag{IV.101}$$

La disponibilité à l'état d'équilibre peut être trouvée en mettant $t = \infty$ dans l'Eq.IV.93 :

$$A(\infty) = 1 - \left[1 + \frac{I}{m} + \left(\frac{I}{m} \right)^2 \right]^{-1} \cdot \left(\frac{I}{m} \right)^2 \tag{IV.102}$$

Si on suppose en plus que $\lambda/\mu \ll 1$, on peut écrire :

$$A(\infty) \approx 1 - \left(\frac{I}{m} \right)^2 \tag{IV.103}$$

IV.10 Conclusion :

On peut conclure à la fin de ce chapitre que :

- L'analyse de Markov fournit des moyens d'analyser la fiabilité et la disponibilité des systèmes dont les composants montrent des dépendances fortes.
- D'autres méthodes d'analyse des systèmes (telles que la méthode cinétique de la théorie d'arbre utilisée dans des analyses d'arbre de défaillance) supposent généralement l'indépendance des composants ce qui peut mener à des prévisions optimistes pour les paramètres de la disponibilité et de la fiabilité des systèmes.
- Quelques dépendances typiques qui peuvent être manipulées en utilisant des modèles de Markov sont :
 - Des composants en un stand-by froid ou chaud ;
 - Personnel commun d'entretien ;
 - Pièces de rechange communes avec un stock sur site limité.
- A mesure que la taille du diagramme de Markov augmente, la tâche pour évaluer à la main les expressions pour l'indisponibilité dépendant du temps devient impraticable.
- Des méthodes numériques informatisées peuvent être utilisées, cependant, pour fournir une solution rapide pour des systèmes de Markov larges et compliqués.

Chapitre V Etude de la fiabilité des postes de distribution électrique par l'application des modèles semi-Markoviens

V.1 Introduction:

Il est connu que les installations électriques sont classées sur la base de plusieurs critères, les principaux sont les suivants :

- Régime de fonctionnement;
- Nature du courant;
- Niveau de tension et de puissance;
- Fiabilité exigée de leur réseau d'alimentation électrique.

D'après le dernier critère, les installations électriques se divisent en trois catégories :

- Installations de première catégorie: ces installations n'admettent aucun arrêt (accidentel ou planifié) de leur réseau d'alimentation électrique (RAE), l'arrêt de ce dernier a pour conséquence la mort humaine, c'est pourquoi leur RAE doit être réalisé avec deux sources indépendantes.
- Installations de deuxième catégorie: ces installations n'admettent aucun arrêt aussi (accidentel ou planifié) de leur RAE, l'arrêt de ce dernier a pour conséquence des coûts économiques importants, leur RAE doit être réalisé aussi avec deux sources indépendantes.
- Installations de troisième catégorie: ces installations n'ont pas un insert capital dans le processus technologique, elles peuvent admettre un arrêt (accidentel ou planifié) de leur RAE allant jusqu'à 24 heures, leur RAE est réalisé avec une seule source.

La grande majorité des installations électriques appartiennent à la première et deuxième catégorie. Afin d'assurer un niveau de fiabilité élevé de leur RAE, deux sources d'alimentation électrique sont prévues, une principale et une autre de réserve, généralement une réserve froide (groupe diesel-électrique).

La source principale étant en fonctionnement, son contrôle peut être idéal et sûr. Cependant, pour la source de réserve et étant à l'arrêt, des maintenances préventives qui se déroulent sur des intervalles de temps P_m (périodicité) et pendant des durées d_m bien déterminées sont prévues, afin que cette source soit toujours disponible en cas de défaillance de la source principale. Le choix de la périodicité de maintenance préventive de la source de réserve influe directement sur la fiabilité du R.A.E. Sur la base des processus semi-markoviens est étudiée l'influence de la périodicité de maintenance préventive de la source de réserve sur la fiabilité du RAE et est déterminée la périodicité optimale de maintenance préventive ainsi que l'influence du temps de déclenchement du disjoncteur de couplage sur la fiabilité et la disponibilité du système d'alimentation électrique.

V.2 Principales structures des schémas des RAE des installations électriques :

Les principales structures des schémas du RAE des installations électriques sont représentées sur la figure V.1, où :

- a – RAE avec deux sources extérieures principales et une source de réserve froide.
- b – RAE avec une seule source extérieure principale et une source de réserve froide.
- c – RAE avec deux sources locales principales et une source de réserve froide.

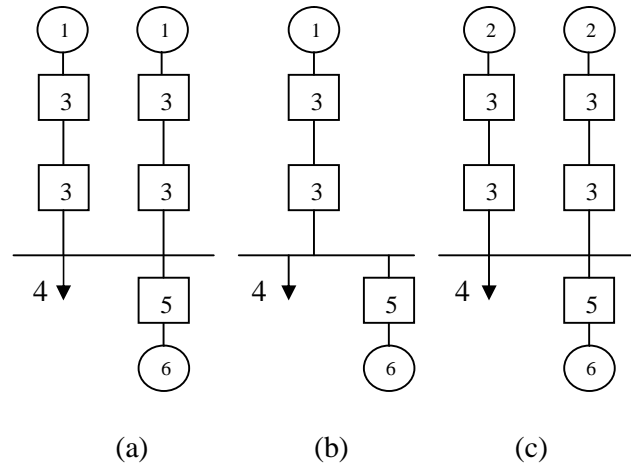


Figure V.1: Schémas types des structures du R.A.E.

- 1 – source extérieure du réseau;
- 2 – source locale;
- 3 – disjoncteur de ligne;
- 4 – charge électrique;
- 5 – disjoncteur de couplage de la source de réserve;
- 6 – source de réserve (groupe diesel-électrique).

Sur la base de ces structures, le RAE peut être schématiser par deux schémas de principe comme suit (figure V.2):

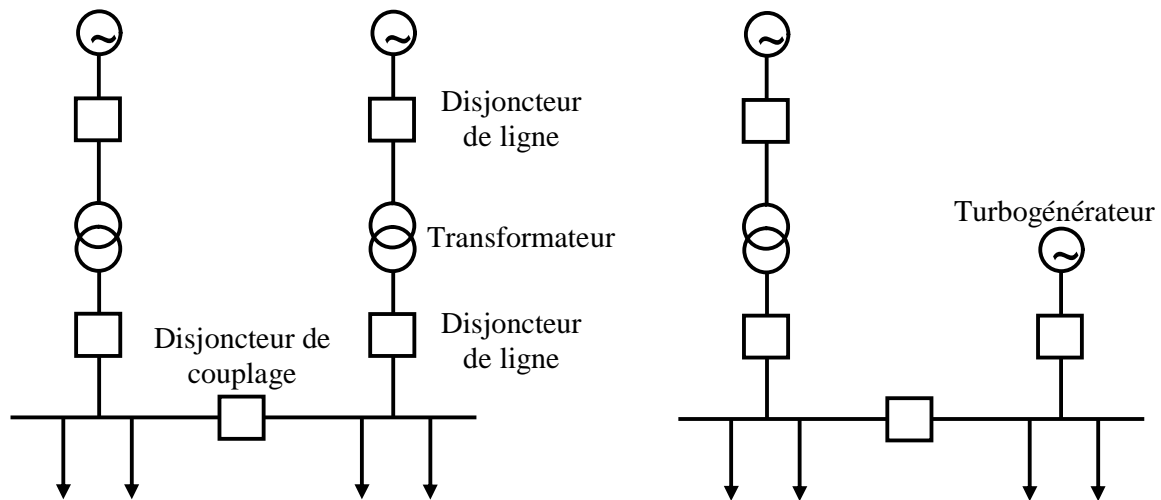


Figure V.2: Schémas de principe des réseaux d'alimentation électrique.

Sur la base de ces structures, le RAE peut être schématiser avec les paramètres de fiabilité comme suit (figure V.3):

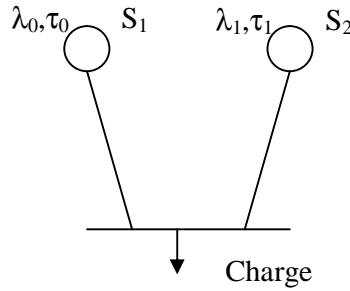


Figure V.3: Schéma représentatif des sources.

S_1 : Source principale;

S_2 : Source de réserve;

λ_0, τ_0 : taux de défaillance et temps de réparation respectivement de la source principale;

λ_1, τ_1 : taux de défaillance et temps de réparation respectivement de la source de réserve.

V.3 Calcul des paramètres de fiabilité de chaque structure :

Eléments en série:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i \tag{V.1}$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \tag{V.2}$$

Eléments en i, j en parallèle :

$$I_{ij} = I_i \cdot I_j \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right) \tag{V.3}$$

$$m_{ij} = m_i + m_j \tag{V.4}$$

Après utilisation des résultats obtenus au chapitre 4, on peut trouver les paramètres de fiabilité de chaque type de source :

- Pour une source extérieure, on trouve $\lambda_0 = 0.000047$ déf/h et $\mu_0 = 0.0187$ rép/h.
- Pour une source locale, on trouve $\lambda_1 = 0.00072$ déf/h et $\mu_1 = 0.0167$ rép/h.

V.4 Calcul du temps moyen de bon fonctionnement des systèmes par la méthode semi-markovienne :

Le temps moyen de bon fonctionnement du système (RAE) peut être obtenu comme suit [51]:

$$T_f = \frac{\sum_{e_n \in e^+} P_{e_n} \cdot T_{e_n}}{\sum_{i \in e^+, j \in e^-} P_i \cdot P_{ij}} \tag{V.5}$$

P_{e_n} : Probabilité stationnaire de l'état e_n ,

T_{e_n} : Temps moyen d'occupation de l'état e_n ,

$e_n \in e^+$: Etat appartenant à l'ensemble des états de bon fonctionnement du système.

V.5 Calcul du temps moyen de réparation des systèmes par la méthode semi-markovienne :

Le temps moyen de réparation du système (RAE) peut être obtenu comme suit [51]:

$$T_r = \frac{\sum_{e_n \in e^-} P_{e_n} \cdot T_{e_n}}{\sum_{i \in e^+, j \in e^-} P_i \cdot P_{ij}} \quad (V.6)$$

P_{e_n} : Probabilité stationnaire de l'état e_n ,

T_{e_n} : Temps moyen d'occupation de l'état e_n ,

$e_n \in e^-$: Etat appartenant à l'ensemble des états de défaillance du système.

V.6 Disponibilité des systèmes :

La disponibilité du système peut être évaluée par son coefficient donné par la relation suivante :

$$K_d = \frac{T_f}{T_f + T_r} \quad (V.7)$$

V.7 Application des processus semi-markoviens pour la détermination de la périodicité optimale de maintenance préventive des sources de réserve des réseaux d'alimentation électrique :

La grande majorité des installations électriques appartiennent à la première et deuxième catégorie. Afin d'assurer la fiabilité de leurs réseaux d'alimentation électrique (R.A.E.), deux sources d'énergie électrique indépendantes sont prévues : une principale, la deuxième de réserve, généralement une réserve froide (groupe diesel électrique).

La source principale étant en fonctionnement, son contrôle peut être idéal et sûr. Cependant, pour la source de réserve et étant à l'arrêt, des maintenances préventives sur des intervalles de temps (périodicité) et pendant des durées bien déterminées sont prévues et ce afin d'assurer sa disponibilité en cas de défaillance de la source principale. Le choix de la périodicité de maintenance préventive de la source de réserve influe directement sur la fiabilité du R.A.E.

Dans cette section et sur la base des processus semi-markoviens est étudiée l'influence de la périodicité de maintenance préventive de la source de réserve sur la fiabilité du RAE et est déterminée la durée optimale de la périodicité afin d'assurer une fiabilité maximale du R.A.E.

V.7.1 Graphe d'états et de transitions du système (RAE) :

Sur la base des processus semi-markoviens, l'évolution du fonctionnement du RAE peut être décrite par le graphe d'états et de transitions suivant (figure V.4):

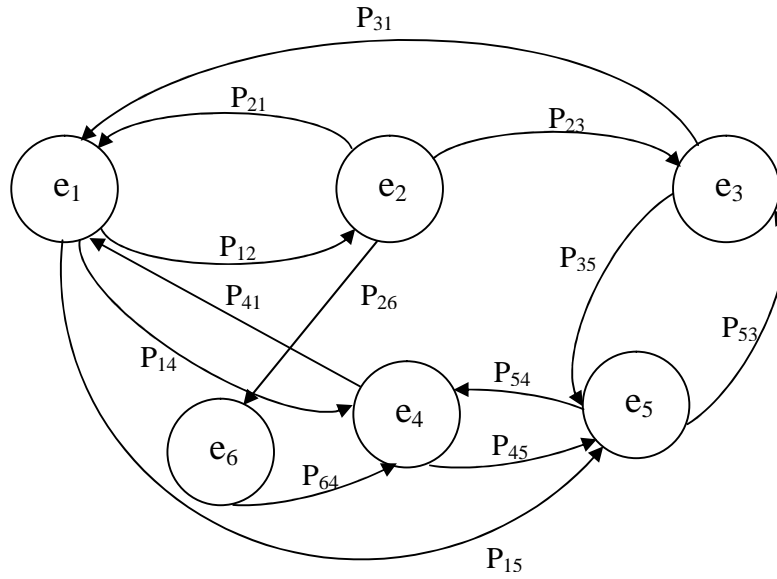


Figure V.4: Graphe d'états et de transitions du processus semi-markovien.

- e1 : SP en fonctionnement, SR en réserve;
- e2 : SP en fonctionnement, SR en maintenance préventive;
- e3 : SP en fonctionnement, SR en réparation;
- e4 : SR en fonctionnement, SP en réparation;
- e5 : SP et SR en réparation;
- e6 : SR est mise en marche.
- SP: source principale, SR: source de réserve.

Les valeurs aléatoires du temps de bon fonctionnement x_0 , x_1 ainsi que le temps de réparation h_0 , h_1 de la source principale et de la source de réserve respectivement suivent une loi exponentielle $P(t)$ et $G(t)$ avec les paramètres I_i , m_i ($i = 0, 1$). Le taux de défaillance de la source de réserve est pris égal à aI_1 avec $0 < a < 1$.

Nous supposons ici que l'enclenchement de la source de réserve en cas de défaillance de la source principale est absolument fiable, le démarrage de la source de réserve est instantané.

V.7.2 Calcul des probabilités de transitions entre états :

En appliquant les lois de la fonction de densité de probabilité, on trouve :

$$P_{12} = P\{x_0 > P_m\} = e^{-I_0 P_m}$$

$$P_{14} = P\{x_0 < P_m\} \cdot P\{x_1 > P_m\} = (1 - e^{-I_0 P_m}) \cdot e^{-aI_1 P_m}$$

$$P_{15} = P\{x_0 < P_m\} \cdot P\{x_1 < P_m\} = (1 - e^{-I_0 P_m}) \cdot (1 - e^{-I_1 P_m})$$

$$P_{21} = P\{x_1 > P_m\} \cdot P\{x_0 > d_m\} = e^{-(I_0 d_m + aI_1 P_m)}$$

$$P_{23} = P\{x_1 < P_m\} = (1 - e^{-aI_1 P_m})$$

$$P_{26} = P\{x_1 > P_m\} \cdot P\{x_0 < d_m\} = e^{-aI_1 P_m} (1 - e^{-I_0 d_m})$$

Calculons la probabilité P_{31} :

$$\begin{aligned}
 P_{31} &= P\{x_0 > h_1\} = \int_0^{\infty} [1 - P_0(t)] dG_1(t) \\
 &= \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-I_0 t})] d(1 - e^{-m_1 t}) \\
 &= \int_0^{\infty} [e^{-I_0 t}] (m_1 \cdot e^{-m_1 t}) (dt) \\
 &= m_1 \cdot \int_0^{\infty} [e^{-(I_0 + m_1)t}] dt \\
 &= m_1 \cdot \left[-\frac{e^{-(I_0 + m_1)t}}{(I_0 + m_1)} \right]_0^{\infty} \\
 &= \frac{m_1}{I_0 + m_1}
 \end{aligned}$$

De même, pour les autres probabilités on peut trouver :

$$\begin{aligned}
 P_{35} &= P\{x_0 < h_1\} = \int_0^{\infty} P_0(t) dG_1(t) = \frac{I_0}{I_0 + m_1} \\
 P_{41} &= P\{h_0 < x_1\} = \int_0^{\infty} G_0(t) dP_1(t) = \frac{m_0}{m_0 + aI_1} \\
 P_{45} &= P\{h_0 > x_1\} = \int_0^{\infty} [1 - G_0(t)] dP_1(t) = \frac{aI_1}{m_0 + aI_1} \\
 P_{53} &= P\{h_0 < h_1\} = \int_0^{\infty} G_0(t) dG_1(t) = \frac{m_0}{m_0 + m_1} \\
 P_{54} &= P\{h_1 < h_0\} = \int_0^{\infty} G_1(t) dG_0(t) = \frac{m_1}{m_0 + m_1} \\
 P_{64} &= 1
 \end{aligned}$$

V.7.3 Calcul du temps moyen Te_i d'occupation à l'état e_i :

$$\begin{aligned}
 T_{e_1} &= E \min\{x_0, P_m\} = \int_0^{P_m} [1 - P_0(t)] dt = \frac{1 - e^{-I_0 P_m}}{I_0} \\
 T_{e_2} &= E \min\{x_0, d_m\} = \int_0^{d_m} [1 - P_0(t)] dt = \frac{1 - e^{-I_0 d_m}}{I_0} \\
 T_{e_6} &= 0
 \end{aligned}$$

E : espérance mathématique.

Pour les autres états, connaissant la loi de distribution $T_{ij}(t)$ d'existence à l'état e_i lors de la transition à l'état e_j , on peut déterminer la loi de distribution $F_i(t)$ et le temps moyen d'existence à l'état e_i , T_{e_i} comme suit [51]:

$$F_i(t) = \sum_{j=0}^n P_{ij} . T_{ij}(t) \quad (V.8)$$

$$T_{e_i} = \int_0^{\infty} t . dF_i(t) \quad (V.9)$$

On trouve donc :

$$T_{31}(t) = P\{h_1 < t / h_1 < x_0\} = 1 - e^{-(m+I_0)t}$$

$$T_{35}(t) = P\{x_0 < t / h_1 > x_0\} = 1 - e^{-(m+I_0)t}$$

$$T_{41}(t) = P\{h_0 < t / h_0 < x_1\} = 1 - e^{-(m_0+aI_1)t}$$

$$T_{45}(t) = P\{x_1 < t / h_0 > x_1\} = 1 - e^{-(m_0+aI_1)t}$$

$$T_{53}(t) = P\{h_0 < t / h_0 < h_1\} = 1 - e^{-(m_0+m)t}$$

$$T_{54}(t) = P\{h_1 < t / h_1 < h_0\} = 1 - e^{-(m_0+m)t}$$

On détermine que :

$$T_{e_3} = \frac{1}{m+I_0} ; T_{e_4} = \frac{1}{m_0+aI_1} ; T_{e_5} = \frac{1}{m_0+m} .$$

V.7.4 Calcul des probabilités stationnaires d'occupation à l'état e_i (P_i) :

Les probabilités stationnaires d'occupation de l'état e_i peuvent être déterminées en résolvant le système d'équations suivant :

$$P_i = \sum_{j \in e} P_{ij} . P_j$$

$$P_1 = P_{21} . P_2 + P_{31} . P_3 + P_{41} . P_4$$

$$P_2 = P_{12} . P_1$$

$$P_3 = P_{23} . P_2 + P_{53} . P_5$$

$$P_4 = P_{14} . P_1 + P_{54} . P_5 + P_{64} . P_6$$

$$P_5 = P_{15} . P_1 + P_{35} . P_3 + P_{45} . P_4$$

$$P_6 = P_{26} . P_2$$

Ainsi que l'équation (puisque toutes les probabilités doivent s'additionner à l'unité):

$$\sum_1^6 P_i = 1$$

V.7.5 Calcul du temps moyen de bon fonctionnement du système (RAE) :

Dans notre cas, nous trouvons :

$$T_f = \frac{P_1 . T_{e_1} + P_2 . T_{e_2} + P_3 . T_{e_3} + P_4 . T_{e_4}}{P_1 . P_{15} + P_2 . P_{26} + P_3 . P_{35} + P_4 . P_{45}}$$

V.7.6 Calcul du temps moyen de réparation du système (RAE) :

Donc, dans notre cas nous trouvons :

$$T_r = \frac{P_5.T_{e5} + P_6.T_{e6}}{P_1.P_{15} + P_2.P_{26} + P_3.P_{35} + P_4.P_{45}}$$

V.7.7 Simulation de la méthode :

La méthode est appliquée à un réseau d'alimentation électrique qui a deux sources indépendantes, une source principale et une deuxième de réserve. On suppose que $d_m = 8$ h, où :
 d_m : durée de la maintenance préventive de la source de réserve.

P_m : périodicité de maintenance préventive de la source de réserve.

h_0 : temps moyen de réparation de la source principale;

h_1 : temps moyen de réparation de la source de réserve.

a. Les deux sources sont du même type :

Les sources principale et de réserve ont les paramètres de fiabilité suivants :

$$I_0 = I_1 = 0.412 \text{ déf/an} ; \mu_0 = \mu_1 = 163.812 \text{ rép/an}$$

Les courbes obtenues de la variation du temps moyen de bon fonctionnement, du temps de réparation et de la disponibilité du système d'alimentation en fonction du rapport P_m/d_m sont les suivantes :

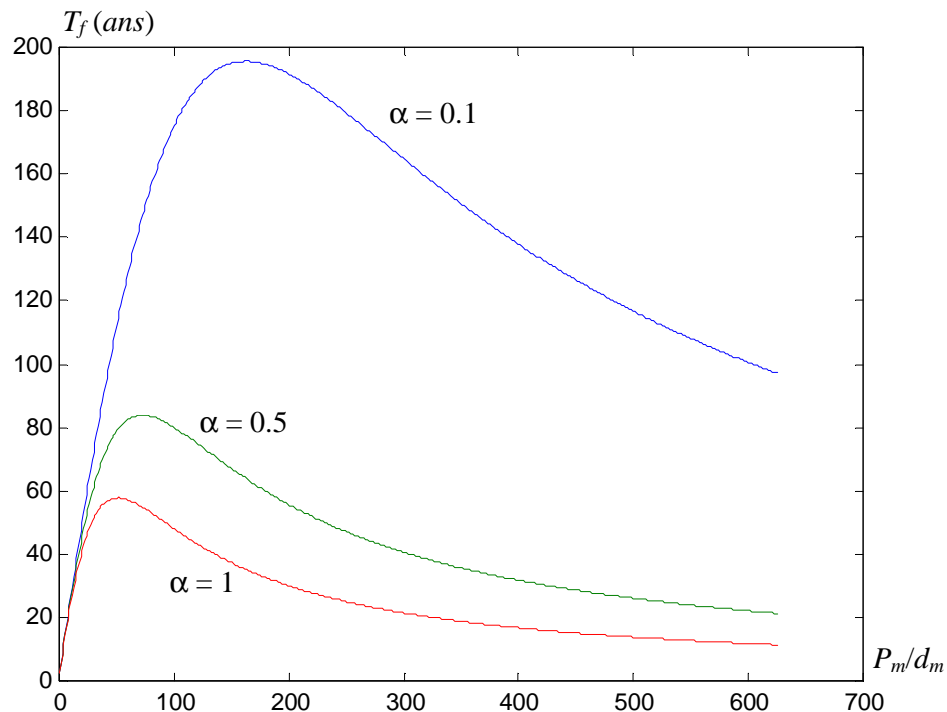


Figure V.5: Temps moyen de bon fonctionnement du système en fonction de P_m/d_m pour deux sources identiques.

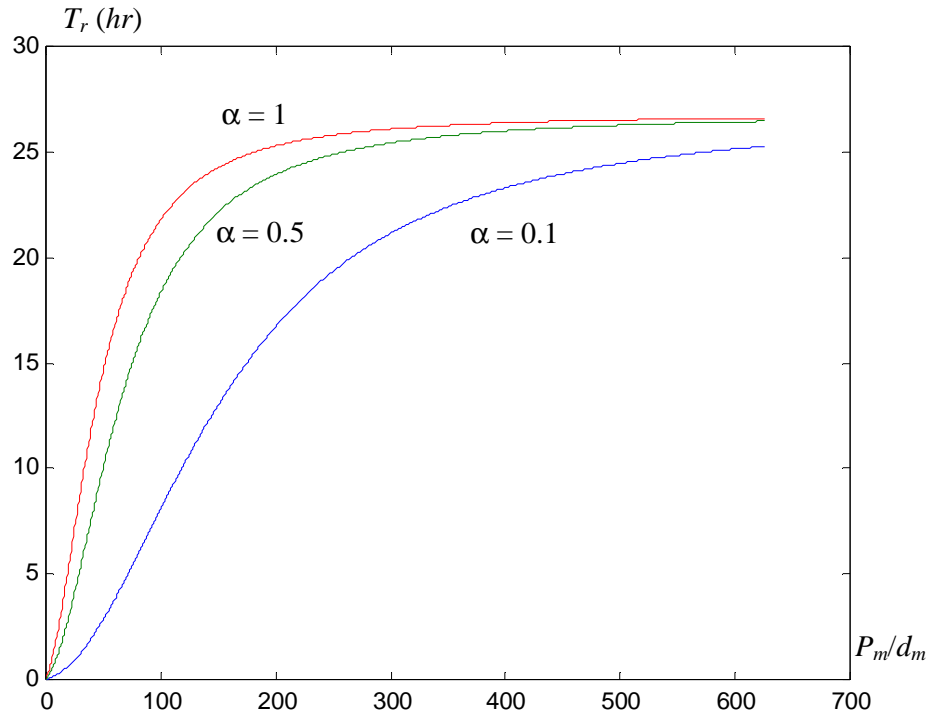


Figure V.6: Temps moyen de réparation du système en fonction de P_m/d_m pour deux sources identiques.

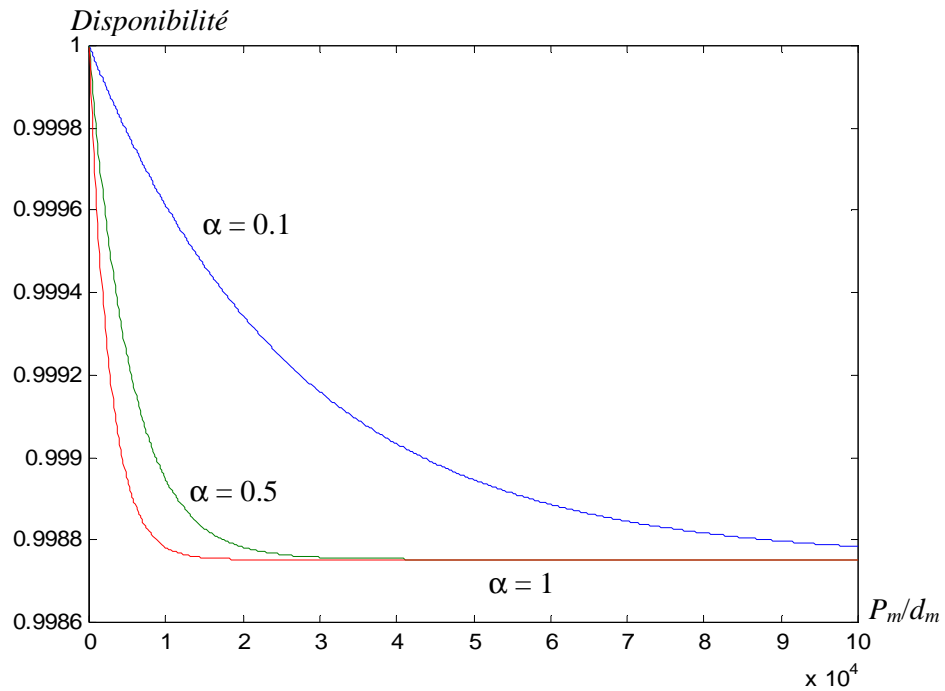


Figure V.7: Disponibilité du système en fonction de P_m/d_m pour deux sources identiques.

b. Deux sources différentes dont celle de réserve moins fiable :

Les sources principale et de réserve ont les paramètres de fiabilité suivants :

Source principale : $I_0 = 0.412$ déf/an ; $\mu_0 = 163.812$ rép/an.

Source de réserve : $I_1 = 6.307$ déf/an ; $\mu_1 = 146.292$ rép/an.

Les courbes obtenues de la variation du temps moyen de bon fonctionnement, du temps de réparation et de la disponibilité du système d'alimentation en fonction du rapport P_m/d_m sont les suivantes :

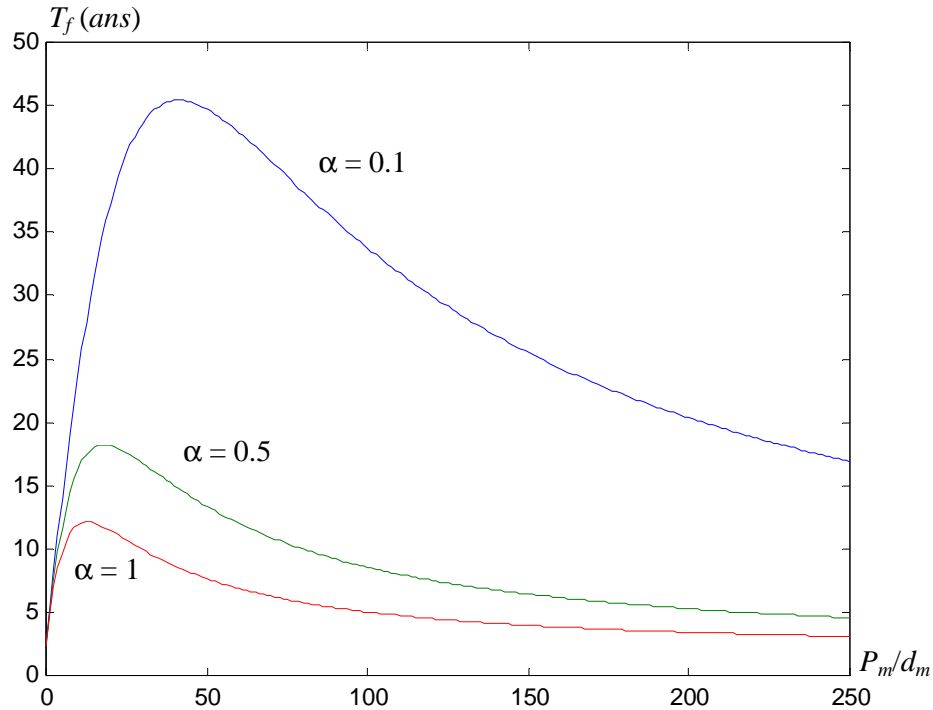


Figure V.8: Temps moyen de bon fonctionnement du système en fonction de P_m/d_m pour deux sources différentes.

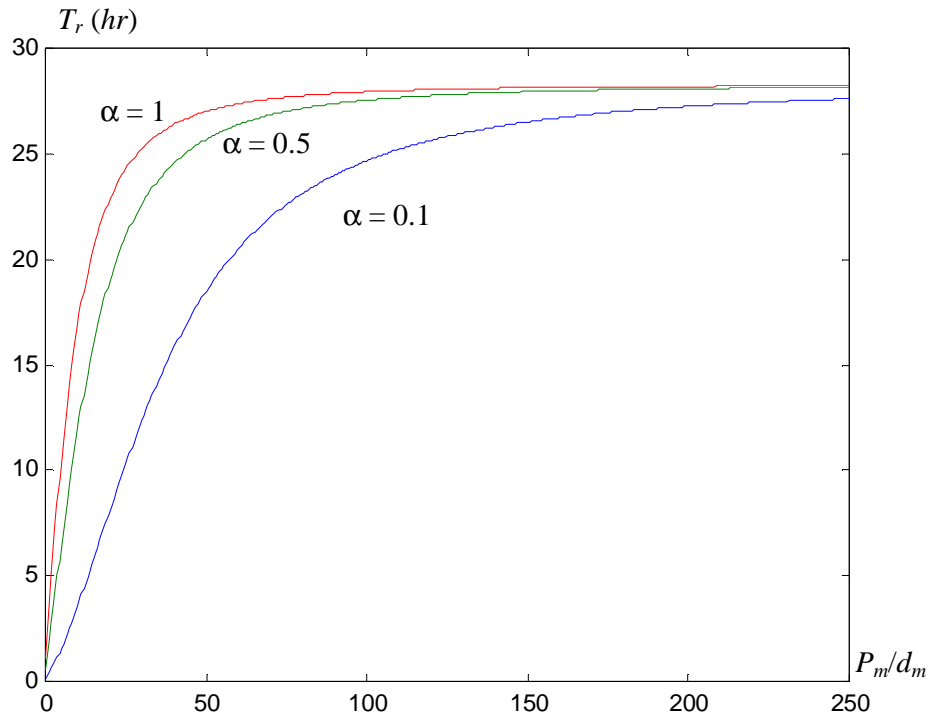


Figure V.9: Temps moyen de réparation du système en fonction de P_m/d_m pour deux sources différentes.

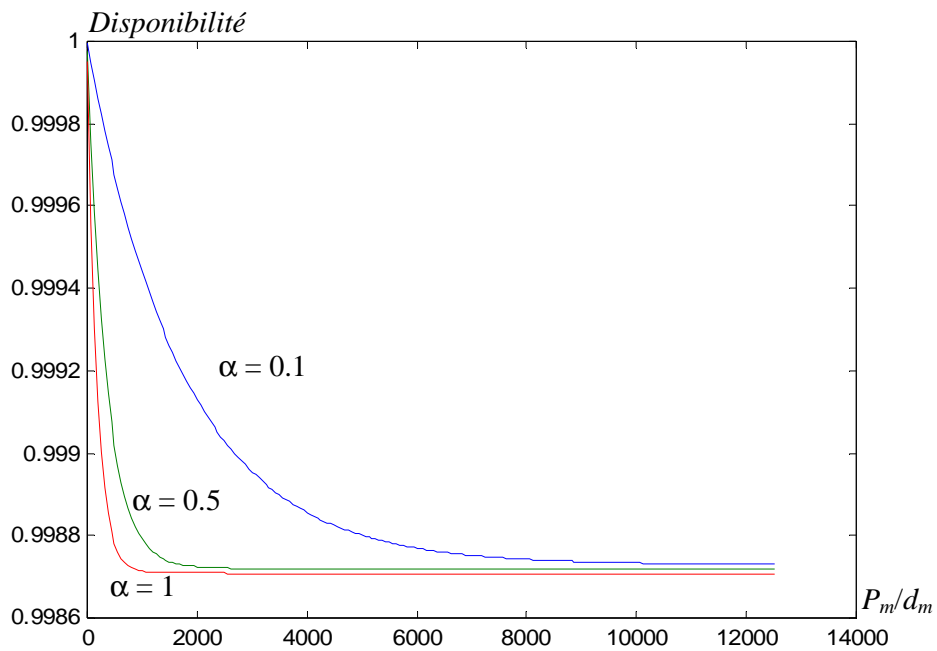


Figure V.10: Disponibilité du système en fonction de P_m/d_m pour deux sources différentes.

V.7.8 Interprétation des résultats :

D'après les courbes obtenues, on peut conclure ce qui suit :

a. Temps de bon fonctionnement :

On peut remarquer que :

- Une périodicité optimale de la maintenance préventive a été trouvée qui correspond à un temps de bon fonctionnement maximal.
- Le temps de bon fonctionnement augmente avec la diminution du taux de défaillance de la source principale ainsi que celui de la source de réserve.
- Le temps de bon fonctionnement diminue avec l'augmentation de la périodicité de maintenance préventive de la source de réserve (P_m) et aussi lorsque celui-ci devient trop petit.
- La périodicité optimale de la maintenance préventive pour le cas de deux sources identiques est plus grande que celle obtenue en utilisant deux sources différentes. Ceci est dû au taux de défaillance de la source de réserve qui est plus grand lorsqu'elle est différente de la source principale.
- L'existence d'une périodicité optimale ($P_{m\ opt}$) de la source de réserve s'explique comme suit : Tant que P_m est trop grand, la probabilité de localiser une défaillance de la source de réserve (SR) est grande, donc le temps de fonctionnement du système d'alimentation va diminuer. Mais lorsque P_m devient trop faible, la probabilité d'avoir une défaillance de la source principale alors que la source de réserve est en maintenance préventive est grande, donc le système ne va fonctionner qu'avec la source principale sans source de réserve ce qui va diminuer ce temps de bon fonctionnement.
- L'utilisation de deux sources identiques se reflète par un temps de fonctionnement trop grand mais ça revient trop cher. Mais, l'utilisation de deux sources différentes, où la deuxième a un taux de défaillance plus grand se traduit par une diminution du temps de bon fonctionnement, mais ce dernier reste aussi important. Donc on peut utiliser une source de réserve moins chère.

b. Temps de réparation:

On peut observer ce qui suit :

- Avec l'augmentation de P_m , le temps de réparation augmente jusqu'à ce qu'il devient constant (stabilisation du temps de réparation).
- L'utilisation de deux sources identiques résulte en un rapport de stabilisation plus grand ce qui peut s'expliquer par le fait que la périodicité de la maintenance préventive est plus grande.
- Avec la diminution du taux de défaillance de la source de réserve, le temps de réparation du système diminue.
- D'après les figures V.6 et V.9, le temps de réparation tend vers une même valeur par ce que dans les deux cas, les taux de réparation sont très proches.
- A la périodicité optimale $P_{m\ opt}$, correspond dans les deux cas un temps de réparation inférieur au temps maximal ou le temps de stabilisation.

c. Disponibilité :

D'après les courbes obtenues, on peut tirer les remarques suivantes :

- Le système dans les deux cas (utilisation des deux sources identiques ou différentes) réalise une disponibilité très élevée.
- La disponibilité diminue avec l'augmentation de la périodicité de maintenance préventive de la source de réserve.
- Dans les deux cas il y a un seuil minimum de la disponibilité. Il peut s'expliquer par le fait qu'avec l'augmentation de la périodicité de maintenance préventive de la source de réserve, les temps de bon fonctionnement et de réparation deviennent constants.
- Avec l'augmentation du taux de défaillance de la source de principale et celui de la source de réserve, la disponibilité du système diminue.
- L'utilisation d'une source de réserve moins fiable que la source principale (taux de défaillance plus grand) a comme conséquence une diminution de la disponibilité globale du système, mais cette diminution n'est pas très considérable. C'est pour cela qu'on peut utiliser une source de réserve moins fiable pour diminuer le coût global de l'installation.
- La périodicité optimale de la source de réserve correspond à une disponibilité très élevée du R.A.E.

V.8 Application des processus semi-markoviens pour l'étude de l'influence du temps de déclenchement du disjoncteur de couplage dans les réseaux d'alimentation électrique :

Le disjoncteur de couplage sert à relier la charge alimentée initialement par la source principale à la source de réserve en cas de défaillance de la source principale. Sa fiabilité et son temps de déclenchement sont deux facteurs très importants en concevant un système d'alimentation en énergie électrique. Sur la base des processus semi-markoviens, l'influence du temps de déclenchement du disjoncteur de couplage t_d sur la fiabilité et la disponibilité des systèmes d'alimentation en énergie électrique est étudiée.

V.8.1 Graphe d'états et de transitions du système (RAE):

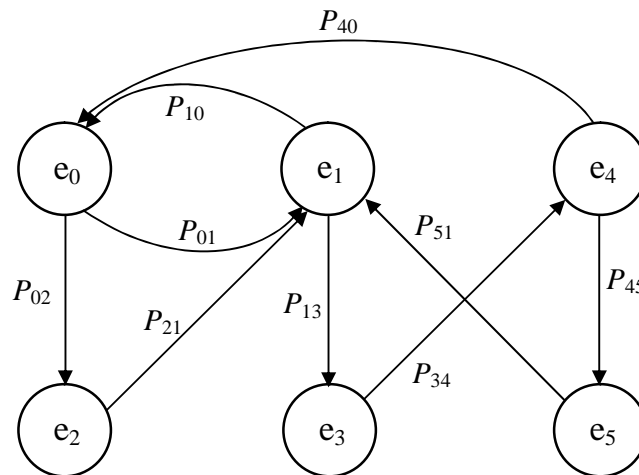


Figure V.11: Graphe d'états et de transitions du processus semi-markovien.

- e_0 : SP en fonctionnement, SR en réserve.
- e_1 : SP en réparation, SR en fonctionnement.
- e_2 : SP défaillant et $t_d > \tau_{adm}$.
- e_3 : SP en réparation, SR défaillant.
- e_4 : SP en fonctionnement, SR en réparation.
- e_5 : SP défaillant, SR en réparation.

V.8.2 Calcul des probabilités de transitions entres états:

$$P_{01} = 1 - q$$

$$P_{02} = q = P\{t_d > t_{adm}\} = 1 - F_d(t_{adm})$$

Pour $t_d = \text{constante}$ et $D(t) = P\{t_{adm} < t\} = \frac{t - t_{adm \min}}{t_{adm \max} - t_{adm \min}}$

On a :

$$q = \int_0^{\infty} [1 - F_d(t)] dD(t) = \frac{t_d - t_{adm \min}}{t_{adm \max} - t_{adm \min}}$$

$$P_{10} = P\{h_0 < x_1\} = \int_0^{\infty} G_0(t) . dP_1(t) = \frac{m_0}{I_1 + m_0}$$

$$P_{13} = P\{h_0 > x_1\} = \int_0^{\infty} [1 - G_0(t)] dP_1(t) = \frac{I_1}{I_1 + m_0}$$

$$P_{40} = P\{x_0 > h_1\} = \int_0^{\infty} [1 - P_0(t)] dG_1(t) = \frac{m_1}{I_0 + m_1}$$

$$P_{45} = P\{x_0 < h_1\} = \int_0^{\infty} P_0(t) . dG_1(t) = \frac{I_0}{I_0 + m_1}$$

$$P_{21} = P_{34} = P_{51} = 1$$

La matrice des probabilités de transition P_{ij} , est alors :

$$\begin{bmatrix} 0 & 1-q & q & 0 & 0 & 0 \\ \frac{m_0}{I_1 + m_0} & 0 & 0 & \frac{I_1}{I_1 + m_0} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{m_1}{I_0 + m_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{I_0}{I_0 + m_1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

V.8.3 Calcul du temps moyen Te_i d'occupation à l'état e_i :

La loi de distribution d'occupation de l'état e_i lors du transfert à l'état e_j est $T_{ij}(t)$ et est obtenue comme suit :

$$T_{01}(t) = P\{x_0 \leq t / t_d < t_{adm}\} = 1 - e^{-I_0 t}$$

$$T_{02}(t) = 1 - e^{-I_0 t}$$

$$T_{21}(t) = P\{t_d - t_{adm} \leq t\}$$

Pour $t_d = \text{constante}$ et $D(t) = \frac{t - t_{adm \min}}{t_{adm \max} - t_{adm \min}}$

$$T_{21}(t) = P\{t_d - t_{adm} \leq t\} = \frac{t}{t_{adm \max} - t_{adm \min}}$$

avec $t_d - t_{adm \max} < t < t_d - t_{adm \min}$

$$T_{10}(t) = P\{h_0 \leq t / h_0 < x_1\} = 1 - e^{-(m_0+I_1)t}$$

$$T_{13}(t) = P\{x_1 \leq t / x_1 < h_0\} = 1 - e^{-(m_0+I_1)t}$$

$$T_{34}(t) = P\{(h_0 - x_1) \leq t / h_0 > x_1\} = 1 - e^{-m_0 t}$$

$$T_{40}(t) = P\{h_1 \leq t / h_1 < x_0\} = 1 - e^{-(m+I_0)t}$$

$$T_{45}(t) = P\{x_0 < t / h_1 > x_0\} = 1 - e^{-(m+I_0)t}$$

$$T_{51}(t) = P\{h_1 < t\} = 1 - e^{-m t}$$

Connaissant $T_{ij}(t)$; la fonction de distribution d'occupation de l'état e_i est déterminée comme suit :

$$F_i(t) = \sum_{j=1}^n P_{ij} \cdot T_{ij}(t) \quad i = 0, 1, 2, \dots, n$$

Le temps moyen d'occupation de l'état e_i :

$$T_{e_i} = \int_0^{\infty} t \cdot dF_i(t)$$

On obtient donc :

$$T_{e_i} = \left[\frac{1}{I_0}; \frac{1}{m_0+I_1}; t_d - \frac{t_{adm \max} + t_{adm \min}}{2}; \frac{1}{m}; \frac{1}{m+I_0}; \frac{1}{m} \right]$$

V.8.4 Calcul des probabilités stationnaires d'occupation à l'état e_i (P_i):

Les probabilités stationnaires d'occupation de l'état e_i sont [51]:

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j \in e} P_{ij} \cdot P_j \\ \sum_{i=1}^n P_i = 1 \end{cases} \quad (V.10)$$

C'est-à-dire :

$$\begin{cases} P_0 = P_{10} \cdot P_1 + P_{40} \cdot P_4 \\ P_1 = P_{01} \cdot P_0 + P_{21} \cdot P_2 + P_{51} \cdot P_5 \\ P_2 = P_{02} \cdot P_0 \\ P_3 = P_{13} \cdot P_1 \\ P_4 = P_{34} \cdot P_3 \\ P_5 = P_{45} \cdot P_4 \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1 \end{cases}$$

La résolution du système donne :

$$P_0 = P_1 = \frac{m_0(I_0 + m_1) + I_1 \cdot m_1}{(I_0 + m_1)[2 \cdot (2 \cdot I_1 + m_0) + q \cdot m_0] + q \cdot m_1 \cdot I_1} = \frac{m_0(I_0 + m_1) + I_1 \cdot m_1}{A}$$

$$P_2 = \frac{q \cdot [m_0(I_0 + m_1) + I_1 \cdot m_1]}{A}$$

$$P_3 = P_4 = \frac{I_1(I_0 + m_1)}{A}$$

$$P_5 = \frac{I_1 \cdot I_0}{A}$$

V.8.5 Calcul du temps moyen de bon fonctionnement du système (RAE):

Dans notre cas, nous avons :

$$T_f = \frac{P_0 \cdot T_{e_0} + P_1 \cdot T_{e_1} + P_4 \cdot T_{e_4}}{P_0 \cdot P_{02} + P_1 \cdot P_{13} + P_4 \cdot P_{45}}$$

Donc :

$$T_f = \frac{(I_0 + m_1) + (I_1 + m_0) \left(1 + \frac{m_1}{I_0}\right)}{q \cdot [m_0 \cdot (I_0 + m_1) + I_1 \cdot m_1] + I_1 \cdot (m_1 + 2 \cdot I_0)}$$

V.8.6 Calcul du temps moyen de réparation du système (RAE):

Dans notre cas, nous avons :

$$T_r = \frac{P_2 \cdot T_{e_2} + P_3 \cdot T_{e_3} + P_5 \cdot T_{e_5}}{P_0 \cdot P_{02} + P_1 \cdot P_{13} + P_4 \cdot P_{45}}$$

Donc :

$$T_r = \frac{q \cdot [m_0 \cdot (I_0 + m_1) + I_1 \cdot m_1] T_{e_2} + \frac{I_1(I_0 + m_1)}{m_0} + \frac{I_1 \cdot I_0}{m_0}}{q \cdot [m_0 \cdot (I_0 + m_1) + I_1 \cdot m_1] + I_1 \cdot (m_1 + 2 \cdot I_0)}$$

V.8.7 Simulation de la méthode :

La méthode est appliquée à un réseau d'alimentation électrique qui a deux sources indépendantes, une source principale, une deuxième de réserve et un disjoncteur de couplage qui assure le basculement vers la source de réserve en cas de défaillance de la source principale. On prendra en compte de deux cas : temps de déclenchement de disjoncteur de couplage $t_d = 3 \text{ sec}$ et $t_d = 5 \text{ sec}$.

a. Les deux sources sont du même type :

Les sources principale et de réserve ont les paramètres de fiabilité suivants :

$$I_0 = I_1 = 0.412 \text{ déf/an} ; \mu_0 = \mu_1 = 163.812 \text{ rép/an.}$$

Les courbes obtenues de la variation du temps moyen de bon fonctionnement, du temps de réparation et de la disponibilité du système d'alimentation en fonction du rapport T_{adm}/t_d sont les suivantes:

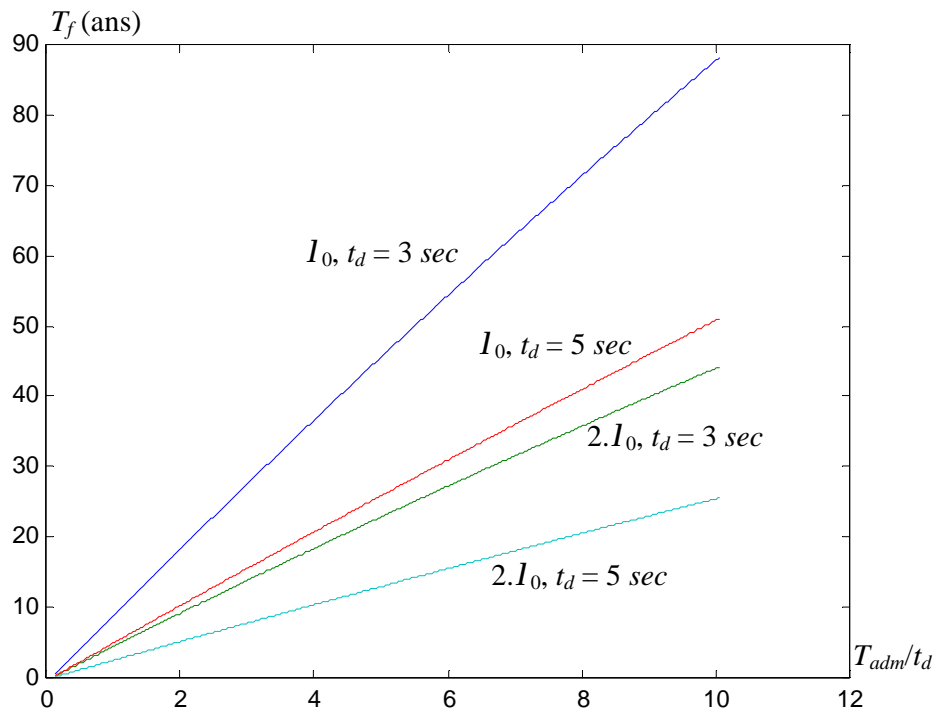


Figure V.12: Temps moyen de bon fonctionnement du système en fonction de T_{adm}/t_d pour deux sources identiques.

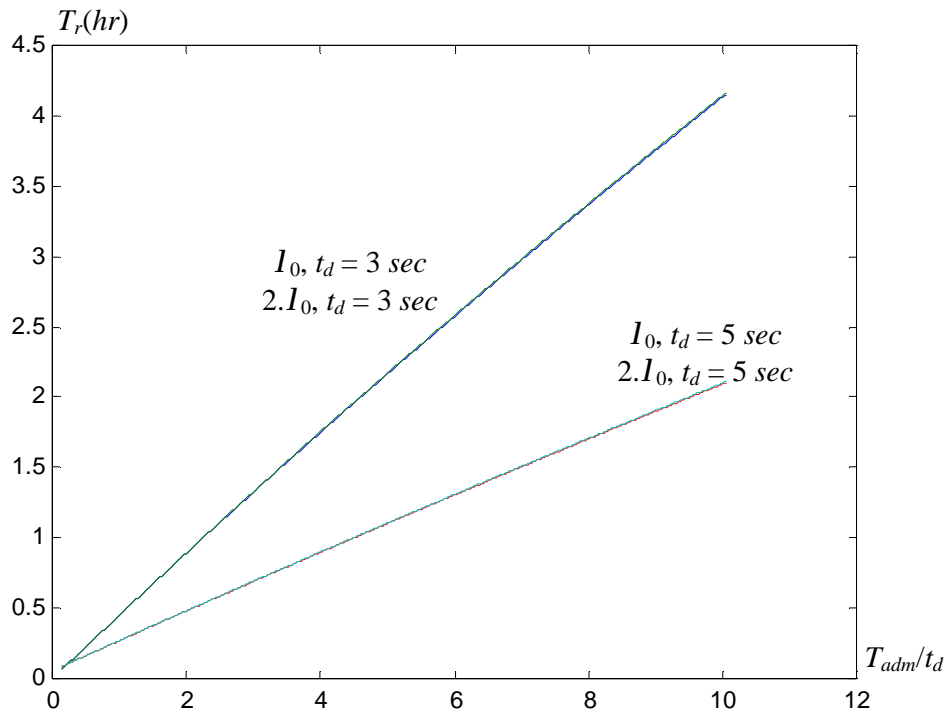


Figure V.13: Temps moyen de réparation du système en fonction de T_{adm}/t_d pour deux sources identiques.

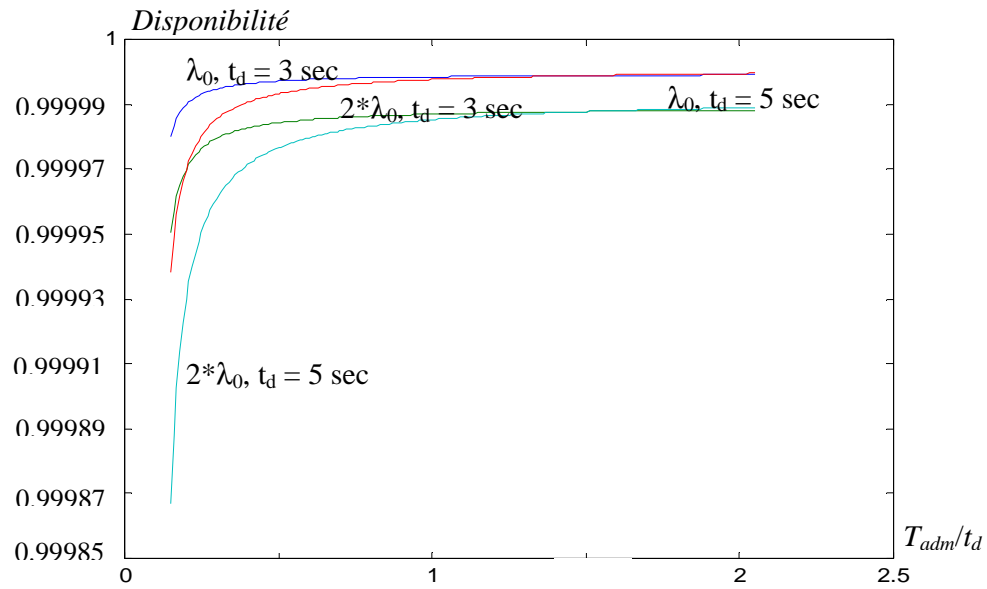


Figure V.14: Disponibilité du système en fonction de T_{adm}/t_d pour deux sources identiques.

b. Deux sources différentes dont celle de réserve moins fiable :

Les sources principale et de réserve ont les paramètres de fiabilité suivants :

Source principale : $I_0 = 0.412$ déf/an ; $\mu_0 = 163.812$ rép/an.

Source de réserve : $I_1 = 6.307$ déf/an ; $\mu_1 = 146.292$ rép/an.

Les courbes obtenues de la variation du temps moyen de bon fonctionnement, du temps de réparation et de la disponibilité du système d'alimentation en fonction du rapport T_{adm}/t_d sont les suivantes:

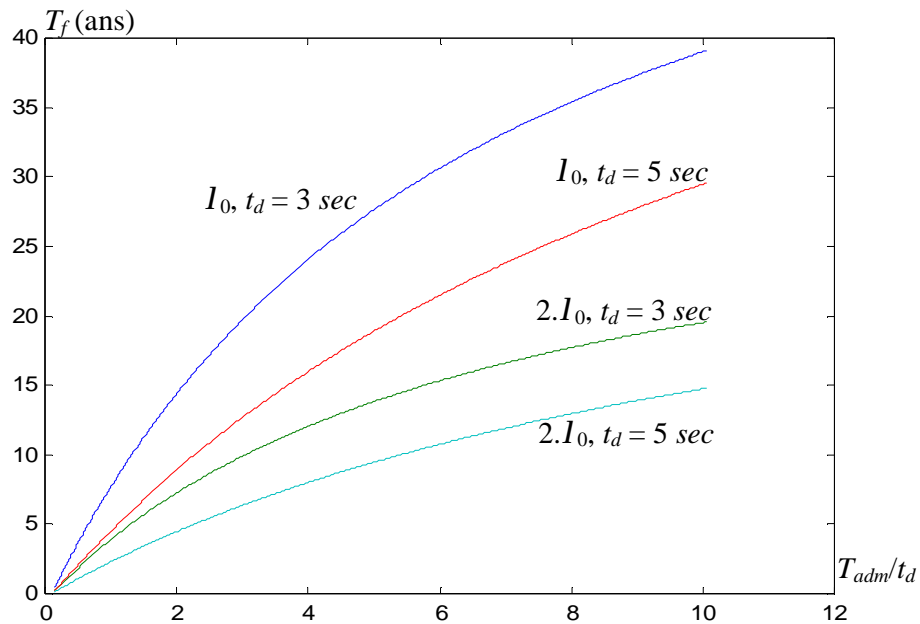


Figure V.15: Temps moyen de bon fonctionnement du système en fonction de T_{adm}/t_d pour deux sources différentes.

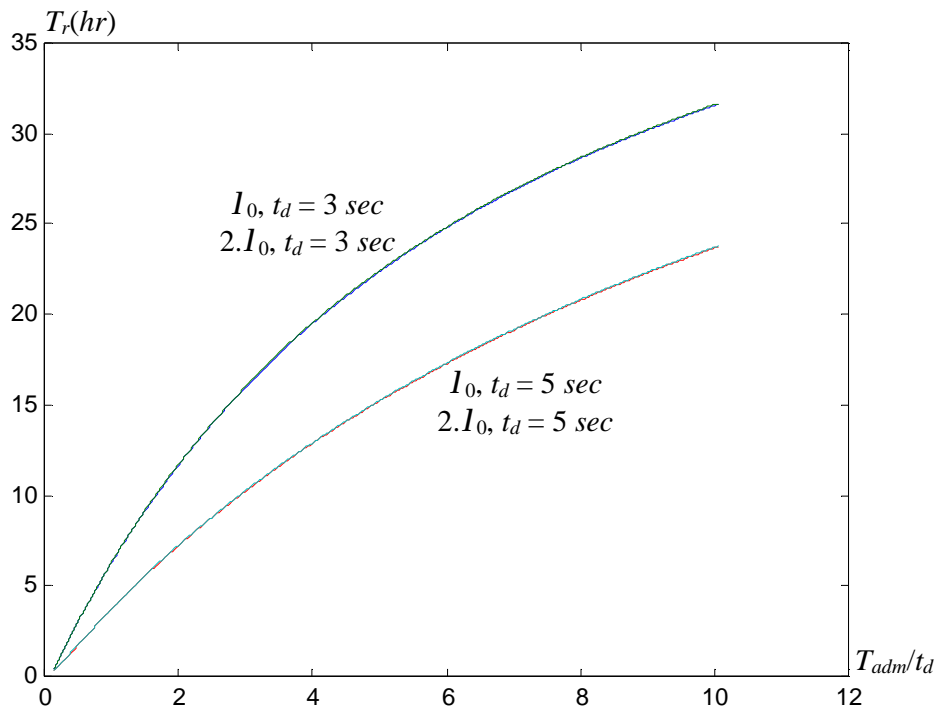


Figure V.16: Temps moyen de réparation du système en fonction de T_{adm}/t_d pour deux sources différentes.

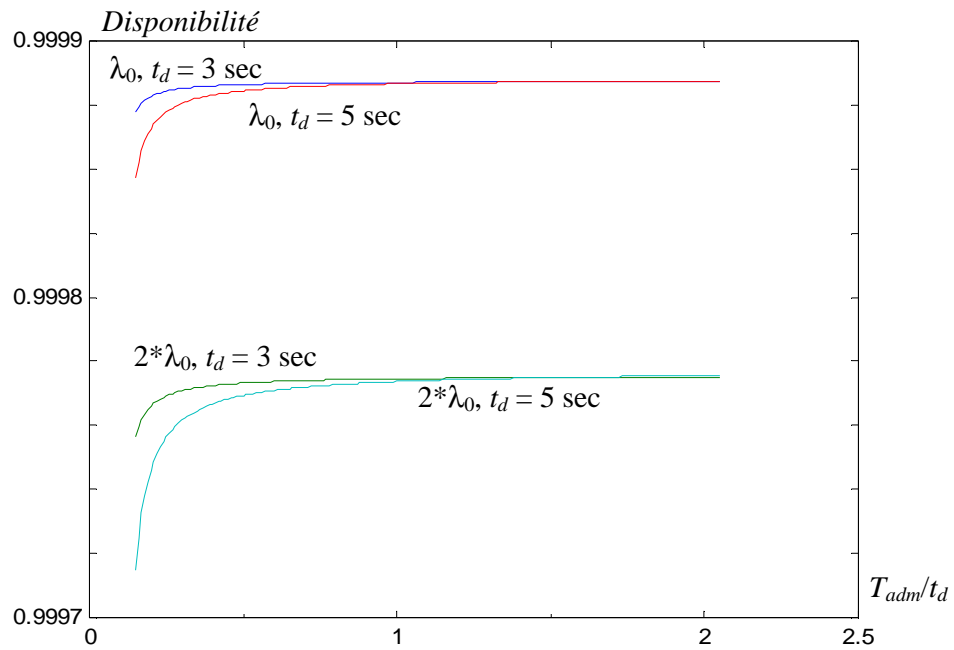


Figure V.17: Disponibilité du système en fonction de T_{adm}/t_d pour deux sources différentes.

V.8.8 Interprétation des résultats :

D'après les courbes obtenues on peut conclure ce qui suit :

a. Temps de bon fonctionnement :

On remarque d'après les courbes tracées que :

- Le temps de bon fonctionnement augmente avec l'augmentation du rapport (T_{adm}/t_d).
- Le temps de bon fonctionnement augmente avec la diminution du taux de défaillance de la source principale et celui de la source de réserve.
- Il est presque multiplié par 2.5 pour un même temps d'enclenchement et un taux de défaillance diminué à sa moitié, autrement dit pour un disjoncteur donné avec un temps d'enclenchement donné, on pourra doubler la durée du bon fonctionnement si on arrive à diminuer à moitié le taux de défaillance, et cela est possible avec la mise au point d'une politique de maintenance adéquate avec une périodicité de maintenance bien déterminée.
- Par ailleurs, on pourra dire que la possibilité d'augmenter la durée du bon temps de fonctionnement peut être aussi offerte si on arrive à augmenter le rapport (T_{adm}/t_d) en choisissant un disjoncteur avec un temps d'enclenchement très petit, mais on revient pour dire que cette solution ne sera plus utile parce qu'il y a peu de processus qui peuvent tolérer un rapport de T_{adm}/t_d trop grand.
- L'utilisation de deux sources identiques se traduit par un temps de bon fonctionnement plus grand que celui obtenu par deux sources différentes dont celle de réserve est moins fiable. Mais ce dernier cas donne aussi un temps de bon fonctionnement très élevé, donc on peut utiliser une source de réserve moins fiable qui sera moins coûteuse.
- Pour améliorer le temps de bon fonctionnement de notre système, agir sur le taux de défaillance de la source principale est mieux que d'agir sur le temps d'enclenchement du disjoncteur de couplage. Pour un même taux de défaillance et deux temps d'enclenchement différents (3 et 5 secondes), on voit bien que la différence n'est pas trop grande en la comparant à celle obtenue avec un même temps d'enclenchement et deux taux de défaillance dont l'un est le double de l'autre.

b. Temps de réparation :

On peut tirer les constatations suivantes :

- Le taux de défaillance de la source principale n'a pas d'influence sur le temps de réparation du système, puisque dans les deux cas (I_0 et $2I_0$) on a pris le même taux de réparation pour la source principale.
- Le temps de réparation augmente avec l'augmentation du rapport T_{adm}/t_d .
- Le temps de réparation augmente avec la diminution du temps de déclenchement du disjoncteur de couplage.
- L'utilisation de deux sources identiques a comme conséquence un temps de réparation réduit par rapport à celui obtenu en utilisant une source de réserve moins fiable.

c. Disponibilité :

D'après les courbes obtenues, on peut dire que :

- La disponibilité augmente avec l'augmentation du rapport T_{adm}/t_d .
- Il y a une augmentation maximale de la disponibilité dans un certain intervalle du rapport T_{adm}/t_d , c'est-à-dire entre 1 et 1.5. Donc c'est en fonction de notre process que nous devons

choisir la valeur du temps d'enclenchement du disjoncteur de couplage dans cet intervalle qui va garantir une disponibilité maximale.

- Pour avoir une meilleure disponibilité on doit augmenter le rapport T_{adm}/t_d en gardant le même taux de défaillance I_0 de la source de principale ou en diminuant I_0 en gardant le même rapport T_{adm}/t_d et cela est possible par l'adoption d'une bonne politique de maintenance du disjoncteur de couplage, ce qui va améliorer la fiabilité du système d'alimentation.
- L'amélioration de la disponibilité du système d'alimentation est meilleure en agissant sur le taux de défaillance de la source principale.
- Le système dans les deux cas (utilisation des deux sources identiques ou différentes) réalise une disponibilité très élevée.
- Dans les deux cas il y a un seuil maximum de la disponibilité. Il peut s'expliquer par le fait qu'avec l'augmentation du rapport T_{adm}/t_d , les temps de bon fonctionnement et de réparation deviennent constants.
- Avec l'augmentation du taux de défaillance de la source principale ainsi que celui de la source de réserve, la disponibilité du système diminue.
- L'utilisation d'une source de réserve moins fiable que la source principale (taux de défaillance plus grand) a comme conséquence une diminution de la disponibilité globale du système, mais cette diminution n'est pas très considérable. Inversement, l'utilisation de deux sources identiques se reflète par une disponibilité meilleure, c'est-à-dire que l'utilisation d'une source de réserve plus ou moins fiable, dépend des exigences du client, mais ça va influencer sur le coût global de l'installation.

V.9 Conclusion:

L'utilisation d'une source de réserve est de grande importance pour la préservation du niveau de sécurité d'alimentation en énergie électrique, cette source sera sollicitée à chaque défaillance de la source principale. L'élément principal qui permet d'établir ou d'interrompre ce transfert de puissance est le disjoncteur de couplage qui fait partie des appareils de commutation, qui est parmi les éléments constitutifs du réseau d'alimentation électrique qui sont les plus exposés aux défaillances.

A travers cette étude, on a pu visualiser l'influence de la périodicité de la source de réserve et du temps d'enclenchement du disjoncteur de couplage sur la fiabilité ainsi que sur la disponibilité du système d'alimentation en énergie électrique. Ces deux paramètres que nous estimons très importants, donc nous devons en tenir compte lors du choix des équipements ainsi lors de l'exploitation de notre système d'alimentation.

Les différentes courbes obtenues montrent que le système d'alimentation présente une fiabilité et disponibilité très élevées, mais pour améliorer plus leur fiabilité et disponibilité il faut jouer sur la maintenance préventive qui est un facteur primordial pour augmenter la durée de vie des équipements ainsi que pour diminuer leurs taux de défaillance.

Conclusion générale:

Dans ce mémoire, un modèle stochastique a été introduit pour faire des calculs d'évaluation de la fiabilité des systèmes d'alimentation en énergie électrique. Nous avons présenté de ce fait un modèle semi-markovien permettant une évaluation des paramètres de la fiabilité des postes de distribution de l'énergie électrique dans un cas pratique où les statistiques des défaillances sont ramenées de l'industrie.

Afin d'assurer un niveau de fiabilité élevé des R.A.E., deux sources d'alimentation électrique sont prévues, une principale et l'autre de réserve, généralement une réserve froide (groupe diesel-électrique). La fiabilité d'une structure générale d'alimentation en énergie électrique a été étudiée, la périodicité optimale de la maintenance préventive de la source de réserve a été déterminée ainsi que l'influence du temps d'enclenchement du disjoncteur de couplage (qui permet le transfert de puissance à la charge par la source de réserve en cas de défaillance de la source principale) sur la fiabilité et la disponibilité de notre structure. Ces deux derniers paramètres influent directement sur la fiabilité et la disponibilité du R.A.E. Auparavant, on a déterminé les facteurs climatiques (vent de sable) et non-climatiques (le non-respect de la période planifiée d'entretien) qui ont le plus d'influence sur la fiabilité des équipements électriques, c'est-à-dire qu'avec la prise en compte de ses facteurs et de la périodicité optimale de la source de réserve qu'on doit appliquer une politique de maintenance afin d'optimiser la fiabilité et la disponibilité des postes de distribution de l'énergie électrique.

Avec la conception appropriée, un système d'alimentation pareil peut réaliser une fiabilité extrêmement élevée. Cependant, pour que cette fiabilité élevée se produise, le fonctionnement doit suivre la procédure désignée; la maintenabilité doit être bien conçue dans le système y compris la détection et l'isolement du défaut (même celle du disjoncteur de couplage); la possibilité d'erreur humaine devait être éliminée par conception. En général, un système de redondance d'alimentation en énergie électrique peut réaliser une fiabilité globale très élevée, quoique les unités soient beaucoup moins fiables que le nécessaire :

- Faire marcher en mode de sous-sollicitation peut réduire le taux de défaillance des unités;
- La mise des unités de réserve en stand-by peut sauver le coût de fonctionnement et encore garder un niveau élevé de la fiabilité globale du système.
- La probabilité de démarrage d'une unité de secours froide a un effet significatif sur la fiabilité globale du système, et elle peut jouer un rôle primordial dans la conception de la fiabilité du système, telle que, employer des doubles ou triples démarreurs.
- La fiabilité de la source de secours n'est pas trop importante dans cette configuration de système. Des unités moins fiables peuvent être employées en tant qu'unités de secours pour réduire le coût. Ils n'affecteront pas trop la fiabilité du système.
- En utilisant plusieurs unités de petite taille pour former des systèmes k -parmi- M en tant qu'une unité de secours peut non seulement augmenter la fiabilité de secours et réduire le coût, mais le plus important c'est d'améliorer également la probabilité de démarrage.
- Une fiabilité élevée du système est non seulement garantie par la conception mais également par le fonctionnement et l'entretien.
- Le modèle semi-markovien est un outil approprié pour analyser le système de redondance. Des solutions d'état d'équilibre et dynamiques de la fiabilité et de la disponibilité du système peuvent être facilement obtenues par les modèles de Markov.

On peut dire que l'amélioration de la disponibilité des postes de distribution de l'énergie électrique peut être atteinte de deux manières : en agissant d'une part sur la fiabilité et d'autre

part sur la maintenabilité. Mais le plus juste serait d'agir simultanément sur les deux facteurs, à savoir la fiabilité et la maintenabilité afin d'obtenir la meilleure disponibilité possible du poste pour des coûts consentis pour ces deux paramètres, qui serait les plus faibles que possibles. La maintenance, la réparation immédiate et la réparation en ligne, sont des grandes étapes pour réaliser une disponibilité extrêmement élevée dans la conception de systèmes d'alimentation critique. En fin, on peut dire que le modèle global proposé dans cette étude a été élaboré dans le but de réaliser une analyse des risques de perturbation en alimentation électrique, ainsi que la mise au point d'outils d'aide à la décision permettant de rationaliser l'exploitation de ce type de systèmes : maintenance préventive, redondance, choix optimal du disjoncteur de couplage.

Les méthodes de Markov peuvent être considérées comme des outils puissants dans l'étude de la fiabilité, la maintenabilité et la sûreté (FMS). L'analyse de Markov fournit un moyen d'analyser la FMS des systèmes dont les composants montrent des dépendances fortes. D'autres méthodes d'analyse des systèmes (par exemple, analyse d'arbre de défaillance) supposent souvent l'indépendance totale des composants. Utilisées seules, ces méthodes peuvent mener à des prévisions optimistes pour les paramètres de fiabilité et de sûreté des systèmes.

La distribution exponentielle c.-à-d., un taux de défaillance constant est une prétention commune pour les analyses des systèmes basées sur des méthodes de Markov. La méthode semi-markovienne offre des avantages significatifs par rapport à d'autres techniques de modelage de la fiabilité, certains de ces avantages sont :

1. Approche modelant simpliste : les modèles sont simples bien qu'ils exigent une approche mathématique plus compliquée.
2. Techniques de gestion de redondance : la reconfiguration du système imposée par des défaillances est facilement incorporée dans le modèle.
3. Assurance : le processus semi-markovien peut facilement décrire ainsi les états dégradés de fonctionnement, où l'équipement est partiellement défaillant ou bien il est dans un état dégradé où quelques fonctions sont exécutées alors que d'autres ne le sont pas. Les techniques concurrentes, par exemple, AMDE ou l'analyse d'arbre de défaillances (AAD), ont un temps de traitement long des états dégradés puisqu'ils sont contrastés avec des défaillances pures.
4. Systèmes complexes : beaucoup de techniques de simplification existent qui permettent de modeler des systèmes complexes.
5. Événements ordonnés : souvent pour la simplification, on est intéressé à calculer la probabilité d'un événement résultant d'un ordre de sous-événements. Tandis que ces types de problèmes ne se prêtent pas bien aux techniques classiques, ils sont facilement manipulés en utilisant le modelage semi-markovien qui décrit d'une manière ordonnée la défaillance d'un point et sa réparation.

L'inconvénient principal des méthodes de Markov est l'explosion du nombre d'états à mesure que la taille du système augmente. Les diagrammes résultants pour de grands systèmes sont généralement extrêmement grands et compliqués, difficiles à construire et à larges programmes informatiques. Cependant, des modèles de Markov peuvent être employés pour analyser des systèmes plus réduits avec des dépendances fortes exigeants une évaluation précise. D'autres techniques d'analyse, telles que l'analyse de l'arbre de défaillances, peuvent être employées pour évaluer de grands systèmes en utilisant des techniques de calcul probabilistes plus simples. De grands systèmes, qui montrent de fortes dépendances des composants dans les parties critiques du système, peuvent être analysés ainsi en utilisant une combinaison d'analyse de Markov et de modèles quantitatifs plus simples.

Références Bibliographiques

- [1]. Asgarpoor S. & Mathine M. J., "Reliability evaluation of distribution systems with Non-Exponential down-times", IEEE transactions on power systems, Vol. 12, No. 2, May 1997.
- [2]. Aupied J., "Retour d'expérience appliqué à la sûreté de fonctionnement des matériels en exploitation", Editions Eyrolles, 1994.
- [3]. Bechelev C.D., Gourvitch F.C., "Méthodes statistico-mathématiques des évaluations des expertises", édition statistica, 1980, 263p.
- [4]. Billinton R. & Wang P., "Reliability network equivalent approach to distribution system reliability evaluation", IEE Proc.-Gener., Transm., distrib., Vol. 145, No. 2, March 1998.
- [5]. Blanquart P. & Roncin J.-C., "Fiabilité", Techniques de l'ingénieur, E1420, 1999.
- [6]. Boateng R., Nguyen L. & Agarwal S., "Distribution Systems Reliability – Lakeland Electric Case Study", Proceedings annual reliability and maintainability symposium, IEEE 2003.
- [7]. Bouguerra M., "Elaboration et recommandation pour l'augmentation de la fiabilité et de l'efficacité des systèmes d'alimentation électrique des station de compression de gaz", Thèse de Ph.D., Moscou, 1988.
- [8]. Briš R. & Rusek S., "Reliability analysis of a distribution area system under maintenance", European Safety & Reliability International Conference ESREL, Torino Italy, September, 16-20, 2001.
- [9]. Brown R. E. & Hanson A. P., "Impact of Two-Stage Service Restoration on Distribution Reliability", IEEE transactions on power systems, vol. 16, No. 4, November 2001.
- [10]. Carpaneto E., & Chicco G., "Evaluation of the Probability Density Functions of Distribution System Reliability Indices With a Characteristic Functions-Based Approach", IEEE Transactions on power systems, Vol. 19, NO. 2, May 2004.
- [11]. Carpaneto E., Mosso A., Ponta A. & Roggero E., "Comparison of Reliability and Availability Evaluation Techniques for Distribution Network Systems", Proceedings annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002.
- [12]. Chichinok H.A. & al., "Principes de base de la fiabilité", Editions Moscou, 1964, 551p.
- [13]. "Choosing states" http://www.owl.net.rice.edu/~elec428/handouts/Choosing_states.pdf
- [14]. De Oliveira M.F & Miranda V., "Optimization studies in distribution networks including reliability calculations", Proceedings of CIRED'79, Rap.59, session 6, ed. A.I.M., Liège, Belgium, 1979.
- [15]. Demegel G., Benichou P., Boy N. & Pouget P., "Probabilités, statistiques inférentielles, fiabilité: outils pour l'ingénieur", Editions Ellipses, 1997.
- [16]. Désquilbet G., Carer P. & Michalak J.M., "Liens entre objectifs de qualité de fourniture et spécifications de fiabilité pour les matériels de réseaux", REE n° 2, février 2000.

- [17]. Doucet Joseph A., "La reconstruction des marchés de l'électricité: un portrait de la situation mondiale", Groupe de recherche en économie de l'énergie, de l'environnement et des ressources naturelles (GREEN), Université LAVAL.
- [18]. Ferrand P., "Fiabilité des compteurs d'électricité électroniques et normalisation", REE n^o 5, Mai 1998.
- [19]. Gauthier B., "Les données secondaires, Méthodes de recherche et d'intervention dans l'organisation" http://www.circum.com/enp7304/10_entrevue.pdf
- [20]. Gaver D.P., Montmeat F.E. & Patton A.D., "Power system reliability: I—Measures of reliability and methods of calculation", IEEE Trans. Power Apparatus Systems, Vol. 83, pp. 727-737, July, 1964.
- [21]. Girard A., Le Blon M. & Aupied J., "Utilisation de la méthode O.M.F à l'élaboration de la nouvelle politique de maintenance des matériels HT de réseaux électriques", REE n^o: 1, Janvier 2002.
- [22]. Gnedenko B., Beliaev Y. & Soloviev A., "Méthodes mathématiques en théorie de la fiabilité", Editions Mir, 1972.
- [23]. Green P.; "Elections et technologie", IFES, UN-DESA, IIDEA, Déc. 2003, <http://www.aceproject.org/main/francais/et/et.htm>
- [24]. Groupe animé par Gérard SOLIGNAC, "Guide de l'ingénierie électrique: des réseaux internes d'usines", Tec&doc, 1986.
- [25]. Groupe de travail Canada - Etats-Unis sur la panne de courant, "Aperçu du réseau électrique nord-américain et de ses organismes de fiabilité", Causes de la panne du 14 août 2003, http://www.rncan-nrcan.gc.ca/media/docs/final/1_fr_chapter_1.pdf
- [26]. Hayashi Y. & Matsuki J., "Loss minimum configuration of distribution system considering N-1 security of dispersed generators", IEEE Transactions on power systems, vol. 19, no. 1, February 2004.
- [27]. He Y., Andersson G. & Allan R. N., "Impact of Automatic Service Restoration on the Reliability of Power Distribution Systems", Proceedings of 34th UPEC Conference, Leicester, UK, 1999.
- [28]. "IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", IEEE Std 493-1997.
- [29]. Ihsan A. Akbar, "Markov modeling of third generation wireless channels", Thesis of the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, March 15, 2003 Blacksburg, Virginia.
- [30]. Ionescu D. C. & Ulmeanu A. P., "Efficient computational techniques for power systems reliability assessment", Third international conference on mathematical methods in reliability methodology and practice, June 17-20, 2002, Trondheim, Norway.

- [31]. "Isograph reliability software", reliability workbench V9.1, Technical specifications, 2002.
- [32]. James R. Knaub Jr., "Practical methods for electric power survey data", US department of Energy, Energy information Administration, EI-53.
- [33]. Kaufman A., Grouchko D. & Cruon R., "Modèles mathématiques pour l'étude de la fiabilité des systèmes", Masson et cie, 1975.
- [34]. Kleiner Y., "Optimal scheduling of rehabilitation and inspection/condition assessment in large buried pipes", 4th International Conference on Water Pipeline Systems, Managing Pipeline Assets in an Evolving Market, 2001, pp. 181-197.
- [35]. Leite da Silva A.M., Cassula A.M., Billinton R. & Manso L.A.F., "Integrated reliability evaluation of generation, transmission and distribution systems", IEE Proc.-Gener., Transm., distrib., Vol. 149, No. 1, January 2002.
- [36]. Lemaire M. & Tobias J. C., "Reliability design approach for protection and control equipment for MV distribution networks", IEE The reliability of transmission and distribution equipment, No. 406, 29-31 March 1995.
- [37]. Lemaire M., "Sûreté des protections MT et HT", Cahiers techniques Merlin Gerin, n^o: 175.
- [38]. Lewis E. E., "Introduction to reliability engineering", John Wiley & Sons, 1987.
- [39]. Ligeron J.-C. & Lyonnet P., "La fiabilité en exploitation", Tome 1, Tec&doc, 1992.
- [40]. Lyonnet P., "La maintenance: mathématiques et méthodes", Tec&doc, 1992.
- [41]. "Markov chains", Markov processes, Elec 428,
http://www.owl.net.rice.edu/~elec428/handouts/Markov_processes.pdf
- [42]. "Méthodes probabilistes pour le traitement automatique de la langue", LI031
<http://www.linguist.jussieu.fr/~anasr/Ens/LI031/LI031.pdf>
- [43]. Montmeat C. E., Patton A.D., Zemkowski J. & Cumming D. J., "Power system reliability: II—Applications and a computer program", IEEE Trans. Power Apparatus Systems, Vol. PAS-87, pp. 636-643, July, 1965.
- [44]. Ndiaye I. & Savard C., "Conception des réseaux industriels en haute tension", 6GEN607—Transport et exploitation de l'énergie électrique, Université du Québec, 11 décembre 2003.
- [45]. Nexans, "Réseaux de distribution électrique", Elec 2000, 11 décembre 2000.
<http://www.reingexeeni.edu.es/pdf/fr117todo.pdf>
- [46]. Norman B. Fuqua, "The application of Markov analysis methods to reliability, maintainability and safety", Publication of the DoD reliability analysis center, Vol. 10, n^o: 2, Start 2003-2, Markov.
- [47]. "Planification et gestion des évaluations, Partie III: processus de collecte de données", Trousse d'outils, Mai 2001, <http://www.unfpa.org/monitoring/toolkit/french/outil5-iii.pdf>

- [48]. Pregelj A., Begovic M., Rohatgi A. & Novosel D., "On Optimization of Reliability of Distributed Generation-Enhanced Feeders", Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'03), IEEE 2002.
- [49]. "Processus et estimation", Méthode de Hastings-Metropolis, 17 octobre 2001
<http://cermics.enpc.fr/~bl/PS/SIMULATION-X/cours-3.pdf>
- [50]. Puret C., "Les réseaux de distribution publique MT dans le monde", Cahier technique Merlin Gerin n^o: 155 éd. septembre 1991.
- [51]. Rachkin A.A., "Eléments de la théorie de la fiabilité des systèmes techniques", Editions Radio Soviétique, 1978.
- [52]. "Reliability/availability of electrical & mechanical systems for command, control, communications, computer, intelligence, surveillance, and reconnaissance (C4ISR) facilities", Technical manual no. 5-698-1, Headquarters, Department of the army, Washington DC, 14 march 2003.
- [53]. Ringler J., "Précis de probabilités et de statistiques à l'usage de la fiabilité", Octares éditions, 1996.
- [54]. Ronayne M., "Rôles, responsabilités et relations de la Canadienne sur la concurrence dans les marchés émergents de l'électricité", Conférence annuelle d'automne de l'association du bureau canadien, 20-21 septembre 2001, Ottawa.
- [55]. Stillman R. H., "Modeling Failure Data of Overhead Distribution Systems", IEEE Transactions on power delivery, vol. 15, no. 4, October 2000.
- [56]. "Technologie d'électricité et d'électronique", Université de Poitiers, U.F.R, E.S.I.P,
<http://www.esip.campus.univ-poitiers.fr/enseignement/eea/StageElectricite&Electronique/CoursElectricite&Electronique.pdf>
- [57]. Tsao T. & Chang H., "Composite Reliability Evaluation Model for Different Types of Distribution Systems", IEEE Transactions on power systems, vol. 18, no. 2, may 2003.
- [58]. Van Casteren J., "Power system reliability assessment using the weibull-markov model", Thesis for the degree of licentiate of engineering, Department of electric power engineering, Chalmers university of technology, Göteborg 2001.
- [59]. Villemeur A., "Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels", Editions Eyrolles, 1988.
- [60]. Wang W. & Loman J., "Reliability/Availability of K-out-of-N System with M Cold Standby Units", Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002.
- [61]. 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.
- [62]. Young R. Benjamin, "Reliability transform method", thesis submitted to the Faculty of, Virginia Polytechnic Institute and State University, April 2003 Blacksburg, Virginia.

Les données collectées de l'entreprise nationale des industries pétrochimiques ENIP-CP1K de Skikda sont présentées ici. On remarque que dans certains cas, un certain type d'équipements soit d'une importance majeure au niveau de l'entreprise, on trouve un historique détaillé des défaillances de cet équipement; dans notre cas c'est le turbogénérateur qui alimente l'usine en parallèle avec une ligne Sonelgaz. On trouve aussi les statistiques de défaillances du CVCF qui est un onduleur qui permet de garder la tension et la fréquence délivrées par le turbogénérateur constantes et des défaillances de certains équipements.

Turbogénérateur:

<i>Date de la panne</i>	<i>Date de remise en service</i>	<i>Cause</i>
26/02/90 à 9 ^h 20 min	26/02/90 à 16 ^h 50 min	Fuite d'huile sur le joint d'expansion
05/03/90 à 7 ^h 25 min	12/03/90 à 16 ^h 18 min	Réapparition de la fuite d'huile sur le joint d'expansion
16/05/90 à 12 ^h 30 min	19/05/90 à 12 ^h 35 min	Fuite importante d'huile apparue sur le joint d'expansion
20/06/90 à 1 ^h 38 min	21/06/90 à 14 ^h 20 min	Déclenchement de la chaudière A
08/08/90 à 11 ^h 25 min	08/08/90 à 16 ^h 00 min	Signalisation de limite supérieure du régulateur de vitesse
19/11/90 à 18 ^h 45 min	19/11/90 à 19 ^h 45 min	Déclenchement des deux chaudières A et B
20/11/90 à 9 ^h 20 min	20/11/90 à 16 ^h 30 min	Chaudières B et C trop chargées
23/04/91 à 10 ^h 10 min	23/04/91 à 11 ^h 50 min	Fausse alarme d'un vide extra-high
06/06/91 à 14 ^h 26 min	06/06/91 à 18 ^h 00 min	Fausse alarme d'un vide extra-high
31/08/91 à 6 ^h 25 min	31/08/91 à 16 ^h 23 min	Baisse du vide
12/09/91 à 10 ^h 00 min	12/09/91 à 16 ^h 00 min	Déclenchement des 3 chaudières
04/11/91 à 12 ^h 40 min	04/11/91 à 17 ^h 35 min	Fausse alarme du déplacement axial
13/03/92 à 3 ^h 45 min	13/03/92 à 4 ^h 16 min	?
13/04/92 à 7 ^h 00 min	13/04/92 à 20 ^h 05 min	Manque de vapeur causé par le déclenchement de la chaudière C
17/04/92 à 23 ^h 30 min	24/04/92 a 18 ^h 45 min	Arrêt de la chaudière B par manque de GN
02/09/92 à 16 ^h 48 min	02/09/92 à 17 ^h 44 min	Déclenchement des J-GA-101 B et D
18/10/92 à 7 ^h 35 min	18/10/92 à 19 ^h 03 min	Déclenchement des chaudières
02/01/93 à 21 ^h 35 min	13/01/93 à 18 ^h 40 min	Déclenchement de la ligne Sonelgaz
16/02/93 à 13 ^h 20 min	17/02/93 à 19 ^h 00 min	Fausse alarme (haute t ⁰ du palier de la génératrice)
18/07/93 à 20 ^h 50 min	19/07/93 à 15 ^h 45 min	2 fusibles grillés

17/09/93 à 15 ^h 00 min	19/09/93 à 20 ^h 30 min	Déclenchement de la ligne Sonelgaz
22/09/93 à ?	24/09/93 à 15 ^h 30 min	Déclenchement de la ligne Sonelgaz
26/09/93 à 15 ^h 00 min	27/09/93 à 20 ^h 07 min	Balancement au CVCF
04/11/93 à ?	04/11/93 à ?	Déclenchement des chaudières
05/11/93 à 16 ^h 36 min	05/11/93 à 20 ^h 34 min	Manque de vapeur
14/11/93 à 09 ^h 20 min	14/11/93 à 17 ^h 30 min	Fausse alarme (pressostat vide du condenseur principal)
01/03/94 à 00 ^h 00 min	02/03/94 à 16 ^h 00 min	Déclenchement par le CVCF
21/04/94 à 18 ^h 00 min	25/04/94 à 15 ^h 00 min	Déclenchement des 3 chaudières par le CVCF (fusion des fusibles de puissance)
26/04/94 à 04 ^h 50 min	27/04/94 à 17 ^h 40 min	Défaillance du pressostat du vide
14/08/94 à 09 ^h 00 min	14/08/94 à 11 ^h 45 min	Changement du tube fuyard
13/10/94 à 18 ^h 00 min	14/10/94 à 01 ^h 02 min	Manque de vapeur
09/02/95 à 13 ^h 08 min	10/02/95 à 01 ^h 30 min	Détérioration du relais R5
21/03/95 à 11 ^h 45 min	21/03/95 à 17 ^h 45 min	Arrêt de la chaudière B
27/03/95 à 09 ^h 20 min	27/03/95 à 12 ^h 05 min	Fuite d'air instrument au niveau du tube capillaire fissuré
09/06/95 à 14 ^h 30 min	10/06/95 à 11 ^h 10 min	Manque de vapeur
29/07/95 à 06 ^h 30 min	30/07/95 à 11 ^h 55 min	Manque de vapeur
26/09/95 à 19 ^h 30 min	26/09/95 à 21 ^h 55 min	Fréquence a descendu à 47.5 Hz
30/12/95 à 09 ^h 00 min	30/12/95 à 19 ^h 00 min	Eclatement au joint d'expansion d'huile
07/02/96 à 08 ^h 10 min	07/02/96 à 15 ^h 15 min	Manque de vapeur
06/03/96 à 03 ^h 15 min	06/03/96 à 18 ^h 20 min	Echauffement excessif du stator (92 ⁰ C)
14/04/96 à 03 ^h 30 min	14/04/96 à 03 ^h 55 min	Déclenchement de la ligne Sonelgaz
20/04/96 à 10 ^h 15 min	20/04/96 à 16 ^h 30 min	Manque de vapeur
05/05/96 à 14 ^h 45 min	05/05/96 à 16 ^h 25 min	?
12/06/96 à 11 ^h 50 min	12/06/96 à 23 ^h 45 min	Déclenchement des 3 chaudières
02/07/96 à 23 ^h 00 min	09/08/96 à 12 ^h 00 min	Déclenchement des 3 chaudières
04/10/96 à 01 ^h 15 min	06/10/96 à 20 ^h 25 min	Déclenchement général
21/01/97 à 13 ^h 35 min	21/01/97 à 23 ^h 30 min	Déclenchement général
12/02/97 à 9 ^h 20 min	12/02/97 à 14 ^h 00 min	Déclenchement du bras de C ^{de} de la vanne régulatrice, cisaillement de la goupille

12/02/97 à 21 ^h 45 min	13/02/97 à 22 ^h 14 min	Chute de pression du vide
03/03/97 à 01 ^h 10 min	03/03/97 à 01 ^h 25 min	Déclenchement du disjoncteur 152G1
07/06/97 à 15 ^h 50 min	09/06/97 à 17 ^h 35 min	Déclenchement général
10/06/97 à 11 ^h 10 min	10/06/97 à 11 ^h 40 min	CC causé par un instrumentiste
16/06/97 à 05 ^h 10 min	16/06/97 à 15 ^h 00 min	Apparition du défaut: lampes fonctionnement et excitation éteintes
01/08/97 à 17 ^h 50 min	01/08/97 à 20 ^h 20 min	Fausse alarme: minimum de pression vapeur HS
13/10/97 à 16 ^h 35 min	13/10/97 à 17 ^h 45 min	Déclenchement de la pompe d'eau de mer
31/10/97 à 06 ^h 55 min	15/11/97 à 17 ^h 40 min	Baisse du vide 300 mmHg: manque d'eau de mer
16/11/97 à 19 ^h 30 min	12/01/98 à 05 ^h 00 min	Manque de vapeur suite au déclenchement de la chaudière B
12/01/98 à 10 ^h 30 min	12/01/98 à 16 ^h 40 min	Baisse de pression du vide et augmentation de la t ⁰ d'échappement
14/01/98 à ? min	23/01/98 à 13 ^h 00 min	Problème au niveau de la chaudière B
04/02/98 à 10 ^h 32 min	04/02/98 à 17 ^h 15 min	Déclenchement des trois chaudières
14/02/98 à 11 ^h 50 min	14/02/98 à 15 ^h 50 min	Détachement du bras de commande des vannes régulatrices
27/03/98 à 01 ^h 30 min	28/03/98 à 18 ^h 00 min	Déclenchement de pompes d'eau de mer
10/04/98 à 08 ^h 50 min	10/04/98 à 20 ^h 15 min	Détachement du bras de commande des vannes régulatrices
04/05/98 à 20 ^h 15 min	04/05/98 à 20 ^h 25 min	Cause indéterminée
05/06/98 à 12 ^h 00 min	05/06/98 à 17 ^h 45 min	Manque d'eau de mer
16/06/98 à 10 ^h 05 min	16/06/98 à 14 ^h 55 min	Défaut sur jeu de barres
20/07/98 à 21 ^h 30 min	21/07/98 à 01 ^h 30 min	Déclenchement de la chaudière C
02/09/98 à 18 ^h 30 min	03/09/98 à 15 ^h 00 min	Fissure du joint d'expansion d'huile
09/10/98 à 10 ^h 10 min	09/10/98 à 13 ^h 00 min	Déclenchement des chaudières A et B
14/10/98 à 23 ^h 20 min	15/10/98 à 11 ^h 50 min	Détachement du bras des vannes régulatrices
29/11/98 à 04 ^h 00 min	29/11/98 à 19 ^h 10 min	Déclenchement de la chaudière A
30/11/98 à 09 ^h 00 min	01/12/98 à 18 ^h 00 min	Déclenchement par le relais lors de l'ouverture de la vanne de soutirage
10/12/98 à 19 ^h 20 min	11/12/98 à 11 ^h 00 min	CC au niveau du transformateur
13/03/99 à 20 ^h 55 min	13/03/99 à 22 ^h 30 min	Arrêt de deux chaudières

18/03/99 à 12 ^h 55 min	18/03/99 à 15 ^h 20 min	Déclenchement de la chaudière A
31/03/99 à 09 ^h 45 min	31/03/99 à 10 ^h 15 min	Sans défaut apparent (aucune alarme allumée)
29/06/99 à 11 ^h 30 min	30/06/99 à 18 ^h 45 min	Eclatement d'un tronçon d'eau de mer
19/09/99 à 02 ^h 00 min	20/09/99 à 18 ^h 45 min	Déclenchement de la chaudière B
25/10/99 à 15 ^h 20 min	25/10/99 à 15 ^h 45 min	Manipulation brusque de l'échafaudage
28/11/99 à 14 ^h 35 min	28/11/99 à 15 ^h 45 min	Arrêt de la chaudière A
28/12/99 à 00 ^h 45 min	28/12/99 à 13 ^h 00 min	Déclenchement des alarmes du panneau central et fonctionnement du relais
22/05/00 à 10 ^h 15 min	22/05/00 à 15 ^h 00 min	Déclenchement des chaudières A et C
21/08/00 à 11 ^h 45 min	21/08/00 à 12 ^h 15 min	Déclenchement lors de la mise en auto du système inter-look
22/08/00 à 09 ^h 00 min	22/08/00 à 09 ^h 30 min	Fissure au niveau du tube capillaire du régulateur de soutirage
23/10/00 à 11 ^h 30 min	25/10/00 à 16 ^h 20 min	Déclenchement du complexe
25/10/00 à 18 ^h 25 min	26/10/00 à 12 ^h 00 min	Début de feu du palier côté régulateur
01/11/00 à 00 ^h 20 min	01/11/00 à 12 ^h 30 min	Fusion du fusible 8A de commande
08/03/01 à 13 ^h 20 min	08/03/01 à 15 ^h 55 min	Désexcitation de la génératrice
09/03/01 à 18 ^h 55 min	09/03/01 à 23 ^h 15 min	Fausse alarme de séquence: défaillance du relais R7 (arrêt d'une chaudière)
11/03/01 à 14 ^h 00 min	13/03/01 à 14 ^h 30 min	Arrêt de la chaudière C
14/03/01 à 09 ^h 05 min	19/03/01 à 10 ^h 25 min	Arrêt de la chaudière A
25/03/01 à 15 ^h 00 min	01/04/01 à 09 ^h 55 min	Arrêt de la chaudière B
07/04/01 à 13 ^h 50 min	09/04/01 à 14 ^h 20 min	Arrêt de la chaudière C
15/04/01 à 23 ^h 00 min	19/04/01 à 14 ^h 25 min	Arrêt de la chaudière A
28/04/01 à 20 ^h 20 min	02/05/01 à 13 ^h 50 min	Arrêt de la chaudière A
03/05/01 à 17 ^h 00 min	06/05/01 à 12 ^h 00 min	Arrêt de la chaudière A
08/05/01 à 11 ^h 45 min	09/05/01 à 22 ^h 30 min	Arrêt de la chaudière C
14/05/01 à 11 ^h 20 min	16/05/01 à 11 ^h 30 min	Arrêt de la chaudière B
01/07/01 à 20 ^h 20 min	03/07/01 à 15 ^h 40 min	Arrêt de la chaudière B
10/07/01 à 21 ^h 00 min	11/07/01 à 12 ^h 25 min	Arrêt de la chaudière C
11/07/01 à 19 ^h 30 min	15/07/01 à 11 ^h 50 min	Arrêt des trois chaudières
15/07/01 à 11 ^h 50 min	//	Déclenchement, incident: explosion du TG

CVCF: onduleur qui permet de garder la tension et la fréquence du turbogénérateur constantes :

<i>Date de la panne</i>	<i>Date de remise en service</i>	<i>Cause</i>
18/07/93 à 20 ^h 50 min	26/09/93 à 15 ^h 00 min	Travaux
01/03/94 à 00 ^h 15 min	01/03/94 à 10 ^h 25 min	Fusibles de puissance et de commande grillés
21/04/94 à 18 ^h 00 min	25/04/94 à 15 ^h 00 min	Fusibles fondus
07/02/96 à 08 ^h 10 min	07/02/96 à 15 ^h 15 min	Défaillance sur le transformateur du CVCF
02/04/98 à 13 ^h 00 min	20/04/98 à 15 ^h 30 min	Tombé en panne sur by-pass statique
10/06/98 à 20 ^h 30 min	19/06/98 à 10 ^h 30 min	Tombé en panne sur by-pass statique
09/12/03 09 ^h 00 min	?	Défaillance des batteries

Y-GA 102 26/02/90 à 9^h 20 min, fuite d'huile sur le joint d'expansion, le 26/02/90 à 16^h 50 min.

Y-GA 102 05/03/90 à 7^h 25 min, réapparition de la fuite d'huile sur le joint d'expansion, le 07/03/90.

Y-GA 102 16/05/90 à 13^h 30 min, importante fuite d'huile sur le joint d'expansion, le 17/05/90 à 15^h 00 min.

Y-GB 201 B 19/08/90, échauffement excessif, le 20/08/90.

UNB 401 B: 05/11/90 à 17^h 35 min, déclenchement du moteur-générateur n^o: 2 par surintensité, redémarrage le 06/11/90 à 15^h 07 min.

YGA 101A : 23/04/91, changement de la bobine du disjoncteur (bobine grillée), démarrage, la deuxième bobine grillée encore, changement et redémarrage, 23/04/91 à 11^h50 min.

J-GA 101 B et D: 02/09/92 à 16^h 48 min, 02/09/92 à 17^h 44.

Transfo SG 220-63, 04/01/93 à 10^h 40 min, défaillance, 04/01/93 à 11^h 00 min.

Y-GE 202B (moteur diesel): 13/08/95, déclenchement par survitesse causé par manque d'huile de carter.

BGA 102A: 28/01/95, contacteurs auxiliaires mal placés

2C-1B: jeu de barre; Transformateur, 20/10/95 à 12^h 37 min, la tige de fixation du TI avec le jeu de barre étant desserrée causant la carbonisation d'une partie du TI et une partie du jeu de barre, 28/10/95 à 14^h 30 min.

MG n^o:2, 06/01/96 à 05^h 20 min, carbonisation d'un ail au niveau du sélecteur, 06/01/96 à 10^h 40 min.

UNB 407 (transfo) à 08^h 10 min, défaillance, 07/02/96 à 15^h 15.

MG n^o: 2, 21/01/97 à 13^h 35 min, CC du collecteur, ?

152G1, 07/06/97 à 15^h 50 min, non-ouverture en auto, 09/06/97 à 17^h 35 min.

UNB 113B (transfo): 10/12/98 à 18^h 00 min, court-circuit; pénétration d'eau pluviale, 11/12/98 à 11^h 00 min.

UNB 404A: 23/10/2000 à 11^h 30 min, déclenchement du chargeur de batteries, 25/10/00 à 16^h 20 min.

UNB 404 A: 20/12/99 à 8^h 30 min, chargeur de batteries tombé en panne, ?

YNB: 103A, 04/03/00, changement de la bobine du disjoncteur secondaire 152 G1Y, ?

UNB 230A, 04/10/00 à 20^h 15 min, fuite de courant à la terre du 1/2 jeu de barre, 18/10/2000 à 09^h 45 min.

UNB 109B (disjoncteur), 16/01/01 à 9^h 00 min, bruit anormal, 16/01/01 à 15^h 00.

MG n°: 2, 10/05/00 à 12^h 05 min, tentative de démarrage échouée; trois sélecteurs de commande carbonisés, ?

04/04/03 à ? non-démarrage des diesels de secours à cause de la défaillance survenue sur la soupape de démarrage.

Transformateur U-NB 113A: date de mise en service: 1980.

1^{er} incident: 1998, court-circuit, une semaine.

2^{eme} incident: 2004, fuite d'huile au niveau d'un radiateur, 02 jours.

Disjoncteur UNB 201A: date de mise en service: 1980.

01 incident: changement des doigts de contact: 4 jours.

3 fois réglage du mécanisme de fermeture: 02 jours, 01 jour, 01 jour.

Table de Bravais-Pearson (table de Khi-2)

La table donne la probabilité α pour que χ^2 égale ou dépasse une valeur donnée sous l'hypothèse d'indépendance, en fonction du nombre de degrés de liberté (d.d.l.) ν .

$\nu \backslash \alpha$	0.95	0.90	0.50	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.001
1	0.004	0.016	0.455	1.074	1.642	2.706	3.841	5.412	6.635	10.827
2	0.1	0.211	1.386	2.408	3.219	4.605	5.991	7.824	9.210	13.815
3	0.35	0.584	2.366	3.665	4.642	6.251	7.815	9.837	11.345	16.266
4	0.71	1.064	3.357	4.878	5.989	7.779	9.488	11.668	13.277	18.467
5	1.15	1.610	4.351	6.064	7.289	9.236	11.070	13.388	15.086	20.515
6	1.64	2.204	5.348	7.231	8.558	10.645	12.592	15.033	16.812	22.457
7	2.17	2.833	6.346	8.383	9.803	12.017	14.067	16.622	18.475	24.322
8	2.73	3.490	7.344	9.524	11.030	13.362	15.507	18.168	20.090	26.125
9	3.33	4.168	8.343	10.656	12.242	14.684	16.919	19.679	21.666	27.877
10	3.94	4.865	9.342	11.781	13.442	15.987	18.307	21.161	23.209	29.588
11	4.57	5.578	10.341	12.899	14.631	17.275	19.675	22.618	24.725	31.264
12	5.23	6.304	11.340	14.011	15.812	18.549	21.026	24.054	26.217	32.909
13	5.89	7.042	12.340	15.119	16.985	19.812	22.362	25.472	27.688	34.528
14	6.57	7.790	13.339	16.222	18.151	21.064	23.685	26.873	29.141	36.123
15	7.26	8.547	14.339	17.322	19.311	22.307	24.996	28.259	30.578	37.697
16	7.96	9.312	15.338	18.418	20.465	23.542	26.296	29.633	32.000	39.252
17	8.67	10.085	16.338	19.511	21.615	24.769	27.587	30.995	33.409	40.790
18	9.39	10.865	17.338	20.601	22.760	25.989	28.869	32.346	34.805	42.312
19	10.12	11.651	18.338	21.689	23.900	27.204	30.144	33.687	36.191	43.820
20	10.85	12.443	19.337	22.775	25.038	28.412	31.410	35.020	37.566	45.315
21	11.59	13.240	20.337	23.858	26.171	29.615	32.671	36.343	38.932	46.797
22	12.34	14.041	21.337	24.939	27.301	30.813	33.924	37.659	40.289	48.268
23	13.09	14.848	22.337	26.018	28.429	32.007	35.172	38.968	41.638	49.728
24	13.85	15.659	23.337	27.096	29.553	33.196	36.415	40.270	42.980	51.179
25	14.61	16.473	24.337	28.172	30.675	34.382	37.652	41.566	44.314	52.620
26	15.38	17.292	25.336	29.246	31.795	35.563	38.885	42.856	45.642	54.052
27	16.15	18.114	26.336	30.319	32.912	36.741	40.113	44.140	46.963	55.476
28	16.93	18.939	27.336	31.391	34.027	37.916	41.337	45.419	48.278	56.893
29	17.71	19.768	28.336	32.461	35.139	39.087	42.557	46.693	49.588	58.302
30	18.49	20.599	29.336	33.530	36.250	40.256	43.773	47.962	50.892	59.703

Exemple : avec $\nu = 6$ d.d.l. , pour $\chi^2 = 26,5$, la probabilité α est inférieure à 0,001.

Cela signifie que la probabilité de rejeter par erreur l'hypothèse d'indépendance est de moins de 0,1%. On dit alors que la relation entre les deux variables est significative au seuil de 99,9%.

Table de Student :

Valeurs de t en fonction de la probabilité et du degré de liberté

	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,9995	
v														v
1	0,158	0,325	0,51	0,727	1	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619	1
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,92	4,303	6,965	9,925	31,598	2
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,25	1,638	2,353	3,82	4,541	5,841	12,929	3
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,19	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,61	4
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,92	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869	5
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,44	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959	6
7	0,13	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408	7
8	0,13	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,86	2,306	2,896	3,355	5,041	8
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,1	1,383	1,833	2,262	2,821	3,25	4,781	9
10	0,129	0,26	0,397	0,542	0,7	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587	10
11	0,129	0,26	0,396	0,54	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437	11
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318	12
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,87	1,079	1,35	1,771	2,16	2,65	3,012	4,221	13
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,14	14
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073	15
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,69	0,865	1,071	1,337	1,746	2,12	2,583	2,921	4,015	16
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,74	2,11	2,567	2,898	3,965	17
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,33	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922	18
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,323	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883	19
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,86	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,85	20
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,08	2,518	2,831	3,819	21
22	0,127	0,256	0,39	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792	22
23	0,127	0,256	0,39	0,532	0,685	0,858	1,06	1,319	1,714	2,069	2,5	2,807	3,767	23
24	0,127	0,256	0,39	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745	24
25	0,127	0,256	0,39	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,06	2,485	2,787	3,725	25
26	0,127	0,256	0,39	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707	26
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,69	27
28	0,127	0,256	0,389	0,53	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674	28
29	0,127	0,256	0,389	0,53	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659	29
30	0,127	0,256	0,389	0,53	0,683	0,854	1,055	1,31	1,697	2,042	2,457	2,75	3,646	30
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,05	1,303	1,684	2,011	2,423	2,704	3,551	40
60	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,848	1,046	1,296	1,671	2	2,39	2,66	3,46	60
120	0,126	0,254	0,386	0,526	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,98	2,358	2,617	3,373	120
∞	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,96	2,326	2,576	3,291	∞
v														v
	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,9995	

Utilisation de la table :

Cette table donne la valeur de t en fonction du degré de liberté $v = n - p$ avec $n =$ nombre de résultats.

$p =$ nombre de paramètres indépendants.

Si on désire un niveau de confiance de 95%, cela signifie que l'on cherche la probabilité que la moyenne soit supérieure à 0,025 et inférieure à 0,975. Ce qui laisse 2,5% des deux cotés de la courbe, 5% en tout. Comme la distribution de Student est symétrique, le coefficient est le même pour ces deux valeurs. Il suffit de prendre le coefficient t à 0,975.

Exemple: 20 résultats, ne dépendant que d'un seul paramètre : $v = 19$, pour un niveau de confiance de 0,95 : $T_{0,975}(19) = 2,093$

Table du F de Fisher-Snedecor :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.8	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.35	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.89	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.09	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.88	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.21	4.21	4.15	4.10	4.05	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.79	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.50	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.29	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.14	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.01	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	2.91	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.83	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.76	2.7	2.70	2.65	2.62	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.71	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.66	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.61	2.61	2.55	2.46	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.58	2.58	2.51	2.49	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.54	2.54	2.48	2.46	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.51	2.51	2.45	2.42	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.49	2.49	2.42	2.39	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.46	2.46	2.40	2.37	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.44	2.44	2.37	2.34	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.42	2.42	2.36	2.32	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.40	2.40	2.34	2.30	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.39	2.39	2.32	2.28	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.37	2.37	2.31	2.27	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.36	2.36	2.29	2.25	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.35	2.35	2.28	2.24	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.33	2.33	2.27	2.22	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.25	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.17	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.09	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.01	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

ملخص :

يُعنى موضوع هذه المذكرة بدراسة موثوقية شبكات التمرين بالطاقة الكهربائية. لهذا، قمنا بإدخال نموذج عشوائي والذي هو النموذج النصف ماركوفي من أجل تقدير موثوقية محطات توزيع الطاقة الكهربائية. التحليل الماركوفي يوفر وسائل من أجل تحليل موثوقية وإتاحة الأنظمة التي تظهر مكوناتها ترابطات قوية.

نظراً لأن العالم يدخل الآن في الزمن الرقمي، تعلقنا بنوعية التمرين بالطاقة الكهربائية يتطور نتاجاً لذلك. بضع ثوانٍ من عطل للتمرين بالطاقة أو حتى انخفاض للجهد يمكن أن ينجر عنه خسائر بملايين الدولارات للمؤسسات فضلاً عن ضياع كبير للشهرة و لعدد معتبر من الزبائن. تلبية آمال المجتمع لتمرين كهربائي متوافر و قليل التكلفة لا يعد فقط خياراً.

معرفة موثوقية الأجهزة الكهربائية هي إعتبار مهم أثناء تصميم وكذا تشغيل الانظمة الموزعة للطاقة الصناعية والتجارية. خصائص أعطال مختلف مكونات الأجهزة الكهربائية يمكن ان توصف جزئياً بالإحصائيات التالية للموثوقية :

- § نسبة الأعطال، عادة يعبر عنها بعدد الأعطال في السنة بالنسبة لكل مكون (الأعطال بالنسبة لوحدة قياس عام واحد)؛
- § زمن التوقف من أجل تصليح أو تبديل مكون بعد أن أصيب بعطب أثناء العمل، والتي يعبر عنها بعدد الساعات (أو الدقائق) لكل عطل؛
- § في بعض الحالات الخاصة، إحتمال التشغيل (أو العمل) مُستعمل أيضاً.

الحسابات التوقعية للموثوقية هدفها هو إختبار مستوى الموثوقية لنظام معين بدلالة معطيات موثوقية مكوناته و بنيته المادية. معطيات الدخول لحساب الموثوقية يُمكن إستخراجها من عدة مصادر: المعارف التجريبية، بنوك المعلومات، الخ... إنطلاقاً من المعطيات الإحصائية و التي جُلبت من مصادر صناعية، استطعنا أن نقدر و باختبار إثبات الخاصية الأسية لدالة توزيع أعطال الأجهزة الكهربائية لهذه المعطيات. و نظراً لأن الجزائر تعرف نقصاً من ناحية أنظمة تجميع و معالجة المعطيات و خصوصاً في مجال الموثوقية، قمنا بإجراء دراسة خبرة لمعرفة العوامل المناخية و الغير مناخية و التي لها التأثير الأكبر على موثوقية الاجهزة الكهربائية، حيث أن هذه الطريقة مستعملة من أجل تصويب البحث في مجال موثوقية الأجهزة.

من أجل ضمان مستوى موثوقية عالٍ لشبكات التمرين الكهربائي، منبعان للتمرين الكهربائي يمكن تصورهما، واحد رئيس و الآخر للاحتياط، عموماً يكون بارداً (مجمع ديزل كهربائي). موثوقية بنية عامة للتمرين بالطاقة الكهربائية دُرست، وتم إستخلاص الدورية المثلى للصيانة الوقائية للمنبع الإحتياطي إضافة إلى تأثير توقيت تشبيك قاطع المزوجة الكهربائي (الذي يسمح بتحويل الطاقة للحمولة من المنبع الإحتياطي في حالة تعطل المنبع الرئيس) على موثوقية و إتاحة البنية المعطاة.

الكلمات المفتاحية : الموثوقية، الإتاحة، السياق النصف ماركوفي، الصيانة الوقائية، قاطع المزوجة الكهربائي.

Abstract :

The aim of this work is to study the reliability of electric feeder systems (E.F.S.). So, we have introduced a stochastic model which is the semi-markovian model for the electric power distribution stations reliability evaluation. Markov analysis provides a means of analyzing the reliability and availability of systems whose components exhibit strong dependencies.

Since the world enters to the digital area, our dependency of the electric power quality supply will develop consequently. A few seconds of power breakdown or even a voltage fall could cost a company millions of dollars, and as well as an incalculable loss of reputation and significant number of customers. Respond the hopes of the society for a power supply available everywhere and inexpensive is not simply an option.

The electric components reliability knowledge is a significant consideration in the design and the operation of industrials and commercials energy distribution systems. The various components failure characteristics of electric equipments can be partially described by the following basic reliability statistics :

- § Failure rate, often expressed as the failures number per year per component (failures per one year unit);
- § The component repair or substitution downtime after its broke-down in service, expressed in hours (or minutes) by failure; and
- § In some special cases, the starting (or operation) probability is used.

Estimated calculations of reliability have the aim of checking the reliability level of a system according to the reliability data of its components and material architecture. The data input result from various sources: experience feedbacks, reliability data banks (IEEE, MIL-HDBK 217, NPRD,...), etc. From an industry brought back statistical data, we could estimate and with a checking test, the exponential character of the electric components failures distribution function for these data. Since Algeria have a lack of the data collection and processing systems, we carried out an expertise study in order to determine the climatic and not-climatic factors which have the most influence on the electric components reliability. This method is used in order to target search on the equipments reliability.

In order to ensure a high level reliability of the E.F.S., two sources of power supply are envisaged, one principal and the other of reserve, generally a cold reserve (diesel-electric group). The reliability of an electric power supply general structure was studied, the optimal periodicity of the reserve source preventive maintenance was given as well as the influence of the coupling circuit-breaker interlocking time (which allows the power transfer to the load by the reserve source in case of the principal source failure) on the reliability and the availability of our structure.

Key words : reliability, availability, semi-markovian process, preventive maintenance, coupling circuit-breaker.