

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar –
Annaba

Faculté des Sciences de
l'Ingénierat

Département d'électromécanique



جامعة باجي مختار –
عنابة

كلية علوم الهندسة

قسم الالكتروميكانيك

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat

Thème :

Amélioration de l'efficacité d'une installation de compensation d'énergie réactive

Filière : Électromécanique

Spécialité : Électromécanique

Par :

REFFAS Omar

Soutenue le 23 décembre 2020

Devant le jury

| | | | |
|------------------------|------|---|--------------|
| HADJAJA OUL ELIAS | Prof | Université Badji Mokhtar -Annaba | Président |
| GHOUL HADIBY RACHIDA | Prof | Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed- Boudiaf- USTO-MB | Rapporteur |
| SAHRAOUI YACINE | MCA | Université–Souk Ahras | Co-Encadreur |
| MERIDJET MOHAMED SALAH | MCA | Université Badji Mokhtar -Annaba | Examineur |
| RACHEDI MOHAMED FAOUZI | Prof | Université Badji Mokhtar -Annaba | Examineur |

Remerciements

Mes premiers remerciements sont adressés à mes directeurs de thèse, Madame GHOUL HADIBY Rachida , professeur à l'université USTO-MB et Monsieur Yacine sahraoui , maître de conférences à l'Université SOUK HARAS , sans lesquels ce travail n'aurait jamais vu le jour. Je les remercie pour la qualité de l'encadrement, les encouragements et la confiance qu'ils m'ont accordée tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier en particulier les membres du jury :

Monsieur HADJAJAOUL .ELIAS, professeur à l'Université badji Mokhtar Annaba, pour avoir accepté de présider ce jury et d'avoir voulu juger ce travail.

Monsieur MERIDJET. Med SALAH , maître de conférences à l'Université badji Mokhtar Annaba, pour avoir accepté d'examiner mon travail et de participer au jury.

Monsieur RACHEDI. Med FAOUZI maître de conférences à l'université badji Mokhtar Annaba, qui a accepté d'évaluer ce travail et de participer au jury de soutenance.

Monsieur Mourad Nehal, maître de conférences à l'Université SOUK HARAS, pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail et pour leurs remarques qui ont contribué à l'amélioration de cette thèse.

Monsieur Saad Salah professeur à l'Université badji Mokhtar Annaba et bille zerouili et monsieur boumediri hayteme et boussba issam pour leurs aides, leurs gentilleses, et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Enfin, je remercie toute personne ayant collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce travail en particulier mon conjoint qui m'a soutenu et encouragé.

Merci A ALLAH de m'avoir donné la force, la patience et la volonté d'arriver au terme de travail.

Je ne saurais terminer mes remerciements sans penser à ma famille spécialement ma femme et mes enfants Djan, Jasmine. Merci à mes parents, à mes beaux-parents, mes frères et mes sœurs d'avoir été là pour moi dès le début et sans lesquels cette thèse n'aurait jamais été ce qu'elle est aujourd'hui. Merci à tous mes amis (je ne citerais personne pour n'oublier personne) pour leur soutien permanent et notamment dans les moments difficiles, je ne vous remercierai jamais assez.

ملخص

يتم تقديم المعوض المتزامن الثابت من أجل تحسين أداء نظام الشبكة الكهربائية. يهدف العمل الحالي إلى تطوير منهجية بايز لتقييم موثوقية متغير الوقت لنظام كهربائي معقد، مع الأخذ في الاعتبار معوض الطاقة التفاعلية (STATCOM). ومع ذلك، فإن الجانب المعقد لا يتعلق فقط بتعقيد بنية مكونات النظام الكهربائي، بل إنه متصل أيضاً بالشبكة الكهربائية وتفاعلات STATCOM. تُستخدم شبكة بايز للتعامل مع قيود التعقيد هذه. يتم تطبيق التقييم المعتمد على الموثوقية لتأثير معوض الطاقة التفاعلية على حالة حقيقية لنظام كهربائي معقد. يكشف تطبيق منهجية Bayésien المقترحة أن STATCOM لها تأثير كبير على موثوقية النظام الكهربائي وأن النموذج المطور يمكن أن يوفر معلومات قيمة لصانعي القرار لتحسين أداء موثوقية النظام.

الكلمات المفتاحية

STATCOM، الموثوقية، النظام الكهربائي المعقد، الطاقة التفاعلية، شبكة بايزي

Abstract

The static synchronous compensator is presented in order to improve an electrical network system's performance. The present work aims to develop a Bayesian methodology to assess the time-variant reliability of a complex electrical system, taking into account a reactive energy compensator (STATCOM). However, the complex aspect is not only related to the complexity of the electrical system's component architecture, it is also connected to the electrical network and STATCOM's interactions. The Bayesian network is used to cope with this complexity constraint. The reliability-based assessment of the reactive energy compensator effect is applied to a real case of a complex electrical system. The proposed Bayesian methodology application reveals that STATCOM has a significant influence on electrical system reliability and that the developed model can provide valuable information for decision makers to improve system reliability performance.

Keywords

STATCOM, reliability, complex electrical system, reactive energy, Bayesian network

Résumé

Le compensateur statique synchrone est présenté afin d'améliorer les performances d'un système de réseau électrique. Le présent travail vise à développer une méthodologie bayésienne pour évaluer la fiabilité variable dans le temps d'un système électrique complexe, en tenant compte d'un compensateur d'énergie réactive (STATCOM). Cependant, l'aspect complexe n'est pas seulement lié à la complexité de l'architecture des composants du système électrique, il est également connecté au réseau électrique et aux interactions de STATCOM. Le réseau bayésien permet de faire face à cette contrainte de complexité. L'évaluation basée sur la fiabilité de l'effet compensateur d'énergie réactive est appliquée à un cas réel d'un système électrique complexe. L'application de méthodologie bayésienne proposée révèle que STATCOM a une influence significative sur la fiabilité du système électrique et que le modèle développé peut fournir des informations précieuses aux décideurs pour améliorer les performances de fiabilité du système.

Mots clés :

STATCOM, fiabilité, système électrique complexe, énergie réactive, réseau bayésien

Liste de figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1. Classification des appareils FACTS | 9 |
| Figure I.2. Dispositif FACTS shunt..... | 10 |
| Figure I.3. Thyristor Switched Capacitor (TCR) et Thyristor Controlled Reactor (TSC) | 11 |
| Figure I.4. Static VAR Compensator (SVC) | 12 |
| Figure I.5: Dispositifs FACTS séries..... | 13 |
| Figure I.5.1 Structure d'un Condensateur série contrôlé par thyristor (TCSC)..... | 14 |
| Figure I.5.2. Structure d'un Réacteur commandé par thyristor de série (TCSR)..... | 14 |
| Figure I.5.3. Schéma de base de Compensateur synchrone série statique (SSSC)..... | 15 |
| Figure I.6. a. Contrôleur de flux de puissance unifié (UPFC)..... | 16 |
| Figure I.6.b. Schéma du contrôleur de transit de puissance entre ligne (IPFC)..... | 16 |
| Figure I.7. Compensateur synchrone statique (STATCOM) | 19 |
| Figure I.8.a. Schéma de base d'un STATCOM..... | 20 |
| Figure I.8.b. Caractéristiques V I du STATCOM..... | 21 |
| Figure I.8.c. Circuit équivalent du STATCOM..... | 22 |
| Figure I.9.a. : Diagramme de Fresnel lorsque $V_{sh} > V_r$ | 23 |
| Figure I.9.b. Diagramme de Fresnel lorsque $V_{sh} < V_r$ | 23 |
| Figure I.10.1. Courbe de l'angle de puissance avec un STATCOM..... | 24 |
| Figure I.10.2. Amplitude de la tension du bus STATCOM..... | 24 |
| Figure I.11. Schéma de commande de base pour le STATCOM basé sur Un convertisseur alimenté en tension..... | 25 |
| Figure II.1. centrales hydroélectriques..... | 33 |
| La figure II.2. centrales nucléaires..... | 34 |
| Figure II.3. Centrales électriques au gaz..... | 35 |
| Figure II.4. Centrales électriques au charbon..... | 36 |
| Figure II.5. Centrales au fioul..... | 37 |
| Figure II.6. L'énergie solaire..... | 38 |
| Figure II.7. Les éoliennes..... | 39 |
| Figure II.8. réseaux électrique | 39 |
| Figure II.9. Les différents types de réseaux électriques..... | 41 |
| figure II.10. La topologie du réseau maillé (grille)..... | 42 |
| Figure II.11. Schéma de principe d'un réseau radial..... | 42 |
| figure II.12. Schéma de principe d'un réseau bouclé..... | 43 |
| Figure II.13. Modèle en π d'une ligne électrique..... | 44 |
| Figure II.14. Classement de la stabilité des systèmes électriques..... | 46 |
| Figure III.1 : Attributs de la sûreté de fonctionnement (SdF)..... | 58 |
| Figure III.2. Courbe théorique de fiabilité de la loi exponentielle..... | 61 |
| Figure III.3. Relations entre différentes grandeurs caractérisant la Sûreté de Fonctionnement.. | 62 |
| Figure III.4. Fonction de défaillance..... | 63 |
| Figure III.5. Taux de défaillance en fonction du temps..... | 65 |
| Figure III.6. Redondance des éléments..... | 68 |
| Figure III.7. Redondance des unités..... | 68 |
| Figure III.8. Redondance active..... | 69 |
| Figure III.9. Redondance passive..... | 69 |
| Figure III.10. Système série..... | 71 |

| | |
|--|-----|
| Figure III.11 Systèmes parallèles..... | 71 |
| Figure III.12 Systèmes mixte..... | 72 |
| Figure III.13 Systèmes complexes..... | 73 |
| Figure III.14 la structure de base du diagramme ADD..... | 74 |
| Figure III.15 la représentation des trois types de construction de BDF..... | 76 |
| Figure III.16 Chaîne de Markov à deux états..... | 77 |
| Figure III.17.Exmple RdP sur le système de freinage ABS..... | 79 |
| Figure IV.1. Un exemple typique de réseau bayésien..... | 83 |
| Figure.IV.2. Représentation graphique du modèle..... | 85 |
| FIGURE .IV.3 mode de connexions dans un RB..... | 86 |
| Figure .IV.4 Exemple de D-séparation..... | 88 |
| Figure .IV.5. Les trois étapes de construction d'un réseau bayésien..... | 89 |
| Figure .IV.6. Boucle dans un réseau bayésien..... | 90 |
| Figure IV.7. Organigramme représentant un algorithme simplifié pour représenter un Add en RB..... | 93 |
| IV.8. Exemple de création des tables de probabilité conditionnelle des portes logiques "ET" et "OU"..... | 94 |
| FigureIV.9.Exemple de Structure d'AdD (a) convertie vers la structure d'un RB (b)..... | 94 |
| Figure.IV.10 La conception du système électrique..... | 95 |
| Figure.IV.10.1Présentations d'un arbre de défaillances du système Electrique | 96 |
| Figure IV.10.2 Présentations du système de réseau bayésien..... | 97 |
| Figure IV.10.3 Fiabilité du système avec / sans générateur de secours..... | 98 |
| Figure IV.11.Diagramme de l'algorithme de l'arbre de jonction..... | 100 |
| Figure IV.12.Exemple de diagramme d'influence..... | 102 |
| Figure.IV.13. Exemple de réseau bayésien dynamique..... | 103 |
| Figures IV.14. Analyse des causes des chocs électriques..... | 106 |
| Figures IV.15.Répartition des références sur les thèmes..... | 108 |
| Figures IV.16.Les nombres des publications liées à l'application RB sur la fiabilité..... | 108 |
| Figure IV .17.Réseau bayésien d'un système avec trois configurations différentes..... | 109 |
| Figure IV .18. Évolution de la fiabilité d'un système estimée par les RBs..... | 110 |
| Figure V.1 : Le schéma fonctionnel de l'unité de laminage à froid (LAF)..... | 116 |
| Figure V.2. Photo du site de notre système électrique..... | 118 |
| Figure V.3. Diagrammes de fiabilité (a) du sous-système des unités et du démarrage de l'énergie électrique et (b) du sous-système de la station d'abaissement et de transport, distribution de l'énergie électrique..... | 119 |
| Figure V.4. Réseau bayésien pour deux composants..... | 121 |
| Figure V.5. Diagramme de fiabilité de l'exemple illustratif..... | 122 |
| Figure V.6. Modèle de fiabilité du système utilisant le logiciel De gestion des risques Agena(exemple1)..... | 123 |
| Figure .V.7. Diagramme de fiabilité..... | 124 |
| Figure V.8. Modèle de fiabilité du système utilisant le logiciel de gestion des risques Agena (exemple 2)..... | 125 |
| Figure V.9.Le couplage Réseaux électriques-STATCOM..... | 126 |
| Figure .V.10.Approche bayésienne pour l'évaluation de la fiabilité du système électrique..... | 128 |
| Figure . V.11. Schéma électrique de (HT) dans l'unité (LAF)..... | 129 |
| Figure.V.12.Fonctionnement du système électrique sans et avec STATCOM(respectivement a et b)..... | 133 |

| | |
|--|-----|
| Figure.V.13. Fonction de densité de probabilité de la puissance réactive avec et sans STATCOM (respectivement a et b)..... | 134 |
| Figure V.14. Réseau bayésien du système électrique..... | 136 |
| Figure V.15. Fiabilité du système électrique sans et avec STATCOM..... | 137 |
| Figure. V.16 Fiabilité du système électrique selon les trois configurations..... | 138 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau I.1. Domaines d'applications des dispositifs FACTS..... | 18 |
| Tableau I.2.L'utilité de STATCOM..... | 20 |
| Tableau III.1 Techniques pour améliorer la fiabilité du système..... | 67 |
| Tableau III.2. Symboles utilisés dans ADD..... | 75 |
| Tableau IV.1. Travaux de recherche sur le passage de l'arbre de défaillance vers les réseaux bayésiens..... | 92 |
| Tableau IV.2.Fiabilité (probabilité de succès) pour un système avec des défaillances de cause commune..... | 98 |
| Tableau V .1. CPT dans le boîtier système série avec deux composants..... | 121 |
| Tableau V.2. CPT dans le cas du système parallèle avec deux composants..... | 121 |
| Tableau V.3. Valeur des composants aléatoires | 124 |
| Tableau V.4. Tableau de probabilité conditionnelle du nœud N sur la figure V.9..... | 127 |
| Tableau V.5. Présentation des équipements électriques du système (HT)..... | 129 |
| Tableau V.6. Paramètres Weibull des composants du système..... | 131 |
| Tableau V.7. Données d'entrée de la consommation d'énergie électrique..... | 135 |

Liste des acronymes

FACTS : Flexible Alternating Current Transmission Systems

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistors

TCR : Thyristor Controlled Reactor

TSR : Thyristor Switched Reactor

TSC : Thyristor Switched Capacitor

SVC : Static Var Compensator

STATCOM : Static Compensator

TCSC : Thyristor Controlled Series Capacitor

TSSC : Thyristor Switched Series Capacitor

TSSR : Thyristor Switched Series Reactor

SSSC : Static Synchronous Series Compensator

TCPAR : Thyristor Controlled Phase Angle Regulator

UPFC : Unified Power Flow Controller

PSS : Power System Stabiliser.

TG : Turbine à gaz.

TS : Trend stationnaire.

TV : Turbine à vapeur.

TWH : Ton watt heure.

HT(HTB) : Haute tension.

AdD : Arbres de Défaillance.

AFNOR : Association Française de normalisation.

CdM : Chaînes de Markov.

CEN : Comité Européen de Normalisation.

DAG: Directed Acyclic Graph.

MTTF: Mean Time To Failure.

MTTR: Mean Time To Repair.

RB : Réseau Bayésien.

RdP : Réseaux de Petri.

SdF : Sûreté de Fonctionnement.

TTF : Time To Failure.

Pf : Probabilité de défaillance.

R : Résistance d'un composant.

R(t) : Fonction de fiabilité.

B : Indice de fiabilité.

B : Paramètre de forme de la loi de Weibull.

η : Paramètre d'échelle de la loi de Weibull.

Γ : Paramètre de localisation de la loi de Weibull.

F(t) : Fonction de répartition.

CPf : Probabilité conditionnelle de défaillance.

G : Fonction d'état limite.

Table des matières

| | |
|---|------|
| <i>Remerciements</i> | I |
| ملخص..... | III |
| Abstract | IV |
| Résumé..... | V |
| Liste de figure | VI |
| Liste des tableaux..... | VIII |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I. | 4 |
| Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques | 4 |
| I.1. Introduction..... | 5 |
| I.2. Les utilisations de système de compensation : | 5 |
| I.2.1. Les avantages de compensation de la puissance réactive | 5 |
| I.3. Différents dispositifs de contrôle des réseaux électriques | 6 |
| I.3.1. Compensation traditionnelle. | 6 |
| I.3.1.1. Compensateurs synchrones | 6 |
| I.3.1.2. Batteries de condensateurs..... | 6 |
| I.3.1.3. Les inductances | 7 |
| I.3.1.4. les PSS (Power System Stabiliser) | 7 |
| I.3.2. la Compensation par les nouvelles technologies (dispositifs FACTS) | 8 |
| I.3.2.1. La définition des dispositifs FACTS | 8 |
| I.3.2.2. La progression des dispositifs FACTS : | 8 |
| I.4. Les différents dispositifs FACTS..... | 10 |
| I.4. 1. Dispositifs FACTS shunt..... | 10 |
| I.4. 1.1. Compensateur shunt à base de thyristors | 10 |
| I.4. 1.2. Compensateur shunt à base de GTO thyristors: | 12 |
| I.4. 2. Dispositifs FACTS séries..... | 13 |
| I.4. 3. Dispositifs FACTS combinés série-parallèle | 15 |
| I.5. Les possibilités offertes par la technologie FACTS | 17 |
| I.6. Exploitation des systèmes FACTS dans les réseaux électriques. | 18 |
| I.7. Etude profonde d'un dispositif FACTS (STATCOM) | 18 |
| I.7. 1. Première invention de (STATCOM) | 19 |
| I.7. 2. Compensateur statique synchrone..... | 20 |
| I.7. 3. Modèle de flux de puissance du compensateur synchrone statique | 21 |

| | |
|---|----|
| I.7. 3. Principes de contrôle STATCOM..... | 24 |
| I.8. Placement optimal des dispositifs FACTS..... | 26 |
| I.8.1. Certaines recherches sur les appareils FACTS | 26 |
| I.8. 2. Coût des dispositifs FACTS | 28 |
| I.9.conclusion | 28 |
| Chapitre II..... | 30 |
| Les systèmes électriques | 30 |
| II.1. INTRODUCTION..... | 31 |
| II.2. Définition de la production d'énergie électrique | 31 |
| II.3. Description des technologies de production d'électricité..... | 32 |
| II.3.1. Les sources d'énergie traditionnelle. | 32 |
| II.3.1.1. Énergie hydroélectrique..... | 32 |
| II.3.1.2. Les centrales nucléaires | 33 |
| II.3.1.3. Les centrales électriques au gaz..... | 34 |
| II.3.1.4. Les centrales électriques au charbon | 35 |
| II.3.1.5. L'énergie au fioul | 36 |
| II.3.2. Les sources d'énergie renouvelable. | 37 |
| II.3.2.1. Technologies de l'énergie solaire..... | 37 |
| II.3.2.2. Énergie éolienne..... | 38 |
| II.4. MODELISATION DES RESEAUX ELECTRIQUES EN REGIME PERMANENT..... | 39 |
| II.4. 1. Définition les réseaux électrique | 39 |
| II.4. 2. Structure topologique des réseaux électriques | 40 |
| II.4. 3. Composition de réseau électrique | 40 |
| II.4. 4.Les différent type de réseaux électrique..... | 41 |
| II.4. 4.1.Réseaux maillés | 41 |
| II.4.4.2. Réseaux radiaux | 42 |
| II. 5.MODELISATION MATHEMATIQUE DU RESEAU ELECTRIQUE..... | 43 |
| II. 5.1. Modèle de l'alternateur | 43 |
| II.5.2. Modèle de la ligne de transport | 43 |
| II. 5.3. Modèles des nœuds du réseau | 44 |
| II.5.4 Modèle du transformateur | 44 |
| II.5.5. Equipements de compensation de l'énergie réactive | 45 |
| II.5.6. Modélisation des charges | 45 |
| II.6. STABILITE DES RESEAUX ELECTRIQUES | 45 |
| II.6. 1. Stabilité angulaire..... | 46 |
| II.6.1.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations | 46 |

| | |
|---|----|
| II.6. 1.2. Stabilité transitoire | 47 |
| II.6.2. Stabilité de fréquence..... | 47 |
| II.6.3 Stabilité de tension..... | 47 |
| II.6.3.1 Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations | 48 |
| II.6.3.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations | 48 |
| II.7.pratiques de mesure pour la fiabilité et la qualité de l'énergie | 48 |
| II.7.1. La définition de fiabilité de système électrique :..... | 48 |
| II.7.1. Les indices des mesures la fiabilité | 48 |
| II.7.1.1. indice de fréquence moyenne des interruptions du système (SAIFI) | 49 |
| II.7.1.2. indice de durée moyenne d'interruption du système (SAIDI)..... | 49 |
| II.7.1.3. indice de durée moyenne d'interruption du client (CAIDI)..... | 49 |
| II.7.1.4. indice de fréquence moyenne des interruptions momentanées (MAIFI) | 49 |
| II.7.2.définition la Qualité de l'énergie | 49 |
| II.7.3.une perspective historique pour la Probabilité de perte de charge..... | 51 |
| II.8. Conclusion | 54 |
| Chapitre III. | 55 |
| Les concepts sur la fiabilité | 55 |
| III.1. Introduction..... | 56 |
| III.2. Historique de fiabilité..... | 56 |
| III.3. Eléments constitutifs de la sûreté de fonctionnement..... | 57 |
| III.3.1. La fiabilité | 58 |
| III.3.2. La Maintenabilité | 59 |
| III.3.3. La disponibilité | 60 |
| III.3.4. Sécurité..... | 60 |
| III.4. Lois de probabilité usuelles en sûreté de fonctionnement..... | 60 |
| III.4.1. Loi exponentielle..... | 60 |
| III.4.2. Loi de Weibull | 61 |
| III.5. Les temps caractéristiques de la Sûreté de Fonctionnement..... | 62 |
| III.6. Les probabilités et la fiabilité..... | 63 |
| III.6.1. La défaillance | 63 |
| III.6.2. Fonction de défaillance $F(t)$ | 63 |
| III.6.3. Le taux de défaillance | 64 |
| III.7. Conception de la fiabilité..... | 66 |
| III.7. 1. Définition de la Redondance | 68 |
| III.7. 2. Redondance des éléments | 68 |
| III.7. 3. Redondance d'unité..... | 68 |

| | |
|--|----|
| III.7. 3.1. Redondance active..... | 69 |
| III.7. 3.2.Redondance passive | 69 |
| III.8 .Les différents types de configurations du système | 70 |
| III.8. 1.1.Systèmes série..... | 71 |
| III.8. 1.2.Systèmes parallèles | 71 |
| III.8. 1.3.Systèmes mixtes | 72 |
| III.8. 1.4.Systèmes complexes..... | 72 |
| III.8. METHODE ET DE MODÈLES DE FIABILITÉ DU SYSTÈME..... | 73 |
| III.8.1.Méthodes d'évaluation de la fiabilité | 73 |
| III.8.1.1.Arbre de défaillances | 74 |
| III.8.1.1.2.Symboles utilisés dans diagramme ADD | 75 |
| III.8.1.2.Bloc-diagramme de Fiabilité (BDF) | 76 |
| III.8.2. Les Modèles pour le calcul de la fiabilité | 77 |
| III.8.2. 1. Chaînes de Markov | 77 |
| III.8.2. 2. Modèle combinatoire | 78 |
| III.8.2. 3. Modèle basé sur les réseaux de Pétri..... | 78 |
| III.8.2. 4. Les réseaux bayésiens (RB)..... | 79 |
| III.9.conclusion | 80 |
| Chapitre IV..... | 81 |
| Réseau bayésien..... | 81 |
| IV.1.Introduction | 82 |
| IV.2. Historique..... | 82 |
| IV.3. Formalisme des réseaux bayésiens | 83 |
| IV.3.1 Définition et généralité | 83 |
| IV.3.2. Définition Formelle | 84 |
| IV.4.La causalité en terme graphique..... | 84 |
| IV.4.1.Exemple..... | 84 |
| IV.4.2.Notions autour des réseaux bayésiens | 85 |
| IV.4.2.1.Notions parents et enfants | 85 |
| IV.4.2.2.Notions racine et feuille | 85 |
| IV.4.2.3.Chemin orienté | 86 |
| IV.4.2.4. Notions ancêtres et descendants | 86 |
| IV.4.3. les différentes Types de connexions dans un RB..... | 86 |
| IV.4.3.1. Connexion série..... | 87 |
| IV.4.3.2. Connexion convergente | 87 |
| IV.4.3.3. Connexion divergente..... | 87 |

| | |
|---|-----|
| IV.4.4. Propriétés des réseaux bayésiens | 87 |
| IV.4.4. 1.La relation de séparation (ou d-séparation) | 87 |
| IV.4.4. 2.Propriété de Markov | 88 |
| IV.5.Construction d'un des réseaux bayésiens | 88 |
| IV.5.1.Identification des variables et de leurs espaces d'états..... | 89 |
| IV.5.2. Définition de la structure du réseau bayésien..... | 89 |
| IV.5.3. Loi de probabilité conjointe des variables | 90 |
| IV.6.Construction d'un RB à partir d'un Arber de défaillance (AdD) | 91 |
| IV.6.1.Les différentes recherches de Convertir l'AdD en RB. | 91 |
| IV.6.2. Convertir l'AdD en RB | 93 |
| IV.6.3. exemple pratique d'un système électrique..... | 95 |
| IV.6.3.1.la construction d'Arbre de défaillance du système..... | 96 |
| IV.6.3.2.La conception du système électrique avec le réseau bayésien..... | 97 |
| IV.7. Inférence Bayésienne..... | 99 |
| IV.7.1.Méthodes d'inférences exactes | 99 |
| IV.7.1.1.Méthode de propagation de messages..... | 99 |
| IV.7.1.2. Méthode de l'arbre de jonction | 99 |
| IV.7.2.Méthodes d'inférences approchées | 100 |
| IV.7.2.1.Méthodes de simulations stochastiques..... | 101 |
| IV.7.2.2. Méthodes exacte sur des graphes réduits..... | 101 |
| IV.8.Type des réseaux bayésiens | 101 |
| IV.8.1 Diagrammes d'influence | 101 |
| IV.8.2 .Réseaux Bayésiens Orientés Objet | 102 |
| IV.8.3. Réseaux bayésiens dynamiques | 103 |
| IV.9.Classification des applications aux réseaux bayésiens par domaines | 103 |
| IV.9.1.Domaine de la Santé | 103 |
| IV.9.2.Domaine de la défense | 104 |
| IV.9.3.Domaine de Banque/finance | 104 |
| IV.9.4.Domaine de l'industriel | 104 |
| IV.9.4.1. Exemple pratique | 104 |
| IV.9.4.1.1. analyse des causes des chocs électriques..... | 105 |
| IV.9.4.1.2.les simulation des cas | 106 |
| IV.10.Utilisation des réseaux bayésiens pour la fiabilité du système..... | 107 |
| IV.10.1.littérature sur l'application du BN à la fiabilité | 107 |
| IV.10.2.Estimation de la fiabilité d'un système complexe | 108 |
| IV.10.2.1. Méthodologie générale..... | 109 |

| | |
|---|-----|
| IV.10.2.2. Application..... | 109 |
| IV.11. Conclusion | 110 |
| Chapitre V..... | 112 |
| L'efficacité de compensateur d'énergie réactive..... | 112 |
| V.1.LA Problématique | 113 |
| V.2. Introduction | 113 |
| V.3. Description du système..... | 115 |
| V.3.1.Configuration du système électrique | 116 |
| V.4. Procédure de modélisation de la fiabilité du système à l'aide de réseaux bayésiens | 120 |
| V.4.1. Réseaux bayésiens | 120 |
| V.4.2. Systèmes en série et parallèles | 121 |
| V. 4.3. Combinaison complexe d'une configuration système série-parallèle | 122 |
| V. 4.3.1. Exemple d'un système complexe..... | 122 |
| V. 4.3.2.Exemple d'un système complexe | 124 |
| V.4.4.Interaction entre le réseau électrique et STATCOM | 125 |
| V.5. Application industrielle | 128 |
| V.5.1. Données de défaillance et fiabilité des composants électriques individuels..... | 130 |
| V.5.2. Consommation d'énergie électrique et modélisation du système à l'aide des réseaux bayésiens..... | 132 |
| V.5.3.Évaluation de la fiabilité du système électrique avec et sans STATCOM | 136 |
| V.5.4. Estimation de la fiabilité du système pour trois configurations STATCOM..... | 137 |
| V.6.Conclusion | 139 |
| Conclusion générale | 140 |
| Bibliographie..... | 140 |
| Annexe (Activités scientifiques) | 153 |
| Communications Internationales | 153 |
| Publications | 154 |

Introduction générale

Jusqu'à la fin du vingtième siècle, l'humanité a toujours considéré que l'énergie lui serait assurée à jamais puisque celle-ci a toujours été disponible. Mais récemment, les experts en la matière affirment que nous avons consommé beaucoup trop rapidement d'importantes réserves d'énergie : le pétrole, le gaz naturel et le charbon.

Cependant, il existe plusieurs sources d'énergie alternatives pour remplacer les combustibles fossiles, tels que le soleil, le vent et les sources naturelles d'eau chaude (énergie thermique).

L'énergie électrique en Algérie est fournie par la société Sonelgaz, groupe composé de différentes filiales qui assurent la production (centrale électrique), le transport (réseaux THT ,HT) et la distribution à travers tout le territoire national tout en veillant à la sécurité des installations et la qualité du service fourni aux clients (abonnés MT , BT).

Il y a plus d'un siècle le réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique est devenu l'un des réseaux à prédominance complexe de l'augmentation de la consommation; ce qui a nécessité le développement des réseaux électriques modernes en une énorme structure.

En Algérie la consommation de l'énergie électrique est en nette progression et cette tendance est due à la croissance spontanée du parc logements d'une part et la forte demande des différents secteurs de développement tel que : l'industrie ; le tourisme, l'hydraulique l'agriculture etc.

Par conséquent, le raccordement au réseau électrique des installations industrielles, produit des réactions sur ce dernier qui d'une part provoque des pertes supplémentaires dans l'installation de production et d'autre part sur le réseau de transport et de la distribution

Tous les systèmes électriques ne peuvent pas conduire de grandes quantités d'énergie ce qui nécessite des rénovations et des extensions pour faciliter la maintenance et le contrôle.

En cas d'absence de dispositifs de contrôle adéquat beaucoup de problèmes peuvent influencer sur la qualité de l'électricité tels que :

- ✓ Le transit de puissance réactive excessif dans les lignes.
- ✓ Les creux de tension entre les différentes parties du réseau....etc.

Cette problématique de la qualité de l'électricité concerne tous les acteurs qu'ils soient gestionnaires, utilisateurs de ces réseaux (producteurs ou consommateurs d'électricité) ou divers intervenants (fournisseurs d'électricités, de service, organisme de régulation.....).

Les dispositifs de l'électronique et de l'informatique sont très sensibles aux différentes perturbations qui surviennent sur le système d'alimentation. Cela exige que les entreprises de production de l'énergie électrique doivent fournir l'approvisionnement régulier afin d'assurer une fiabilité de la qualité de service.

Parmi les solutions utilisées, l'installation d'un système de compensation d'énergie réactive afin de rectifier les réactions dans des limites acceptables pour le fournisseur et le client.

Grace aux semi-conducteurs et au développement rapide de l'électronique de puissance il y a eu un effet considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des systèmes électriques. Et cela par l'introduction de dispositifs connus tels que Flexible Alternatif Curant Transmission (FACTS) qui est basé sur des composants électroniques de puissance très avancés (GTO, IGBT). À partir de la technologie FACTS on peut ouvrir de nouvelles perspectives pour remplir diverses fonctions comme le maintien de la tension, le contrôle des flux de puissance, l'amélioration de la stabilité du réseau, l'augmentation de la puissance transmissible maximale, etc...

Parmi les technologies FACTS, les plus connues sont : le SVC (Static Var Compensator), le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), le STATCOM (Static Synchronous Compensator), et l'UPFC (Unified Power Flow Controller). Chacune d'entre elles possède ses propres caractéristiques et peut être utilisé pour répondre à des besoins bien précis.

La position de l'installation dans le réseau est également un paramètre important pour sa fiabilité. Lorsque plusieurs dispositifs sont insérés dans le réseau il convient que leurs effets soient coordonnés afin qu'ils n'agissent pas de façon opposée. Le choix du dispositif approprié est donc essentiel et il dépend des objectifs à atteindre.

L'un des problèmes majeurs dans le domaine de la fiabilité du système électrique est d'aborder la modélisation du système en relation avec l'augmentation de sa complexité comme un phénomène réel. La modélisation met en évidence les problèmes concernant la quantification des paramètres du modèle, la représentation, la propagation et la quantification de l'incertitude sur le comportement du système.

Nous mettrons en évidence le problème de la modélisation d'une installation électrique avec un système de compensation d'énergie réactive (STATCOM) ce qui crée un système très complexe de point de vue structural et fonctionnel.

L'objectif de notre travail est d'étudier la fiabilité du dispositif FACT (Static Synchronous Compensator) et son influence sur l'amélioration de la capacité du système électrique.

Pour atteindre cet objectif, nous avons organisé notre mémoire de thèse en cinq chapitres :

Le premier chapitre consiste à une exploration de l'historique et de brèves définitions des célèbres dispositifs FACTS ainsi qu'un bref aperçu sur les différentes techniques. A cela s'ajoute également la mise en page, le fonctionnement, le rôle et l'apport sur le réseau du compensateur synchrone «STATCOM».

Le deuxième chapitre, traite du comportement du système électrique, le degré de performance des éléments, les normes de livraison de l'électricité, la qualité de service pour obtention d'une meilleure fiabilité.

Le troisième chapitre décrit les principales et diverses notions relatives au domaine de la fiabilité ainsi que les méthodes d'analyse et de quantification du système.

Le quatrième chapitre introduit les principes fondamentaux du réseau bayésien et donne quelques définitions ainsi que des concepts de l'approche RB et les techniques

d'organisations de base de ce cas. D'où une présentation détaillée des réseaux bayésiens, ainsi que leurs propriétés notamment la représentation de l'indépendance conditionnelle. Nous explicitons les algorithmes d'inférence d'une manière générale et l'inférence exacte en particulier. Il s'agit, en fait, de l'algorithme de propagation des messages locaux utilisé dans les poly arbres et l'algorithme de l'arbre de jonction utilisé dans tous les types d'arbres.

Le cinquième chapitre est consacré à l'évaluation de la fiabilité des systèmes électriques complexes qui existent au niveau de la société algérienne de l'industrie sidérurgique (SIDER). A ce sujet il a été proposé la méthode de construction du RB pour ce genre de structures. Cette approche est validée par une application qui consiste au développement d'un système électrique complexe avec et sans compensateur d'énergie réactive et dont les résultats ont fait l'objet d'analyses et discussions.

En conclusion générale, nous avons résumé les apports de la méthodologie globale proposée et son développement.

Chapitre I.

Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

I.1. Introduction

A Cause déréglementation du marché de l'électricité, le nombre d'échanges d'électricité non planifié augmente, Si ces échanges ne sont pas contrôlés, des problèmes peuvent apparaître avec les flux de puissance. En raison de la concurrence des consommateurs.

Avant l'ouverture du marché, la maîtrise des flux d'électricité était principalement réalisée par la réallocation des productions.

Il est donc dans l'intérêt du gestionnaire de réseau de transport (GRT) de disposer d'un autre moyen de contrôler les flux d'énergie afin de permettre une utilisation plus efficace et plus sûre des lignes de transmission. Les dispositifs FACTS (Flexible alternative Current Transmission Systems) pourraient être un moyen de remplir cette fonction sans les inconvénients des dispositifs électromécaniques (lenteur et usure).

les dispositifs FACTS dite Les systèmes de transmission Courant Alternative flexibles, peuvent aider à réduire le flux d'énergie sur les lignes surchargées, ce qui se traduirait par une capacité de charge accrue du système d'alimentation, moins de pertes de ligne de transmission, un meilleur rendement énergétique système de transmission ,et en fin une stabilité et une sécurité améliorée du système électrique.

La technologie FACTS elle offre la possibilité de déplacer ces installations quand elle n'est plus utile. En outre, permet d'étendre la transmission limite d'un système d'alimentation de manière progressive au fur et à mesure obligatoire.

I.2. Les utilisations de système de compensation :

Le réseau électrique se compose de trois types de puissances, à savoir la puissance active, réactive et apparente. La puissance active est la puissance utile ou réelle qui effectue un travail utile dans le système ou la charge.

La puissance réactive est entièrement causée par les composants de stockage d'énergie et les pertes dues à la puissance réactive peuvent être considérables, bien que la puissance réactive ne soit pas consommée par les charges.

La présence de puissance réactive réduit la capacité de fournir la puissance active par les lignes de transmission.

I.2.1. Les avantage de compensation de la puissance réactive

La compensation est une technique de la gestion d'énergie réactive afin d'améliorer la qualité énergétique dans les réseaux électriques à courant alternatif. En d'autres termes pour obtenir une transmission de puissance active maximale, la puissance réactive doit être compensée elle peut se réaliser de plusieurs manières. Cette compensation est nécessaire pour :

-Amélioration de la régulation de tension

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

- Augmentation de la stabilité du système
- Réduire les pertes associées au système
- Amélioration du facteur de puissance
- Meilleure utilisation des machines connectées au système

I.3. Différents dispositifs de contrôle des réseaux électriques

I.3.1. Compensation traditionnelle.

Le problème des flux de puissance Jusqu'à la fin des années 1980 a été résolu en l'utilisant Les méthodes traditionnelles comme les condensateurs, des réacteurs et des générateurs synchrones fixes et commutés mécaniquement toutefois, des problèmes d'usure ainsi que leur relative lenteur ne permet pas d'actionner ces dispositifs

Quelques fois par jour .ils sont par conséquent difficilement utilisables pour un contrôle continu des flux de puissance. Il existe plusieurs types de ces compensateurs :

I.3.1.1. Compensateurs synchrones

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes branchées sur le tertiaire du transformateur THT/HT Ils sont utilisés pour améliorer le facteur de puissance ($\cos \Phi$) et réguler la tension dans les lignes électriques et les réseaux de distribution d'énergie. La tension au point de consommation (aux bornes d'une ligne de transmission) varie avec l'amplitude et la nature des charges dans le réseau de distribution (charges inductives ou capacitives).donc on peut fournir ou absorbé de l'énergie réactive sans mettre en jeu de puissance active.

Un compensateur synchrone est démarré de la même manière que les moteurs synchrones conventionnels ; le courant de démarrage d'un compensateur synchrone est de 30 à 100% de la valeur du courant nominal. Les compensateurs synchrones sont fabriqués avec des puissances nominales allant jusqu'à 100 kilovolts ampères ; les compensateurs synchrones hautes puissances sont refroidies à l'hydrogène ou à l'eau. Les compensateurs synchrones sont principalement utilisés dans les sous-stations électriques. Cette machine pose des problèmes de maintenance et leur installation nécessite des ouvrages de génie civil important et le coût est élevé tant en investissement qu'en exploitation. Leur emploi est de plus en plus abandonné principalement à cause de leur entretien trop onéreux.

I.3.1.2. Batteries de condensateurs

Les condensateurs (ou batterie de condensateurs) sont utilisés pour améliorer l'efficacité de fonctionnement des systèmes d'alimentation électrique et aider à stabiliser la tension des systèmes de transmission et de distribution pendant les perturbations et les conditions de charge élevée, On distingue deux types de matériels:

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

- **Batteries de condensateurs HT**

Ces batteries fournissent une puissance réactive simple et fiable pour améliorer les performances, la qualité et l'efficacité du système.

Ces batteries doivent être connectées aux jeux de barres HT des postes THT/HT compensent les pertes réactives sur les réseaux HT et THT. Leur puissance est de 20 à 30 MVAR.

- **Batteries de condensateurs MT**

Les batteries des condensateurs MT sont installés dans les réseaux électriques industriels principalement pour répondre aux exigences de compensation des moteurs à induction MT individuels et de la correction globale du facteur de puissance au niveau aux jeux de barres MT des postes HT/MT et THT/MT .Ces batteries sont fractionnées en gradins de 2.4 ou 3 MVAR (selon la puissance du transformateur HT/MT). Chaque gradin commandé séparément est dimensionné pour limiter à 5% la variation de la tension maximale sur le jeu de barre MT au moment de la manœuvre d'un gradin.

I.3.1.3. Les inductances

Dans le but de limiter la prolifération des effets nocifs dans le réseau à cause de la puissance réactive, il est possible de limiter les courants harmoniques de certains convertisseurs. Toutefois, ces inductances engendrent des harmoniques importants dont les filtrages nécessitent des installations importantes où les pertes peuvent ne pas être négligeables.

Le raccordement de l'inductance est soit branchées directement au réseau, soit sur les tertiaires des auto- transformateurs.

I.3.1.4. les PSS (Power System Stabiliser)

Le stabilisateur du système d'alimentation (PSS) est un appareil qui mesure les améliorations de la stabilité du système. Ces Stabilisateurs de puissance sont un moyen efficace et économique d'amélioration de la stabilité dynamique d'un système électrique. Un choix adéquat des paramètres des PSS Engendre un bon amortissement des oscillations induites par les perturbations et améliore la stabilité de l'ensemble du système.

Les moyens cités ci-dessus sont certes efficaces mais présentent tout de même certaines limitations telles que : temps de réaction élevé, et génération d'harmoniques. Aujourd'hui, grâce à l'amélioration des performances de l'électronique de puissance, et le contrôle plus sophistiqué on peut obtenir des opérations fluides .cette technologie est de plus requise qui se est appelée les dispositifs FACTS.

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

I.3.2. la Compensation par les nouvelles technologies (dispositifs FACTS)

À base de l'électronique de puissance peuvent fournir des opérations fluides, continues, rapides et répétables pour le contrôle du système d'alimentation. Tout cela grâce à une invention des dispositifs à thyristors, des convertisseurs électroniques de puissance sont développés qui ont conduit à mettre en œuvre des contrôleurs les dispositifs FACTS.

Un acronyme le système FACTS est Flexible AC Transmission System et c'est une application de dispositifs électroniques de puissance au système de transmission électrique. Il s'agit d'un système de transmission AC qui intègre un contrôleur électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour améliorer la contrôlabilité ainsi que la capacité de transfert de puissance. Il améliore les performances des réseaux électriques en gérant la puissance active et réactive.

I.3.2.1. La définition des dispositifs FACTS

Les dispositifs FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) sont indiqués comme étant un système basé sur l'électronique de puissance et d'autres équipements statiques qui fournissent le contrôle d'un ou plusieurs paramètres de transmission AC (tels que la tension, l'impédance, l'angle de phase et la puissance).

Ainsi, ces dispositifs peuvent contribuer à faire face aux problèmes auxquels nous sommes confrontés dans l'exploitation des réseaux électriques. C'est selon la définition fournie par EPRI (Electric Power Research Institute) en 1986.

le développement des dispositifs FACTS est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables qui jouent le rôle d'interrupteurs statiques très rapides tels que le GTO (thyristor blocable par la gâchette),

MOSFET (transistor à effet de champ à grille isolée) et IGBT (transistor bipolaire à grille isolée), ce qui confère aux composants ces dispositifs une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques.

I.3.2.2. La progression des dispositifs FACTS :

Les systèmes d'alimentation sont des systèmes non linéaires avec une large gamme de conditions de fonctionnement et de configurations et de paramètres variant dans le temps.

Des systèmes de transmission CA flexibles (FACTS) ont été développés pour améliorer les performances des systèmes CA faibles et améliorer les capacités de transmission sur de longues lignes CA. Les contrôleurs FACTS peuvent être utilisés dans les trois états du système d'alimentation, à savoir : état stable, transitoire et post-transitoire. Les dispositifs FACTS peuvent réguler la puissance active et réactive ainsi que la tension-magnitude [1],[2]. L'application dynamique des contrôleurs FACTS comprend l'amélioration de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations (stabilité dynamique) et l'amélioration de la

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

stabilité de la tension. Le contrôleur de faits peut vérifier l'impédance de shunt, l'impédance série, la tension, le courant et l'angle de phase [3]. Les dispositifs FACTS peuvent être divisés en trois catégories comme illustré à la Fig. 1.

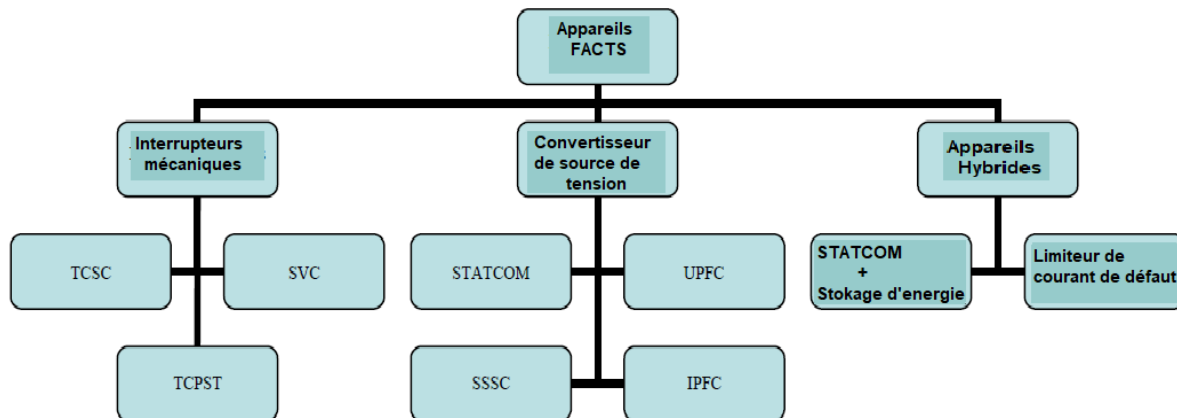


Figure I.1. Classification des appareils FACTS

En général, à partir du contrôle de la vue, les contrôleurs FACTS peuvent être divisés en quatre catégories [4] contrôleurs série tels que le condensateur série commandé par thyristor (TCSC) [5] et le compensateur statique synchrone série (SSSC) [6].

les contrôleurs shunt tels que le compensateur var statique (SVC) [7], STATCOM [8] et STATCOM avec système de stockage d'énergie [9], des contrôleurs série-shunt combinés tels que le contrôleur de flux de puissance unifié (UPFC) [10] et des contrôleurs série-série combinés tels que le contrôleur d'alimentation interligne (IPFC) [11].

Un bon nombre d'articles sont disponibles sur la modélisation, la simulation, l'exploitation et le contrôle des fondamentaux des dispositifs FACTS. La simulation des contrôleurs FACTS se fait principalement des deux manières suivantes :

- (a) calculs détaillés dans les systèmes triphasés et (b) en régime permanent analyses d'état et de stabilité [12].

Dans [13] proposé, un modèle d'injection de courant de contrôleurs FACTS est adopté pour étudier la stabilité dynamique du système d'alimentation qui peut être facilement appliqué à l'analyse linéaire et non linéaire, et adopter tout type de contrôleurs FACTS de type VSI quels que soient les types de modèle. Une étude comparant les effets de quatre contrôleurs FACTS à l'aide de l'analyse des valeurs propres sur la stabilité des petits angles de signal des systèmes d'alimentation présentée dans [14]. Les dispositifs Shunts FACTS sont utilisés pour contrôler la tension de transmission, le flux de puissance, réduire les pertes réactives et amortir les oscillations du système d'alimentation pour des niveaux de transfert de puissance élevés. STATCOM est une sorte de compensateur de puissance dynamique, qui a été développé ces dernières années.

I.4. Les différents dispositifs FACTS

Les techniques de compensation du système d'alimentation fournissent la puissance réactive inductive ou capacitive (à ses limites particulières) afin d'améliorer la qualité et l'efficacité du système de transmission d'énergie. Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés [15]. Nous font ici une description sommaire des principaux dispositifs.

I.4. 1. Dispositifs FACTS shunt

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. L'objectif principal de la compensation shunt est l'accroissement de la puissance transmissible dans le réseau. Donc à fournir ou à absorber de la puissance réactive de façon à modifier les caractéristiques naturelles des lignes pour le rendre plus compatibles avec la charge [16].

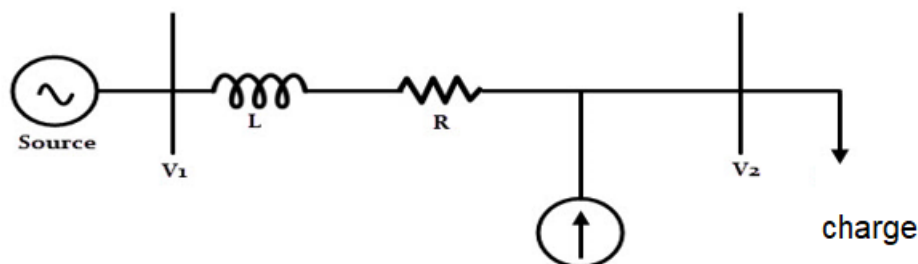


Figure I.2. Dispositifs FACTS shunt [38]

Les types de dispositifs de compensation shunt comprennent le compensateur synchrone statique (STATCOM) et le compensateur VAR statique (SVC).

I.4. 1.1. Compensateur shunt à base de thyristors :

1. Réacteur commandé par thyristor ((TCR) Thyristor Controlled Reactor)

Il s'agit d'un générateur ou d'un absorbeur de var statique connecté par shunt. Il se compose d'un réacteur fixe en série avec interrupteurs à thyristors bidirectionnels (Fig I.3.a). L'impédance de ce dispositif variait de manière continue en faisant modifier les angles de conduction des thyristors. La sortie de cet appareil est ajustée pour échanger un courant inductif ou capacitif. Il maintient et contrôle les paramètres (généralement une tension de bus) du système d'alimentation.

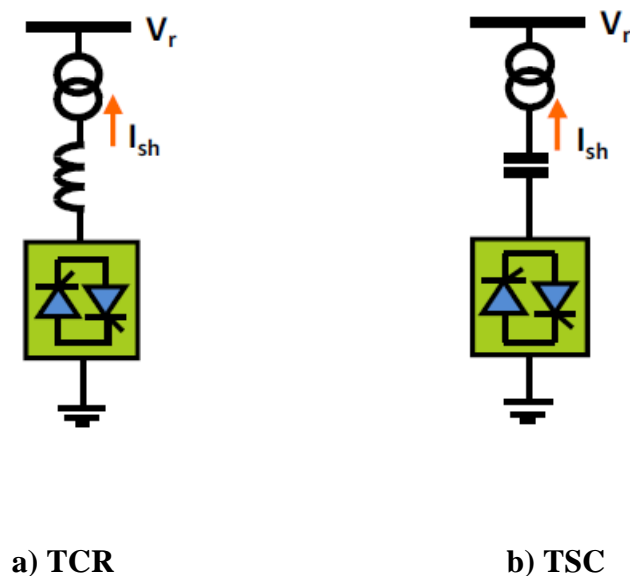


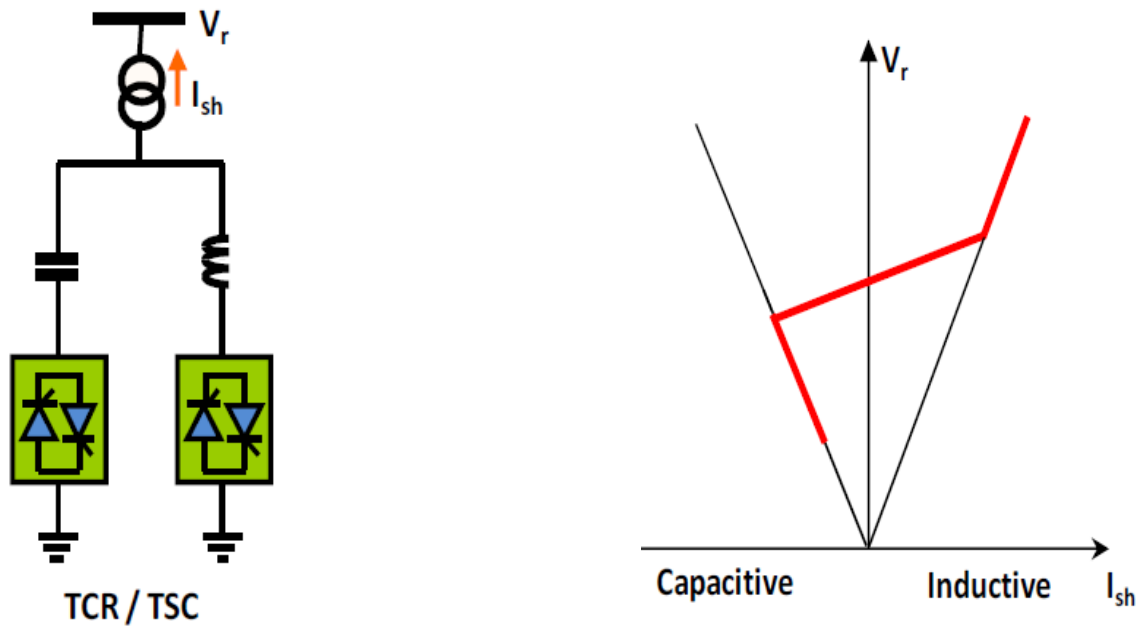
Figure I.3. Thyristor Switched Capacitor (TCR) et Thyristor Controlled Reactor (TSC) [39]

2. Condensateur commandé par thyristor ((TSC) Thyristor Switched Capacitor)

Il se compose d'un condensateur connecté en shunt qui est connecté en série avec des commutateurs à thyristors bidirectionnels (Fig I.3.b). L'impédance ou la réactance de ce dispositif est modifiée de manière progressive en commandant les thyristors dans une opération de conduction nulle ou complète. Ce contrôleur n'offre aucune harmonique, aucun transitoire et de faibles pertes.

3. Compensateur de var statique ((SVC) Static Var Compensator)

Les SVC est l'association des dispositifs TCR, TSC. Bancs de capacités fixes et filtres d'harmonique constitue le compensateur hybride (Fig. I.4.a) qui contrôle le flux de puissance dans le système de transmission et améliore la stabilité transitoire des réseaux électriques. Le premier exemple a été installé en 1979 en Afrique du sud. Ce contrôleur régule la tension à ses bornes en contrôlant la quantité de puissance réactive injectée ou absorbée par le système d'alimentation.



a) Schéma du SVC

b) Caractéristique d'un SVC

Figure.I.4. Static VAR Compensator SVC [39]

Lorsque la tension du système est faible, SVC génère la puissance réactive et lorsque la tension est élevée, elle absorbe la puissance réactive. La puissance réactive est modifiée en commutant les batteries d'inductances et de condensateurs triphasés. voir sur la figure. (Fig I.4.b) les trois zones de fonctionnement qui présente La caractéristique statique de SVC [17] :

- . Une zone où seules les capacités sont connectées au réseau.
- . Une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison de TCR et de TSC.
- . Une zone où le TCR donne son énergie maximale, les condensateurs sont

I.4. 1.2. Compensateur shunt à base de GTO thyristors:

Il s'agit du ASVC (Advanced Static Var compensator) qui a connu jusqu'à présent différentes appellations :

- STATCOM (Static Compensator).
- STATCON (STATIC CONDenser).
- SVG (Static Var Generator).
- SVC light.

Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70 mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connues un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte puissance.

I.4. 2. Dispositifs FACTS séries

En cela, divers dispositifs de compensation ou FACTS (qui peuvent être commutés ou contrôlés) sont connectés en série avec les lignes de transmission à des nœuds particuliers. Cette compensation donnera un meilleur contrôle du flux de puissance à travers la ligne et améliorera également la limite de stabilité dynamique du système d'alimentation.

La plupart du temps, les condensateurs sont installés en série avec les lignes. Le montant de la compensation varie en installant plusieurs batteries de condensateurs en série avec les lignes. Ceci est réalisé par des condensateurs contrôlés par thyristors.

Les techniques de condensateurs commutés commandés par thyristors (TCSC) et de condensateurs en série fixes (FSC) sont largement utilisées pour la compensation en série.

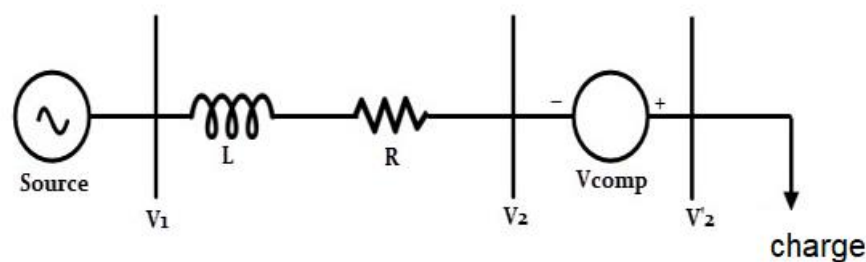


Figure I.5: Dispositifs FACTS séries [38]

1. Condensateur série contrôlé par thyristor (TCSC)

Il s'agit d'un compensateur de réactance capacitive. Il se compose d'une batterie de condensateurs série qui est connectée en parallèle avec un réacteur commandé par thyristor qui fournit une réactance capacitive série variable.

L'impédance totale du système peut être modifiée en modifiant l'angle de conduction des thyristors et, par conséquent, le circuit devient inductif ou capacitif. Si l'impédance totale du circuit est inductive, le courant de défaut est limité par ce contrôleur. Un modèle simple de TCSC est présenté dans la figure ci-dessous.

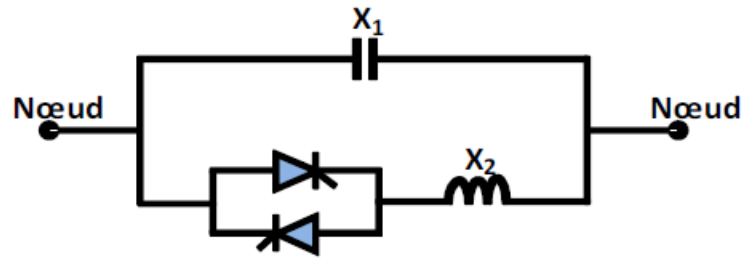


Figure I.5.1. Structure d'un Condensateur série contrôlé par thyristor (TCSC).

2. Réacteur commandé par thyristor de série (TCSR)

Il s'agit d'un compensateur de réactance inductif qui se compose d'un réacteur en série en parallèle avec un réacteur à thyristors commutés. Ce contrôleur fournit une réactance inductive variable douce (**Fig I.5.2**).

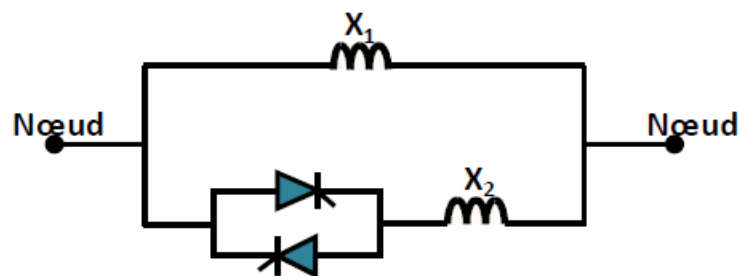


Figure I.5.2. Structure d'un Réacteur commandé par thyristor de série (TCSR).

Lorsque l'angle de tir des thyristors est de 180 degrés, le réacteur cesse de conduire et donc le réacteur non contrôlé est uniquement en série avec la ligne qui agit comme un limiteur de courant de défaut. Si l'angle est inférieur à 180 degrés, l'inductance nette (ou globale) diminue, la tension est ainsi contrôlée dans le réseau.

3. Compensateur synchrone série statique (SSSC)

C'est un type avancé de compensation de série de contrôle. Il produit la tension de sortie en quadrature avec le courant de ligne de telle sorte que la chute de tension réactive globale à travers la ligne augmente ou diminue. ce dispositif est capable d'échanger la puissance réactive et la puissance active (en insérant un système de stockage d'énergie), avec le réseau [18]. La **Figure I.5.3.** . Montre le branchement d'un SSSC sur la ligne de transport

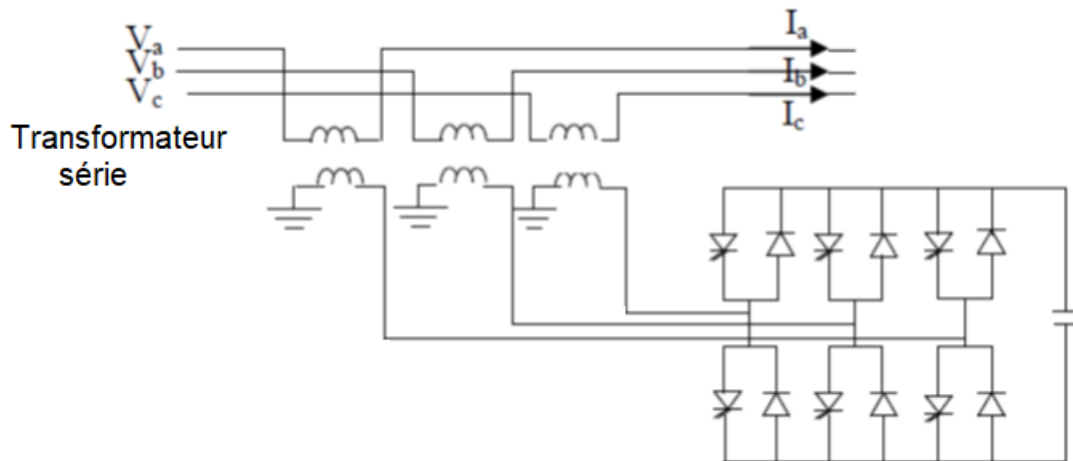


Figure I.5.3. Schéma de base Compensateur synchrone série statique (SSSC) [40]

I.4. 3. Dispositifs FACTS combinés série-parallèle :

Les dispositifs FACTS présentés ci-dessus permettent d'agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle). Par une combinaison des deux types de dispositifs (shunt et série), il peut également s'agir d'un contrôleur de flux de puissance unifié avec des éléments série et shunt. En général, les dispositifs combinés shunt et série injectent du courant dans le système avec la partie shunt de l'appareil, et injectent la tension dans la ligne avec la partie série de l'appareil. Donc il est possible d'obtenir des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément les différentes variables.

1. Contrôleur de flux de puissance unifié ((UPFC) Unified Power Flow Controller)

L'UPFC appartient à la catégorie des shunts et séries combinés appareils connectés et est illustré à la figure I.6.a. L'UPFC est une combinaison de compensateur statique (STATCOM) et d'un compensateur statique synchrone série (SSSC) qui est couplés via une liaison CC commune. Cette disposition permet le flux bidirectionnel de puissance réelle entre les bornes de sortie série du SSSC et les bornes de sortie shunt du STATCOM. Cela fournit une compensation de ligne série réelle et réactive simultanée sans source d'énergie électrique externe. Selon Gyugyi qui a présenté le concept de l'UPFC en 1990.

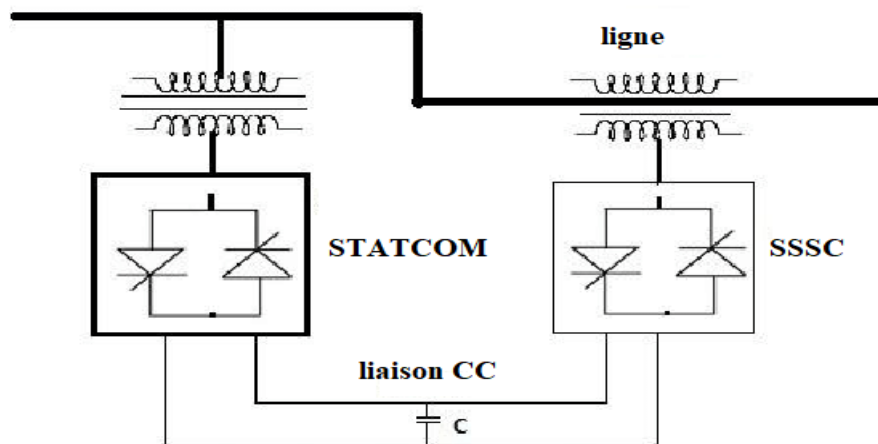


Figure I.6. a. Contrôleur de flux de puissance unifié ((UPFC) [41]

L'énorme avantage de l'UPFC est capable de contrôler la tension, l'impédance et l'angle de la ligne de transmission, contrôlant ainsi le flux de puissance réelle et réactive dans la ligne. Cela peut aussi être alterné entre les différentes fonctions : par exemple, la fonction shunt pourra être utilisée pour soutenir la tension alors que la partie série pourra être utilisée afin d'amortir les oscillations de puissances [19].

2. Le contrôleur de transit de puissance entre ligne ((IPFC) Interline Power Flow Controller)

Le contrôleur de flux de puissance interligne (IPFC) proposé est un nouveau concept pour la compensation et la gestion efficace du flux de puissance des systèmes de transmission multi lignes. Son principe est illustré à la figure (I.6.b).

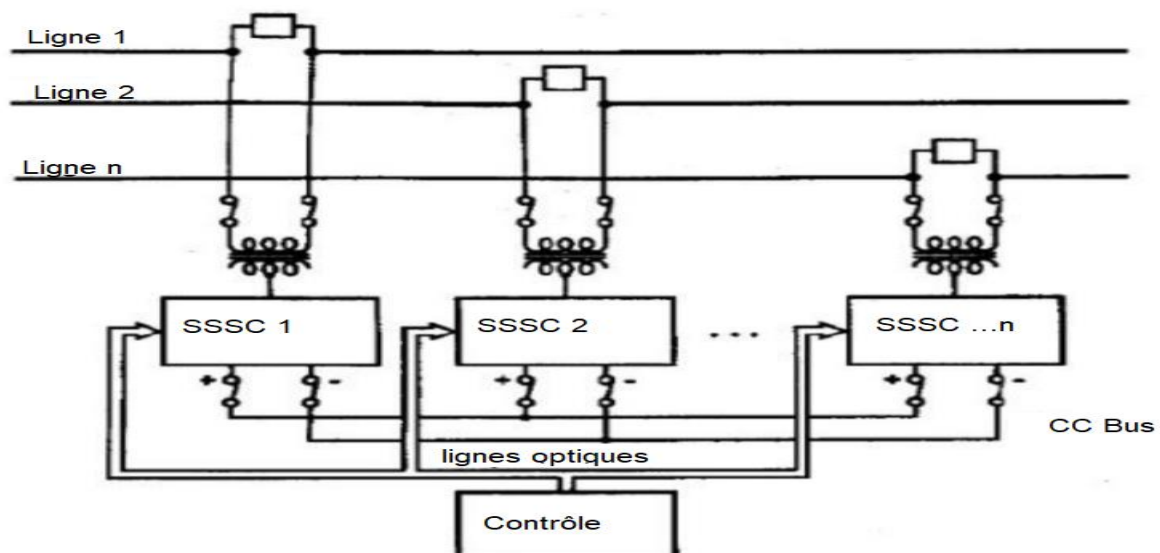


Figure I.6.b. Schéma du contrôleur de transit de puissance entre lignes [42]

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

Dans sa forme générale, l'IPFC emploie des plusieurs SSSC avec une liaison CC commune, chacun pour fournir une compensation en série pour une ligne sélectionnée du système de transmission. En raison de la liaison CC commune, n'importe quel SSSC au sein de l'IPFC est capable de transférer de la puissance réelle à n'importe quel autre et de faciliter ainsi le transfert de puissance réel entre les lignes du système de transmission. Étant donné que chaque SSSC est également capable de fournir une compensation réactive, l'IPFC est capable de réaliser une compensation globale de la puissance réelle et réactive du système de transport plaigues, de transférer la puissance des lignes surchargées vers les lignes sous-chargées, de compenser les chutes de tension réactive et la puissance réactive correspondante de la ligne, et d'augmenter l'efficacité du système de compensation contre les perturbations dynamiques [20].

I.5. Les possibilités offertes par la technologie FACTS

L'intérêt principal de la technologie FACTS pour les opérateurs de l'énergie électrique est d'ouvrir plus d'opportunités pour le contrôle de la puissance, et d'augmenter les capacités utilisables des présentes lignes sous les conditions normales. Tels que les impédances séries, impédances shunts, courant, tension, angle de phase. Comment on présente dans l'équation (1).

$$p = \frac{V_s V_r}{X} \sin \delta \quad (1)$$

V_r : La tension AC au point de connexion

V_s : La tension de sortie du compensateur

δ : Le Déphasage entre V_r et V_s

X : La Réactance de fuite du Transformateur de couplage

La technologie FACTS offrions plusieurs bénéfices on peut présenter comme suit :

-La puissance peut être contrôlée pour la quantité souhaitée de sorte qu'elle circule à travers les voies de transmission prescrites.

- Chargement des lignes de transmission à proximité de leurs limites thermiques, stationnaires et dynamiques

-Amélioration de la capacité de transfert de puissance entre les lignes de transmission interconnectées.

-Accroître la qualité de l'offre pour les industries sensibles.

-Amélioration de la fiabilité et de la disponibilité du système de transmission en limitant l'impact de multiples pannes. [21]

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

I.6. Exploitation des systèmes FACTS dans les réseaux électriques.

Les différents dispositifs FACTS présentés dans cette section possèdent tous leurs propres caractéristiques tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif sera donc utilisé pour répondre à des objectifs bien définis. Des considérations économiques entrant également dans le choix du type d'installation sont à discuter. Le tableau 1 synthétise les domaines d'applications des différentes technologies de FACTS.

Tableau I.1. Domaines d'applications des dispositifs FACTS

| DOMAINES | SITUATION INSTABLE | Résoudre le problème | Dispositifs FACTS |
|--------------------------------|--|--|--------------------------|
| Limite des tensions | Chute de tension à une charge extrême | Fournir de l'énergie Réactive | SVC, STATCOM |
| | | Réduire la réactance de la ligne | TCSC |
| | Surtension suite à une ouverture d'une grande charge | Absorption de l'énergie réactive | SVC, STATCOM |
| | Surtension à charge réduite | Absorption de l'énergie Réactive | SVC, STATCOM |
| | Chute de tension suite à un court-circuit | Augmenter la capacité de transport | SVC, STATCOM |
| Limite thermique | Surcharge des lignes de transport | Augmenter la capacité de transport | TCSC, SSSC, UPFC |
| Ecoulement de puissance | Distribution de la puissance sur des lignes en parallèle | Ajuster la réactance de la ligne | TCSC, UPFC, SSSC |
| | | Ajuster l'angle de transport | UPFC, SSSC |
| | Inverser l'écoulement de puissance | Ajuster l'angle de transport | UPFC, SSSC |
| Courts circuits | Les courants intenses des courts- circuits | Limitation des courants des courts- circuits | TCSC, UPFC |
| Stabilité | Puissance transmissible limitée | Réduire la réactance de la ligne | TCSC, SSSC |

I.7. Etude profonde d'un dispositif FACTS (STATCOM)

L'évolution progressive vers un réseau électrique plus intelligent demande de nombreuses avancées technologiques. Le contrôle de flux de puissance est un problème qui provient

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

Typiquement des réseaux de transport.

Il existe un dispositif flexible avec topologie universelle appelé contrôleur de transit de puissance statique compensateur " STATCOM ", qui sert surtout à contrôler le flux de puissance en régime permanent mais il présente aussi d'autres fonctionnalités telles que l'amélioration de la stabilité transitoire du réseau face aux événements, l'amortissement des oscillations dynamiques (habituellement de basse fréquence) et l'augmentation de la capacité de transport.



Figure I.7. Compensateur synchrone statique (STATCOM)

I.7. 1. Première invention de (STATCOM)

Le compensateur synchrone statique (STATCOM) est la deuxième génération de contrôleurs FACTS qui a une très application future prometteuse.

Le premier STATCOM commercial au monde (± 80 MVA, 154 kV) a été développé par Mitsubishi Electric Power Products, Inc. a été installé à la sous-station d'Inuyama au Japon en 1991. le premier SVC avec convertisseur de source de tension appelé STATCOM (Static Synchronous Compensator) est entré en service. Le STATCOM a une caractéristique similaire au condensateur synchrone, mais en tant que dispositif électronique, il n'a pas d'inertie et est supérieur au condensateur synchrone de plusieurs manières, telles qu'une meilleure dynamique, un coût d'investissement inférieur et des coûts d'exploitation et de maintenance inférieurs [22]. Le tableau I.2 répertorie quelques grandes échelles d'utilité STATCOM en fonctionnement

Tableau I.2.L'utilité de STATCOM

| | années installées | pays | capacité | niveau de tension | objectif | endroit |
|---|-------------------|-------|----------------|-------------------|---|---|
| 1 | 1991 | JAPAN | ± 80 MVA | 154 | système d'alimentation et stabilisation de la tension | Inumaya substion |
| 2 | 1992 | JAPAN | 50 MVA | 500 | Compensation réactive | Shin shinano substation,nagoan |
| 3 | 1995 | USA | ± 100 MVA | 161 | pour réguler la tension du bus | Sullivan substation in TVA power system |
| 4 | 2001 | UK | 0 à +125 MVA | 400 | Compensation réactive | East claydon 400 KV substation |
| 5 | 2001 | USA | -41 à +133 MVA | 115 | Compensation réactive lors de situations critiques | Velco Essex substation |
| 6 | 2003 | USA | +100 MVA | 138 | Contrôle dynamique pendant les conditions de charge de pointe | SDG et talega substation |

I.7. 2.Compensateur statique synchrone

STATCOM est un onduleur de source de tension ou un convertisseur de source de tension qui convertit la tension d'entrée CC donnée en tension de sortie CA pour compenser la puissance réactive requise et le système d'alimentation actif. C'est un générateur synchrone statique, il est exécuté comme un compensateur VAR statique, injectant des variables de début ou de retard dans le système. Un STATCOM est construit avec des thyristors avec une capacité de désactivation comme GTO ou aujourd'hui IGCT ou avec de plus en plus d'IGBT.

STATCOM utilise des dispositifs semi-conducteurs de puissance auto-commutés. Dans sa forme la plus simple, ce dispositif est constitué d'un VSC, d'une source de tension continue et d'un transformateur de couplage avec le réseau .La structure est illustrées à la figure I.8.a.

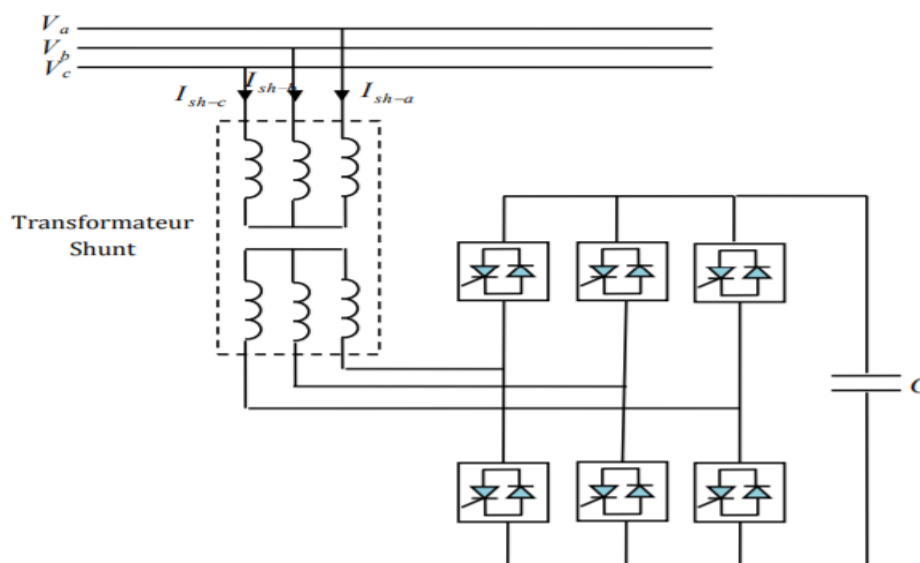


Figure I.8.a. Schéma de base d'un STATCOM

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

Le STATCOM placé sur une ligne de transport via une réactance qui n'est que celle du transformateur de couplage peut être modélisé à n'importe quel régime comme une source de tension shunt placée entre deux régions. Pour l'échanger d'énergie réactive avec le réseau Cette échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de l'onduleur [23].

L'avantage d'un STATCOM est que la fourniture de puissance réactive est indépendante de la tension réelle au point de connexion. Ceci peut être vu dans le diagramme pour les courants maximum étant indépendants de la tension la figure. I.8. b. Cela signifie que même pendant les situations d'urgence les plus graves, le STATCOM conserve sa pleine capacité.

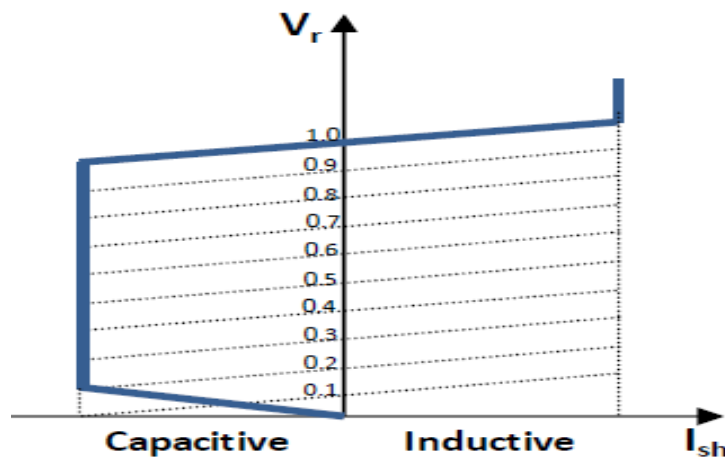


Figure I.8.b. Caractéristiques V I du STATCOM

Pourquoi on utilise le (STATCOM) dans les réseaux ?

Le STATCOM offre de nombreuses fonctionnalités techniques on présente comme suivants :

- . La réponse est très rapide avec Un contrôle de l'énergie réactive précis et continu.
- . Les composants passifs maladroits ne sont pas utilisés et prennent donc moins de place.
- . La perte de synchronisation et de maintenance est moindre.
- . Le contrôle et la régulation de la tension avec La réduction des surtensions temporaires.

I.7. 3. Modèle de flux de puissance du compensateur synchrone statique

Le compensateur synchrone statique (STATCOM) est représenté par une source de tension synchrone avec des limites d'amplitude de tension minimale et maximale. L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de l'onduleur V_{sh} , qui est en phase avec la tension du jeu de barre là où le STATCOM est connecté V_r . Dans un tel cas, la puissance réactive générée ou absorbée correspondrait à la limite violée.

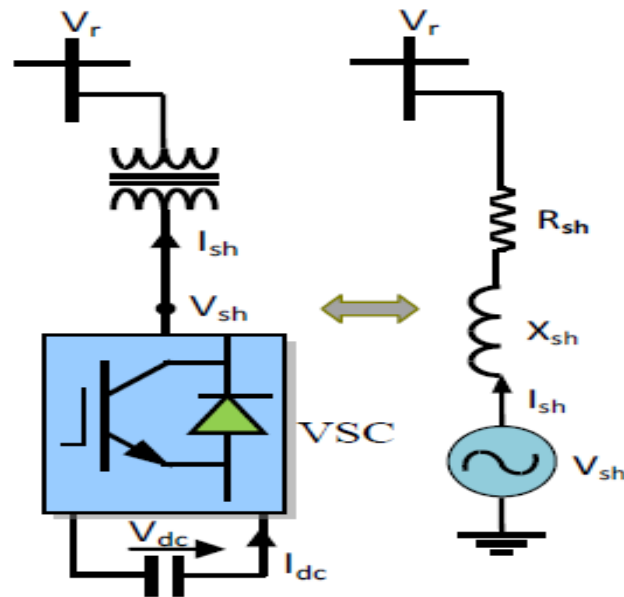


Figure I.8.c. Circuit équivalent du STATCOM [43] [44]

Sur la base de la connexion de Circuit équivalent du STATCOM qui illustrée à la figure I.8.c, Les puissances active et réactive qui transitent entre le STATCOM et le réseau sont quantifiées par les équations suivantes :

$$p = \frac{V_s V_r}{X} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_r}{X_{sh}} (V_r - V_{sh} \cos \delta) \quad (2)$$

Avec

V_r : La tension AC au point de connexion

V_{sh} : La tension de sortie du STATCOM

δ : Déphasage entre V_r et V_{sh}

X_{sh} : La Réactance de fuite du Transformateur de couplage

A partir des équations (1) et (2), on peut constater que lorsque les deux tensions sont en phase ($\delta = 0$), il n'y a qu'un écoulement de puissance réactive, la valeur de la puissance échangée ne dépendant que de l'amplitude des deux tensions V_r et V_{sh} .

On peut envisager trois cas possibles en considérant toujours ($\delta = 0$) :

- Si $V_{sh} > V_r$: le courant capacitif I_{sh} qui circule à travers la réactance est en avance de 90 degrés par rapport à la tension du nœud, fig I.9.a, le STATCOM génère de la Puissance réactive au nœud de connexion, c'est-à-dire la tension de ce dernier Augmente. (Compensation capacitive).

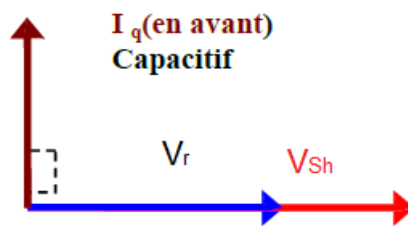


Figure I.9.a : Diagramme de Fresnel lorsque $V_{sh} > V_r$

- Si $V_{sh} < V_r$: un courant inductif I_{sh} s'établit entre les deux sources de tension à travers la réactance X_{sh} , ce courant est en retard de 90 degrés par rapport à V_r , Fig. **I.9.b**, le STATCOM absorbe de la puissance réactive, par conséquent, la tension du nœud V_r diminue. (compensation inductive)

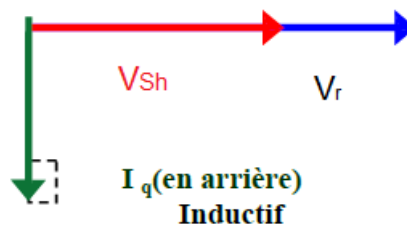


Figure. I.9.b . Diagramme de Fresnel lorsque $V_{sh} < V_r$

- Si $V_r = V_{sh}$: le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie. On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrées. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur. Donc pas de génération ni d'absorption de puissance réactive.

Le courant maximum Dans STATCOM est donné par le différence de tension entre la tension aux bornes du convertisseur et la tension du système d'alimentation, et par la réactance de phase. Dans des conditions stationnaires et en ignorant les pertes, l'échange de puissance active et le courant continu sont nuls. Figues. **I.10.1**.

Montre les courbes puissance-angle de la machine pour trois cas : le STATCOM fonctionne à sa pleine capacité capacitive ($I_S = I_{SMAX}$) ainsi qu'à pleine puissance inductive ($I_S = I_{SMIN}$) et sans le STATCOM ($I_S = 0$) [24].

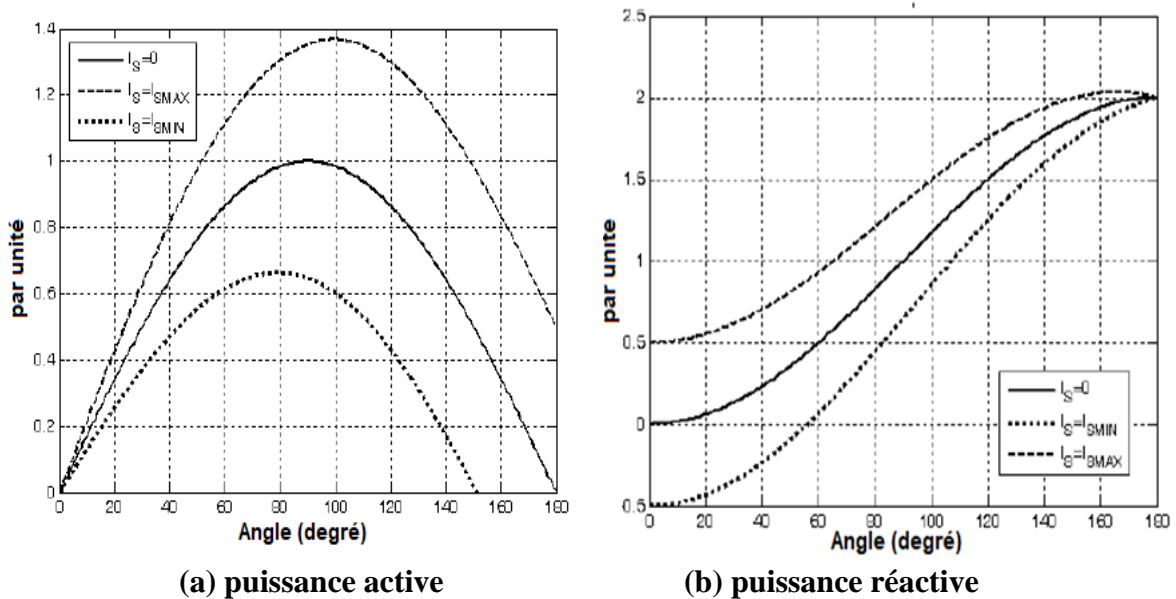


Figure I.10.1. Courbe de l'angle de puissance avec un STATCOM. [24]

La figure I.10.2 montre l'amplitude de la tension du bus STATCOM pour trois cas. En pratique, le STATCOM peut fonctionner n'importe où entre les deux courbes. On constate que pour un δ donné, la valeur de PE peut être contrôlée en ajustant I_S . Le courant réactif I_S peut être réglé dans sa capacité maximale et ses limites inductives même dans des conditions de tension fortement réduite.

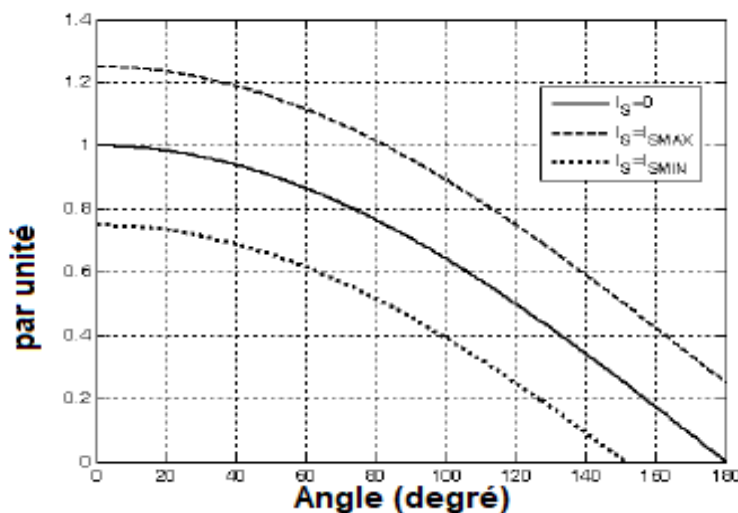


Figure I.10.2. Amplitude de la tension du bus STATCOM. [24]

I.7. 3. Principes de contrôle STATCOM

La commande STATCOM se compose d'une boucle de régulation de tension continue, d'une boucle de régulation externe qui définit le courant réactif de référence, $I_{q\ ref}$, sur la base de

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

l'équation de statisme et d'une boucle de courant interne qui règle la tension de sortie du convertisseur, V_{st} , afin d'obtenir le courant souhaité sur la figure I.11.

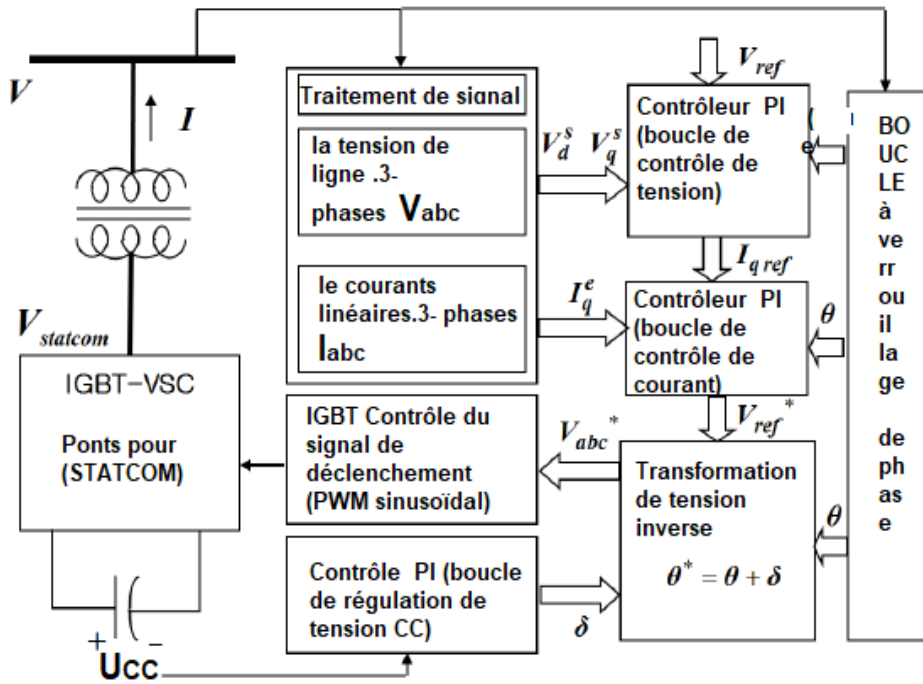


Figure I.11. Schéma de commande de base pour le STATCOM basé sur un convertisseur alimenté en tension.

D'autres éléments de la commande comprennent la boucle à verrouillage de phase pour assurer la synchronisation avec le système à courant alternatif et la mesure et le filtrage passe-bande de l'ensemble de phases instantanées de tensions et de courants de ligne.

Pour un contrôle approprié du STATCOM, divers signaux système doivent être traités et les informations nécessaires sont extraites. La transformation de tension et de courant est quelque peu différente. De plus, ils sont filtrés afin d'extraire le composant fondamental, éliminant les harmoniques qui résultent du Modulation de largeur d'impulsion (Pulse-width modulation (PWM)) commutation.

La petite quantité de puissance réelle requise pour la régulation de la tension du bus continu est contrôlée en imposant un petit déphasage entre la tension de sortie du convertisseur et la tension du système alternatif nécessaire pour charger (ou décharger) le condensateur de stockage.

Les références de courant réel interne et externe combinées pour les pertes de commutation du convertisseur et la compensation de puissance active détermineraient l'angle de la tension de sortie générée et donc la puissance réelle échangée avec le système à courant alternatif. En conséquence, l'angle δ est additionné à θ et ensuite l'angle de référence, le résultat de la

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

sommation, représente le signal de synchronisation souhaité. La comparaison du signal de référence avec la composante réactive de la sortie de la transformation de Park produit le signal d'erreur.

Le signal d'erreur de courant réactif est converti en l'amplitude de la tension de sortie du convertisseur souhaitée après le contrôleur PI approprié. Ce schéma de contrôle interne pourrait faire fonctionner le convertisseur avec une alimentation CC qui est réglée par la boucle de régulation CC.

I.8. Placement optimal des dispositifs FACTS

Un grand nombre de travaux de recherche qui présente l'emplacement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique par :

- Les régimes de fonctionnement pour lesquels les dispositifs sont installés ;
- Les modèles adoptés pour les dispositifs FACTS ;
- Les méthodes et les critères d'optimisation ;
- La taille et la topologie des réseaux utilisés dans les simulations.

Donc Ils se différencient principalement les uns des autres.

I.8.1. Certaines recherches sur les appareils FACTS

Pour un placement optimal d'un nombre spécifique d'appareils FACTS. Certaines des recherches rapportées sur les appareils FACTS sont rapportées ici [24]

Dans [25], une méthode est présentée pour décider des emplacements optimaux de déphaseur contrôlé par thyristor (TCPS), afin de minimiser les pertes de puissance active des lignes de transmission et pour augmenter la stabilité du système électrique.

Dans ce travail, la minimisation des pertes de puissance est basée sur le facteur de distribution du déphaseur ; de plus, la sélection du placement des déphaseurs sont effectuée en fonction de l'influence de chaque dispositif sur les pertes de puissance active des lignes de transmission.

Dans [26], le condensateur en série contrôlé par thyristor (TCSC) qui est modélisée comme une réactance variable en mode capacitif est utilisée pour maximiser la capacité de transfert disponible (Available Transfer Capacity (ATC)).

Le nombre de TCSC est limité à deux appareils et le montant de la compensation est limité à 60%. L'algorithme génétique (Genetic Algorithm (GA)) est utilisé pour déterminer le placement et la compensation optimaux.

Dans [27], un GA est utilisé pour déterminer le placement optimal du Unified Power Flow Controller (UPFC) afin de maximiser la capacité de charge du système. Le placement de l'UPFC est déterminé pour différents situation des charges actives et réactives sur le réseau. Le nombre de Les UPFC sont augmentés tant que la capacité de charge du système est considérablement augmentée. Augmentation considérable de l'objectif la fonction n'est pas quantifiée par les auteurs. Ainsi, il n'est pas clair comment de nombreux UPFC doivent être appliqués.

Dans [28], un algorithme génétique (GA) est utilisée pour déterminer le meilleur placement d'une donnée ensemble de déphaseurs en fonction du coût de production et du retour sur

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

investissement des appareils. Le problème de la sélection dès le meilleur nombre de déphaseurs n'est pas pris en compte ; cependant les résultats du placement optimal de un, deux et trois les déphaseurs sont comparés.

Les auteurs de [29] utilisent une GA pour rechercher le placement optimal de les dispositifs FACTS multi-types dans un système d'alimentation se composent de TCSC, StaticCompensateur Var (SVC), TCPS et tension contrôlée par thyristor Régulateur (Thyristor Controlled Voltage Regulator TCVR). Le numéro de chaque appareil FACTS a été attribué avant que le processus d'optimisation ne soit résolu. L'optimisation est effectuée pour déterminer trois paramètres, c'est-à-dire le placement des appareils, leurs types et leurs tailles. La capacité de charge du système est utilisée comme indice des performances du système d'alimentation.

Dans [30], TCPS et TCSC sont utilisés simultanément et individuellement pour maximiser la capacité totale de transfert (e Total Transfer Capacity TTC). La solution optimale est déterminée à l'aide de la programmation linéaire en nombres entiers mixtes (Mixed Integer Linear Programming MILP). Uniquement dans le cas individuel, le nombre d'appareils FACTS augmente dans la mesure où la capacité de chargement du système est considérablement améliorée. Dans ce travail, l'amélioration considérable de la fonction objective n'est pas quantifiée ; donc le point d'arrêt pour augmenter le nombre d'appareils FACTS n'est pas clair. Dans le cas simultané, le Nombre de chaque appareil est supposé connu

Les auteurs de [31] localisent individuellement un statique synchrone statique Compensateur (STATCOM) et un UPFC considérant le changement du profil de tension des bus en raison de l'augmentation de la charge du système. Le bus approprié pour l'installation d'appareils FACTS est le bus dans lequel la chute de tension est supérieure à celle des autres bus.

Dans [32], un UPFC et un Interline Power Flow Controller (IPFC) sont utilisés pour maximiser la capacité de transfert de puissance. La programmation linéaire (Linear Programming LP) est utilisée pour déterminer leur emplacement optimal et la taille de Appareils FACTS.

Les auteurs de [33] localisent individuellement un TCSC, quatre EPTC et un UPFC pour réduire la congestion. Utilisation simultanée de deux TCPAR et deux UPFC sont également étudiés. La fonction objective est la somme du coût total de production et du coût d'utilisation des appareils FACTS. La fonction objective est minimisée via la méthode LP.

Les auteurs de [34] localisent individuellement TCSC, TCPS et SVC pour gérer la congestion. La fonction objective est la maximisation de la protection sociale. Le problème d'optimisation est résolu par Mixed Programmation non linéaire entière (MINP). Le nombre de chaque FACTS l'appareil est augmenté jusqu'à ce que la fonction de l'objectif soit considérablement améliorée. Cependant, l'amélioration de l'objectif n'est pas quantifiée.

Dans [35], les impacts d'une combinaison de dispositifs FACTS, c'est-à-dire SVC, SVC avec TCPS et SVC avec UPFC, sur la maximisation de l'ATC sont étudiés. On suppose que les placements de FACTS

Les appareils sont connus.

Dans [36], SVC et UPFC sont utilisés individuellement pour compenser la puissance réactive et pour minimiser le coût total de production, respectivement. Le placement du SVC pour la

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

compensation réactive est déterminé en tenant compte de la réduction du coût marginal réactif. L'emplacement de l'UPFC était connu avant que le processus d'optimisation ne soit résolu. L'impact de l'UPFC sur le coût total de production est étudié dans plusieurs scénarios.

Dans [37], la combinaison des dispositifs FACTS et la transmission Les droits sont pris en compte pour la gestion de la congestion. Deux marchés les modèles, c'est-à-dire les contrats bilatéraux et multilatéraux, sont étudiés. Deux types d'appareils FACTS, à savoir un TCSC et un SVC, sont appliqués et ils sont modélisés comme réactance variable. Deux cas sont étudiés pour TCSC. Dans le premier cas, le TCSC est introduit en mode inductif pour les lignes encombrées. Dans le second cas, TCSC en Le mode capacitif est introduit dans les lignes faiblement chargées.

À la fois cas, l'emplacement optimal du TCSC est déterminé par une méthode d'essai et d'erreur. SVC est introduit dans différents bus et son l'emplacement est déterminé en observant le taux d'amélioration de la fonction objectif. La fonction objective est la minimisation

Des écarts par rapport aux demandes de transaction faites par le marché participant.

En bref, dans les recherches précédentes, plusieurs objectifs tels que la minimisation des pertes de transmission, la maximisation du bien-être social, la minimisation du coût total de production, etc.

Sont pris en compte pour un placement optimal des appareils FACTS sans présenter un algorithme pour déterminer le nombre optimal d'un dispositif FACTS appliqué.

I.8. 2. Coût des dispositifs FACTS

Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que les performances requises, la puissance de l'installation, le niveau de tension du système ou encore la technologie du semi-conducteur utilise. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation.

De manière générale, les avantages techniques apportés par les FACTS doivent répondre à d'autres critères qui sont liés au coût lors de l'installation de l'équipement

I.9.conclusion :

Face aux évolutions récentes des réseaux électriques, à l'augmentation significative des interconnexions ainsi qu'aux contraintes économiques, la maîtrise des flux d'énergie qui assure la stabilité des réseaux électriques devient plus importante.

Dans ce chapitre, nous avons commencé notre étude en définissant les différents dispositifs de contrôle des réseaux électriques (compensation traditionnelle et nouvelle technologie connue sous le nom de dispositifs FACTS pour les systèmes de transmission CA flexibles) qui dépendent de l'électronique, de la capacité à résoudre les problèmes de stabilité du réseau et

Chapitre I. Les dispositifs de contrôle des réseaux électriques

de leur rôle, après avoir mentionné chaque type différent avec son propre principe de fonctionnement par schémas présentatifs qui caractérise chaque compensateur.

Nous avons également étudié STATCOM plus en détail, son fonctionnement, sa planification, ses avantages et ses contributions au réseau. Pour améliorer les performances dynamiques du système électrique tels que ;

- Augmenter la capacité du transfert du système de transmission ;
- Répartition des puissances dans les réseaux électriques à part égale et minimisation des pertes.
- Améliorer la stabilité des réseaux électriques la qualité de service.

Chapitre II.

Les systèmes électriques

Chapitre II. Les systèmes électriques

II.1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, les systèmes électriques dans beaucoup de pays industrialisés se sont développés et ont été exploités de façon centralisée. C'est toujours le cas dans de nombreux pays. La production électrique est souvent liée à des emplacements géographiques adéquats (sources d'eau, impératifs techniques, etc.). Là où cette production électrique est centrée autour de centrales à grande capacité de production (centrales nucléaires, hydrauliques, etc.), L'énergie est ensuite acheminée vers les grands centres de consommation à travers un réseau de "lignes aériennes et de câbles, souvent à de grandes distances et à des niveaux de tension plus au moins importants. L'énergie est produite sur des sites spécifiques (centrales électriques) et est souvent utilisée dans des centres de consommation éloignés des sites de production (agglomérations urbaines, concentrations industrielles, etc.). Par conséquent, il est nécessaire de produire et de transmettre cette énergie aux lieux et aux heures de consommation.

Le système électrique représente le plus grand défi d'infrastructure dans tous les pays du monde. Que ce soit mesuré en termes de capacité de production ou de consommation d'électricité, s'il est important d'augmenter le financement du développement des infrastructures, cela doit s'accompagner d'améliorations de la qualité et de la durabilité des infrastructures. Fournir une infrastructure économiquement efficace, socialement inclusive, sûre, résiliente et durable nécessite l'intégration de concepts de qualité tout au long du cycle de vie du projet, de la planification et de la conception de faisabilité à la technologie, l'exploitation et la construction. Un bon entretien.

Où Le système électrique représente les centres de production, les centres de consommation et les équipements de transport, mais sa représentation ne prend pas en compte les détails de ces composants. Par exemple, un centre de production sera représenté par une machine génératrice, un centre de consommation par une charge, etc. ... Le système électrique est l'ensemble de tous les composants qui fournissent de l'énergie au consommateur et comprend donc le réseau électrique avec le détail de tous ses composants (centrale de production, réseau de distribution, etc.). La gestion d'un tel système est très complexe pose de nombreux problèmes. Cependant, il convient de veiller à ce que le réseau de transport remplisse au mieux son rôle en gardant à l'esprit qu'il est plus facile de distribuer une énergie de haute qualité dans les étapes finales (aux consommateurs) si elle est transportée en amont de manière satisfaisante.

II.2. Définition de la production d'énergie électrique

L'énergie électrique est un type d'énergie disponible dans la nature, qui peut être fournie par frottement et par la foudre, et elle peut également être obtenue par de nombreuses méthodes différentes telles que des méthodes chimiques telles que des batteries, dans lesquelles le

Chapitre II. Les systèmes électriques

courant est continu, ou en convertissant l'énergie de mouvement en énergie électrique. Dans lequel le courant est alternatif ou continu.

L'énergie électrique est l'une des formes d'énergies importantes utilisées dans la plupart des domaines, dont nous ne pouvons pas nous passer dans notre vie quotidienne dans les usages domestiques tels que le chauffage, l'éclairage, l'utilisation d'appareils électriques à la maison et tous les autres domaines, tels que le commerce, l'industrie, les domaines scientifiques, les communications et autres.

II.3. Description des technologies de production d'électricité

On décrit les Différents types de production d'électricité considérées dans en illustrant les principes de base de chaque forme de production d'électricité, les sous-types conventionnels de chaque technologie, ainsi que leur application commune et leurs caractéristiques technologiques spécifiques [45].

Plusieurs types de générateurs d'énergie se développent dans le monde sur la base d'unités de production traditionnelle, de système à énergie renouvelable. Les différentes technologies de production d'énergie appartenant à deux groupes sont :

- **Les sources d'énergie traditionnelle (le modèle centralisé)**

Ce modèle est caractérisé par deux principaux facteurs qui sont [46] :

-L'écoulement d'énergie : elle coule toujours à partir des centrales vers le, consommateurs d'électricité à travers le système de transport et de distribution.

- Le flux d'information : le gestionnaire du réseau reçoit les données de consommation disponibles, et envoie des commandes aux points de génération, afin d'équilibrer la production électrique. Ce type de source d'énergie été basé sur les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) ou du nucléaire.

- **Les sources d'énergie renouvelable (le modèle décentralisé).**

Ce modelé a toujours été basé sur le vent et sur l'énergie solaire

II.3.1. Les sources d'énergie traditionnelle.

II.3.1.1. Énergie hydroélectrique

Les centrales hydroélectriques (EH) utilisent l'énergie potentielle qui est incorporée dans une masse d'eau en raison de son élévation et la convertit en électricité. Ainsi, l'eau qui coule fait tourner une turbine qui fournit l'énergie mécanique pour entraîner un générateur. Le concept simple d'un Énergie hydroélectrique conventionnel se reflète également dans ses éléments de base qui sont : le barrage qui retient l'eau ; les chambres d'admissions ...

la turbine, qui est tournée par l'eau et reliée au générateur par un arbre, alors que les petits projets n'utilisent souvent qu'une seule turbine et les projets à grande échelle utilisent un

Chapitre II. Les systèmes électriques

certain nombre de turbines ; le générateur qui produit un courant alternatif (AC); le transformateur qui convertit le courant alternatif en tensions plus élevées voir la figure II.1 .

Ainsi que les lignes de transport et l'écoulement de l'eau Les centrales hydroélectriques constituent une technologie entièrement commerciale, mature et fiable, qui est mise en œuvre partout dans le monde. [47]

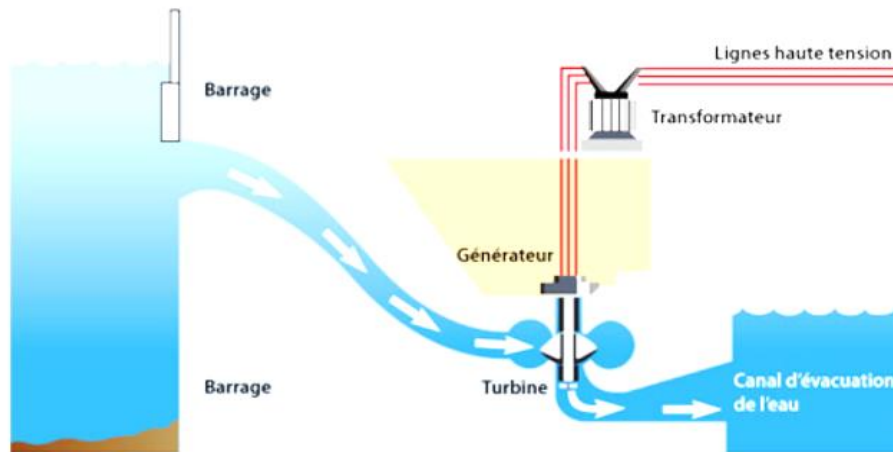


Figure II.1 .centrales hydroélectriques

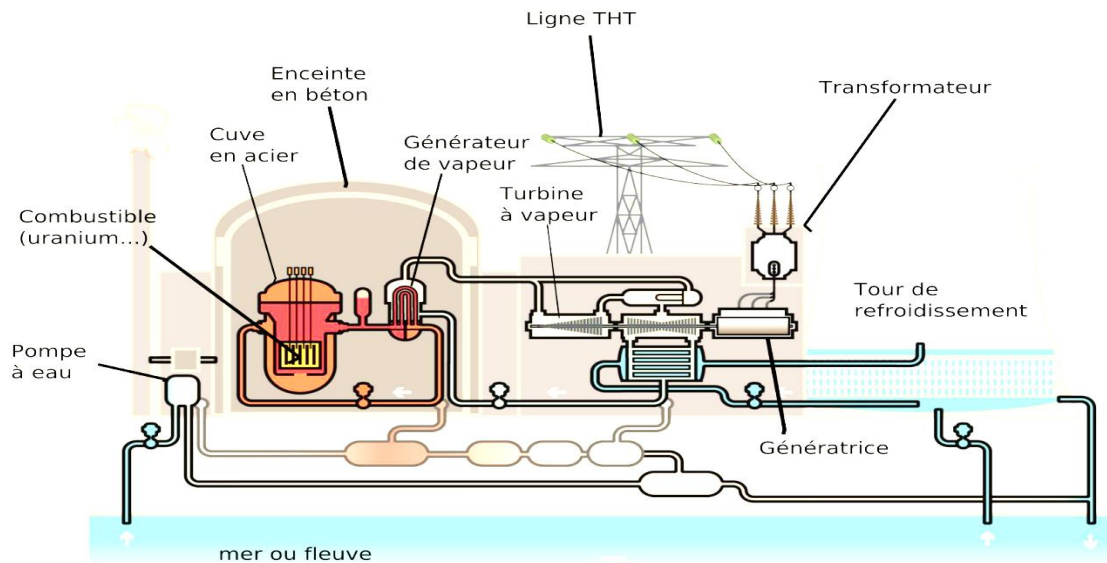
II.3.1.2. Les centrales nucléaires

Les centrales nucléaires (centrales nucléaires) sont basées sur l'énergie thermique qui est libérée par les réactions de fission de l'uranium. Un fluide caloporteur, parfois appelé «fluide de refroidissement du réacteur», retire constamment l'énergie thermique de la réaction de fission.

Le fluide entraîne alors directement un générateur d'électricité à turbine ou transfère la chaleur à un autre fluide (eau ou vapeur) qui alimente la turbine.

À cet égard, les centrales nucléaires sont très similaires aux centrales thermiques conventionnelles basées sur le cycle de Rankine utilisant de l'eau ou de la vapeur, mais certaines sont également basées sur le cycle de Brayton utilisant de l'hélium ou du dioxyde de carbone (voir figure II.2)

Chapitre II. Les systèmes électriques



La figure II.2 .centrales nucléaires

II.3.1.3. Les centrales électriques au gaz

Les centrales électriques au gaz utilisent l'énergie cinétique du mouvement d'un gaz en mouvement ou l'énergie potentielle d'un gaz sous pression pour produire de l'électricité via une turbine à gaz. La plupart des centrales électriques au gaz utilisent le gaz naturel comme combustible, tandis que d'autres gaz et combustibles pourraient également être utilisés, y compris le mazout distillé, l'hydrogène et les gaz produits par gazéification, comme les gaz dans les centrales électriques IGCC.

Le gaz naturel est généralement extrait des champs de gaz avec le méthane composant principal (environ 70 à 90%) et d'autres composants, tels que l'éthane, le propane ou le butane (jusqu'à 20%) et de petites quantités de dioxyde de carbone (jusqu'à 8%), l'oxygène, l'azote et le sulfure d'hydrogène.

Normalement avant le transport ou l'utilisation, le gaz naturel est nettoyé de ses impuretés et est alors appelé gaz naturel sec. Le gaz naturel peut être transporté par canalisations ou, sous forme de gaz naturel liquéfié (GNL), sans canalisations.

La partie la plus importante d'une centrale électrique au gaz est la turbine à gaz. La turbine à gaz moderne se compose d'un compresseur, d'une chambre de combustion et d'un étage de turbine qui est en principe une motrice thermique thermodynamique.

Le compresseur aspire et comprime l'air. L'air haut pression pénètre alors dans la chambre de combustion où il est mélangé au gaz naturel et brûlé. Ce processus chauffe l'air jusqu'à 1600 ° C et crée également des NOx. Le gaz de combustion chaud pressurisé entre alors dans l'étage de turbine et fait tourner les aubes de la turbine. Les lames rotatives remplissent deux fonctions :

Chapitre II. Les systèmes électriques

Premièrement, ils entraînent le compresseur pour aspirer encore plus d'air sous pression dans la chambre de combustion et, deuxièmement, ils font tourner le générateur pour produire de l'électricité [48]

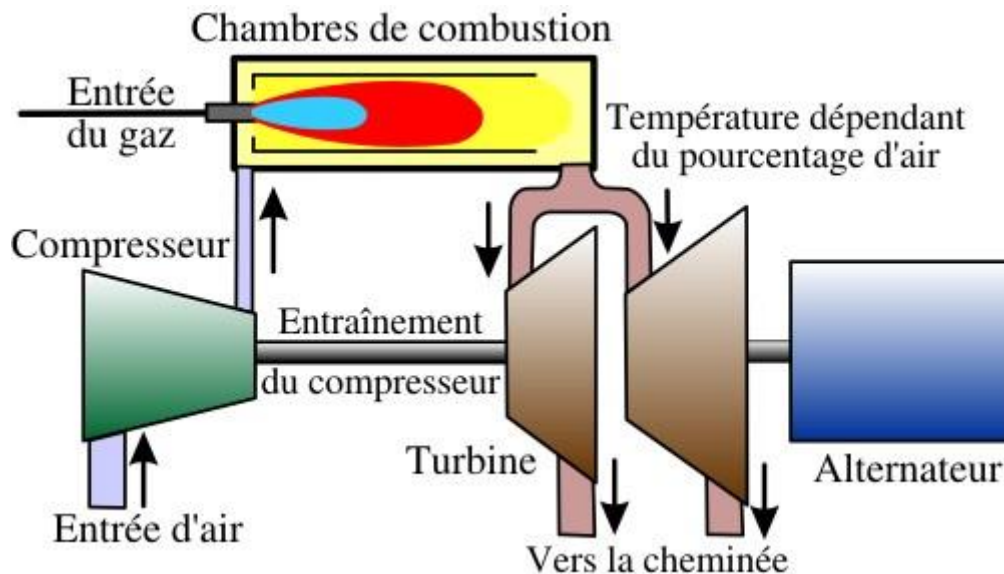


Figure II.3. Centrales électriques au gaz

II.3.1.4. Les centrales électriques au charbon

Les centrales électriques au charbon convertissent l'énergie chimique incorporée dans le charbon en chaleur, c'est-à-dire que le combustible est brûlé et que la chaleur libérée pendant la combustion est capturée. La chaleur est ensuite utilisée pour générer de la vapeur qui entraîne un générateur de turbine à vapeur pour produire de l'électricité.

Une centrale électrique au charbon conventionnelle comprend les éléments suivants composants: un système de manutention du combustible, qui transforme le charbon sous une forme pouvant être brûlée (généralement en broyant le charbon); un système de combustion avec la chaudière, où le charbon brûlé par addition d'air et la chaleur est capturée par des tubes remplis d'eau à l'intérieur de la chaudière; un système de turbine à vapeur, qui se compose souvent de plusieurs turbines pour haute pression

(HP), pression intermédiaire (IP) et basse pression (LP) et qui convertit la chaleur contenue dans la vapeur en énergie mécanique; un condenseur, qui condense la vapeur de sortie de la turbine BP en eau; un système d'épuration des gaz de combustion, qui élimine certaines impuretés, telles que le dioxyde de soufre (SO_x), l'oxyde d'azote (NO_x) et

les métaux lourds comme restes du processus de combustion, avant que les gaz de combustion ne soient rejetés dans l'atmosphère ; et un générateur, qui est couplé à la turbine via un arbre de turbine et convertit le mouvement mécanique rotatif provenant de la turbine en électricité (AC) voir figure II.4..

Chapitre II. Les systèmes électriques

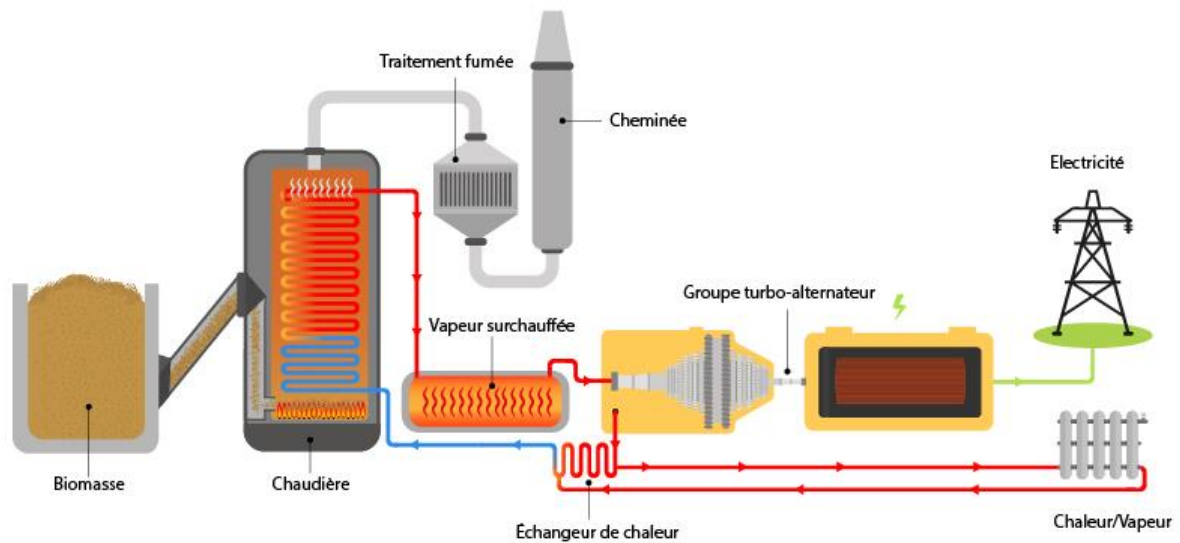


Figure II.4. Centrales électriques au charbon

II.3.1.5. L'énergie au fioul

L'énergie chimique incorporée dans le pétrole peut être utilisée de différentes manières pour produire de l'électricité. Il existe trois types de base de centrales électriques au mazout basées sur les systèmes à vapeur conventionnels, la turbine à combustion ou l'utilisation d'un moteur diesel.

Centrales au mazout basé sur un système à vapeur conventionnel Ce type de centrales électriques est similaire aux centrales au charbon utilisant la technologie des chaudières. Ils fonctionnent selon les mêmes principes et caractéristiques ainsi qu'avec la même composition que les centrales à charbon, mais en remplaçant le charbon comme combustible. Cependant, leur stockage et leur alimentation en carburant sont moins complexes. Centrales au fioul utilisant une turbine à combustion en parallèle, au fioul.

Les centrales électriques utilisant une turbine à combustion sont similaires aux OCGT ou CCGT au gaz, mais remplacent le gaz naturel par du mazout pour l'allumage de l'air haute pression dans la chambre de combustion de la turbine à gaz.

Centrales à moteur diesel Dans les centrales à moteur diesel, un mélange air-carburant est introduit dans un cylindre et enflammé. Cela provoque une explosion contrôlée dans le cylindre et l'impulsion haute pression force le gaz dans le cylindre à se dilater, ce qui déplace un piston. Le moteur est directement connecté à un générateur qui convertit l'énergie mécanique en électricité. Les moteurs diesel ont des rendements compris entre 30 et 48%, tandis que les moteurs plus gros ont des rendements plus élevés. Les moteurs diesel peuvent brûler une large gamme de carburants, y compris les biocarburants et les mazouts lourds de mauvaise qualité, et peut atteindre 65 MW (voir la figure II.5).

Chapitre II. Les systèmes électriques

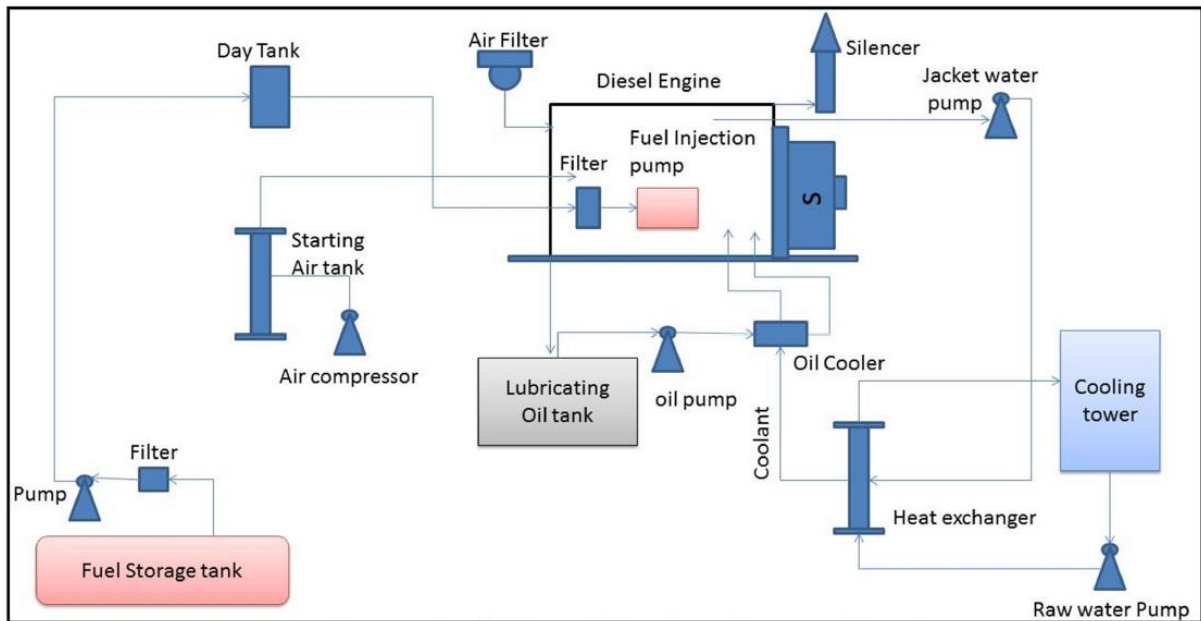


Figure II.5. Centrales au fioul

II.3.2. Les sources d'énergie renouvelable.

II.3.2.1. Technologies de l'énergie solaire

Il existe deux principaux groupes de technologies utilisées pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire : les cellules photovoltaïques (PV) convertissent directement le rayonnement solaire en électricité ; Les centrales solaires à concentration (CSP) captent l'énergie du rayonnement solaire pour produire de la chaleur qui est ensuite convertie en électricité via un cycle thermique conventionnel. [49]

Les cellules photovoltaïques convertissent directement le rayonnement solaire en électricité en exploitant l'effet photovoltaïque à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Ce processus est silencieux et ne nécessite aucune pièce mobile. Contrairement aux technologies CSP, les cellules photovoltaïques peuvent utiliser un rayonnement solaire direct et diffus, ce qui rend le fonctionnement possible même par temps nuageux, mais avec une efficacité réduite. [50]

Les cellules PV individuelles sont combinées en série ou en parallèle pour produire une tension plus élevée. Ensemble, ils forment un module ou panneau PV. En général, un système PV se compose d'un certain nombre de modules PV connectés, formant le champ PV. En outre, le «Balance of Systems» (BOS) comprend des composants auxiliaires, tels que la structure de rack et de montage, le câblage, l'alimentation et les commandes de surveillance, et - comme les systèmes photovoltaïques produisent du courant continu (CC) - un onduleur qui convertit le CC en courant alternatif (AC), si le système sera connecté au réseau (pour un aperçu schématique d'un système PV, voir Figure II.6).

Chapitre II. Les systèmes électriques

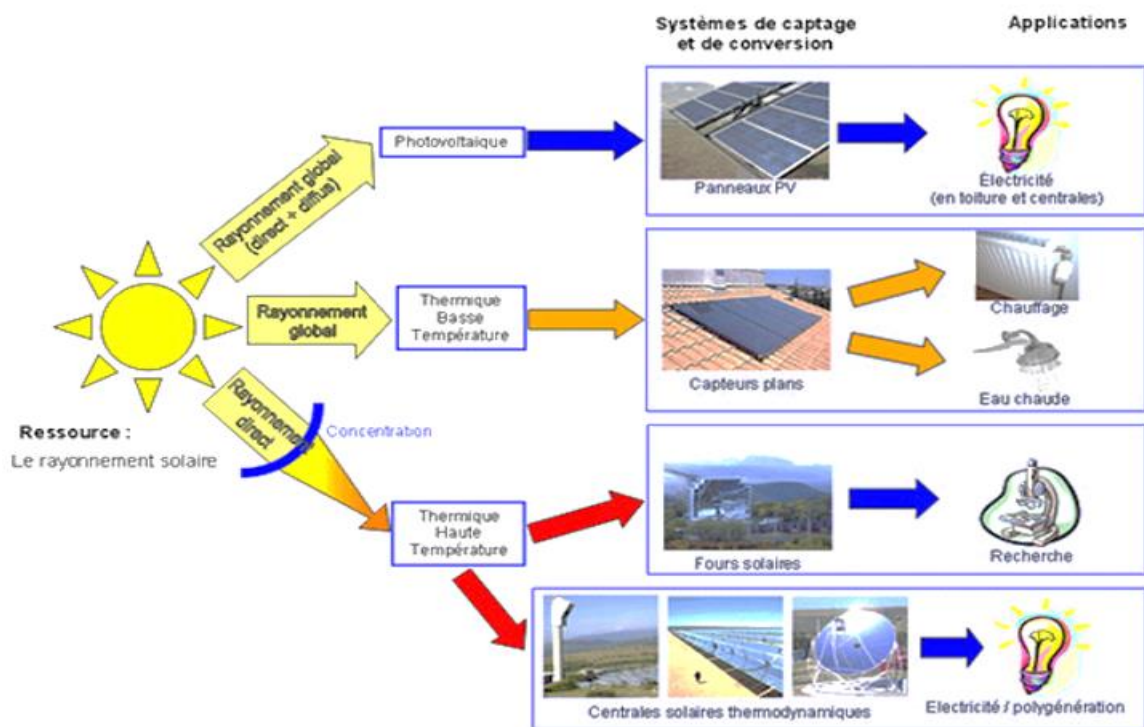


Figure II.6. L'énergie solaire

II.3.2.2. Énergie éolienne

Les éoliennes - également appelées systèmes de conversion de l'énergie éolienne (WEC) - exploitent l'énergie cinétique du vent et la convertissent en énergie mécanique, puis en électricité. Souvent, un certain nombre de vent les turbines sont regroupées et, avec les routes, les bâtiments et le point de raccordement au réseau, elles forment un parc éolien pouvant avoir une capacité de plus de 100 MW.

Les parcs éoliens peuvent être réalisés sur ou en mer. Une éolienne typique se compose des éléments suivants: les pales, qui sont généralement fabriquées à partir de polyester renforcé de fibre de verre ou de résine époxy, bien que de nouveaux matériaux émergent, la nacelle, qui est un boîtier de protection qui comprend tous les principaux composants de la turbine le moyeu de rotor, qui transfère l'énergie de rotation à l'arbre de rotor

La boîte de vitesses, qui convertit la rotation à basse vitesse et à couple élevé du rotor en une rotation à haute vitesse avec un couple faible pour l'entrée au générateur.

Le générateur, qui convertit l'énergie mécanique du rotor en énergie électrique fournissant du courant alternatif ; le contrôleur, qui surveille la turbine et recueille des informations pour que l'éolienne soit constamment face au vent ; la tour, qui peut être en acier ou en béton et les transformateurs, qui transforment l'électricité du générateur pour répondre aux exigences du réseau (voir **figure II.7.**).

Chapitre II. Les systèmes électriques

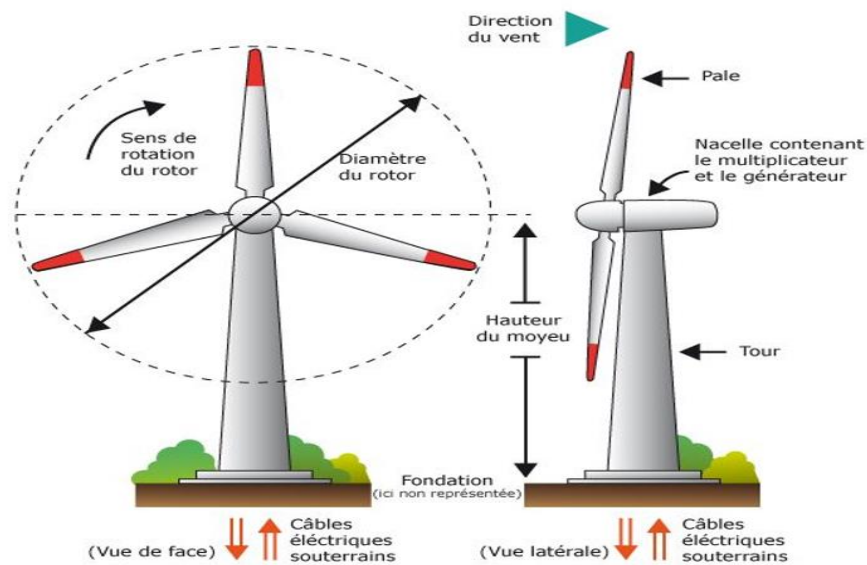


Figure II.7. Les éoliennes

II.4. MODELISATION DES RESEAUX ELECTRIQUES EN REGIME PERMANENT

II.4. 1. Définition les réseaux électrique

Le réseau électrique traditionnel c'est un la connections de grandes centrales électriques via un système de transport à haute tension (HT) à un système de distribution qui alimentait directement la demande des clients. Les centrales se composaient principalement de centrales à vapeur utilisant des combustibles fossiles et des turbines hydrauliques qui transformaient des turbines à forte inertie pour produire de l'électricité. Le système de transmission s'est développé à partir de réseaux régionaux en un grand réseau interconnecté qui était géré par une exploitation et une procédure de planification [51].on peut distinguer deux parties principales comme montrée schématiquement sur la Figure II.8.

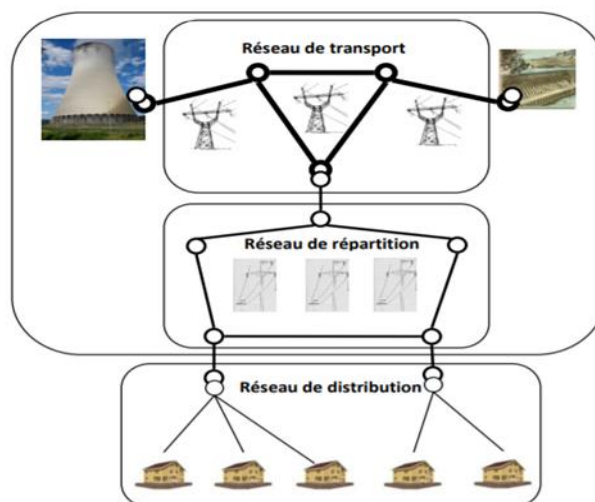


Figure II.8 .réseaux électrique [52]

Chapitre II. Les systèmes électriques

Comme le montre la figure précédente, nous avons deux parties principales, qui sont en : les réseaux de transport/répartition et les réseaux de distribution.

- Le réseau de transport : qui transporte d'électricité en très haute tension sur de longues distances depuis des centrales de production vers le réseau de répartition. Via les réseaux d'interconnexion.
- Les réseaux de distribution : qui distribué l'énergie pour desservent les consommateurs finaux : les clients industriels importants et clientèle domestique (petite industrie) à moyenne tension ou en basse tension. [52]

II.4. 2. Structure topologique des réseaux électriques

Ont été développé et réalisées une différente architecture de réseaux électrique depuis le début du XXème siècle [53]. Elles diffèrent par leur topologie, leur agencement et leur exploitation. Par topologie d'un réseau électrique il faut comprendre l'ensemble de ses éléments, ses composants et leurs connexions dans le réseau .le choix d'une topologie est toujours le résultat de compromis technico-économiques. Dans la pratique, 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 [54].

Les topologies de base sont la topologie boucle fermée et la topologie radiale. La traduction graphique de cette topologie Sera présente par un schéma de type unifilaire simplifié.

Les réseaux de distribution ont été conçus comme des réseaux boucles mais exploités avec une configuration radiale. Cela se traduit par l'existence d'un seul chemin électrique, entre tout point du réseau et un point d'alimentation (le poste source).

On définit L'architecture du réseau de distribution par l'ensemble des principes (schéma, protection, mode d'exploitation) utilisés pour véhiculer l'énergie électrique en distribution publique.

Le choix d'architecture du réseau dépend de deux facteurs majeurs qui caractérisent leur paramètre. Premièrement les zones géographiques à couvrir (rurale ou urbaine, caractérisées par les densités de charges). Deuxièmes l'investissement pour la construction qui contraignent les développements. Nous allons présenter dans la suite de cette section les structures générales des réseaux de distribution.

II.4. 3. Composition de réseau électrique

La Composition des réseaux de distributions il contient plusieurs composants comme les postes de transformation, ainsi que des conducteurs (lignes aériennes, câbles souterrains), différents organes de coupures et des gradins de condensateurs. Les caractéristiques et les propriétés de ces composants sont détaillées dans les références [55], [56].

Chapitre II. Les systèmes électriques

II.4. 4. Les différents types de réseaux électriques

Pour assurer la sécurité d'alimentation réseaux qui assure le transit de l'énergie électrique avec une sécurité suffisante, il faut qu'elle soit augmentée : les lignes aux appareillages plus solides et par des circuits plus nombreux. Pour cette raison il y a un compromis à réaliser entre le coût des investissements supplémentaires et la valeur de ce qu'ils permettent de sauver ce qui conduit à des topologies de réseaux différents. [57]

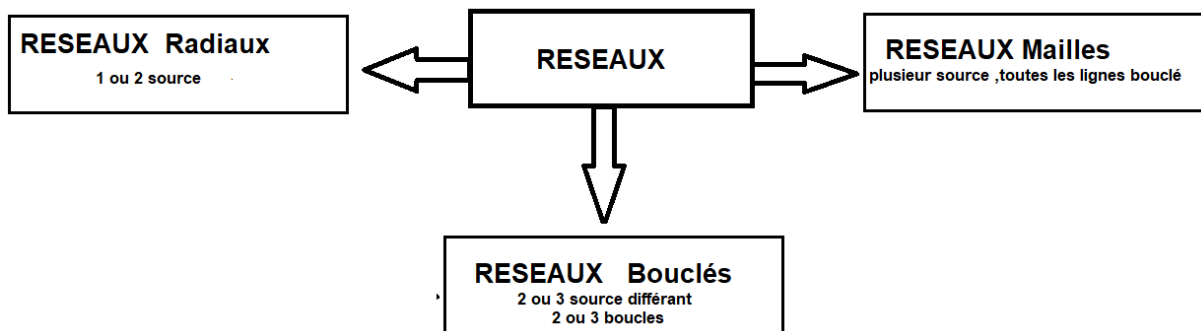


Figure II.9. Les différents types de réseaux électriques

II.4. 4.1. Réseaux maillés

Ce sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées formant par des conducteurs reliant les postes source HTB/HTA entre eux, les charges et les connexions intermédiaires. Grâce au placement de plusieurs organes de manœuvre normalement ouverts dans le réseau. L'exploitation de cette structure se réalise en radial. L'existence de nombreuses connexions entre des lignes dans le réseau apporte une grande sécurité d'alimentation. Cette structure nécessite que tous les tronçons de ligne soient capables de supporter des surcharges permanentes et qu'ils soient munis à leurs deux extrémités d'appareils de coupure et des isolants en cas d'avarie. On obtient ainsi une meilleure sécurité du réseau, mais cela rend le coût de construction de cette architecture très élevé. La structure maillée est montrée sur la Figure II.10.

Chapitre II. Les systèmes électriques

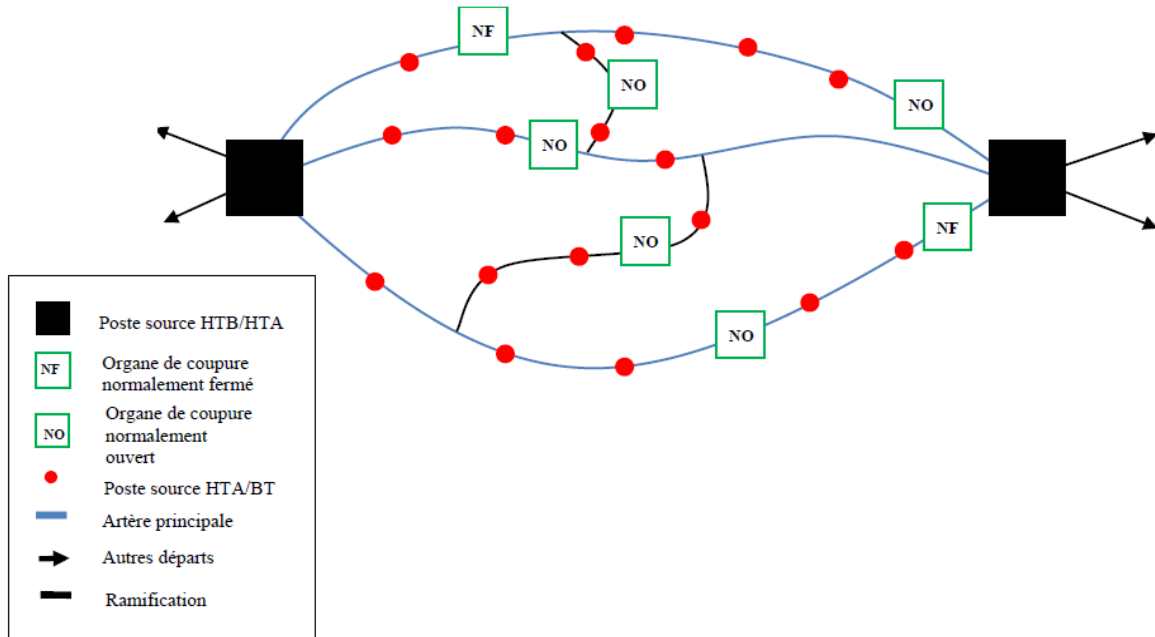


Figure II.10. La topologie du réseau maillé (grille) [52].

II.4.4.2. Réseaux radiaux

Un réseau radial issu d'un poste d'alimentation est constitué de plusieurs artères dont chacune va en se ramifiant ont une topologie très faiblement maillée, avec des boucles entre des différents postes source ou les ramifications, mais l'exploitation se réalise via une structure arborescente. Cette structure nous permet d'avoir des points communs, de sorte que le réseau soit bouclé mais non bouclé. Car en un point est placé toujours un appareil de coupure, ouvert en régime normal. Cette disposition permet en cas d'incidents sur une artère de reprendre l'alimentation [58]. Les réseaux radiaux sont des structures simples et peuvent être contrôlés et protégés par un appareillage simple. [59] Ce sont les réseaux les moins onéreux. Une telle structure avec un poste source est illustrée sur la figure II.11.

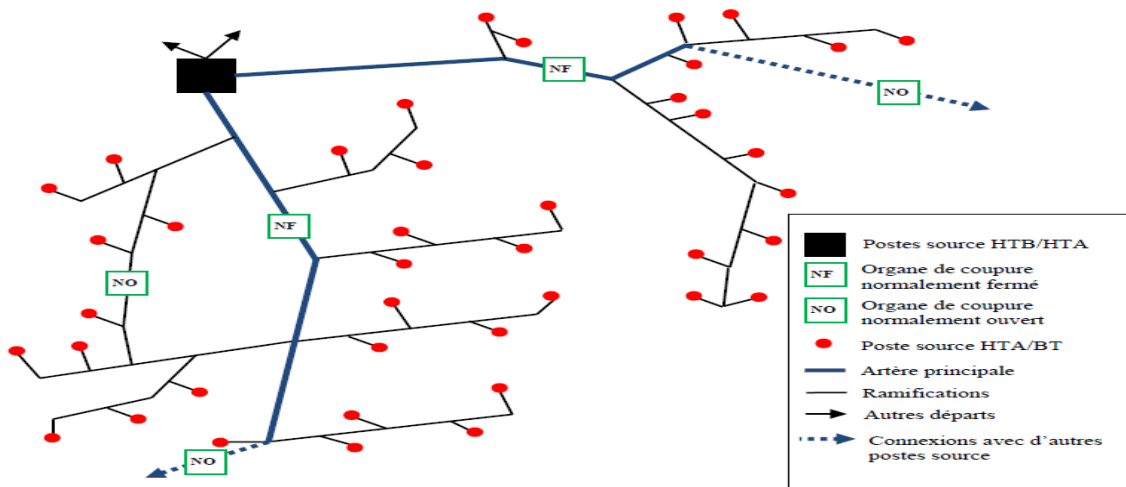


Figure II.11. Schéma de principe d'un réseau radial [52].

Chapitre II. Les systèmes électriques

II.4. 4.3. Réseaux bouclés

Ce réseau est un peu plus compliqué que le réseau radial, de plus le contrôle et la protection du réseau nécessitent des dispositifs plus complexes. Car Les réseaux bouclés sont alimentés à la fois par plusieurs sources ; les postes sont raccordés en coupure d'artère cette disposition permet lors d'une coupure, une continuité de service. L'existence de plusieurs sources en parallèle augmente la sécurité d'alimentation en cas d'avarie de l'une d'elles (transformateurs) ou en cas d'avarie sur une boucle. Dans ce cas, le tronçon avarié est isolé en deux fractions du réseau.

La figure II.12. Représente ces structures.

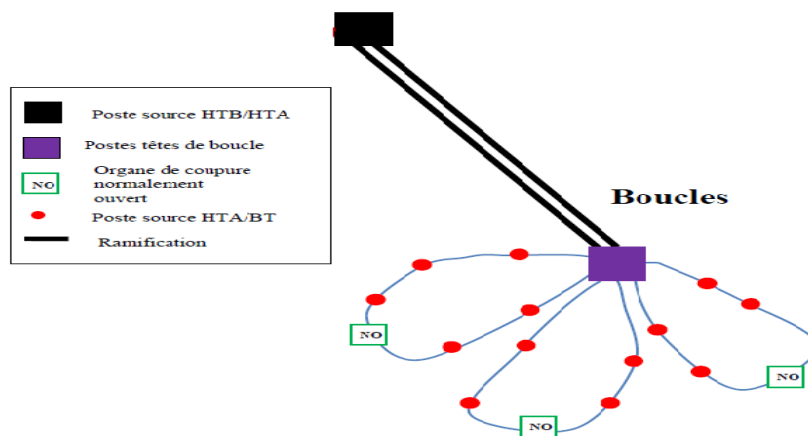


Figure II.12. Schéma de principe d'un réseau bouclé [52].

II. 5. MODELISATION MATHÉMATIQUE DU RESEAU ELECTRIQUE

II. 5.1. Modèle de l'alternateur

Un turbo-alternateur est l'accouplement d'une turbine et d'un alternateur en vue de transformer la puissance mécanique d'un fluide en mouvement en électricité. Est considéré comme le cœur du réseau électrique, il assure la production de l'énergie électrique demandée par le consommateur. L'alternateur possède deux boucles de régulation automatique, une pour le réglage automatique de la puissance AGC (Automatic Generation Control) et l'autre pour le réglage automatique de la tension AVR (Automatic Voltage Regulator). cette machine est modélisé par une source de tension constante qui injecte, au niveau du nœud auquel il est connecté, une puissance active P_g et réactive Q_g

II.5.2. Modèle de la ligne de transport

Les lignes et câbles sont les organes assurent la fonction « transport de l'énergie » sur les longues distances. Elles sont constituées de 3 phases. A été modélisée par un schéma équivalent en π qui se compose d'une impédance série (résistance R en série avec une

Chapitre II. Les systèmes électriques

réactance inductive X), et une admittance shunt qui consiste en une substance capacitive B (due à l'effet capacitif de la ligne avec la terre) en parallèle avec une conductance d'isolation G . Voir figure II.13.

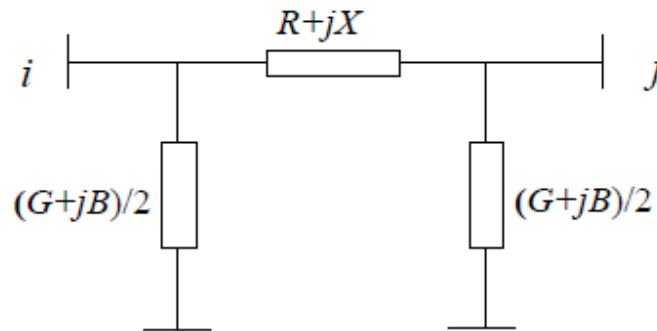


Figure II.13. Modèle en π d'une ligne électrique

II. 5.3. Modèles des nœuds du réseau

- Nœud de générateur (PV).

La puissance active et la tension sont considérées connues. La production de l'énergie réactive est limitée par des valeurs inférieures et supérieures, Q_g^{min} et Q_g^{max} respectivement. Si l'une des deux limites est atteinte, la valeur se fixe à cette limite et la tension se libère, le nœud devient alors un nœud (PQ). ce nœud est directement connecté à la source d'énergie réactive ou d'un générateur.

- Nœud bilan (slack bus) :

L'amplitude et l'angle de la tension sont considérées connus.

Il est considéré dans le calcul d'écoulement de puissance afin de compenser les pertes actives et assurer l'égalité entre la demande et la génération de la puissance active. C'est un nœud connecté avec un générateur relativement puissant.

- Nœud de charge (PQ) :

Les puissances active et réactive sont considérées connues. C'est un nœud connecté directement avec la charge, il ne possède aucune source d'énergie.

II.5.4 Modèle du transformateur

Un transformateur de l'énergie électrique est représenté par un quadripôle en π non symétrique. Les grandeurs associées sont le rapport de transformation a et l'impédance de fuite. Les transformateurs qui sont connectés directement à la charge Dans un réseau électrique qui sont appelés les transformatrices régulations de charge (LTC). Ils disposent des régulateurs automatiques de la tension dans des limites permises de fonctionnement, indépendamment des fluctuations de tension primaire.

Chapitre II. Les systèmes électriques

II.5.5. Equipements de compensation de l'énergie réactive

L'augmentation des pertes actives est causée par la transmission de puissance réactive à longue distance. Il rend la production déterministe d'énergie réactive au plus près des points de consommation, où il existe plusieurs types des équipements de compensations il a été mentionné en détail dans le chapitre un

II.5.6. Modélisation des charges

Il existe deux types de modélisation des charges électriques à savoir, la modélisation statique et celle dynamique. La modélisation dynamique est relativement compliquée ; la puissance consommée par la charge est une fonction de la tension et du temps. Elle est utilisée généralement pour l'étude et l'analyse de la stabilité transitoire. La modélisation statique est mieux adaptée aux programmes d'écoulement de puissance [60]. On peut présenter les différents modèles statiques à savoir :

- Modèle à puissance constante (modèle standard PQ) les puissances active et réactive ne dépendent pas de la tension.
- Modèle à courant constant : la puissance varie directement avec le module de la tension.
- Modèle à impédance constante : la puissance varie avec le carré du module de la tension.

II.6. STABILITE DES RESEAUX ELECTRIQUES

En général, le réseau est caractérisé par les fluctuations temporelles des variables électriques, et la stabilité globale du réseau électrique se manifeste par l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie électrique. Le comportement du réseau et sa stabilité face aux perturbations dépendent du lieu, de la nature et de l'ampleur des événements. Les perturbations typiques du réseau sont dues à des défaillances ou aux changements de la structure du réseau, des conditions d'exploitation, systèmes de contrôle-commande des

Machines ou du niveau des charges. Ces événements peuvent aboutir à déstabiliser une partie ou l'ensemble du réseau. On peut dire que La stabilité d'un réseau électrique c'est la propriété qui lui permet de rester dans un état d'équilibre, pour des conditions de fonctionnement normales, et de retrouver un état d'équilibre acceptable, suite à une perturbation [61]. Selon la nature physique de l'instabilité, la plage de temps des phénomènes et l'amplitude de perturbations, La stabilité est subdivisée en trois catégories : la stabilité angulaire, qui étudie les excursions angulaires des rotors des machines synchrones, la stabilité de tension et la stabilité de fréquence du réseau [62]. La figure ci-dessous montre la classification de la stabilité selon l'effet sur les variables électriques.

Chapitre II. Les systèmes électriques

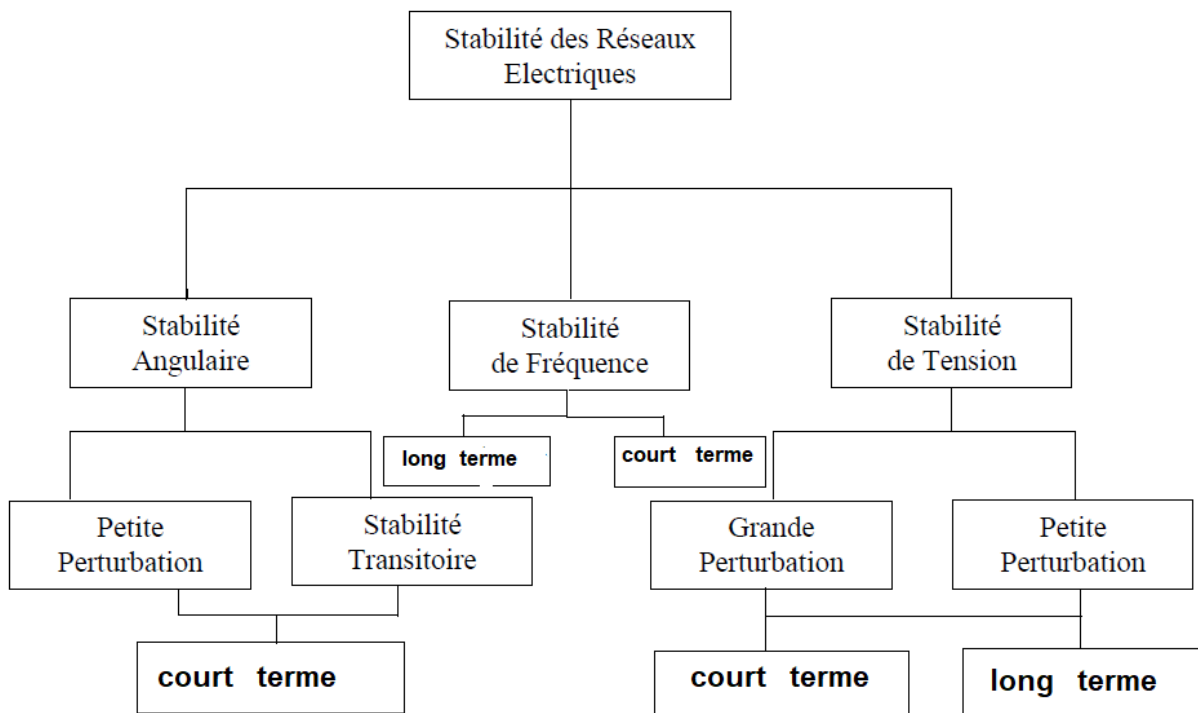


Figure II.14. Classement de la stabilité des systèmes électriques

II.6. 1. Stabilité angulaire

Elle est définie comme la capacité d'un ensemble de machines synchrones interconnectées de conserver le synchronisme dans des conditions de fonctionnement normales ou après avoir été soumis à une perturbation. Les grandes perturbations peuvent conduire à de larges excursions des angles du rotor de machines et, lorsque les actions correctives échouent, à la perte de synchronisme en fraction de millisecondes. Il faut maintenir l'équilibre entre le couple électromagnétique et le couple mécanique de la machine synchrone pour que le système soit stable. L'instabilité angulaire se manifeste sous forme d'un écart croissant entre les angles rotoriques : soit d'une machine et de reste du système, soit d'un groupe de machines et du reste du système. Une machine qui a perdu le synchronisme sera déclenchée par une protection de survitesse ou par une protection de perte de synchronisme, ce qui met en danger l'équilibre production consommation du système. La stabilité angulaire peut être décomposée en deux types correspondant soit à la stabilité transitoire, soit de petits signaux.

II.6.1.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations

La stabilité angulaire aux petites perturbations concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations comme : une petite variation de la charge ou de génération .ou par des oscillations non amorties des rotors occasionnées par l'absence de couple amortissant, manœuvre d'équipement etc. à cause l'instabilité de petits signaux Les

Chapitre II. Les systèmes électriques

différents régulateurs peuvent aussi devenir inadaptés. L'opérateur du centre de contrôle du réseau doit ramener le système à un état stable Si quelques contraintes d'exploitation ne sont pas respectées, en apportant des modifications adéquates suffisamment rapidement.

Cela se fait en séparant une ou plusieurs parties du réseau du système pour assurer son fonctionnement normal [63].

II.6. 1.2. Stabilité transitoire

La stabilité transitoire concerne la capacité du réseau à maintenir le synchronisme suite à une perturbation sévère comme un court-circuit, arrêt d'un générateur ou la perte d'ouvrages importants du réseau de transport etc.

Les conséquences de ces défauts peuvent être très graves, elles peuvent même conduire à l'effondrement complet du réseau (black-out).

on peut dire que La gravité de la perturbation dépend du type de perturbation, de la durée, de la localisation, de la performance des systèmes de protection (sélectivité, relais, disjoncteurs, fusibles), point initial de fonctionnement, du niveau de puissance active, de la topologie du réseau, des caractéristiques dynamiques des générateurs, des charges, du degré d'excitation des machines, des régulateurs et des stabilisateurs mis en place [62].

II.6.2. Stabilité de fréquence

La stabilité de fréquence concerne la capacité du système à maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale du réseau à 50 ou 60 Hz, La stabilité de fréquence est étroitement liée à l'équilibre global entre la puissance active produite et consommée.

L'instabilité est souvent causée par les changements soudains de la demande ce qui en résulte les oscillations de fréquence non amorties. Cela rend impératif de séparer l'alimentation des charges. on distingue La stabilité de fréquence par la stabilité de fréquence long terme ce qui est essentiellement dû la mauvaise coordination des protections, la perte de synchronisme des générateurs, des tensions basses, l'insuffisance des réserves de puissance active (pour réaliser le réglage secondaire en fréquence) et l'incapacité à rétablir l'équilibre de puissance.

La stabilité de fréquence court terme supporte souvent mieux les variations de fréquence de la stabilité de fréquence long terme.

II.6.3 Stabilité de tension

La stabilité en tension : C'est la capacité d'un système de puissance à maintenir des tensions acceptables à tous ses nœuds, dans des conditions du fonctionnement normales ou suite à une perturbation .Le facteur principal responsable de l'instabilité de tension est principalement le déséquilibre de puissance réactive dans le système donc une diminution ou une augmentation incontrôlée de la tension sur les nœuds d'une zone du réseau et l'incapacité du système production-transport à fournir la puissance demandée par la charge. Selon l'amplitude de la perturbation, on distingue la stabilité de tension de petites perturbations et celle de grandes perturbations.

Chapitre II. Les systèmes électriques

II.6.3.1 Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations

La stabilité de tension de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites permises en présence de perturbations telles que : l'augmentation de la demande, la déconnection de lignes, ou des défauts éloignés qui provoquent l'augmentation de la consommation de puissance réactive ou l'augmentation des pertes.

II.6.3.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations

On définit La stabilité de tension de grande perturbation comme la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement permises. En présence des grandes perturbations .comme les limites de tension des transformateurs avec changeurs de prises, aux limiteurs de courant d'excitation des générateurs, ou à l'absence de réserves de puissance réactive dynamiques dans le système.

II.7.pratiques de mesure pour la fiabilité et la qualité de l'énergie

II.7.1. La définition de fiabilité de système électrique :

La fiabilité de système électrique peut être définie comme le degré auquel la performance des éléments dans un système en vrac entraîne la livraison d'électricité aux clients dans les normes acceptées et dans la quantité souhaitée. Le degré de fiabilité peut être mesuré par la fréquence, la durée et l'ampleur des effets néfastes sur l'alimentation électrique [64].

La fiabilité a à voir avec des interruptions électriques totales - une perte totale de tension, pas seulement des déformations de l'onde sinusoïdale électrique. La fiabilité ne couvre pas les affaissements, les gonflements, les impulsions ou les harmoniques.

Les indices de fiabilité prennent généralement en compte des aspects tels que

- le nombre de clients.
- la charge connectée.
- la durée de l'interruption mesurée en secondes, minutes, heures, ou jours.
- la quantité de puissance (kVA) interrompue ; et la fréquence des interruptions.

II.7.1. Les indices des mesures la fiabilité

Il existe de nombreux indices pour mesurer la fiabilité. Les trois plus courants sont appelés SAIFI, SAIDI et CAIDI, définis dans la norme IEEE [65].

Chapitre II. Les systèmes électriques

II.7.1.1. indice de fréquence moyenne des interruptions du système (SAIFI)

SAIFI, ou indice de fréquence moyenne des interruptions du système, est la fréquence moyenne des interruptions soutenues par client sur une zone prédéfinie. Il s'agit du nombre total d'interruptions de clients divisé par le nombre total de clients servis.

II.7.1.2. indice de durée moyenne d'interruption du système (SAIDI)

SAIDI, ou indice de durée moyenne d'interruption du système, est communément appelé minutes d'interruption client ou heures client, et est conçu pour fournir des informations sur la durée moyenne d'interruption des clients. Il s'agit de la somme du temps de restauration pour chaque événement d'interruption multiplié par le nombre de clients interrompus pour chaque événement d'interruption divisé par le nombre total de clients.

II.7.1.3. indice de durée moyenne d'interruption du client (CAIDI)

Le CAIDI, ou indice de durée moyenne d'interruption du client, est le temps moyen nécessaire pour restaurer le service au client moyen par interruption prolongée. Il s'agit de la somme des durées d'interruption client divisée par le nombre total d'interruptions client. Un indice de fiabilité qui tient compte des interruptions momentanées est MAIFI, ou indice de fréquence moyenne des interruptions momentanées.

II.7.1.4. indice de fréquence moyenne des interruptions momentanées (MAIFI) .

MAIFI est le nombre total d'interruptions momentanées des clients divisé par le nombre total de clients servis. Les interruptions momentanées sont définies dans IEEE [65]. Comme celles qui résultent de chaque opération unique d'un dispositif d'interruption tel qu'un sectionneur. L'inconvénient majeur des mesures de fiabilité est qu'il y a beaucoup de débats sur la comparaison de ces indices d'une zone géographique à une autre et sur la manière exacte dont les données d'entrée doivent être appliquées pour effectuer les calculs [66].

II.7.2. définition la Qualité de l'énergie

La qualité d'énergie peut être définie comme «la mesure, l'analyse et l'amélioration de la tension de bus, généralement une tension de bus de charge, pour maintenir cette tension comme une sinusoïde à la tension et à la fréquence nominales. Le dictionnaire standard des termes électriques et électroniques de l'IEEE définit la Qualité de l'énergie comme «le concept de mise sous tension et de mise à la terre d'équipements électroniques sensibles à la fonctionnement de cet équipement. »

Chapitre II. Les systèmes électriques

La qualité du service électrique est devenue aussi importante que sa fiabilité. La qualité de l'énergie est un nouveau phénomène. Les événements tels que les baisses de tension, les impulsions, les harmoniques et le déséquilibre de phase sont désormais des problèmes de qualité de l'énergie, dans notre époque, Les charges électroniques ou sensibles sont soumises à des chocs transitoires, aux fléchissements, aux gonflements, aux harmoniques, aux interruptions momentanées et à d'autres perturbations et des problèmes qui n'étaient historiquement pas préoccupantes. Ces problèmes ont un impact économique énorme. Par conséquent, il est devenu impératif que toute discussion sur la fiabilité du système électrique comprenne l'impératif de parler la qualité de l'énergie.

Les indices de fiabilité et les techniques de calcul sont un domaine assez mature, selon un ensemble des travaux et des articles scientifique. Les travaux sur la qualité d'énergie sont des travaux en cours, souvent révisés et souvent dépassés [66] . Il y a plusieurs raisons à cela :

- Les incidents liés à la qualité de l'énergie sont souvent momentanés (une fraction de cycle) et difficiles à observer ou à diagnostiquer. Des dispositifs de mesure de la qualité de l'énergie ont dû être développés pour que les phénomènes puissent être observés avant que la qualité de l'énergie puisse être analysée. Donc La fiabilité et la disponibilité décrivent des événements clairement définis perte de puissance.
- A cause La charge numérique croissante et la sensibilité accrue de certaines charges.la définition d'un incident de qualité de l'énergie ne cesse de changer.
- les capacités de mesure et de modélisation.il a une relation directe avec Les groupes concernés par la qualité de l'énergie ; services publics, régulateurs, gestionnaires d'installations, fabricants d'équipement, ingénieurs électriciens, inspecteurs électriciens, concepteurs de bâtiments, électriciens Tous ces groupes ont des définitions, des objectifs, des responsabilités, des critères et des niveaux de sophistication.
- les problèmes de sécurité (par exemple, mise à la terre et tensions neutres élevées) qui n'ont jamais fait partie de l'évaluation de la fiabilité. Qui causée souvent des problèmes sur La qualité de l'énergie
- A cause les problèmes de conception, tels que la rigidité du système de distribution de l'utilisateur, qui n'avait pas un tel impact sur la fiabilité opérationnelle auparavant. Les problèmes de qualité de l'énergie peuvent facilement causer des pertes de plusieurs milliards de dollars, et toute une nouvelle industrie s'est récemment développée. Pour diagnostiquer et corriger ces problèmes.

Souvent, les problèmes de qualité de l'énergie peuvent être résolus au mieux par des actions correctives locales, et ces appareils locaux subissent eux-mêmes une révolution, avec des changements rapides.

Chapitre II. Les systèmes électriques

Il existe de nombreuses mesures et indices de la qualité de l'énergie. Certains des indices les plus courants sont les suivants :

- ❖ Distorsion harmonique totale (THD): Le rapport de la valeur RMS de la somme des amplitudes harmoniques individuelles à la valeur RMS de la fréquence fondamentale.
- ❖ Facteur K: somme des carrés des produits des courants harmoniques individuels et de leurs ordres harmoniques divisée par la somme des carrés des courants harmoniques individuels
- ❖ Facteur de crête : rapport du pic ou de la crête d'une forme d'onde à sa tension ou à son courant RMS
- ❖ Flicker: un changement perceptible de l'intensité de la source lumineuse électrique en raison d'une fluctuation de la tension d'entrée. Il est défini comme le changement de tension divisé par la tension moyenne exprimée en un pour cent. Ce rapport est tracé par rapport au nombre de changements par minute pour développer une «courbe de scintillement».

De nombreux problèmes proviennent d'un client et voyager à travers le système de distribution, et même le réseau de transport, pour avoir un impact sur d'autres clients. La qualité d'énergie est fournie à la charge des clients via le système de distribution des services publics, et certains sont causés par les clients eux-mêmes. Certains fabricants équipent désormais leurs produits de filtres et de périphériques de stockage à court terme afin d'être à l'abri de nombreux problèmes de qualité de l'alimentation. Les solutions locales aux problèmes de qualité de l'énergie sont généralement les plus rentables, En règle générale Il est essentiel de connaître la qualité d'énergie à attendre du fournisseur d'énergie pour concevoir la tolérance de qualité de l'alimentation dans les équipements d'utilisation finale, ce qui profite au client, au service public et au fabricant de l'équipement.

II.7.3.une perspective historique pour la Probabilité de perte de charge

Le concept d'amélioration de la fiabilité de système électrique a changé au fil de temps, par exemple Il y a vingt ans, lorsqu'un réenclencher d'alimentation de distribution provoquait une interruption momentanée pour effacer un défaut, cela était compté comme une amélioration de la fiabilité, car le scintillement à peine perceptible empêchait une panne prolongée. Contrairement aux dix dernières années, l'opération de réenclenchement était considérée comme une panne, car elle interrompait les horloges électroniques, les magnétoscopes, les ordinateurs personnels (PC), etc., l'opération de réenclenchement pourrait bientôt être à nouveau classée comme non-panne. Pour la fiabilité des systèmes électriques du 21^e siècle, cette évolution a deux implications :

1. le client doit être impliqué dans un aspect de responsabilité. Il peut ne pas être approprié d'exiger du service public à lui seul qu'il réponde aux critères de fiabilité et de qualité de l'énergie

Chapitre II. Les systèmes électriques

2. les deux conditions qui nous assurent la fiabilité du système électrique ces sont les caractéristiques de l'électricité à fournir et le service électrique en fonction des charges desservies.

LOLP la probabilité de perte de charge (loss-of-load probability (LOLP)) est une valeur projetée de combien de temps, à long terme, la charge sur un système électrique devrait être supérieure à la capacité des ressources de production. Qui a été utilisée pendant des années comme la mesure la plus importante pour évaluer la fiabilité globale. Il est calculé à l'aide de techniques probabilistes. En définissant un critère LOLP, la logique est qu'un système suffisamment solide pour avoir une LOLP faible peut probablement résister à la plupart des pannes, des imprévus et des pics de charge prévisibles. On s'attend à ce qu'un service public organise les ressources (génération, achats, gestion de la charge, etc.) pour que le système résultant LOLP soit à un niveau acceptable ou en dessous.

Il est parfois calculé la probabilité de perte de charge (LOLP) sur la base de la charge horaire de pointe de chaque jour, et parfois sur la charge de chaque heure (24 heures sur 24). En conséquence, le même système peut être caractérisé par deux ou plusieurs valeurs de LOLP, selon la façon dont LOLP est calculé. De plus, LOLP est utilisé pour caractériser l'adéquation de la production pour desservir la charge du système d'alimentation en vrac ; il ne modélise pas la fiabilité du système de fourniture d'électricité - transport et distribution - là où la majorité des pannes se produisent réellement. Donc LOLP n'est pas vraiment une probabilité mais une valeur attendue [67].

Si les services publics étaient planifiés de manière à maintenir une marge de réserve appropriée, différents services publics devraient avoir des marges de réserve différentes car la même marge de réserve dans différents services publics entraînerait des niveaux de fiabilité différents. Le critère LOLP ressemble beaucoup à une règle empirique pour maintenir une marge de réserve de 25%, mais c'est une amélioration car il prend en compte les caractéristiques du système telles que la fiabilité du générateur, la charge volatilité, corrélation des charges de pointe estivales et déclassements unitaires. Ainsi, lorsqu'un service public peut fonctionner de manière acceptable avec une marge de réserve de 25%, un autre peut survivre avec 20%, et un autre encore peut avoir besoin de 30% pour maintenir la même LOLP.

Pour atteindre une LOLP de 0,1 jour par an ou moins, ce qui était généralement décrit comme «un jour sur dix ans». Selon la planification du système électrique qui courante en pratique .Cette description résultait de l'hypothèse erronée que la LOLP était une probabilité plutôt qu'une valeur attendue, interprétant le 0,1 critère comme une probabilité de 0,1 par an que la charge excède l'offre, et en simplifiant cela comme «un probabilité de 0,1 par an entraîne une interruption tous les 10 ans. » En plus de l'erreur de définition, il y a plusieurs problèmes avec cette utilisation de LOLP :

Chapitre II. Les systèmes électriques

- En tant que LOLP valeur attendue, elle ne fait pas la différence entre un grand déficit et plusieurs petits et brefs. Car LOLP seule ne précise pas l'ampleur ou la durée de la pénurie d'électricité.
- Certains utilitaires calculent la LOLP en fonction de l'heure de la charge de pointe de chaque jour (c'est-à-dire 365 calculs), tandis que d'autres modélisent la charge de chaque heure (c'est-à-dire 8760 calculs). ce qui à différentes techniques de calcul différentes indices pour le même système.
- Les pannes de courant dans le nord-est de 1965 et 2003 et la panne de courant à New York en 1977 ont entraîné des changements majeurs dans la planification du système électrique et les procédures d'exploitation pour essayer d'empêcher leur récurrence, même si elles se sont produites à plus de dix ans d'intervalle. En fait donc «un jour sur dix ans» n'est pas acceptable.
- en cas d'urgence qu'une zone de contrôle ou une région peut recevoir d'une autre, ou d'autres mesures d'urgence .LOLP n'inclut pas le soutien supplémentaire aux opérateurs de zone pour maintenir la fiabilité du système.
- Souvent, un événement majeur de panne de courant est précipité par une série d'incidents, qui ne se produisent pas nécessairement au moment de la pointe du système (lorsque le risque calculé est le plus grand). Les incidents majeurs de perte de charge se produisent généralement à la suite de contingences non modélisées par le calcul LOLP traditionnel.

Le service public structuré verticalement construira la production ou conclura des contrats d'achat d'électricité pour atteindre la LOLP requise, mais LOLP n'est pas nécessairement un prédicteur précis de l'incidence des pénuries d'électricité qui en résulte. Tous ces problèmes découlent d'un autre malentendu sur la signification des indices de fiabilité, tels que la LOLP ou la fréquence et la durée. LOLP est un indice, un indicateur de substitution de la robustesse le système d'énergie en vrac.

Dans le secteur des services publics à structure verticale, les directives typiques pour une planification prudente étaient

- LOLP de 0,1 et ou moins
- dans le moment de la charge la plus lourde, et à la seule contingence multiple crédible maximale (ou aux deux ou trois pires).il doit y avoir une capacité à résister.

Celles-ci ont été acceptées comme les meilleures pratiques de l'époque ; cependant, on a critiqué le fait que les services publics «plaquaient» leurs systèmes en développant trop de capacités.

Le sentiment était que le niveau de réserves ou de redondance fourni par les services publics n'était pas justifié par les coûts par rapport aux coûts des pannes. Les réserves de production diminuaient en raison de la baisse de la réglementation. Dans l'environnement des services

Chapitre II. Les systèmes électriques

publics restructuré, ils sont maintenant considérablement augmentés dans de nombreuses régions. Les réserves de transport, qui sont réglementées, sont toujours en baisse

II.8. Conclusion

Aujourd'hui, l'électricité est omniprésente dans notre quotidien dans les maisons les entreprises les moyens de productions actuels de que les méthodes d'utilisation mais celle et indispensable à l'échelle humaine qu'économique.

On décrit les Différents types de production d'électricité Dans ce chapitre On décrit les Différents types de production d'électricité et leur fonctionnement (le modèle centralisé et le modèle décentralisé) ou plutôt Les sources d'énergie traditionnelle et Les sources d'énergie renouvelable.

Nous avons aussi présentés de manière détaillée les Structure topologique des réseaux électriques leur agencement et leur exploitation. Et ensuite Nous avons montré modèle différents composants du réseau électrique à savoir : le groupe turbo-alternateur, les lignes de transport, les transformateurs et les charges. Aussi un spectacle présenté des notions de base sur la stabilité et 'instabilité de réseau électrique. Enfin Nous avons proposé une pratique de mesure pour la fiabilité et la Qualité de l'énergie.

Chapitre III.

Les concepts sur la fiabilité

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

III.1. Introduction

La capacité d'un système électrique à satisfaire une demande en énergie électrique c'est le but de base de chaque production d'énergie électrique 'est t'a dire le satisfaire de la demande du consommateur tout en garantissant un coût raisonnable. sont habituellement indiquée par le terme fiabilité des systèmes électrique.

La conception du système électrique tient compte des exigences de fiabilité de service des charges à fournir ainsi que de la fiabilité du service fourni par tout système électrique. Les méthodes d'évaluation de la fiabilité du système basées sur la théorie des probabilités permettent d'évaluer numériquement la fiabilité du système proposé. Les concepts de fiabilité dans toutes les phases du cycle de vie du produit, de la conception à la fabrication, ont abouti à la fabrication de systèmes rentables qui se traduisent par de meilleures performances. Nous faisons et entendons souvent dire qu'un composant est fiable ou non fiable, synonyme de les mots fiables ou non fiables, respectivement. Où est une l'évaluation de la fiabilité du système électrique est essentielle afin de garantir un fonctionnement sain du système électrique. Les méthodes d'évaluation de la fiabilité numérique définissent des indicateurs de fiabilité pour tout système d'énergie électrique. Il est calculé à partir de la connaissance des performances de fiabilité des composants du système. Ainsi, différentes conceptions de système peuvent être étudiées pour évaluer l'impact sur la fiabilité du service et le coût des changements dans la fiabilité des composants, la configuration du système, la protection, le mode de fonctionnement et la politique de commutation du système, y compris les pratiques de maintenance. Où nous avons deux objectifs pour évaluer la fiabilité système d'énergie électrique :

Les évaluations de la fiabilité à long terme, qui sont nécessaires pour la planification le renforcement du système.

Les évaluations de la fiabilité à court terme, qui sont indispensables pour le plan de fonctionnement du système électrique. Cette évaluation, bien sûr suivant l'échelle de temps. Dans la littérature plusieurs méthodes ont été développées pour quantifier la fiabilité du système électrique [68].les grandes Enterprise telles que les compagnies aériennes, les chemins de fer et les systèmes de production d'énergie ..., sont conscients du coût du manque de fiabilité. La perception générale de la fiabilité est l'absence de défaillance. Le facteur contributif important reste l'utilisation maximale des ressources minimales disponibles. L'ingénierie de la fiabilité a beaucoup progressé au fil des ans, depuis Seconde Guerre mondiale avec une contribution importante du personnel de la défense. Cela a conduit à des produits plus fiables.

III.2. Historique de fiabilité

La problématique de fiabilité a pris naissance, dès que les hommes ont inventés les premiers instruments qu'ils sont devenus dépendants de leur bon fonctionnement. La fiabilité est entrée dans une nouvelle ère de complexité avec la naissance de l'électronique.

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

À partir de la deuxième guerre mondiale, une discipline se développe sous le nom de « théorie de la fiabilité ». étudièrent les concepts de fiabilité et le taux de défaillance dans l'aéronautique suite la comparaison des fréquences des pannes des avions bimoteurs et quadrimoteurs et le nombre de pannes par rapport au nombre d'heures de vol. Selon A. Leroy et J.P. Signoret [69], où ont marqué les années 1940 et 1950 sont caractérisées par la découverte de l'efficacité d'une approche probabiliste appliquée l'électronique dans l'aéronautique, la défense et le nucléaire. D'où il a commencé à enseigner La fiabilité aux Etats-Unis dans les années 1950. Les premières directives en électronique voient le jour par des spécifications d'essais de vieillissement accéléré, directives qui seront reprises et adaptées par la NASA.

Durant les années 1960 et 1970 sont marquées par les tentatives de généralisation de cette approche probabiliste si réussie d'autres composants : mécaniques, hydrauliques, électriques, puis aux hommes, aux logiciels..., où des équipes formées sur la fiabilité ont développé des approches déterministes très poussées et se sont essentiellement appuyées sur le surdimensionnement, la redondance et l'analyse logique pour assurer la sécurité.

C'est précisément dans les années 60, que le mot fiabilité acquiert un sens technique décrivant la sûreté de fonctionnement des équipements .Où la fiabilité a été adoptée dans le secteur du transport aérien, la raison majeure était la sécurité des personnes.

en 1961 les premiers ouvrages de référence : ouvrage de Bazovsky publié à la revue « IEEE Transaction on Reliability », 1962 a été admis le mot « fiabilité » par l'Académie des Sciences en France, les résultats des premiers travaux sur la fiabilité des logiciels ont également été publiés en 1971, EDF et le CEA mènent les premières études exhaustives sur le nucléaire En 1972, l'américain Rasmussen En 1975 présente une évaluation complète d'un risque nucléaire sur les centrales de Surry 1 et PeachBottom .

De cette évaluation, il a été conclu que les risques calculés pour les populations avoisinant les centrales nucléaires susmentionnées est inférieur à celui que font courir les chutes de météorites.

La catastrophe nucléaire survenue sur TMI (Three Miles Island) en 1979, décrite dans le rapport Rasmussen. En fait, il a été prouvé qu'il améliore les outils de sûreté de fonctionnement.

À partir de la décennie 1980, le terme fiabilité est appliqué dans tous les secteurs, mécanique, génie civil, physique, chimique, hydraulique, réseaux informatiques, réseaux télécommunication, hydrocarbures. A cause de les efforts entrepris dans tant de directions, Les nouvelles approches de fiabilité mises en œuvre par les mathématiciens, plusieurs travaux de recherche sur les nouvelles techniques sont engagés actuellement. Plusieurs travaux de recherche sur les nouvelles techniques sont engagés actuellement.

Aujourd'hui, le terme « fiabilité » recouvre l'ensemble des moyens qui permettent de se donner et de transmettre une confiance justifiée dans le succès d'un projet, d'une activité et son innocuité.

III.3. Eléments constitutifs de la sûreté de fonctionnement

Elle peut être définie comme "la science des défaillances". Elle inclut tous les aspects liés au dysfonctionnement des composants, dispositifs et systèmes, à savoir la connaissance de ces défaillances, leurs évolutions, leurs prévisions et le cas échéant leurs maîtrises [70].

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

Le raisonnement de « Sûreté de Fonctionnement » ou la SdF s'appuie sur quelques notions de base qui se sont précisées au cours de l'évolution et qui continuent s'affiner. Parcourir ce vocabulaire de base est donc une introduction classique à la sûreté de fonctionnement .

Différents auteurs d'ont défini La Sûreté de Fonctionnement comme étant : la confiance justifiée dans le service délivré avec le maintien de la qualité dans le temps. C'est une fiabilité et disponibilité et maintenabilité et sécurité ou plutôt, c'est une science qui traite la défaillance des systèmes.[71],[72],[73], [74]. Figure I.1.

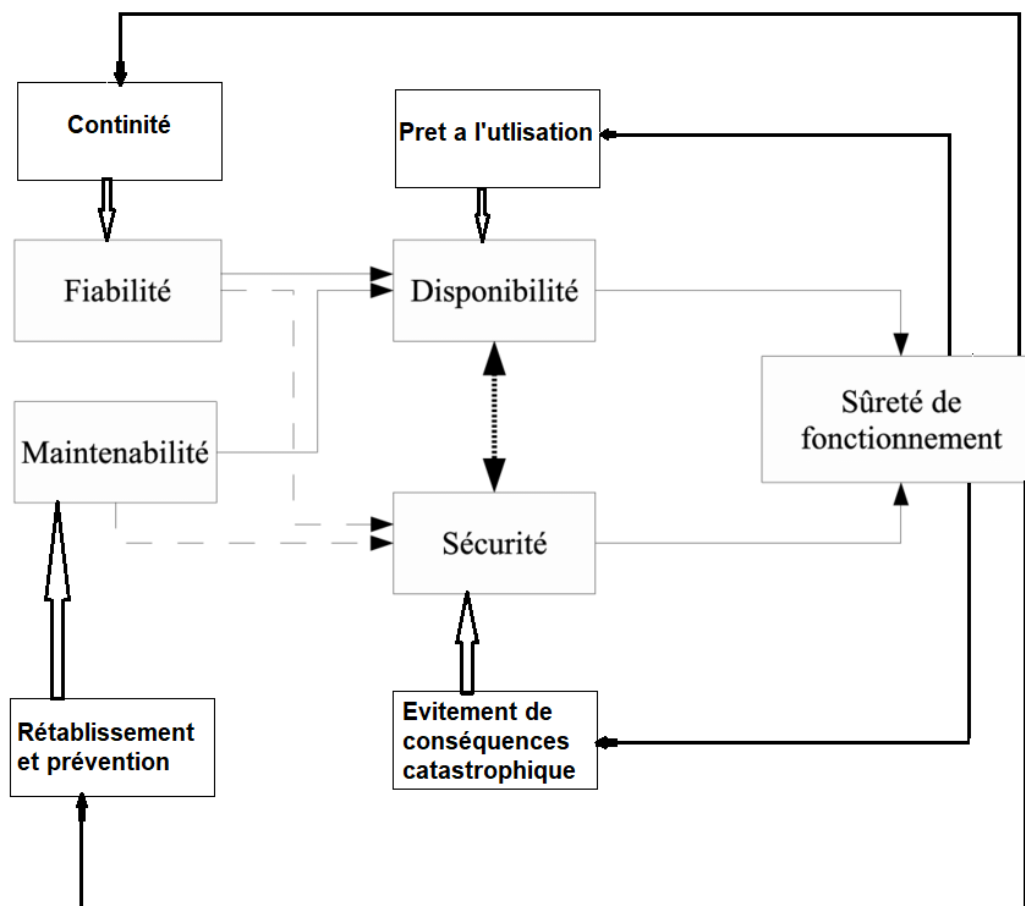


Figure III.1 : Attributs de la sûreté de fonctionnement (SdF)

III.3.1. La fiabilité

La fiabilité est définie comme l'aptitude d'une entité accomplir une fonction requise, dans des conditions et pour une durée donnée. Selon l'AFNOR [75], Cette définition peut être formulée différemment : la fiabilité d'une entité est la probabilité moyenne de non défaillance de cette entité sur un intervalle de temps donné .Cependant, le terme "Aptitude" peut englober tout ce qui peut contribuer à la continuité du service. La fiabilité, qui vient du terme anglais "Reliability" qui symbolisé par la premier lettre du mot R .est aujourd'hui l'une des plus importantes données pour l'impact économique du cycle de vie des biens. Du point de vue mathématique, la fiabilité à l'instant t correspond à la probabilité que le système n'ait pas subi de défaillance durant sa durée de vie T .

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

$$R(t) = P(T > t)$$

III.1

La fonction de fiabilité est associée à trois autres fonctions :

- la fonction de répartition de la durée de vie $F(t)$, elle représente la probabilité de défaillance du système durant sa durée de vie.
- la fonction de densité de probabilité $f(t)$, elle représente la probabilité instantané de défaillance (par unité de temps dt) du système, i.e. la probabilité de défaillance sur un intervalle de temps $[t, t + dt]$.
- le taux de défaillance $\lambda(t)$ qui représente la probabilité qu'une entité perd sa capacité à accomplir sa fonction dans l'intervalle de temps $[t, t + dt]$, sachant qu'elle a fonctionné entre $[0, t]$. [76]

Il est possible de définir quater types de fiabilité selon ses caractéristiques intrinsèques, au mode d'utilisation et son environnement.

. La fiabilité opérationnelle

À partir la définition [77] La fiabilité opérationnelle c'est $R[0, t]$ nombre moyen d'entités non défaillantes un instant t sur le nombre total d'entités. Le système est supposé être sans défaillance à ($t = 0$). En d'autres termes, c'est une analyse du comportement d'un certain nombre de dispositifs identiques, en conditions de fonctionnement réelles.

. La fiabilité extrapolée

C'est une extrapolation ou interpolation pour des conditions ou des durés différentes et en déduite de la fiabilité opérationnelle.

. La fiabilité prévisionnelle

La fiabilité future d'un système partir estimation .repose très souvent sur l'évaluation du "taux de défaillance" probable et du "temps moyen de non défaillance".

. La fiabilité intrinsèque

Lorsque un matériel il fait l'objet d'une maintenance préventive efficace .on peut attendre une fiabilité maximale de ce matériel.

III.3.2. La Maintenabilité

La maintenabilité est l'aptitude d'une entité (M) être maintenu ou rétabli en état d'accomplir des fonctions requises dans les conditions données, par une maintenance donnée [75]. En d'autres termes, pour une durée de réparation T' , la maintenabilité représente la probabilité qu'un système en panne à l'instant 0 soit réparé avant l'instant t :

$$M(t) = P(T' \leq t)$$

III.2

La maintenabilité d'un système est affectée par la durée moyenne de réparation ("Mean Time To Repair (MTTR)"), qui est donnée par la formule suivante :

$$MTTR = \int_0^{+\infty} (1 - M(t)) dt$$

III.3

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

III.3.3. La disponibilité

La disponibilité est l'aptitude d'une entité être en état d'accomplir les fonctions requises dans les conditions données. Elle est notée $A(t)$, et donnée par la formule suivante :

[$A(t)$ = Probabilité que le système fonctionne à l'instant t]
(A) qui s'exprime en fonction de la durée moyenne de bon fonctionnement ("**Mean Time To Failure (MTTF)**") et de (**Mean Time To Repair (MTTR)**) :

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad \text{III.4}$$

Sachant que :

$$MTTF = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad \text{III.5}$$

III.3.4. Sécurité

La sécurité c'est l'aptitude d'une entité ne pas causer de dommages dans des conditions données ou à ne pas faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. La sécurité est définie comme étant "l'aptitude d'un système à éviter le risque", où le risque est défini comme "la probabilité de perte ou de catastrophe". En peut distinguer trois types de sécurité : la première concerne la protection du personnel, la deuxième correspond à la protection de l'équipement et la troisième, concerne la protection de l'environnement qui est considérée comme un sujet d'actualité [76] .

III.4. Lois de probabilité usuelles en sûreté de fonctionnement

la loi de probabilité de durée de bon fonctionnement .est la seule caractéristique pour une fiabilité d'un système réparable .il existe deux lois qui sont les plus utilisées en SdF la loi exponentielle et la loi de Weibull. [77]

III.4.1. Loi exponentielle

La loi exponentielle a de nombreuses applications dans le domaine de l'ingénierie en particulier dans l'étude de fiabilité d'un équipement. Elle présente également diverses applications dans l'étude des phénomènes d'attentes. Exemples :

- ✓ La durée de vie utile d'un composant électronique.(qui justifie sa réputation dans le domaine de la fiabilité électronique).
- ✓ Le temps entre deux arrivées consécutives à un guichet automatique
- ✓ Le temps entre deux défaillances consécutives d'un système informatique

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

✓ Le temps de service à un guichet de pièces détachées d'une usine...

D'une manière générale la distribution exponentielle est définie par un seul paramètre, le taux de défaillance λ , Elle est caractérisée par :

- la fiabilité : $R(t) = \exp(-\lambda t)$ III.6
- la densité de probabilité : $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$ III.7
- le taux de défaillance : $\lambda(t) = \lambda$ III.8
- la durée de vie moyenne : $MTTF = \frac{1}{\lambda}$ III.9

La courbe théorique de distribution de la loi exponentielle est donnée à la figure III.2

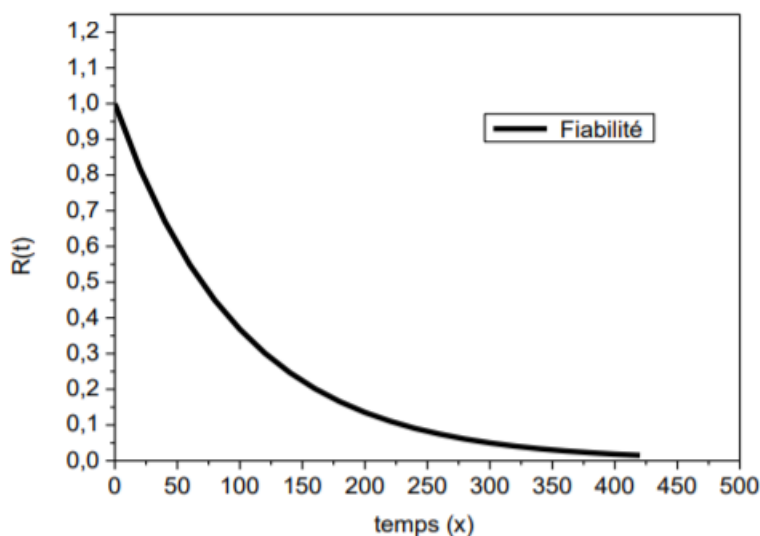


Figure III.2. Courbe théorique de fiabilité de la loi exponentielle.

III.4.2. Loi de Weibull

La loi de Weibull est la loi la plus populaire dans le domaine de la fiabilité. Cette popularité est due notamment à sa forme flexible et au fait qu'elle englobe d'autres lois de probabilité (i.e. loi exponentielle et loi de Rayleigh). de loi. Une distribution à valeurs positives (ou, plus généralement mais moins fréquemment, à valeurs supérieures à une valeur donnée) a presque toujours la même allure. Elle ne part d'une fréquence d'apparition nul, croît jusqu'à un maximum et décroît plus lentement. Elle est souvent définie par deux paramètres, le paramètre de forme β et le paramètre d'échelle η . Un troisième paramètre est parfois considéré, le paramètre de localisation γ , il permet de prendre en considération un éventuel décalage du point de départ de la courbe par rapport à l'origine

La forme générale de la fonction de fiabilité est désignée par $R(t)$ représentant la probabilité de bon fonctionnement à l'instant t

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

On utilise les trois paramètres β , η , γ qui définissent la distribution de Weibull.

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

- ✓ β : paramètre de forme ($\beta > 0$) Nous constatons que : Si $\beta < 1$ le taux de défaillances est décroissant, nous avons donc des panne de jeunesse, si $\beta = 1$ le taux de défaillances est constant et si $\beta > 1$ le taux est croissant
- ✓ η : paramètre d'échelle ($\eta > 0$) est le paramètre d'échelle et indique l'ordre de grandeur de la durée de vie moyenne
- ✓ γ : paramètre de position ($-\infty > \gamma > +\infty$) souvent il est souvent égal à 0.

III.5. Les temps caractéristiques de la Sûreté de Fonctionnement

La norme [74] présente les définitions d'une façon plus fines par rapport aux autres auteurs, où Les différents temps caractérisant la SdF se définissent en fonction de leur état de fonctionnement : avant défaillance, entre défaillance, entre défaillance et réparation, etc. On présente la relation existant entre eux (dans la figure III.3). Ces temps dépendent des probabilités d'occurrences des divers événements comme les défaillances et les réparations des composants. Ce sont des variables aléatoires que l'on cherche à caractériser par leurs espérances mathématiques.

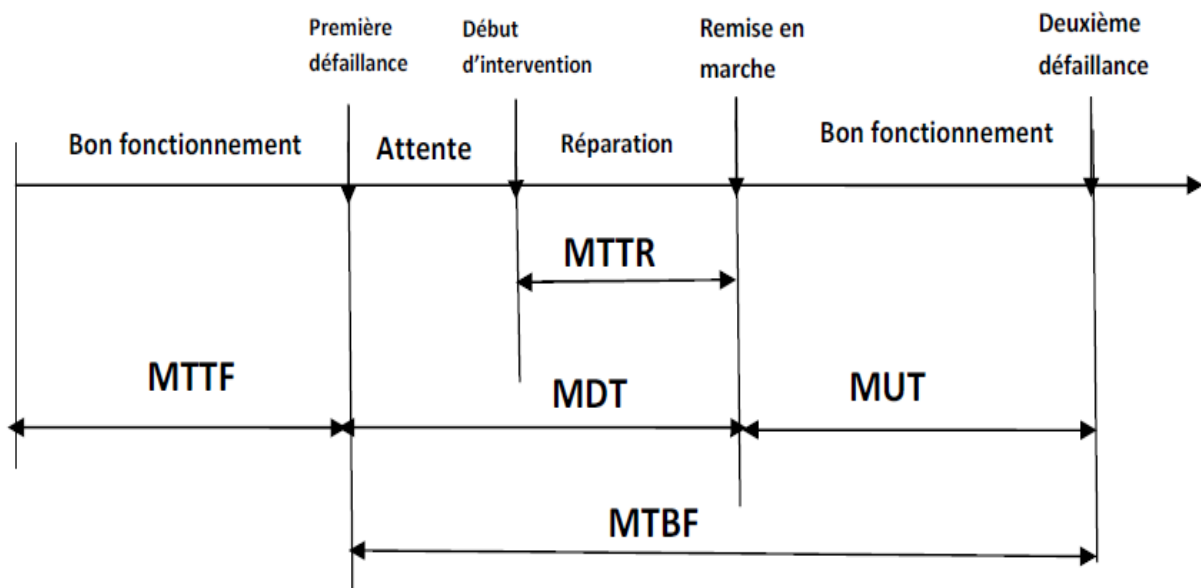


Figure III.3. Relations entre différentes grandeurs caractérisant la Sûreté de Fonctionnement [74]

Où **MTTF** (mean time to failure) : durée moyenne de fonctionnement avant défaillance, espérance mathématique de la durée de fonctionnement avant défaillance. **MTBF** (mean time between failures) durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée.

MRT (mean repair time) durée moyenne de réparation, espérance mathématique de la durée du temps de réparation. **MTTR** (mean time to repair or restoration) durée moyenne de panne ou moyenne des temps pour la remise en état de fonctionnement, espérance mathématique de la durée de panne. **MUT** (mean up time) ou **TMD** temps moyen de disponibilité, espérance

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

mathématique de la durée de disponibilité. **MDT** (mean down time) ou TMI temps moyen d'indisponibilité, espérance mathématique de la durée d'indisponibilité.

III.6. Les probabilités et la fiabilité

III.6.1. La défaillance

La défaillance ou la panne, on entend la cessation de l'aptitude d'une entité ou d'un système à accomplir une fonction requise. Une défaillance résulte d'une ou plusieurs fautes (écart anormal avec la caractéristique désirée), ou encore anomalie de fonctionnement. Une Défaillance peut avoir les conséquences suivantes : Arrêt partiel ou totale d'un système ou obligation de fonctionner au-dessous d'un niveau acceptable, Performance inacceptable d'équipements utilisateurs, Déclenchement forcée des équipements de protection ou un fonctionnement en urgence du système électro énergétique, La rupture de service.

On comprend à partir de cela que La défaillance peut conduire à la panne du système. Le mode de défaillance est le cheminement d'un défaut initial vers une défaillance «visible" du système. Les modes de défaillance sont généré par les causes de défaillance, un mode de défaillance représentant l'effet (ou les effets) par lequel se manifeste la cause de défaillance. Les défaillances d'un composant ont des effets sur les fonctions de celui-ci [78].

III.6.2. Fonction de défaillance $F(t)$

On notera $F(t)$ la probabilité de défaillance l'instant t exprimée par :

$$F(t) = p(T \leq t) \quad \text{III.11}$$

Le nombre $F(t)$ représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard ait une défaillance avant l'instant t . La figure III.4 donne l'allure de cette fonction

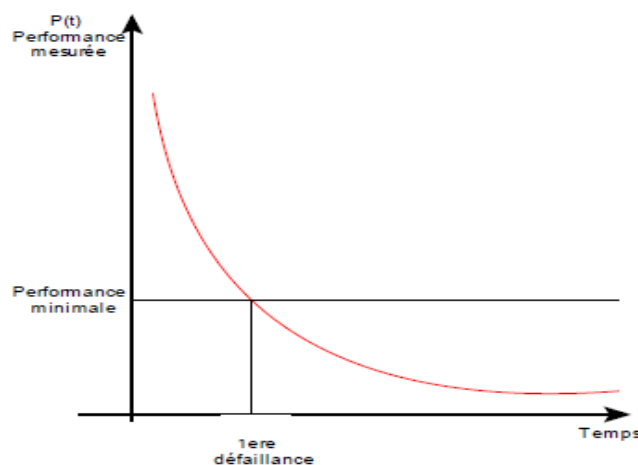


Figure III.4. Fonction de défaillance [79]

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

III.6.3. Le taux de défaillance

C'est la probabilité ($0 \leq R \leq 1$) ; un produit doit accomplir de manière satisfaisante une fonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donné. L'écriture mathématique du taux de défaillance à l'instant t , noté $\lambda(t)$, défini comme une probabilité conditionnelle de défaillance très utilisée en électronique. Il donne une mesure des risques pour qu'un dispositif tombe en panne pendant l'intervalle de temps $[t, t+\Delta t]$ sachant que ce dispositif a survécu jusqu'au temps t . Son unité est le FIT (Failure In Time) qui définit 1 défaillance/10⁹heures ; le taux de défaillance est aussi souvent exprimé dans la littérature en 10-6/heure ou 10-9/heure. Le taux de défaillance s'écrit [80]

$$\lambda(t) = \frac{\text{nombre de défaillant sur intervalle du temp}}{\text{nombre d'entités non défaillantes au debut d'intervalle du temp}} \quad \text{III.12}$$

On en vient à l'expression du taux de défaillance en fonction de la loi de fiabilité et la Densité de probabilité :

$$\lambda(t) = \frac{F(t)}{R(t)} \quad \text{III.13}$$

On suppose que $F(u)$ est la probabilité de défaillance pour une unité d'entité :

$$F(u) = \frac{dF(u)}{du} \quad \text{III.14}$$

D'où le taux de défaillance est exprimé comme suit :

$$\lambda_u = \frac{F(u)}{R(u)} = \frac{dF(u)}{R(u)du} = \frac{dF(u)}{(1-F(u))du} \quad \text{III.15}$$

Donc :

$$\lambda_u du = \frac{dF(u)}{1-F(u)} \quad \text{III.16}$$

Intégrons les deux membres entre 0 et t :

$$\int_0^t \lambda_u du = \int_0^t \frac{dF(u)}{1-F(u)} \quad \text{Donc} \quad - \int_0^t \lambda_u du = \int_0^t \frac{-dF(u)}{1-F(u)} \quad \text{III.17}$$

A $t=0$, il n'y a pas de défaillance donc $F(0)=0$ donc $\ln(1-F(0)) = \ln(1) = 0$, d'où :

$$- \int_0^t \lambda_u du = [\ln(1 - F(t))] = [\ln(1 - F(t) - \ln(1 - F(0)))]$$

$$- \int_0^t \lambda_u du = \ln(1 - F(t)) \quad \text{Donc} \quad e^{-\int_0^t \lambda_u du} = 1 - F(t) = R(t)$$

On obtient donc les expressions générales des lois de fiabilité

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda_u du} \quad \text{III.18}$$

$$F(t) = R(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda_u du} \quad \text{III.19}$$

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

$$F(t) = \frac{df(t)}{t} = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda \cdot du}$$

III.20

Il est fréquent que les entités présentent des taux de défaillance en fonction du temps suivant une courbe dite en baignoire.

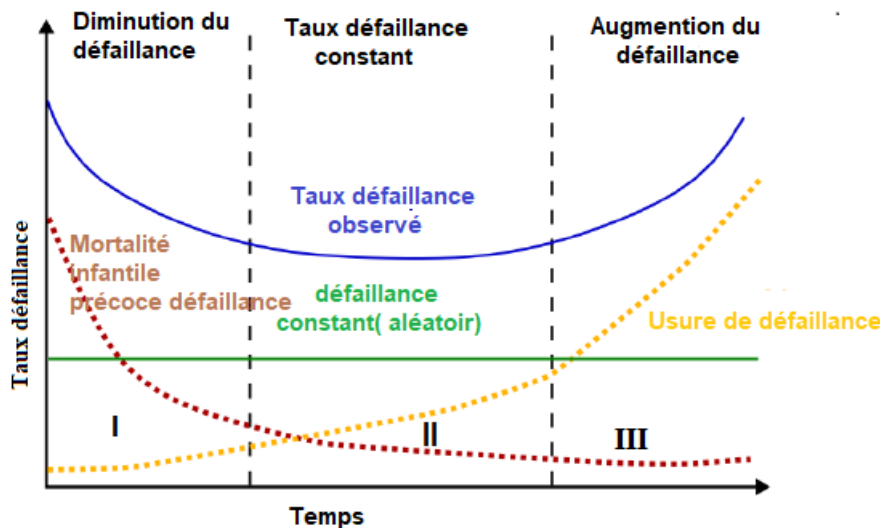


Figure III.5. Taux de défaillance en fonction du temps [81]

Cette courbe se décompose en trois phases :

1. La phase de défaillance précoce (P) :

cette phase définit la période de jeunesse ou La période de défaillances précoces I, caractérisée par une décroissance rapide du taux de défaillance $\lambda(t)$. La première phase de cette courbe en baignoire correspond aux erreurs de conception ou de fabrication, à des composants mal utilisés ou insuffisamment vérifiés. Cette zone peut être minimisée, voire pratiquement annulée, pour les composants vendus aujourd'hui. Les fabricants de composants électroniques se sont engagés à vérifier la qualité de leurs produits en sortie de fabrication. Pour les composants de puissance, ces tests sont très nombreux et diversifiés [82].

2. La phase de fonctionnement normal (N) :

La période intermédiaire ou La deuxième phase de la courbe en baignoire constitue la zone de vie utile des composants. Le fonctionnement taux de défaillance constant résulte de l'apparition de mécanismes de dégradation internes et aléatoires donc indépendants du temps. Ces mécanismes de dégradation sont liés à des altérations physico-chimiques au sein du composant contamination ionique, porteurs chauds, radiations ionisantes. Cette phase définit la période de vie utile généralement très longue. Le taux de défaillance est approximativement constant. Correspondant à la durée de vie normale. Le choix de la loi exponentielle, dont la propriété principale est d'être sans mémoire, est tout à fait satisfaisant. Les pannes sont dites aléatoires, Leur apparition n'est pas liée à l'âge du composant mais à d'autres mécanismes

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

d'endommagement. Les calculs prévisionnels de fiabilité se font presque souvent dans cette Période de vie utile.

3. La phase de défaillance par vieillissement (V) :

C'est la dernière phase : où le taux de défaillance augmente est la période de vieillissement, La dernière partie de la courbe "en baignoire" représente les défaillances elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance avec l'âge du dispositif. Ceci est expliqué par des phénomènes de vieillissement tels que l'usure, l'érosion, etc. Cette zone est très nettement au-delà de la durée de vie globale d'un équipement qui peut être estimée 20ans. Parfois, on réalise des tests de vieillissement accélérés pour révéler les différents modes de défaillance des composants

III.7. Conception de la fiabilité

La fiabilité est une branche de l'ingénierie reconnue et en développement rapide. Produire un produit parfait est une tâche exceptionnelle en raison de différences innées et du fait que le coût de l'optimisation des pièces est si élevé que l'approche devient délicate lorsqu'il s'agit d'un système vaste et complexe. Étant donné que l'étude de fiabilité est essentielle pour une utilisation et une maintenance appropriée des systèmes et équipements d'ingénierie, elle a acquis une validité considérable parmi les ingénieurs en exercice et les ingénieurs de production.

Le concepteur du système est confronté à de nombreux problèmes lors de la planification et de la conception du système pour obtenir un niveau de fiabilité modéré. Par conséquent, une analyse de fiabilité détaillée doit être entreprise au stade de la conception elle-même. Les différents moyens d'augmenter la fiabilité du système et les limites associées doivent être connus. La fiabilité du système peut être maximisée soit en optimisant les composants, par une technique de redondance ou en combinant les deux.

La vérité est que malgré l'importance de l'analyse des données de vie, il ne suffit pas d'obtenir des produits fiables. Au contraire, diverses activités sont impliquées dans un programme de fiabilité efficace et dans «l'obtention de produits fiables».

L'atteinte des objectifs de fiabilité organisationnelle nécessite une vision stratégique, une planification appropriée, une allocation adéquate des ressources organisationnelles, et l'incorporation et l'institutionnalisation de pratiques de fiabilité dans les projets de développement. La fiabilité DFR est plus spécifique que ces idées générales. C'est en fait un processus. Plus précisément, (Design for Reliability DFR) décrit un ensemble d'outils qui prennent en charge la conception de produits et de processus pour garantir que les attentes des clients en matière de fiabilité sont pleinement satisfaites tout au long de la vie du produit avec de faibles coûts de cycle de vie globaux . DFR Design for Reliability repose sur une suite d'outils d'ingénierie de fiabilité côte à côte, ainsi qu'une bonne compréhension du moment et de la manière d'utiliser ces outils tout au long du cycle de conception. Ce processus comprend une variété d'outils et de pratiques. Il décrit le dispositif de déploiement global qu'une organisation doit suivre pour la fiabilité de la conception.

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

Un certain nombre de techniques sont disponibles pour améliorer la fiabilité du système, comme indiqué dans le tableau III.1.

Tableau III.1 Techniques pour améliorer la fiabilité du système.

| Techniques | Remarques |
|---|---|
| 1. Méthode d'amélioration des composants Entraîne simplement | un coût plus élevé |
| 2. Conception efficace et créative | L'élimination totale de l'échec n'est pas assurée |
| 3. Simplification du système | Résultats de mauvaise qualité |
| 4. L'utilisation de composants surestimés n'entraîne guère | le coût le plus élevé |
| 5. Redondance structurelle | Méthode fiable pour les fiabilités |
| 6. Maintenance et réparation | Accroît la fiabilité |

Pour améliorer la fiabilité du système, l'exécution des étapes ci-dessus consomme généralement des ressources. Par conséquent, l'équilibre entre la fiabilité du système et la consommation de ressources est une tâche importante. En examinant les aspects de la redondance structurelle, de la maintenance et de la réparation, une fiabilité maximale peut être garantie, **proche de 1**. En termes simples, la redondance consiste à avoir plus d'une façon d'exécuter une fonction particulière. La redondance permet de construire un système suffisamment fiable en utilisant des composants moins fiables. Voici les méthodes pour introduire la redondance dans un système pour améliorer la fiabilité.

- Redondance des éléments
- Redondance des unités

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

III.7. 1. Définition de la Redondance

Une défaillance est un problème grave dont la solution nécessite souvent à faire appel à des techniques de redondance. Ceci engendre d'autres inconvénients tels que les coûts élevés, le poids, la maintenance et la consommation d'énergie. La redondance peut être utilisée pour améliorer la fiabilité d'un système sans aucun changement dans la fiabilité des composants individuels qui forment le système

III.7. 2. Redondance des éléments

Soit C1 un composant de fiabilité $R_1(t)$, et un autre composant C2 de fiabilité $R_2(t)$ connecté en parallèle comme le montre la figure III.6

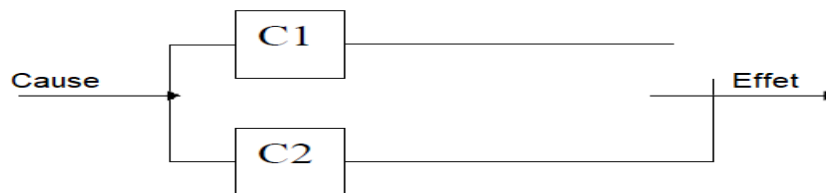


Figure III.6.Redondance des éléments

Dans cette disposition des éléments, la fiabilité du système sera bien meilleure en raison de la présence du composant redondant par rapport à sa non-existence.

La présence d'un élément redondant et le bon fonctionnement d'un élément est suffisant pour le bon fonctionnement du système.

III.7. 3. Redondance d'unité

Le concept de redondance des unités c'est un système Pour améliorer la fiabilité du système, un autre système similaire est connecté en série ou en parallèle à l'existant. En Considéra le système à deux éléments C1et C2 est ajouté un système similaire en parallèle Pour la raison de l'amélioration de la fiabilité de ce dernier, comme illustré à la figure III.7

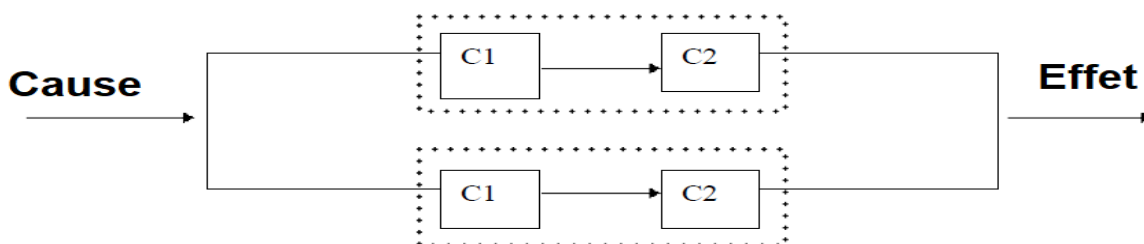


Figure III.7. Redondance des unités

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

Il existe deux types de La redondance des unités.

III.7. 3.1. Redondance active

Un système redondant composé de deux ou plusieurs composants connectés en parallèle et les deux composants fonctionnant simultanément est appelé redondance active. Auquel cas tous les chemins sont actifs depuis le démarrage du fonctionnement du système jusqu'à sa défaillance. On présente dans la figure III.8. Exemple de la représentation d'une redondance active,

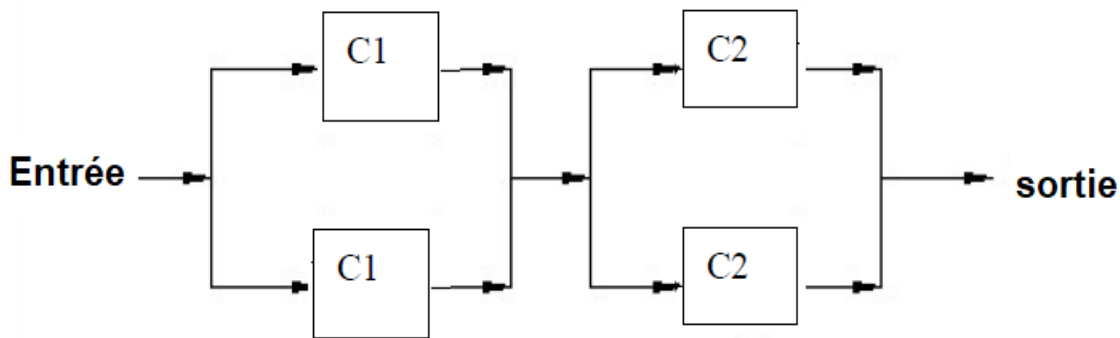


Figure III.8 .Redondance active

III.7. 3.2.Redondance passive

Une redondance de secours à deux éléments est représentée sur la figure III.9 Le moyen alternatif n'est mis en marche que lorsque le moyen principal d'exécution de la fonction échoue. Donc la fonction n'est pas activée tant qu'elle n'est pas nécessaire.

La redondance de secours est la plus appropriée pour les dispositifs mécaniques tels que les turbines à gaz, les moteurs et les pompes, etc.

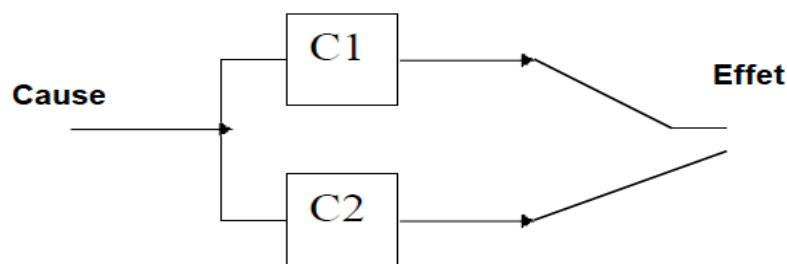


Figure III.9 Redondance passive

On peut en déduire que Presque tous les cas la redondance est très appropriée, pour les conceptions des systèmes. Les avantages de l'approche itérative peuvent être identifiés comme suit :

1. Le niveau de fiabilité requis peut être atteint avec les ressources La flexibilité.

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

2. L'amélioration de la fiabilité de chaque unité de ressource est optimisée lorsque Par rapport à toute autre approche.
3. La redondance nécessite moins de compétences de la part de l'ingénieur concepteur.
4. C'est un moyen rapide de résoudre.
5. Cette méthode peut être le meilleur choix pour améliorer la fiabilité Si toutes les autres méthodes échouent.

III.8 .Les différents types de configurations du système

Avant de mentionner les configurations des systèmes, nous devons définir quelques termes spéciaux tels que le terme système et le terme système Complexe

1. Définition d'un système

La révolution industrielle commencé principalement a au Royaume-Uni dans la deuxième moitié du XVIII émet siècle. Elle a été permise grâce aux profits tirés de l'agriculture et du commerce et repose sur le charbon, la machine à vapeur mise au point par James Watt en 1769. De nouvelles machines dans le secteur du textile, de la sidérurgie sont développées. Cette révolution s'étend à d'autres pays beaucoup plus tardivement, au milieu du XIX émet siècle. Ce qui a poussé les gens à chercher à développer des instruments, des matériels, des équipements...etc., pour le but d'améliorer sa vie quotidienne, Ces fabrications, étant de conception relativement simple et facilement compréhensible au début, sont devenues de plus en plus élaborées et complexes avec le développement du système industrielle. Ce système qui est défini par l'association d'éléments qui peuvent être matériels, logiciels ou bien encore humains en interaction grâce à des flux d'énergie, d'information ou de matière, qui remplissent une ou plusieurs fonctions.la Association Française d'Ingénierie Système(AFIS) a également donné la définition du système qui été décrit comme un ensemble d'éléments en interaction entre eux et avec l'environnement, intégré pour rendre à son environnement les services correspondants à sa finalité.

Si l'on intègre des éléments pour faire un système, c'est bien pour bénéficier des effets de synergie résultant de leurs interactions" [83].cela permet au système d'introduire de nouvelles propriétés résultant d'interactions entre les composants. Donc Cette définition montre bien l'intérêt des interactions entre les éléments du système et son environnement.

2. Définition d'un système complexe :

Un système complexe est un ensemble constitué d'un grand nombre d'entités en interaction qui empêchent l'observateur de constate la prédiction des défaillances et de la fiabilité en général de plus en plus difficile.

Ces systèmes, condamnés par leur faible fiabilité, souvent la réduite de la fiabilité est due non à la défaillance de ces composants, mais à la perte de leur cohérence.

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

III.8. 1.1.Systèmes série

Dans une configuration en série, tous les composants doivent être connectés en série pour que le système fonctionne en continu. Dans ce système, tous les composants sont cruciaux dans le sens où leur fonction doit être remplie afin de faire fonctionner le système avec succès. Selon ce concept, Si l'on considère que les composants du système sont stochastiquement indépendants, la probabilité de bon fonctionnement du système est égale au produit des probabilités de bon fonctionnement de ses composants, alors que son taux de défaillance est égal à la somme des taux de défaillance de ses composants. Le schéma synoptique de fiabilité illustré à la Figure III.10 représente la configuration de la chaîne.



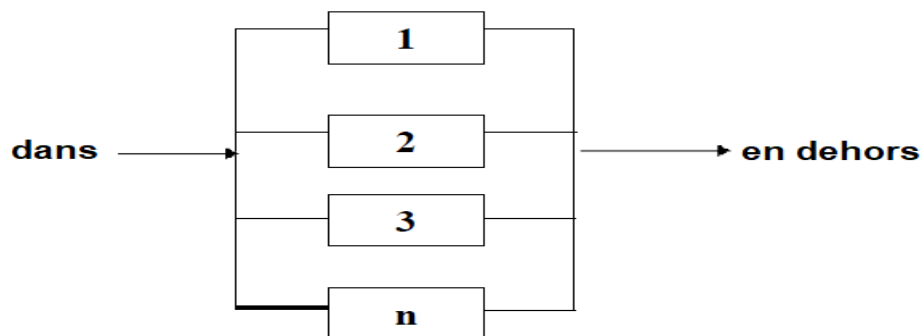
Figure III.10. Système série

On peut déduire Cette configuration sont caractérisé par :

- que le s système ne fonctionne pas sauf lorsque tous ses composants fonctionnent. La fiabilité du système $R(t)$ peut être déterminée à l'aide de la fiabilité des composants.
- Le système entier fonctionnera de manière satisfaisante si tous les composants fonctionnent sans défaillance.

III.8. 1.2.Systèmes parallèles

Un système peut contenir plusieurs composants pour effectuer la même opération et des performances satisfaisantes pour l'un de ces Les composants sont suffisantes pour assurer le bon fonctionnement du système. C'est un système tel qu'il suffit qu'un de ses composants fonctionne pour que le système fonctionne. On dit également que les éléments d'un tel système sont connectés dans une configuration parallèle comme le montre la figure III.11



La figure III.11 Systèmes parallèles

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

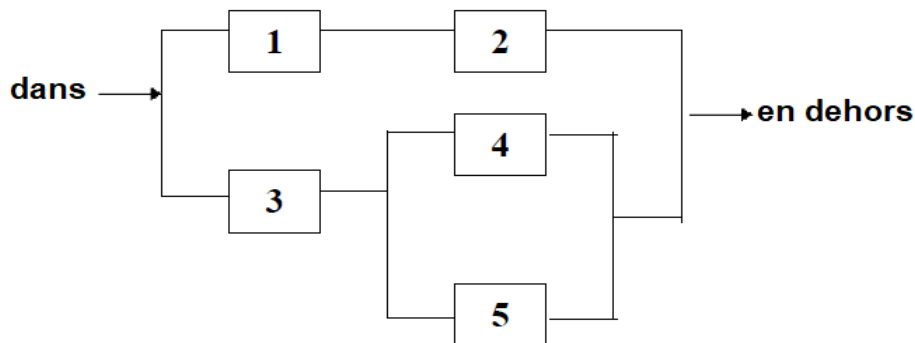
On peut déduire Cette configuration sont caractérisé par :

- Le système fonctionnera de manière satisfaisante même si l'une des unités parallèles fonctionne de manière satisfaisante. Contrairement aux systèmes série.

-le système sera en panne uniquement lorsque tout L'ensemble du système échouera

III.8. 1.3.Systèmes mixtes

Dans une configuration mixte (hybride), les éléments sont liés en série et La disposition parallèle pour effectuer l'opération système requise. Dans une configuration hybride pour tenir compte de la fiabilité du système, le réseau est divisé en sous-systèmes en série ou en parallèle. La fiabilité de chaque sous-système est trouvée, puis la fiabilité du système peut être obtenue sur la base de la relation entre les sous-systèmes. Un diagramme schématique représentant la configuration mixte est présenté dans la figure III.12



La figure III.12 Systèmes mixte

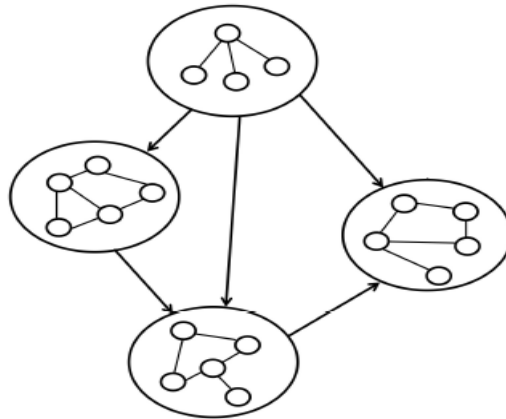
III.8. 1.4.Systèmes complexes

Les configurations des systèmes définis précédemment, la fiabilité du système s'obtient facilement à partir de la fiabilité de ses composants.

Contrairement, pour La structure qui appelée complexe dans le schéma de principe de fiabilité Soit il ne peut pas être réduit à une structure série ou parallèle avec des Composants indépendants.

Les systèmes complexes, il est souvent difficile de quantifier les liens et interactions entre les composants du système [84]. En effet, selon Weber et al. [85], modéliser ce genre de systèmes est l'un des challenges d'actualité dans les domaines de la sûreté de fonctionnement, de l'analyse du risque et de la maintenance. Un exemple de schéma d'un système complexe est illustré sur la Figure III.13

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité



La figure III.13 Systèmes complexes

Pour tout ce système, il doit y avoir deux étapes Les expressions suivent pour obtenir la fiabilité ou le manque de fiabilité le système :

ÉTAPE 1 : Énumération des ensembles de chemins minimaux ou des ensembles de coupes.

ÉTAPE 2 : Une expression de fiabilité ou une expression de non-fiabilité est obtenue à partir d'ensembles ou d'ensembles de chemins minimaux à l'aide de techniques disjointes.

III.8. METHODE ET DE MODÈLES DE FIABILITÉ DU SYSTÈME :

L'objectif d'un ingénieur système est de trouver tous les paramètres de fiabilité du système, qui varient du simple au complexe. Le système peut être analysé en le décomposant en sous-systèmes plus petits et en estimant la fiabilité de chaque sous-système pour évaluer la fiabilité totale du système. Les étapes suivantes doivent être suivies pour déterminer la fiabilité du système :

1. Identifiez les sous-systèmes et les éléments du système donné.
2. Reconnaître les fiabilités individuelles respectives des sous-systèmes et des éléments.
3. Dessinez un diagramme pour représenter la manière logique dont ces unités sont connectées.
4. Trouver les contraintes pour le bon fonctionnement du système.
5. Finalement , pour estimer la fiabilité du système on Appliquer les règles de la théorie des probabilités pour déterminer la fiabilité du système .Déterminer un modèle de fiabilité ou de fiabilité approprié pour chaque composant du système en appliquant les règles de la probabilité selon la configuration des composants dans le système, on parle également de fiabilité du système. Plusieurs méthodes existent pour améliorer la fiabilité du système, comme l'utilisation de facteurs de sécurité importants, la réduction de la complexité du système, l'augmentation de la fiabilité des composants, etc.

III.8.1.Méthodes d'évaluation de la fiabilité

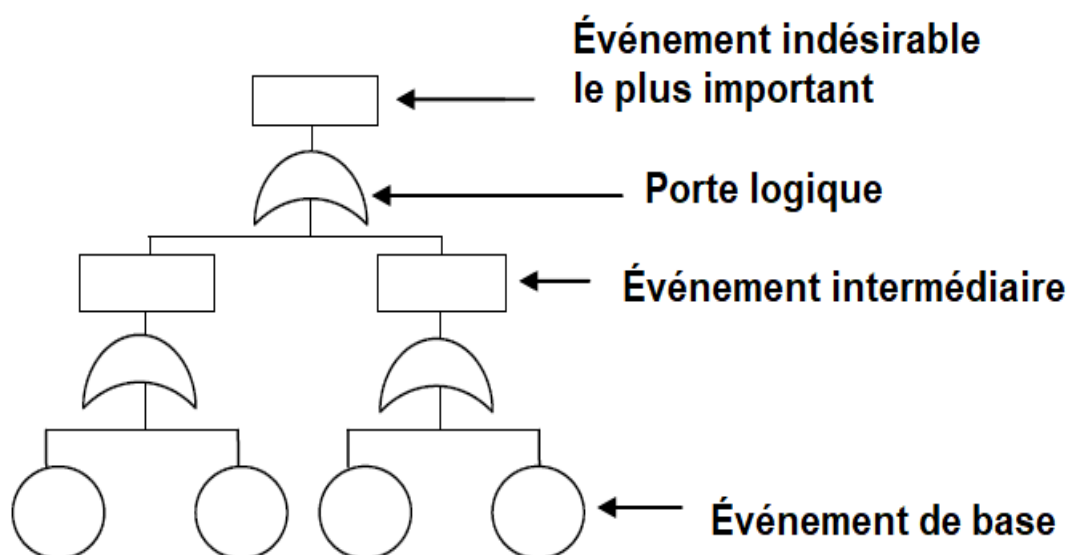
Dans la littérature, il existe plusieurs techniques pour évaluer la fiabilité des systèmes, les techniques les plus utilisées sont :

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

III.8.1.1. Arbre de défaillances

L'analyse d'arbre de défaillances ou ADD est l'un des outils d'analyse de la fiabilité et a été initialement développée en 1962 dans les laboratoires Bell Telephone [86]. Dans le Domaine RAMS (reliability, availability, maintainability and safety), ADD est une approche d'ingénierie bien connue. C'est l'un des plus largement utilisés par les praticiens. Cependant, parce que leur pouvoir expressif ADD ne peut pas être utilisé pour évaluer la valeur exacte de la disponibilité du système. Par conséquent, seuls les calculs approximatifs sont utilisés pour obtenir cette dernière quantité. Le ADD permet d'évaluer la disponibilité à l'instant t pour tout système constitué d'un composant indépendant, c'est-à-dire la probabilité que le système fonctionne à l'instant t [87]. ADD est une méthodologie déductive (de bas en haut) pour déterminer les causes potentielles des accidents ou des pannes du système plus généralement, et pour estimer les probabilités de défaillance.

ADD utilise des arborescences pour décomposer les échecs au niveau du système en combinaisons d'événements de niveau inférieur, et des portes booléennes pour modéliser leurs interactions. Les arbres de défaillances sont utilisés dans les évaluations de fiabilité et de risque de sécurité. Il représente graphiquement les interactions logiques et les probabilités d'occurrence de pannes de composants et d'autres événements dans un système. La figure III.14 présente la structure de base du diagramme ADD.



La figure III.14 la structure de base du diagramme ADD.

L'Événement le plus indésirable est considéré et les événements intermédiaires, les événements de base, etc. y sont connectés en utilisant des portes booléennes. En utilisant ces informations détaillées, les efforts visant à améliorer la sécurité et la fiabilité du système


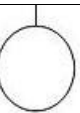








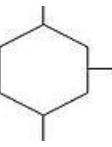

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

peuvent être hautement ciblés et adaptés au système individuel en utilisant les résultats quantitatifs de l'entrée de données. L'arbre de défaillances peut aider à prévenir les pannes en fournissant des données montrant comment et dans quelles circonstances la panne pourrait se produire, permettant des mesures alternatives pour éviter les pannes ou les dangers catastrophiques. La méthodologie et les équations booléennes sont utilisées pour construire et simplifier l'arbre de défaillances. L'évaluation de cette méthode sert, dans un premier temps, à vérifier si l'installation peut avoir une disponibilité suffisamment élevée pour atteindre les objectifs opérationnels prévus dans un délai raisonnable. Si ce n'est pas le cas, puis, deuxièmement, il sert à identifier la méthode la plus efficace d'amélioration [88].

III.8.1.1.2. Symboles utilisés dans diagramme ADD

Différents symboles sont utilisés lors de la création d'un graphique d'arbre de défaillances. Où La sélection et la mise en œuvre de symboles efficaces jouent un rôle important dans la construction du diagramme ADD. Ces symboles utilisés dans l'ADD sont regroupés sous la forme d'icônes de porte, d'événements et de transfert. Dans le tableau III.2 suivant on présente les différents symboles de base utilisés dans diagramme ADD [89]

Tableau III.2. Symboles utilisés dans ADD

| Symbole de la porte Symbole | Sens | Symbole d'événement symbole | Sens | Symbole de transfert symbole | Sens |
|---|----------------------|---|----------------------------|---|-------------------|
|  | Porte ET |  | Événement de base |  | Transférer dans |
|  | Porte OU |  | Événement incomplet | | |
|  | Porte OU exclusive |  | Événement conditionnel |  | Transfert sortant |
|  | Priorité porte ET |  | Événement normal | | |
|  | Inhiber la porte |  | Événement intermédiaire | | |

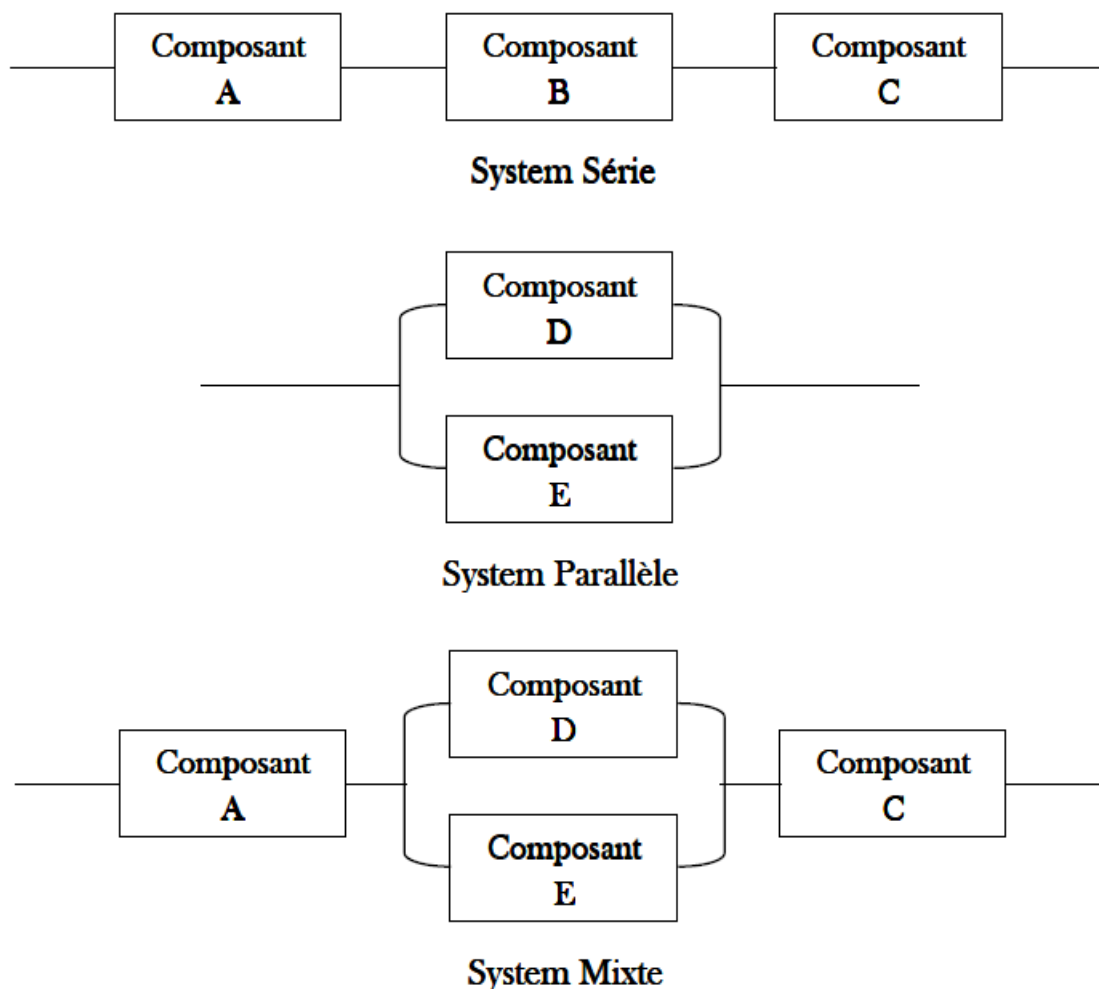
Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

III.8.1.2. Bloc-diagramme de Fiabilité (BDF)

La méthode du diagramme de blocs de fiabilité La méthode BDF est basée sur la représentation d'un système en blocs reliés entre eux configurations série, parallèle ou série parallèle (Mixte). Comme présente dans la figure III.15.

Un BDF est un graphe orienté (N, E), dont chaque sommet de N est un bloc représentant un composant du système et chaque arc de E est un lien de causalité (dépendance) entre deux blocs. Sa fiabilité de l'ensemble du système est dérivée de la connaissance de la fiabilité de ses composants. Dans cette représentation, les des blocs représentant les composants (matériels ou événements) dont la défaillance entraîne la défaillance du système sont placés en série.

Cependant, les éléments dont la défaillance entraîne une défaillance du système en combinaison avec d'autres blocs sont disposés en parallèle. Le BDF est la représentation la plus naturelle et logique du fonctionnement d'un système ou d'un sous-système [90].



La figure III.15 la représentation des trois types de construction de BDF

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

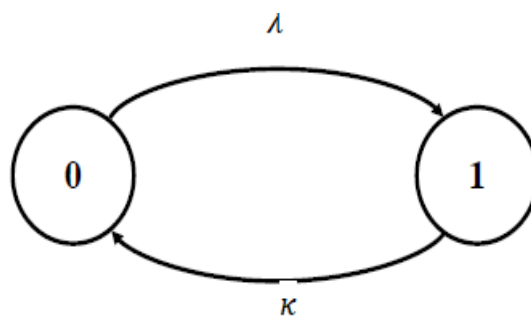
III.8.2. Les Modèles pour le calcul de la fiabilité

III.8.2. 1. Chaînes de Markov

Le modèle des chaînes de Markov est un modèle le plus utilisé dans le domaine de l'évaluation de la fiabilité des systèmes complexes et dans le domaine de la maintenance. En 1907, le mathématicien russe A.A. Markov a introduit un spécial type de processus stochastique markovien avec un espace d'états discrets et un espace de temps discret appelé chaîne de Markov. Si l'espace temporel (paramètre d'index) est continu, il est appelé processus de Markov. Le modèle basé sur le processus de Markov ne suppose qu'un système a un espace d'états fini et une série de transitions possibles entre ces états. Le modèle de Markov joue un rôle important dans que [91] :

1- la modélisation du comportement dynamique d'un système par un graphe d'états, qui représente tous les états du système et les transitions possibles entre ces états. Où le système est représenté par des cercles. Les états du système sont généralement divisés en deux groupes. Les transitions entre les différents états sont représentées par des arcs orientés de l'état de départ vers celui d'arrivée. Quant à leur quantification, elle représente le taux de passage d'un état à un autre. Cette modélisation est soumise à des conditions tel que :

- le nombre d'états du système doit être un nombre fini.
- en divisé l'état du système fonctionne et panne et aussi possible d'admettre en états Dégradés.
- le système est quantifié par le taux de défaillance de l'état de fonctionnement vers la défaillance et par le taux de réparation de l'état de défaillance le vers le fonctionnement (chemin inverse). Sur La figure III.16, est présenté un simple exemple d'une chaîne de Markov à deux États.



La figure III.16 Chaîne de Markov à deux états

Où :

- L'état "0" est état initial ou l'état fonctionnelle
- l'état "1" représente l'état de défaillance.
- l'état de fonctionnement vers la défaillance c'est La transition de l'état "0" vers l'état "1" par la condition du taux de Défaillance.

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

-l'état de défaillance vers le fonctionnement ou le chemin inverse de l'état "1" vers "0" est conditionnée par un Taux de réparation.

2- Le calcul de la fiabilité d'un système peut être effectué grâce à des méthodes de résolution numérique ou par simulation. et aussi les chaînes de Markov permettent la modélisation des événements non indépendants et aussi des événements de réparation des composants du système.

La méthode de Markov peut être utilisée pour déterminer la fiabilité du système après plusieurs états. Par conséquent, il est assez courant d'utiliser la théorie markovienne pour modéliser le problème de prédiction de fiabilité d'un système réparable [92]. cette méthode markovienne a souvent été appliquée à des modèles réparables systèmes et systèmes détériorés. Cependant, il n'est pas facile de trouver toutes les probabilités de transition (parfois elles sont nombreuses). donc ce type de méthode ne convient qu'aux systèmes relativement petits et pour la prédiction du prochain échec .De plus, les équations de Markov sont souvent difficiles à résoudre analytiquement. Certains systèmes ne sont pas conformes au système markovien.

III.8.2. 2. Modèle combinatoire :

La fiabilité de ce système est calculée à partir d'une analyse quantitative de graphe (par un graphe orienté) .Généralement, ces modèles utilisent la théorie des graphes pour représenter graphiquement toutes les combinaisons d'événements élémentaires qui peuvent causer la défaillance d'un système. À chaque nœud son prédécesseur du graphe , qui représente un événement élémentaire, est associé un ensemble de paramètres de performance.

III.8.2. 3. Modèle basé sur les réseaux de Pétri

Les réseaux de Pétri (RdP) ont été nommés d'après Carl Adam Pétri qui, au début des années soixante. Au cours des 40 dernières années les réseaux de Pétri (RdP) ont été appliqués avec succès à un large éventail d'applications, principalement liées à la modélisation et à l'analyse de systèmes artificiels (systèmes de fabrication, réseaux de communication), systèmes informatiques distribués, etc.)[93]. Un Réseau de Pétri (RdP) est une structure graphique orienté bipartites comportant deux types de nœuds :

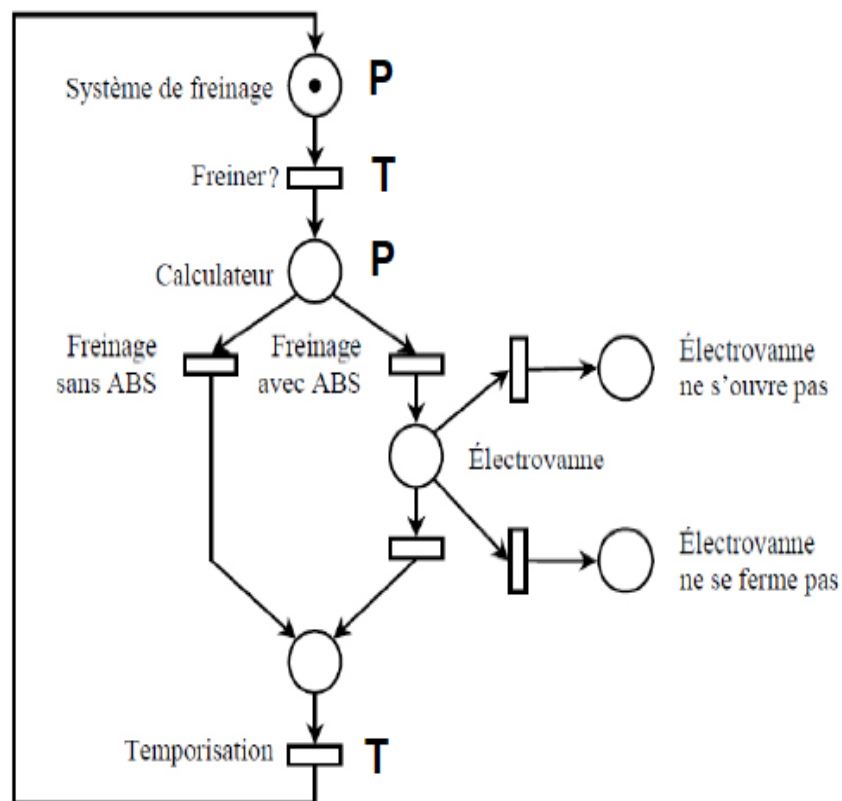
1-Les nœud des places (P) sont représentés graphiquement par des cercles et peuvent être marquées par une ou plusieurs marques appelées jetons. On appelle "marquage du réseau», l'ensemble des jetons associés aux différentes places, et il correspond à un état du système modélisé.

2-Les nœud des transitions (T), sont représentés graphiquement par des rectangles, agissent sur le marquage du réseau selon certaines conditions données. Reliées par des arcs orientés, éventuellement porteurs de poids. Ces arcs sont des liens entre place et transition ou entre transition et place exclusivement. Dans cette structure se déplacent des jetons (ou marques)

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

qui apparaissent dans les places et sont susceptibles de franchir les transitions selon certains critères de franchissable et de franchissement.

le principal avantage le du réseau Pétri à réside la possibilité d'analyser le fonctionnement normal d'un système sans défaillance et son comportement en présence de défaillance [94]. Cet outil est l'un des formalismes de modélisation les plus puissants [95]. D'après les travaux de Guerin et al [96]. Ont présenté Un exemple explicatif d'un RdP qui représentant un système réel où une analyse de fiabilité est faite sur le système de freinage ABS. Comme figuré sur La figure III.17



La figure III.17.Exmple RdP sur le système de freinage ABS [96]

III.8.2. 4. Les réseaux bayésiens (RB)

De nombreuses études ont montré la flexibilité de cet outil à traiter les mêmes problèmes traités par les trois précédents outils avec plus de facilité et en donnant plus de précision. Cet outil est le plus récent dans le domaine de la fiabilité par rapport aux outils cités auparavant [76]. Pour plus de détails sur ce modèle voir le chapitre IV.

Chapitre III. Les concepts sur la fiabilité

III.9.conclusion

Dans ce chapitre, dédié à la fiabilité des systèmes, On retrouve dans la littérature, la terminologie de sureté de fonctionnement, cette dernière est définie par ses quatre paramètres ; la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité.

Concernant les évaluations des fiabilités des systèmes nous avons nécessite la connaissance de certains paramètres, tels que ; MTBF, taux de défaillance et le taux de réparation .nous avons aussi vu les différentes type des configurations des systèmes système série, parallèle, mixte, complexe et comment évaluer leur fiabilité.

On vu aussi Lors de l'évaluation cette fiabilité, on doit définir des modèles telle que Chaînes de Markov, Modèle combinatoire, Modèle basé sur les réseaux de Pétri, model de réseaux bayésiens (RB) et définir aussi des méthodes talque Arbre de défaillances et diagramme de bloc.

Chapitre IV.

Réseau bayésien

Chapitre IV. Réseau bayésien

IV.1.Introduction

Le mariage entre la théorie des probabilités et la théorie des graphes apporté un outil naturel permettant de traiter deux grands problèmes couramment rencontrés en intelligence artificielle, en mathématiques appliquées ou en ingénierie : l'incertitude et la complexité.

La formes de ce modèles graphiques probabilistes elle divise en deux modèle .le premier basés sur les graphes acycliques orientés connus sous le nom de réseaux bayésiens (RB) et le deuxième non orientés, exemple les champs de Markov (HMM).

Les réseaux bayésiens (également appelés réseaux de croyances, réseaux de croyances bayésiennes, réseaux probabilistes causaux ou réseaux causaux) (Pearl 1988) sont des graphes dirigés acycliques dans lesquels les nœuds représentent des variables aléatoires et les arcs représentent des dépendances probabilistes directes entre eux. La structure d'un réseau bayésien est une illustration graphique et qualitative des interactions entre l'ensemble de variables qu'il modélise. La structure du graphe orienté peut imiter la structure causale du domaine modélisé, bien que cela ne soit pas nécessaire. Lorsque la structure est causale, elle donne un aperçu modulaire utile des interactions entre les variables et permet de prédire les effets de la manipulation externe.

Le nom bayésien provient du fait que la distribution de probabilité conjointe représentée par un réseau bayésien est subjective (rappelez-vous qu'ils sont parfois appelés réseaux de croyances ; l'approche bayésienne est souvent utilisée comme synonyme de vue subjective sur la probabilité) et cette distribution de probabilité subjective peut être mis à jour à la lumière de nouvelles preuves utilisant le théorème de Bayes.

Un modèle graphique est un graphe orienté ou non orienté, est portent de nombreux noms tel que : réseaux de croyance, réseaux probabilistes, réseaux d'indépendance probabiliste et nommé aussi parfois sous le nom de systèmes experts probabilistes ou encore réseaux bayésiens. En règle générale le système expert probabiliste apporte :

- une interface intuitive grâce à laquelle un humain peut modéliser un problème comportant des variables interagissant entre elles.

- et d'autre part est un moyen de structurer les données. Ceci qui permettre de mène alors vers une conception naturelle d'algorithmes génériques efficaces.

IV.2. Historique

en 1985, la théorie de l'intersection des graphes et la théorie des probabilités ont été nommées par Pearl comme des réseaux bayésiens (RB).partir les travaux de Judea Pearl et de Finn Jensen à l'Université de Californie à Los Angeles et à l'Université d'Aalborg. Ceux qui ont contribué au premier avancées de la théoriques. À cause l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs. L'usage des réseaux bayésiens son développée directement. Où leur mise en place des nombreuses applications opérationnelles des réseaux bayésiens, telles que le décodage du génome, dans le cadre du projet Human Genome, ou le traitement de la parole.

Chapitre IV. Réseau bayésien

Le développement de méthodes basées sur les réseaux bayésiens doit par ailleurs beaucoup à la section recherche de Microsoft, qui y a beaucoup contribué dans le milieu des années 1990 [97].

IV.3. Formalisme des réseaux bayésiens

IV.3.1 Définition et généralité

Les réseaux bayésiens (RBs) sont des outils mathématiques reposent sur un formalisme basé sur deux théories distinctes [98] :

- la théorie des probabilités.
- la théorie des graphes.

Selon les deux théories on peut obtenir une représentation qualitative et quantitative du système ou du phénomène à étudier. Les réseaux bayésiens représentent graphiquement la loi jointe d'un ensemble de variables aléatoires, exploitant la relation d'indépendance conditionnelle entre ces mêmes variables aléatoires. C'est une représentation factorisée de cette loi jointe.

Pour construire un réseau bayésien il existe trois points clés de la mise en place :

- L'apprentissage de la structure consiste à définir les nœuds et les arcs, c'est à dire les variables et les liens parents-enfants.
- L'apprentissage des probabilités permet de quantifier les relations entre les variables définies par la structure apprise précédemment.
- l'inférence consiste à propager l'information dans le réseau bayésien. Ce dernier permet de calculer les probabilités marginales des variables, c'est à dire les probabilités a priori. Elle permet aussi, à partir d'une connaissance partielle ou totale de certains éléments du graphe, d'affiner la connaissance d'autres éléments du graphe, en propageant de proche en proche l'information disponible. [97]. Un réseau bayésien typique est donné par la figure IV.1 où A est le nœud parent qui est pertinent, dans un certain sens (causalité, corrélation, etc.), pour la connaissance du nœud B pour être complète et à des fins d'évaluation quantitative, cette pertinence (structure) doit être complétée par une table de probabilité conditionnelle ou densité $P_r\{A|B\}$ qui est la probabilité que B connaisse l'état de A.



Figure IV.1. Un exemple typique de réseau bayésien

Chapitre IV. Réseau bayésien

IV.3.2. Définition Formelle

Un réseau bayésien (RB) sont des modèles qui permettent de représenter des situations de raisonnement probabilistes basé sur le théorème de Bayés exprimé par la formule :

$$P(A/B) = \frac{P(B).P(B/A)}{P(A)} \quad \text{IV.1}$$

Est composé à deux partie, une partie qualitative que sont les graphes acyclique dirigé G cette partie c'est exprimé des indépendances conditionnelles entre variables et des liens de causalités et ce grâce à un graphe orienté acyclique dont les nœuds correspondent à des variables aléatoires et une partie quantitative représentant l'ensemble de distributions de probabilité conditionnelle P.

Un réseau bayésien $B = \{G, P\}$ est donc défini par un graphe dirigé, un espace probabiliste et un ensemble de variables aléatoires. Le graphe est sans circuit $G = (X, E)$ où X est l'ensemble des nœuds (ou sommets) et E L'ensemble des arcs. L'espace probabiliste est tel que (Ω, P) où Ω est l'univers des probabilités et P l'ensemble de variables aléatoires $X = \{X_1 \dots, X_n\}$ associées aux nœuds du graphe. et tel que :

$$P(X_1 \dots \dots , X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i/P_a(X_i)) \quad \text{IV.2}$$

Dans cette expression, $P_a(X_i)$ est l'ensemble des parents du nœud X_i dans G.

IV.4.La causalité en terme graphique

Un réseau bayésien a pour objectif d'acquérir, de représenter et d'utiliser la connaissance. Un réseau bayésien (réseau probabiliste ou Bayésien Network) est un modèle représentant des connaissances incertaines sur un phénomène complexe, et permettant, à partir des données, un véritable raisonnement. Il est constitué de deux composantes :

- un graphe causal, orienté, acycliques, (ensemble des nœuds et des arcs) forme ce que l'on appelle la structure du réseau bayésien, C'est la représentation qualitative de la connaissance.
- les paramètres du réseau c'est un ensemble de distributions locales de probabilités. La table de probabilités P (variable/ parents (variable)) .Pour chaque nœud qui représente la distribution locale de probabilité. L'état de chaque nœud ne dépend que de l'état de ses parents. Il s'agit de la représentation quantitative de la connaissance.

Dans un réseau bayésien, un arc de A vers B peut être interprété par ' A causé B', les cycles ne sont pas autorisés, et le graphe est un graphe acyclique orienté. De plus un nœud est conditionnellement indépendant de ses non-descendants sachant ses parents. On peut décrire un réseau bayésien comme un système expert probabiliste [99].

IV.4.1.Exemple

La représentation graphique du modèle causal utilisé est dans la figure (Fig IV.2) [99] et tiré de l'exemple qui présente dans la référence [100] [101].cet exemple que dire « Ce matin-là le

Chapitre IV. Réseau bayésien

temps est clair et sec, M.X (monsieur X) sort de sa maison. Il s'aperçoit que la pelouse de son jardin est humide. Il se demande s'il a plu la nuit, ou s'il a simplement oublié de débrancher son arroseur automatique. Il jette un coup d'œil à la pelouse de son voisin, et s'aperçoit qu'elle est également humide. Il en déduit alors qu'il a plu, et il décide de partir au travail sans vérifier son arroseur automatique ». Cette figure représente un réseau bayésien simple contenant quatre variables binaires, et on peut écrire aussi :

$$P(A, B, C, D) = P(A).P(B).P(C/A, B).P(D/B) \quad \text{IV.3}$$

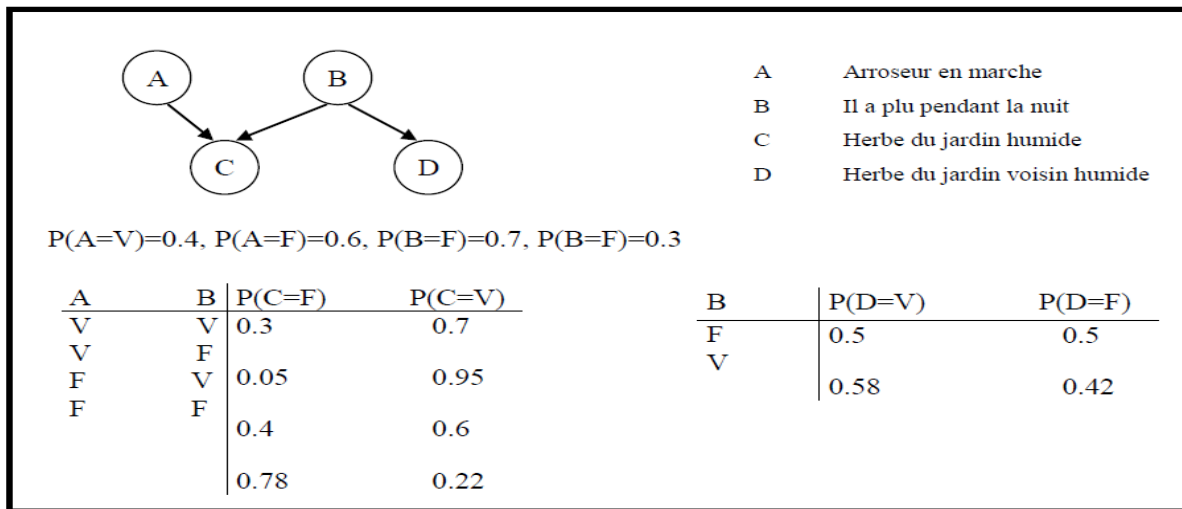


Figure.IV.2. Représentation graphique du modèle [99]

IV.4.2. Notions autour des réseaux bayésiens

Sur la Figure IV.2, est représenté un réseau bayésien d'un système composé de 4 nœuds. Sur un tel réseau, nous pouvons citer les notions suivantes :

IV.4.2.1. Notions parents et enfants

S'il existe un arc partant d'un nœud du réseau V_i vers un autre nœud V_j , alors V_i s'appelle le parent de V_j et V_j l'enfant de V_i . Ainsi, l'ensemble des parents du nœud V_j sont notés $P_a(V_j)$ et l'ensemble des enfants de V_i sont notés $V_i\ ch(V_i)$. Par exemple sur la Figure IV.2. Le nœud "C" possède deux parents "B" et "A" et le nœud "B" possède deux enfants "C" et "D".

IV.4.2.2. Notions racine et feuille

Les nœuds ne possédant pas d'enfants sont appelés nœuds feuilles, alors que l'ensemble des nœuds qui ne possèdent pas de parents sont appelés nœuds racines. Par exemple sur la Figure IV.2, les nœuds "A", "B" sont des nœuds racines et les nœuds "C" et "D" sont des nœuds feuilles.

IV.4.2.3. Chemin orienté

Un chemin orienté est une suite de nœuds distincts V_i, \dots, V_j tel que (V_k, V_{k+1}) est un arc pour tout $k = i, \dots, j - 1$. Ce chemin est généralement noté $V_i \rightarrow V_j$. Le nombre d'arcs dans ce chemin représente sa longueur. Sachant qu'un RB est un graphe acyclique dirigé, aucun chemin d'un RB ne pourra être un circuit (i.e. si V_i, \dots, V_j est un chemin d'un RB, alors $i \neq j$). Sur la Figure IV.2, la suite (A, C) forment un chemin possibles du RB.

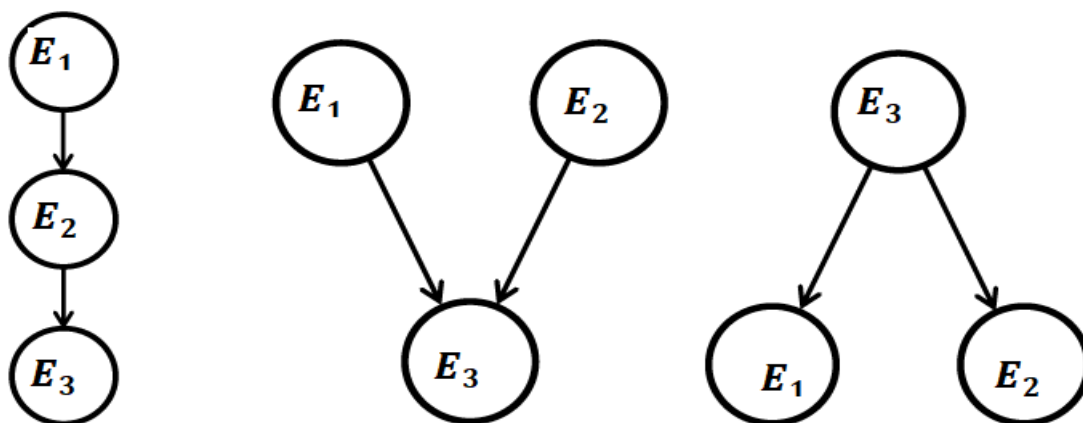
IV.4.2.4. Notions ancêtres et descendants

Les ancêtres d'un nœud V_j sont l'ensemble des nœuds V_i formant un chemin orienté $V_i \rightarrow V_j$. De même, nous appelons descendants du nœud v_i , tous les nœuds v_j formant un chemin orienté $V_i \rightarrow V_j$.

IV.4.3. les différentes Types de connexions dans un RB

Nous commençons par présenter les types de connexions possibles dans RB (**Figure.IV.3**). Là où s'il existe une relation causale de **A** à **B**, alors toute information sur **A** peut modifier les connaissances sur **B**, et inversement, toute information sur **B** peut modifier les connaissances sur **A**.

La représentation graphique la plus intuitive de l'effet d'un événement est d'associer cause et effet avec une flèche [102]. Là où En présence d'un graphe plus complexe, il faut garder à l'esprit que l'information ne tourne pas seulement dans le sens des flèches, mais affecte également le graphe dans son ensemble.



(a) Connexion série

(b) Connexion convergente

(c) Connexion divergente

FIGURE .IV.3 mode de connexions dans un RB [150]

Chapitre IV. Réseau bayésien

IV.4.3.1. Connexion série

Selon la Figure IV.3 (a) les trois nœuds " E_1 ", " E_2 " et " E_3 " sont en série selon la configuration $E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow E_3$. L'événement présenté par le nœud " E_3 " est causé par " E_2 ". Et l'événement présenté par " E_2 " est causé par " E_1 ". Où là " E_1 " est le parent de " E_2 ", " E_2 " est le parent de " E_3 ".

IV.4.3.2. Connexion convergente

Selon la Figure IV.3 (b) la connexion $E_1 \rightarrow E_3 \leftarrow E_2$ est convergente. Dans ce cas le nœud " E_3 " possède deux parents " E_1 " et " E_2 ". Le nœud " E_3 " est nommé "puits". Où deux événements différents représentés par deux nœuds " E_1 " et " E_2 " causent l'événement présenté par le nœud " E_3 ".

IV.4.3.3. Connexion divergente

Si le cas inversé de connexion convergente, où un événement présenté par le nœud " E_3 " cause les deux événements présentés par les nœuds " E_1 " et " E_2 " est appelé connexion divergente. La connexion est dite divergente $E_1 \leftarrow E_3 \rightarrow E_2$, Dans ce cas le nœud " E_3 " possède deux enfants " E_1 " et " E_2 ".

IV.4.4. Propriétés des réseaux bayésiens

il existe deux propriétés essentielles pour garantir la représentation qualitative et quantitative des systèmes ou des événements par les RBs, ils sont la propriété de Markov et la propriété de la relation de séparation (ou d-séparation) [103].

IV.4.4. 1. La relation de séparation (ou d-séparation)

Deux ensembles de nœuds X et Y d'un graphe G sont dits séparés par un ensemble de nœuds Z, si pour tous les chemins entre X et Y, au moins une des deux conditions suivantes est vérifiée :

- le nœud $Z \neq$ nœud Y, et nœud Z n'est pas une cause directe de nœud Y
- le chemin passe par nœud Y, et est soit divergent, soit en série au nœud Y.

La notion de d-séparation est très utile, elle permet de comprendre le sens de diffusion de l'information dans un graphe, où ne sont pas forcément diffusées les informations suivant le sens des flèches.

Dans le graphe de la figure IV.4, Z_1 et Z_4 sont d-séparés par Z_2 car le chemin orienté allant de Z_1 vers Z_4 passe par Z_2 . Et de même le nœud Z_4 d-sépare les nœuds $Z_1Z_2Z_3$ des nœuds $Z_5Z_6Z_7$.

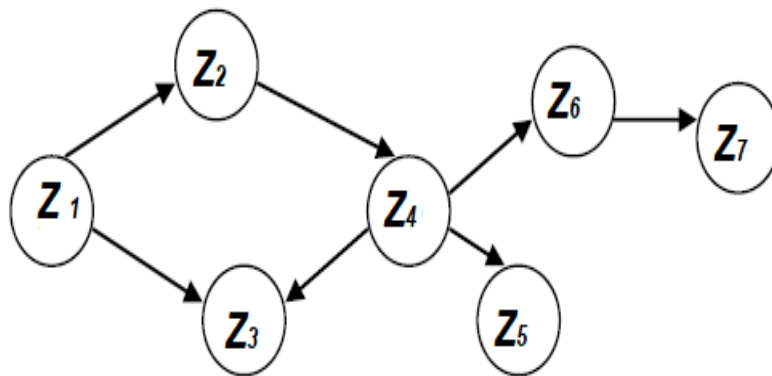


Figure .IV.4 Exemple de D-séparation

- $\langle Z_1|Z_2|Z_4 \rangle$:
Le chemin $Z_1Z_2Z_4$ est en série en Z_2 .
Le chemin A-C-D $Z_1Z_3Z_4$ est convergent en Z_3 .
- $\langle Z_1|Z_4|Z_5 \rangle$:

Tous les chemins de Z_1 à Z_5 passent par Z_4 .

Le chemin $\langle Z_1|Z_2|Z_4 |Z_5 \rangle$ est en série en Z_4

Le chemin $\langle Z_1|Z_3|Z_4 |Z_5 \rangle$ est divergent en Z_4

IV.4.4. 2.Propriété de Markov

À partir de la propriété de Markov, nous pouvons démontrer que si deux nœuds n'ont pas d'ancêtres communs, ils sont systématiquement indépendants, où les RBs possèdent la propriété de Markov directe, c'est t'a dire tous les nœuds sont conditionnellement indépendants à leurs non descendants sachant leurs parents [104]. Grâce à cette propriété, la probabilité jointe s'écrit sous la forme récursive suivante :

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i/P_a(X_i)) \quad \text{IV.4}$$

IV.5.Construction d'un des réseaux bayésiens

Pour construire un réseau bayésien il faut effectuée en trois étapes essentielles, où Chacune des trois étapes peut impliquer un recueil d'expertise, au moyen de questionnaires écrits, d'entretiens individuels ou encore de séances de brainstorming, dans toute les cas L'une ou l'autre de ces approches serait pour le moins hasardeux. On présentées La construction d'un réseau bayésien sur la figure au-dessous [105]

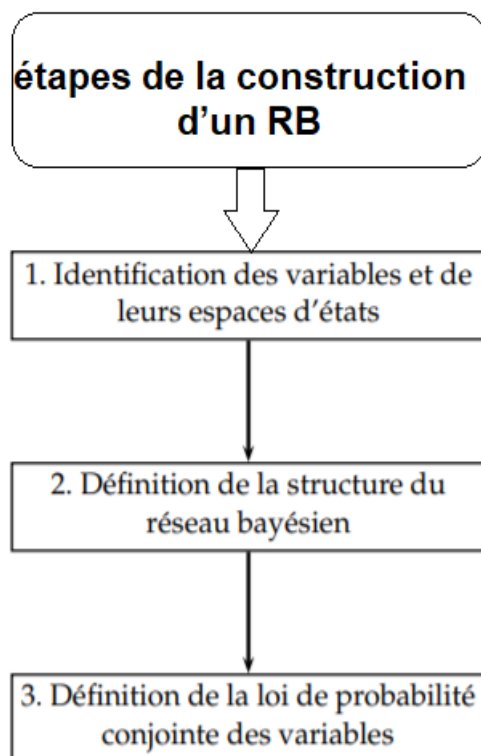


Figure .IV.5. Les trois étapes de construction d'un réseau bayésien [105]

IV.5.1. Identification des variables et de leurs espaces d'états

Lorsque les variables sont identifiées, il est ensuite nécessaire de préciser l'espace d'états de chaque variable X_i , c'est-à-dire l'ensemble de ses valeurs possibles. où La première étape de construction du réseau bayésien est la seule pour laquelle l'intervention humaine est absolument indispensable. Il s'agit de déterminer l'ensemble des variables X_i , catégorielles ou numériques, qui caractérisent le système. Comme dans tout travail de modélisation, un compromis entre la précision de la représentation et la maniabilité du modèle doit être trouvé, au moyen d'une discussion entre les experts et les modélisateurs.

La majorité des logiciels de réseaux bayésiens ne traitent que des modèles à variables discrètes, ayant un nombre fini de valeurs possibles. Si tel est le cas, il est impératif de discrétiser les plages de variation des variables continues. Cette limitation est parfois gênante en pratique, car des discrétisations trop fines peuvent conduire à des tables de probabilités de grande taille, de nature à saturer la mémoire de l'ordinateur [105].

IV.5.2. Définition de la structure du réseau bayésien

Un réseau bayésien ne doit pas comporter de circuit orienté ou boucle (Figure .IV.6.). Cependant, le nombre et la complexité des dépendances identifiées par les experts laissent parfois supposer que la modélisation par un graphe sans circuit est impossible.

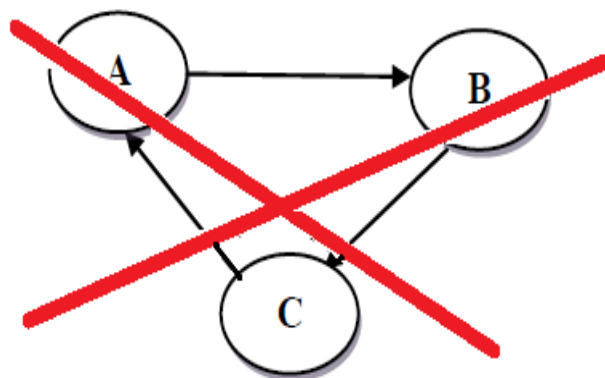


Figure .IV.6. Boucle dans un réseau bayésien [105]

Il est alors important de garder à l'esprit que, quelles que soient les dépendances stochastiques entre des variables aléatoires discrètes, il existe toujours une représentation par réseau bayésien de leur loi conjointe. Ce résultat théorique est fondamental et montre bien la puissance de modélisation des réseaux bayésiens.

Lorsque l'on dispose d'une quantité suffisante de données de retour d'expérience concernant les variables X_i , la structure du réseau bayésien peut également être apprise automatiquement par le réseau bayésien, à condition bien sûr que le logiciel utilisé soit doté de la fonctionnalité adéquate.

Où La deuxième étape consiste à identifier les liens entre variables, c'est à- dire à répondre à la question : pour quels couples (i, j) la variable X_i influence-t-elle la variable X_j ?

Dans la plupart des applications, cette étape s'effectue par l'interrogation d'experts. Dans ce cas, des itérations sont souvent nécessaires pour aboutir à une description consensuelle des interactions entre les variables X_i . L'expérience montre cependant que la représentation graphique du réseau bayésien dans cette étape est un support de dialogue extrêmement précieux [105].

IV.5.3. Loi de probabilité conjointe des variables

Dans un premier temps, la connaissance des experts concernant les lois de probabilité des variables est intégrée au modèle. Concrètement, deux cas se présentent selon la position d'une variable X_i dans le réseau bayésien :

- La variable X_i n'a pas de variable parente : les experts doivent préciser la loi de probabilité marginale de X_i .
- La variable X_i possède des variables parentes : les experts' doivent exprimer la dépendance de X_i en fonction des variables parentes, soit au moyen de probabilités conditionnelles, soit par une équation déterministe (que le logiciel convertira ensuite en probabilités).où Le recueil de lois de probabilités auprès d'experts est une étape délicate du processus de construction du réseau bayésien. Typiquement, les experts se montrent réticents à chiffrer la plausibilité d'un événement qu'ils n'ont jamais observé.

Chapitre IV. Réseau bayésien

Cependant, une discussion approfondie avec les experts, aboutissant parfois à une reformulation plus précise des variables, permet dans de nombreux cas l'obtention d'appréciations qualitatives. Ainsi, lorsqu'un événement est clairement défini, les experts sont généralement mieux à même d'exprimer si celui-ci est probable, peu probable, hautement improbable, etc...

Le cas d'absence totale d'information concernant la loi de probabilité d'une variable X_i peut être rencontré. La solution pragmatique consiste alors à affecter à X_i une loi de probabilité arbitraire, par exemple une loi uniforme.

Lorsque la construction du réseau bayésien est achevée, l'étude de la sensibilité du modèle à cette loi permet de décider ou non de consacrer davantage de moyens à l'étude de la variable X_i .

La quasi-totalité des logiciels commerciaux de réseaux bayésiens permet l'apprentissage automatique des tables de probabilités à partir de données. Par conséquent, dans un second temps, les éventuelles observations des X_i peuvent être incorporées au modèle, afin d'affiner les probabilités introduites par les experts.

Où la dernière étape de construction du réseau bayésien consiste à renseigner les tables de probabilités associées aux différentes variables [105].

IV.6.Construction d'un RB à partir d'un Arber de défaillance (AdD)

IV.6.1.Les différentes recherches de Convertir l'AdD en RB.

La similitude entre l'arbre de défaillance et les réseaux bayésiens a conduit à la création d'un algorithme capable de convertir l'arbre de défaillance, vers les réseaux bayésiens [106] ce dernier considéré comme l'une des méthodes les plus efficaces et les plus utilisées dans le domaine d'intelligence artificielle.

Contrairement à l'arbre de défaillance qui est considéré comme l'une des méthodes classiques. Plusieurs recherches dans ce contexte ont été faites nous les montrons dans le tableau IV.1 [107].

Chapitre IV. Réseau bayésien

Tableau IV.1. Travaux de recherche sur le passage de l'arbre de défaillance vers les réseaux bayésiens

| Référence | Domaine / Cas d'application | Méthodologie de travaille |
|-----------|--|--|
| [108] | L'inférence bayésienne pour l'obtention des facteurs d'importance probabilistes pour un système déluge à eau | <ul style="list-style-type: none"> ○ AdD d'un système déluge à eau ; ○ Convertir l'AdD en RB pour l'obtention de l'outil d'aide à la décision ; ○ L'inférence bayésienne ; |
| [108] | convertir l'arbre de défaillance issue des méthodes classique vers les réseaux bayésiens | <ul style="list-style-type: none"> ○ Obtention des FIP en terme de posteriori et les comparer avec les résultats obtenus par modèle mathématique ; ○ RB pour la mise à jour des données. |
| [109] | Modélisation des taux de défaillance par réseaux bayésiens cas d'une turbine dans le domaine nucléaire | <ul style="list-style-type: none"> ○ Modélisation des taux de défaillance par Arbre de défaillance, ○ Convertir les données apriori en réseaux bayésiens, ○ Un outil utile dans l'évaluation dynamique des risques à partir des données apostériori. |
| [117] | Maintenance préventive et l'évaluation de la fiabilité et la disponibilité par réseau bayésien obtenu à partir de l'arbre de défaillance cas de la plateforme de forage en mer | <ul style="list-style-type: none"> ○ Transformation de l'arbre des défaillances en un réseau bayésien ○ Les dépendances et la relations cause à effet ○ Démonstration de l'application par l'étude du cas ○ Effectuer à la fois l'analyse prédictive et le diagnostic par RB ○ Détection des causes de défaillance par RB |
| [111] | Implémentation d'un réseau bayésien à partir de l'AdD pour évaluer et analyser les risques d'une plateforme de forage en mer | <ul style="list-style-type: none"> ○ Introduction d'un algorithme de RB innovant pour modéliser l'AdD, ○ Une technique robuste pour modéliser un système dynamique pour mettre à jour les données, ○ Mise à jour et adaptation des données. |
| [112] | Algorithme de passage de l'arbre de défaillance vers le réseau bayésien d'un procédé de gaz | <ul style="list-style-type: none"> ○ Fondamentaux sur arbres des défaillances et réseaux bayésiens ○ Modélisation de l'étude de cas ○ comparaison entre les résultats des deux méthodes |

IV.6.2. Convertir l'AdD en RB

A partir des travaux de recherche cités dans le Tableau IV.1. Qui confirme la possibilité de construire le RB à partir d'un AdD. Un algorithme d'obtention d'un RB à partir d'un AdD est proposé ci-dessous avec une simplification présentée dans la Figure IV.7. [107]

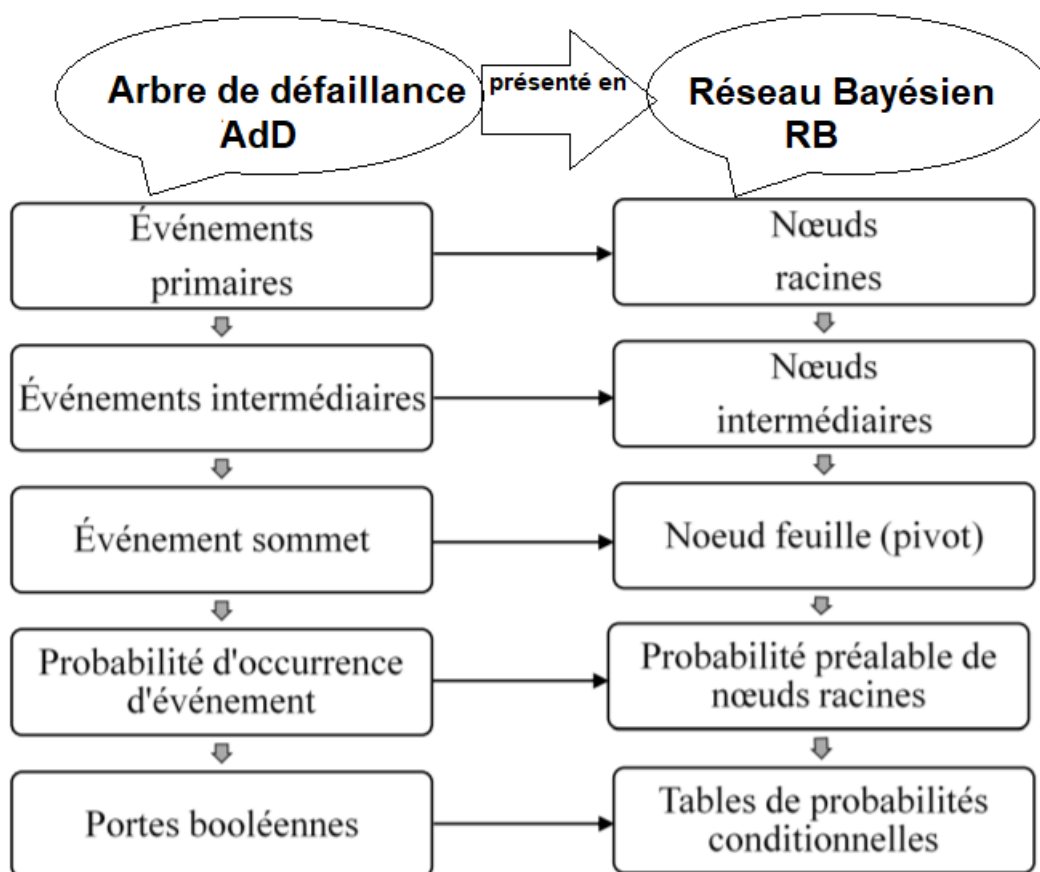


Figure IV.7. Organigramme représentant un algorithme simplifié pour représenter un AdD en RB [107]

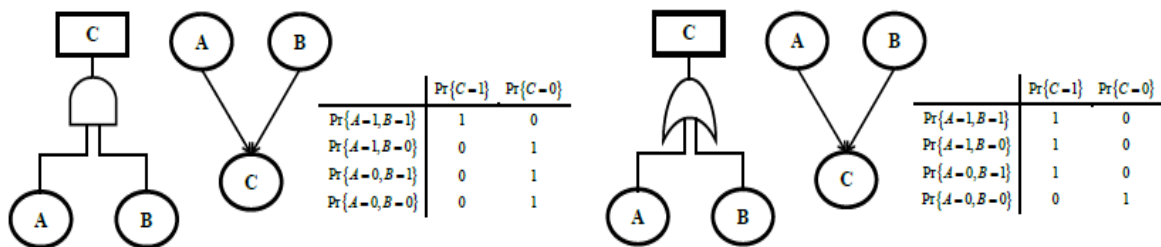
Dans cet Algorithme il est supposé que l'AdD n'aura que des portes logiques « ou », « et » et « k-sur-n », le RB résultant sera binaire et ces variables représenteront les états des composants d'un système et les deux valeurs qu'elles pourront prendre seront désignées par faux « F » pour l'état de fonctionnement et par vrai « V » pour l'état défaillant.

Cependant, l'algorithme peut être généralisé à n'importe quel AdD. Cet algorithme de transition basé sur les étapes suivantes :

- Étape 1 : pour chaque nœud feuille (i.e. événement élémentaire ou composant du système) de l'AdD, lui créer un nœud racine dans le RB. Il est à noter que si plusieurs nœuds feuilles dans l'AdD représentent le même événement élémentaire ou le même composant, il faut créer un seul nœud racine dans le RB.

Chapitre IV. Réseau bayésien

- Étape 2 : attribuer aux nœuds racines dans le RB les probabilités a priori de leurs nœuds feuilles correspondants dans l'AdD.
- Étape 3 : pour chaque porte logique dans l'AdD, lui créer un nœud dans le RB.
- Étape 4 : le nœud correspondant à la porte logique reliée à l'événement indésirable dans l'AdD représente le nœud à analyser dans le RB.
- Étape 5 : connecté les nœuds dans le RB de la même façon que les portes logiques sont connectées dans l'AdD.
- Étape 6 : attribuer aux nœuds correspondant aux portes logiques, les tables de probabilité conditionnelle comme le montre Exemple de création des tables de probabilité conditionnelle des portes logiques "ET" et "OU» dans la Figure IV.8. [113].



IV.8. Exemple de création des tables de probabilité conditionnelle des portes logiques "ET" et "OU" [150]

Après avoir démontré ces étapes, nous montrons un exemple simple de la façon de convertir la structure d'un AdD vers la structure d'un RB [107]. Voir Les Figures IV.9.

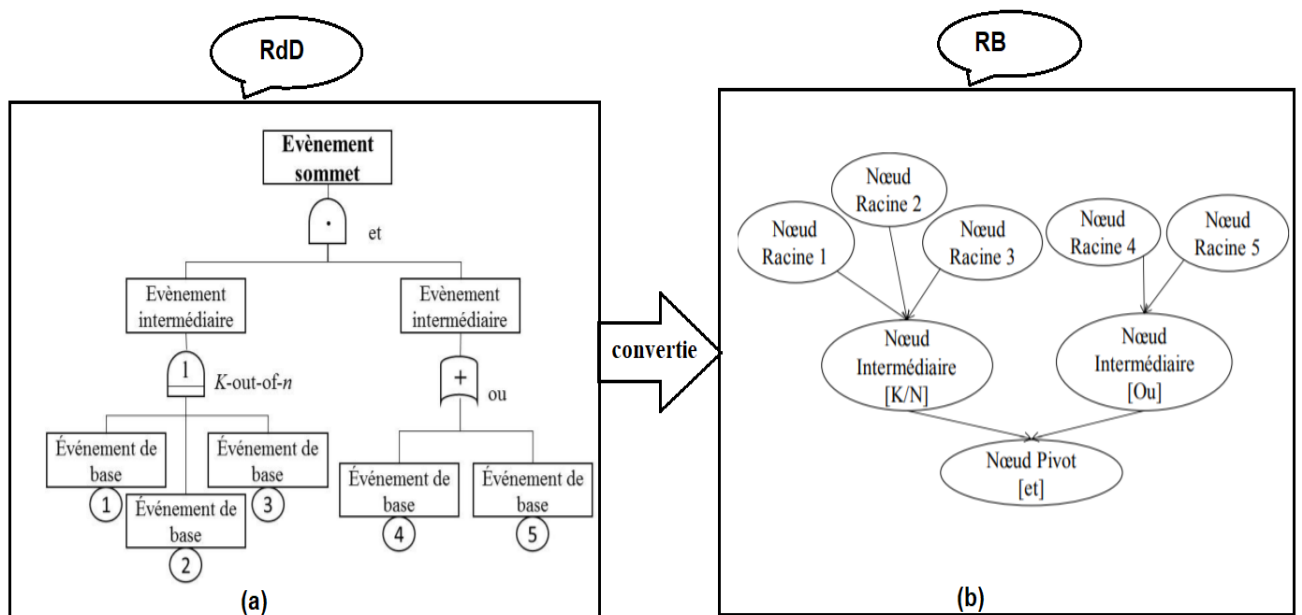


Figure IV.9. Exemple de Structure d'AdD (a) convertie vers la structure d'un RB (b) [107]

Chapitre IV. Réseau bayésien

IV.6.3. exemple pratique d'un système électrique

Le système électrique à la Figure.IV.10 est considéré comme un système à plusieurs composants ; ces composants forment un système en série. La défaillance d'un composant du système conduit à la défaillance de l'ensemble du système pour un fonctionnement plus efficace de ce système électrique ; nécessitent des systèmes auxiliaires et même des systèmes de sauvegarde comme solutions pour fournir un enregistrement électrique au client à chaque instant. Ces solutions créent un système électrique complexe.

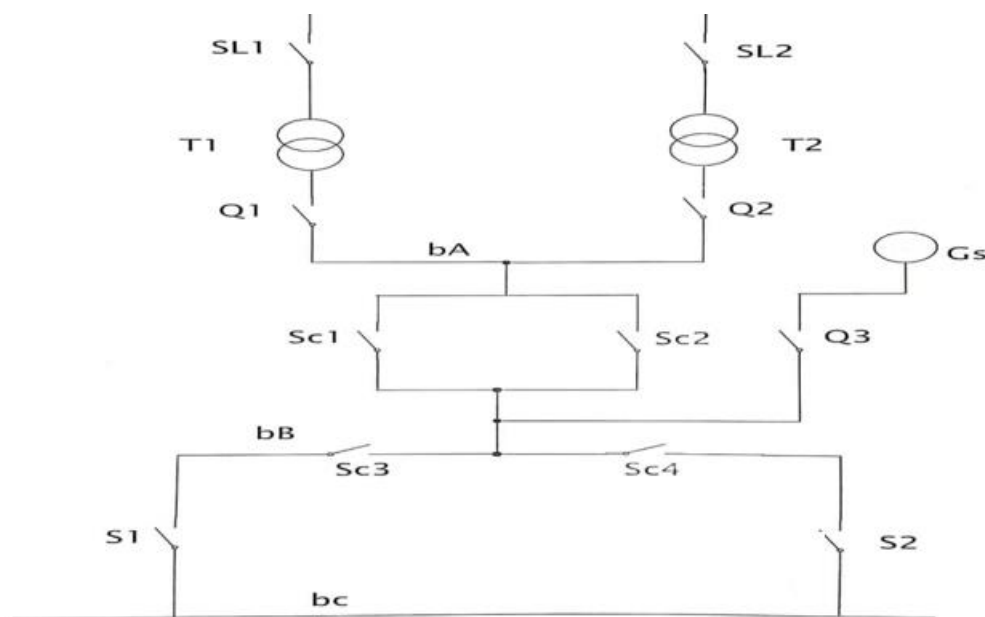


Figure.IV.10 La conception du système électrique.

Ce système électrique est constitutif de trois sources différentes, le premier est le transformateur principal (T 1), la seconde le transformateur auxiliaire (T 2) et le dernier est le générateur de secours.

1 Le transformateur (T 1) : ce transformateur est présent en source principale cette source est suivie du sectionneur de ligne (SL1) et d'un disjoncteur Q1 ce dernier alimente les jeux de barres (A). Grâce aux sectionneurs de couplage (SC1 ou SC2) alimentent les jeux de barres (b). L'alimentation des barres (C) à travers le sectionneur de couplage (SC1 ou SC2), il existe deux possibilités d'alimentation : soit à partir du sectionneur de couplage (SC3) et du sectionneur de ligne (S1) ou à travers le couplage du sectionneur (SC4) et le sectionneur de ligne (S2).

2. Le transformateur (T 2) : ce transformateur se présente comme une source axillaire, c'est en cas de panne à la source principale (T1) avec des équipements propres, cette source et les mêmes principes de fonctionnement que la source principale.

3. Le générateur de secours (GS) : est présent comme source d'inquiétude en cas de panne de deux président source mais intègre ce générateur de secours au niveau du jeu de barres (b). Pour alimenter le jeu de barres (C) Nous avons deux possibilités d'alimentation : soit à partir

Chapitre IV. Réseau bayésien

du sectionneur de couplage (SC3) et du sectionneur de ligne (S1), soit via le sectionneur de couplage (SC4) et le sectionneur de ligne (S2).

IV.6.3.1. la construction d'Arbre de défaillance du système

Dans l'analyse de fiabilité, nous pouvons distinguer trois types de défaillances caractéristiques qui peuvent être inhérentes au comportement ou à l'équipement.

Premièrement, il y a des défaillances qui se produisent fréquemment dans la vie d'un composant, elles sont appelées défaillances précoces et, dans la plupart des cas, résultent de mauvaises techniques de fabrication et de contrôle de la qualité au cours du processus de production.

Deuxièmement, il y a des pannes causées par l'usure des pièces. Celles-ci se produisent dans l'équipement uniquement s'il n'est pas correctement entretenu ou pas du tout entretenu.

Troisièmement, il y a les soi-disant «échecs fortuits». Ces défaillances sont causées par une sommation soudaine des contraintes accumulées au-delà de la résistance nominale du composant. Des échecs aléatoires se produisent à des intervalles aléatoires, irréguliers et inattendus. La méthodologie de l'arbre de défaillances couramment utilisée pour l'analyse de fiabilité, nous nous y référons pour introduire la représentation avec BN. L'analyse de fiabilité commence par la construction de l'arbre des défaillances du système, qui est une représentation graphique. Les symboles de base utilisés dans les arbres de pannes sont classés en plusieurs types : événements, portes et symboles de transfert. Dans les logiciels qui permettent d'éditer les arbres de défaillances, nous pouvons voir des variations mineures. À partir du principe de fonctionnement de notre système électrique en peu de construction d'un diagramme de défaut présent dans la Figure.IV.10.1

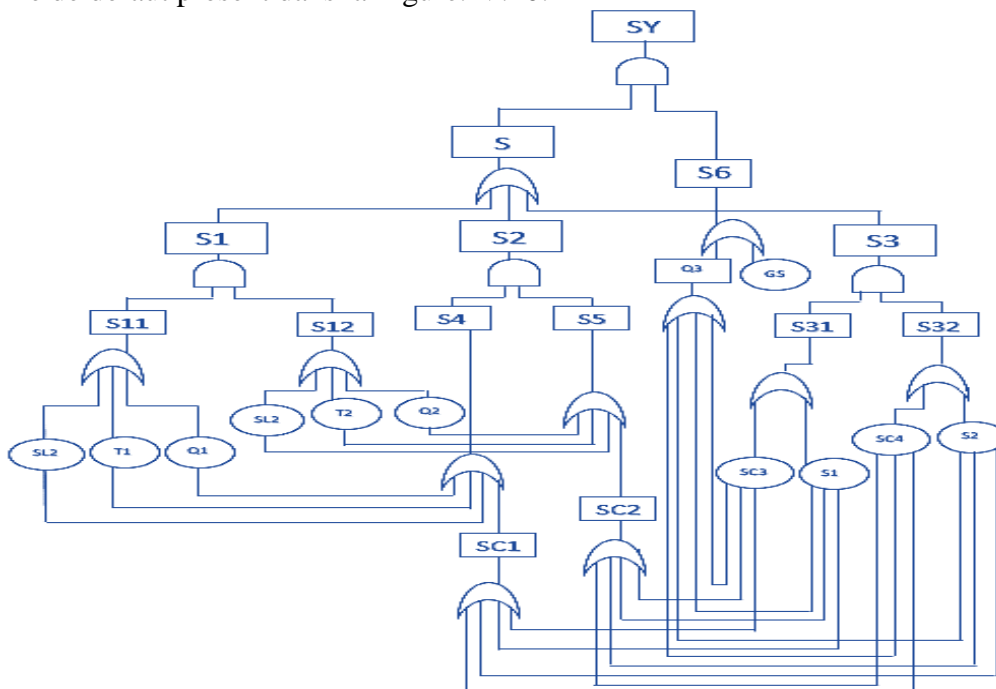


Figure.IV.10.1 Présentations d'un arbre de défaillances du système électrique.

Chapitre IV. Réseau bayésien

IV.6.3.2. La conception du système électrique avec le réseau bayésien

L'objectif est de construire un outil informatique polyvalent capable d'évaluer la fiabilité sur la durée de vie ou l'usure de systèmes complexes. Les arbres de défauts sont utilisés pour l'analyse de fiabilité. Cependant, en utilisant une approche BN, la solution est simplifiée afin que la fiabilité du système puisse être obtenue à partir d'un seul réseau. Une représentation graphique du système par le schéma de réseau bayésien.

Un algorithme développé pour générer automatiquement une représentation BN à partir de l'échec Arber. L'utilisation du logiciel AgenaRisk a créé un modèle pour déterminer la fiabilité du système à partir du réseau bayésien, qui a été présenté à la figure IV.10.2.

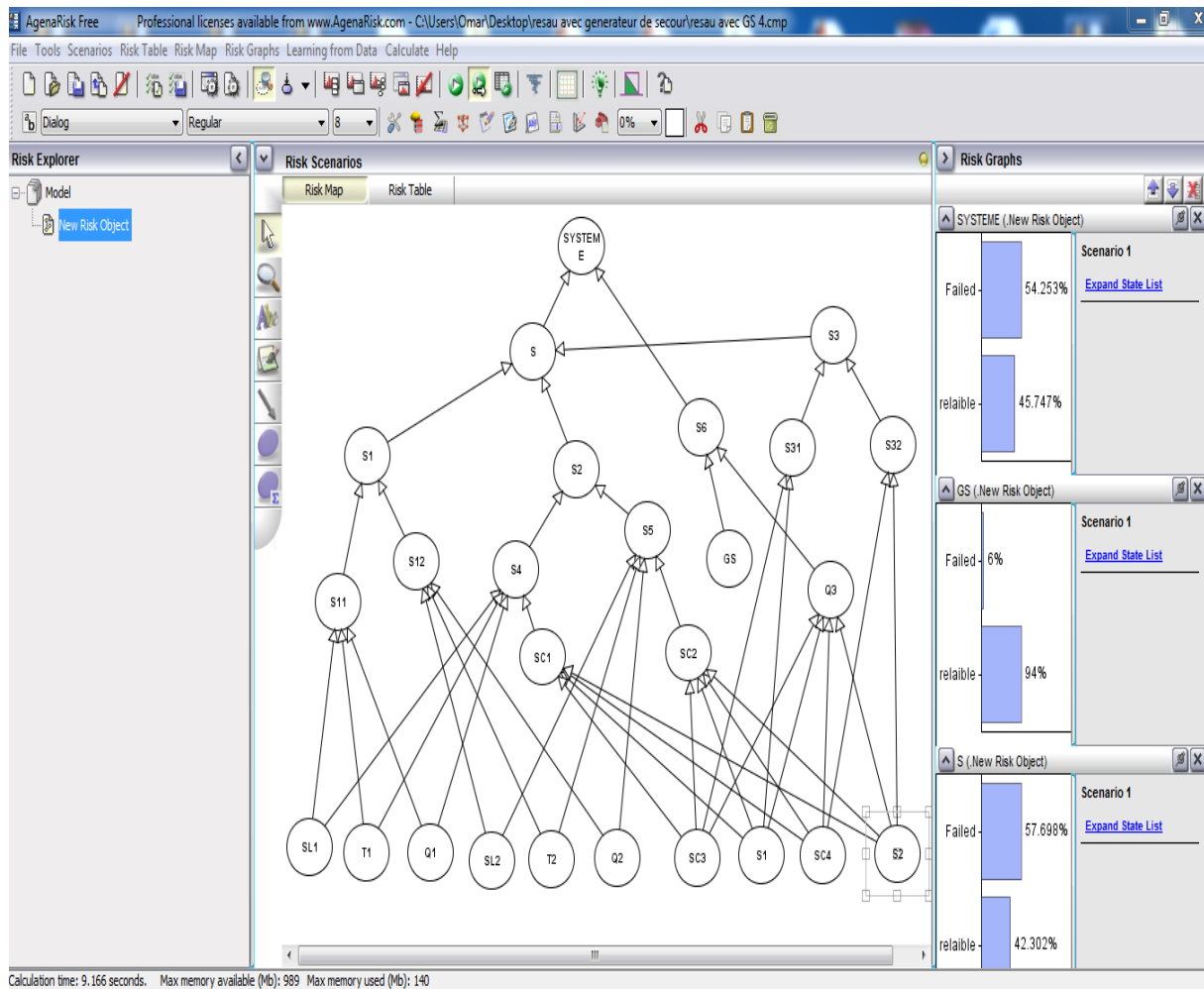


Figure IV.10.2 Présentations du système de réseau bayésien.

Après l'analyse fonctionnelle du système étudié, nous avons développé ce réseau, qui se compose de nœuds et d'arcs où les nœuds sont les éléments pouvant être une cause d'échec, et les arcs expriment l'influence des nœuds parents sur les nœuds enfants. La probabilité technique de propagation (dans ce cas, il s'agit d'un réseau multi-connecté) est appliquée au réseau de la figure IV.10.2. En obtenant des probabilités pour le système complet (P) pendant environ 30 ans, les résultats du système sont présents dans le tableau IV.2.

Chapitre IV. Réseau bayésien

Tableau IV.2. Fiabilité (probabilité de succès) pour un système avec des défaillances de cause commune

| Année | système sans générateur de secours | | système avec générateur de secours | |
|-------|------------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|
| | $R(t)$ | $F(t) = 1 - R(t)$ | $R(t)$ | $F(t) = 1 - R(t)$ |
| 0 | 1 | 0 | 1.00 | 0.00 |
| 5 | 0.79913 | 0.20087 | 0.80337 | 0.19623 |
| 11 | 0.61831 | 0.38169 | 0.63161 | 0.36839 |
| 17 | 0.54253 | 0.45747 | 0.57698 | 0.42302 |
| 21 | 0.25309 | 0.74691 | 0.29851 | 0.70149 |
| 24 | 0.14858 | 0.85142 | 0.21119 | 0.78881 |
| 26 | 0.06015 | 0.93985 | 0.10352 | 0.89648 |
| 28 | 0.0188 | 0.9812 | 0.04283 | 0.95717 |

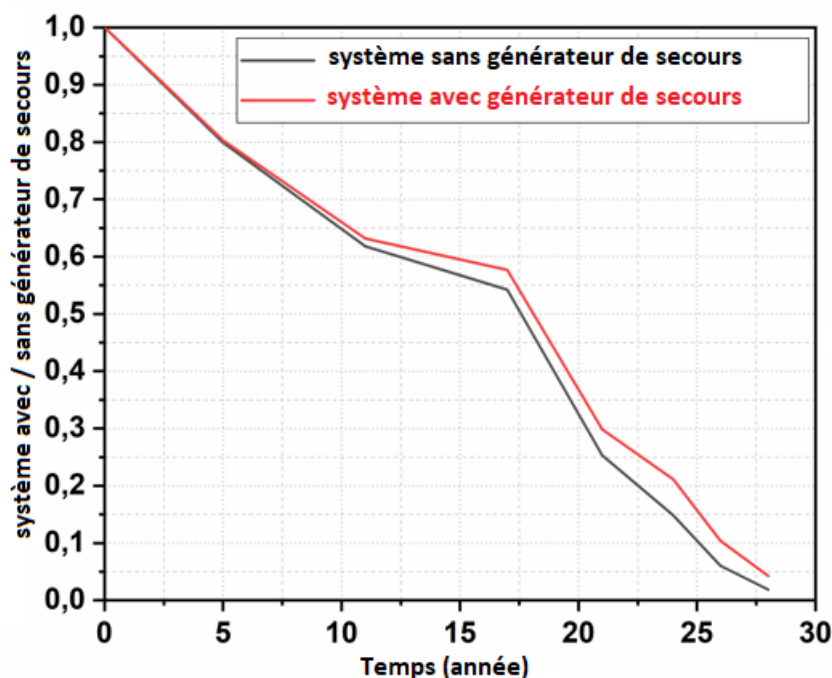


Figure IV.10.3 Fiabilité du système avec / sans générateur de secours

Le graphe de réseau bayésien modélisant la défaillance du système, afin de calculer par les différentes probabilités. Il est à noter que le pourcentage de défaillance du système avec un générateur de secours est diminué, mais avec une valeur inférieure au système sans générateur de secours, cela se voit clairement à 24 ans de service système avec une différence d'environ 7%. À partir de là, on peut dire que le générateur de secours est un équipement de secours qui produit de l'électricité et en même temps améliore le taux de fiabilité du système.

Dans notre exemple du système électrique on montre que Le réseau bayésien présente une forte similitude avec les arbres de défaillance. L'arbre de défaillances peut être considéré comme un cas particulier de BN.

Chapitre IV. Réseau bayésien

IV.7. Inférence Bayésienne

L'inférence bayésienne est une méthode d'inférence statistique dans laquelle le théorème de Bayes est utilisé pour mettre à jour la probabilité d'une hypothèse à mesure que davantage de preuves ou d'informations deviennent disponibles.

L'inférence bayésienne est une technique importante en statistique, et en particulier en statistique mathématique. Ce type d'inférence est généralement appelé mise à jour des probabilités. À partir de ce constat, nous pouvons dire que le modèle représenté par un RB n'est pas un modèle statistiquement fermé.

Deux familles d'algorithmes d'inférence bayésienne sont disponibles dans la littérature : les méthodes d'inférence exactes et les méthodes d'inférence approchées comme présente dans la figure. En terme générale "inférence" désigne tout calcul portant sur la distribution de probabilité associée à un réseau bayésien [114].

IV.7.1.Méthodes d'inférences exactes

La possibilité de faire une erreur est inhérente à toute procédure d'inférence statistique. Ces procédures sont généralement conçues pour contrôler et quantifier la probabilité d'une erreur par le biais de niveaux de signification et de coefficients de confiance. Les méthodes d'inférence approximatives réussissent à contrôler les erreurs avec divers degrés de succès. Des méthodes d'inférence exactes garantissent le contrôle des erreurs pertinentes. Ces méthodes sont les plus utiles lorsqu'elles peuvent contrôler les erreurs sous des hypothèses relativement larges. Cette famille est aussi divisée en deux classes d'inférence, la première est dite méthode de propagation de messages [115]. La seconde est dite méthode de regroupement de nœuds [116].

IV.7.1.1.Méthode de propagation de messages

Est un algorithme à passage de message pour effectuer des inférences sur des modèles graphiques, Cet algorithme fut proposé pour la première fois par Judea Pearl, en 1921. Cette méthode est réservée aux RBs de structure sous forme d'arbre ou poly arbre mais elle peut être généralisée à tous les graphes en utilisant un algorithme dit de coupe cycle [114]. Elle procède par des calculs locaux en chaque nœud du graphe. L'information est transmise de proche en proche, chaque nœud ayant reçu une information doit mettre à jour sa probabilité marginale et ensuite la communiquer à ses nœuds voisins, jusqu'à ce que tous les nœuds du réseau puissent mettre à jour leur probabilité marginale.

IV.7.1.2. Méthode de l'arbre de jonction

L'algorithme d'arbre de jonction (également connu sous le nom « algorithme somme-produit ») est basée sur des transformations du graphe (i.e. regroupement de nœuds) afin d'obtenir une structure dite d'arbre de jonction et ensuite passer aux calculs par propagation de messages.

Chapitre IV. Réseau bayésien

Le graphique s'appelle un arbre parce qu'il se divise en différentes sections de données. L'algorithme de l'arbre de jonction peut être divisé en six phases principales :

1. Moralisation du graphe.
2. Triangulation du graphe.
3. Construction d'un arbre de jonction optimal.
4. Attribution des potentiels et initialisation de l'arbre de jonction.
5. Propagation de messages.
6. Marginalisation.

On présente le Diagramme de l'algorithme de l'arbre de jonction et ses différentes étapes, dans la Figure IV.11 [117].

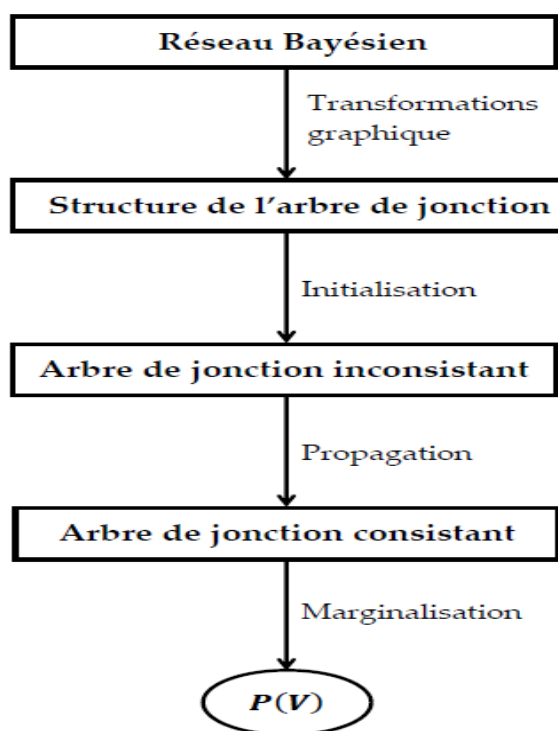


Figure IV.11.Diagramme de l'algorithme de l'arbre de jonction. [117]

Le principe de base de cette méthode est d'éliminer les cycles en les regroupant en nœuds simples. Plusieurs classes étendues de requêtes peuvent être compilées simultanément dans des structures de données plus grandes. Il existe différents algorithmes pour répondre à des besoins spécifiques et pour ce qui doit être calculé. Les algorithmes d'inférence rassemblent les nouveaux développements dans les données et les calculent en fonction des nouvelles informations fournies.

IV.7.2.Méthodes d'inférences approchées

Dans de nombreux cas, le calcul de l'inférence exacte est impossible à cause du trop grand nombre de variables et/ou de leur trop grande cardinalité. On est alors capable d'approximer le calcul de l'inférence en utilisant des algorithmes d'inférences approchées. Ces méthodes sont réservées aux réseaux bayésiens très complexes où le temps de calcul par les méthodes

Chapitre IV. Réseau bayésien

d'inférence exacte est considérable [118]. Elles sont aussi utilisées pour les réseaux bayésiens hybrides où il est impossible d'utiliser les méthodes d'inférence exacte. Ces méthodes sont connues aussi sous le nom de méthodes de « Sampling » ou d'échantillonnage [119]. Elles consistent à tirer des échantillons dans l'espace des valeurs possibles des variables et approchent la distribution cherchée. Dans la plupart des cas, la difficulté réside dans la façon de générer des échantillons. Il existe deux familles de méthodes d'inférence approchées :

- les algorithmes utilisant des méthodes de simulation stochastiques
- les algorithmes utilisant des méthodes de calcul exact mais sur une partie du graphe.

IV.7.2.1. Méthodes de simulations stochastiques

Cette méthode permettant de calculer les estimateurs approchés (i.e. moyenne, écart-type, ...) des paramètres d'une loi de probabilité par les méthodes de simulation. Les méthodes les plus répandues sont basées sur des simulations de type Markov Chain Monte Carlo (MCMC), tel que l'algorithme de Metropolis-Hastings (M-H) et l'échantillonneur de Gibbs [120].

IV.7.2.2. Méthodes exacte sur des graphes réduits

Nous pouvons distinguer deux approches différentes :

La première approche, que nous pouvons trouver dans les travaux de Kjærulff [120], vise à réduire la complexité du calcul en supprimant quelques liens entre les variables et ainsi réduire les tailles des tables de probabilité.

La seconde approche, qui est proposée par D'Ambrosio [121], ne considère qu'une partie des tables de probabilité des variables et cela en supposant que les lois de probabilité de ces variables sont quasi-certaines. Mais la structure du graphe reste inchangée mais la propagation de l'information dans le graphe n'est pas totale.

En générale Ce sont des méthodes relativement récentes par rapport aux autres méthodes d'inférence.

IV.8. Type des réseaux bayésiens

Dans cette section, nous présentons les types de RBs les plus utilisés dans le domaine de la maintenance et de la fiabilité.

IV.8.1 Diagrammes d'influence

En aide à la décision, un diagramme d'influence est une représentation graphique et mathématique de problèmes d'inférence et de décision. Les diagrammes d'influence sont une généralisation des arbres de décision.

Un diagramme d'influence se représente sous la forme d'un graphe acyclique orienté. Il est à noter que pour différencier les types de nœuds, les nœuds classiques (probabilistes) sont représentés par des cercles (comme dans un RB), les nœuds de décision par des carrés et les nœuds d'utilité par des losanges.

Chapitre IV. Réseau bayésien

Les diagrammes d'influence sont très utilisés dans le domaine de l'aide à la décision. Ils sont équivalents aux arbres de décision du point de vue calcul mais la représentation par diagramme d'influence est plus compacte et plus facilement applicable aux problèmes de grande taille

La figure IV.12. Présenté un exemple de diagramme d'influence.

Ce réseau bayésien dynamique représente un système de distribution de fluide modélisé par le logiciel BayesiaLab. Les nœuds utilité sont représentés par des losanges, les nœuds de décision sont représentés par des carrés, alors que les nœuds probabilistes (nœuds classiques du réseau) sont représentés par des ronds [122].

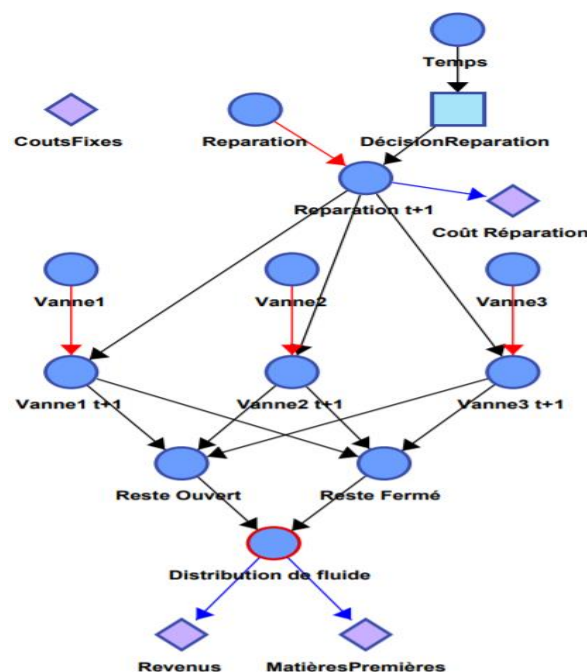


Figure IV.12. Exemple de diagramme d'influence. [122]

IV.8.2 .Réseaux Bayésiens Orientés Objet

Les réseaux bayésiens orientés objet sont de puissants outils de modélisation de la connaissance pour de larges systèmes. Les réseaux bayésiens orientés objets (Oriented Object Bayesian Networks en anglais) sont introduits dans le but de réduire la complexité d'un RB représentant les systèmes complexes avec un grand nombre de variables. Ils permettent de fusionner des sous-structures répétées dans un RB et ainsi réduire la taille du modèle.

Ce type de modèles est adapté à la modélisation des systèmes complexes comportant des sous-structures ayant le même mode de raisonnement ainsi que les systèmes comportant des sous-systèmes ou composants redondants [123]. Ils sont aussi utilisés pour représenter les réseaux bayésiens dynamiques.

Chapitre IV. Réseau bayésien

IV.8.3. Réseaux bayésiens dynamiques

Les réseaux bayésiens dynamiques sont une extension des RBs dans laquelle la variable temps est prise en considération et cela par des arcs représentant les dépendances temporelles probabilistes entre les variables (nœuds). Les réseaux bayésiens dynamiques sont des réseaux bayésiens intégrant la notion de temps. C'est-à-dire qu'une variable peut influencer sa propre valeur à l'instant suivant (voir figure IV.13).

Si on considère un ensemble de variables $D(t) = \{D_1(t), D_2(t) \dots D_n(t)\}$ évoluant dans le temps, un réseau bayésien dynamique représente la distribution de probabilité jointe de ces variables pour un intervalle borné $[0, T]$. En général, cette distribution peut être codée par un réseau bayésien statique avec $T \times n$ variables. Si le processus est stationnaire, les hypothèses d'indépendance et les probabilités conditionnelles associées sont identiques pour tous les temps t . Dans ce cas, le réseau bayésien dynamique peut être représenté par un réseau bayésien dont la structure est dupliquée pour chaque pas de temps. Un nœud représente donc une variable aléatoire dont la valeur indique l'état occupé à l'instant t [122].

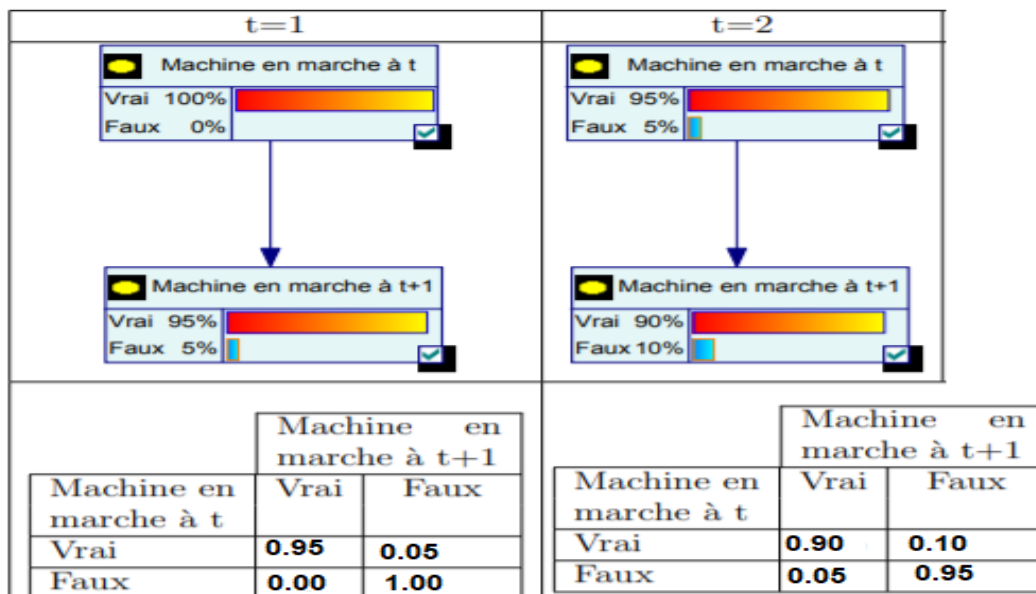


Figure.IV.13. Exemple de réseau bayésien dynamique. [122]

IV.9. Classification des applications aux réseaux bayésiens par domaines

On peut distinguer quatre grande famille ou secteur pour le domaine d'application des réseaux bayésiens talque la sante, finance, Industrie et défense. OÙ ces sont les secteurs très sensible qui joue un rôle un portant pour le développement de chaque pays au monde.

IV.9.1. Domaine de la Santé

Les réseaux bayésiens sont particulièrement adaptés au domaine du diagnostic médicale parce qu'ils offrent la possibilité d'intégrer des sources de connaissances hétérogènes (expertise

Chapitre IV. Réseau bayésien

humaine et données statistiques), et surtout parce que leur capacité à traiter des requêtes complexes (explication la plus probable, action la plus appropriée) peuvent constituer une aide véritable et interactive pour le praticien. Où Les premières applications des réseaux bayésiens ont été développées dans ce domaine (diagnostic médical).au début des années 1990 a été développé Le système Pathfinder, ce système pour aider à faire un diagnostic histopathologie, c'est-à-dire basé sur l'analyse des biopsies. Il est aujourd'hui intégré au produit Intellipath, qui couvre un domaine d'une trentaine de types de pathologies.

IV.9.2.Domaine de la défense

La fusion de données est particulièrement un domaine d'application privilège des réseaux bayésiens. Grâce à leur capacité à prendre en compte des données incomplètes ou incertaines et guider la recherche ou la vérification de ces informations. Grâce à la défense américaine que les réseaux bayésiens ont pu connaître leurs premiers développements. Où La société Mitre a développé un système de défense tactique embarqué pour les navires de guerre de la marine amé décide des ripostes à adopter. Ce système analyse les informations permet en particulier de gérer les menaces multiples, qui peuvent générer des conflits sur l'affectation des armes

IV.9.3.Domaine de Banque/finance

Dans les années 1980 avec des systèmes experts, des applications comme l'analyse financière, la détection de fraudes ont été progressivement considérées comme relevant du domaine de la modélisation quantitative, et donc abordées par des techniques comme les réseaux neuronaux ou les arbres de décision, techniques quantitatives qui se révèlent incapables de prendre en compte par elles-mêmes la révision des modèles. Où la technologie de réseaux bayésien présente un potentiel très important pour un certain nombre d'applications relevant du domaine de la banque, comme l'analyse financière, l'évaluation du risque ou la détection de fraudes .mais Les applications dans le domaine de la banque et de la finance sont encore rares, ou du moins ne sont pas publiées.

IV.9.4.Domaine de l'industriel

Dans le domaine industriel, les réseaux bayésiens présentent également certains avantages par rapport aux autres techniques d'intelligence artificielle .le réseau bayésien été inclus dans l'évaluation de la fiabilité de la sûreté de fonctionnement et même de la sécurité industrielle et encore la sécurité des personnes, où nous présentons un exemple de modèle de prédiction pour le phénomène de choc électrique à l'aide d'un réseau bayésien.

IV.9.4.1. Exemple pratique

Chaque année, une dizaine de personnes meurent électrocutées. On estime que 200 personnes meurent chaque année à cause de l'électricité en Algérie, phénomène de choc électrique si le courant électrique traverse le corps et provoque des blessures plus ou moins graves. Ce Phénomène se produit notamment lors des opérations sur des installations fixes basse tension (Coffret électrique, armoires, coffrets et prises ...). Le but de cette étude est de développer un modèle qui simule le phénomène de choc électrique et ses causes. A partir de la théorie des

Chapitre IV. Réseau bayésien

probabilités conditionnelles développée par Bayes, la conception de ce modèle a été créée par l'utilisation de réseaux bayésiens.

IV.9.4.1.1. analyse des causes des chocs électriques

Le phénomène (de choc électrique) est principalement lié à trois facteurs. Chacun de ces facteurs a un ensemble d'éléments considérés comme des nœuds dans le réseau bayésien :

- A. L'installation de l'appareil contient les éléments suivants :
 - Type d'alimentation (monophasé 220V ou triphasé 380V) (N2).
 - Disjoncteur (N3).
 - Porte-fusible (N4).
- B. L'utilisateur de l'appareil contient les éléments suivants :
 - Mode d'utilisation (N5).
 - Sexe de l'utilisateur (N6).
 - Âge de l'utilisateur (N7)
 - Comportement de l'utilisateur (N8).
- C. Enquêtes sur l'appareil et l'installation Contient les éléments suivants :
 - Fusibles (N9).
 - Fils électriques (N10).
 - Stabilisateur de tension (N11).

A partir des statistiques annuelles fournies par la compagnie d'électricité algérienne SONELGAZ et avec l'aide de la direction générale de la protection civile. Voir figures IV.14

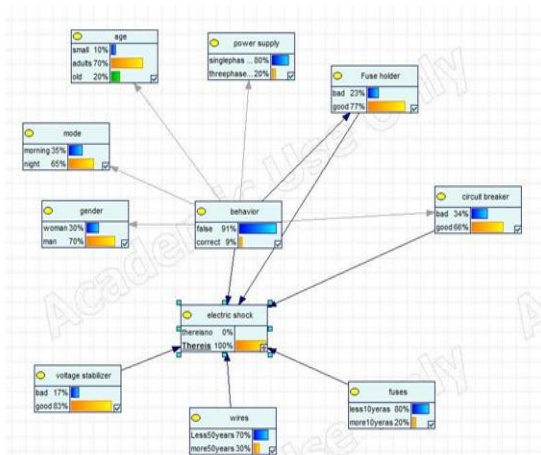


Figure IV.14.1. Simulation des résultats de l'occurrence en choc Électrique à 100%.

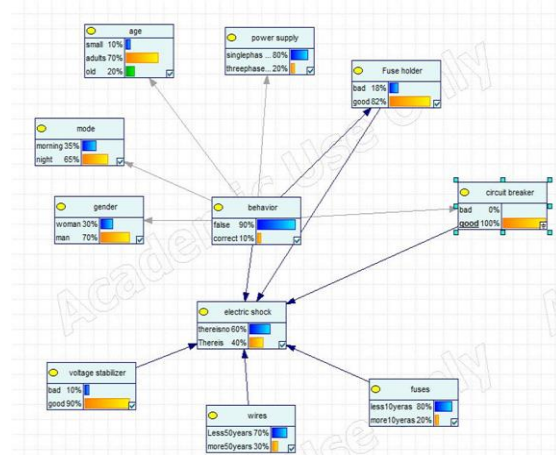


Figure IV.14.2. Résultats de la simulation du disjoncteur à 100% Bon

Chapitre IV. Réseau bayésien

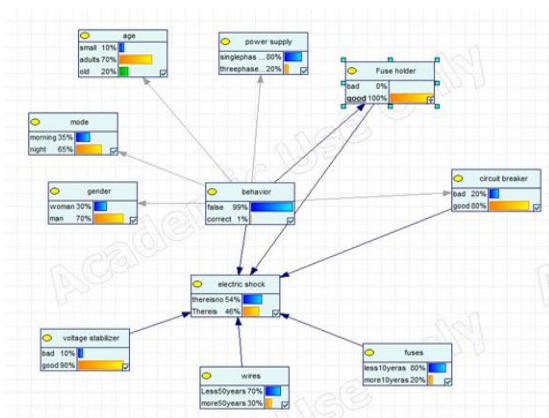


Figure IV.14.3. Résultats de simulation de la bonne moyenne de protection le port fusible à 100%

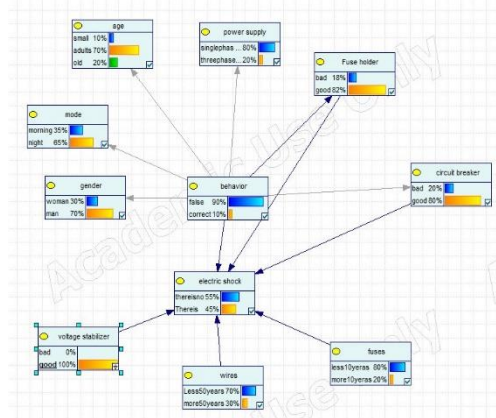


Figure IV.14.4. Résultats de la simulation de stabilisation de stable à 100% en bon état.

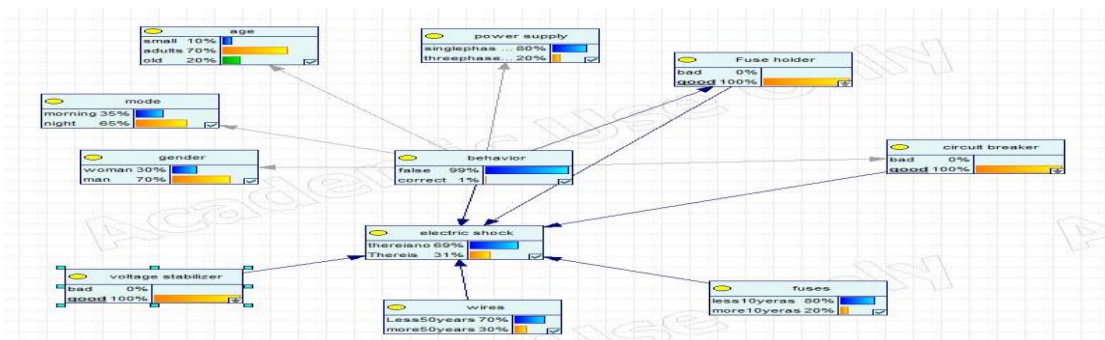


Figure IV.14.5. Résultats de simulation de l'équipement de protection en bon état à 100%.

Figures IV.14. Analyse des causes des chocs électriques

IV.9.4.1.2. les simulation des cas

Simulation №1: Il y a un choc électrique à 100%

Dans cette simulation, nous avons mis la probabilité d'occurrence d'un choc électrique à 100%, et nous avons remarqué que les éléments dans lesquels les probabilités ont radicalement changé étaient: le disjoncteur, le port fusible, le stabilisateur de tension et le comportement de l'utilisateur. Ces éléments sont que nous allons simuler la probabilité d'occurrence de leurs modalités, puis observer son impact sur l'apparition d'un choc électrique.

Simulation №2: Le disjoncteur a l'état 100% bon.

Dans cette simulation, nous proposons une probabilité de disjoncteur bonne à 100%, nous avons constaté que l'incidence des chocs électriques. Environ 40%, cela explique l'importance du disjoncteur comme équipement de protection même si le comportement de l'utilisateur fait 90%.

Figure IV.14.1. Simulation des résultats de l'occurrence en choc électrique à 100%.

Simulation №3: bon équipement de protection, 100% porte-fusible

Dans cette simulation, nous proposons une bonne probabilité de port de fusible de 100%; nous avons constaté que l'incidence des chocs électriques. Environ 46%, cela explique

Chapitre IV. Réseau bayésien

l'importance du port fusible même avec le mauvais comportement de l'utilisateur qui est d'environ 99%.

Simulation №4: Stabilisateur de tension à l'état 100%.

La probabilité d'un bon stabilisateur de tension à 100%, a révélé que l'incidence des chocs électriques. Environ 45%, avec une probabilité de faux comportement de l'utilisateur d'environ 90%.

Simulation №5: L'équipement de protection en bon état à 100%.

On remarque à travers la figure ci-dessus qu'un bon équipement de protection diminue la probabilité d'occurrence d'un choc électrique à 31%. Même le comportement de l'utilisateur est faux à presque 99%. Ce pourcentage de simulation oblige les utilisateurs à mettre les équipements de protection pour assurer la bonne sécurité du bien.

En générale Les simulations réalisées par notre modèle d'évaluation du risque de choc électrique, prenant différents états des nœuds constituant le graphe causal, visent à proposer aux responsables de la sécurité, un outil de décision sur les actions sécurité à entreprendre en même temps sur les installations, ainsi que les utilisateurs.

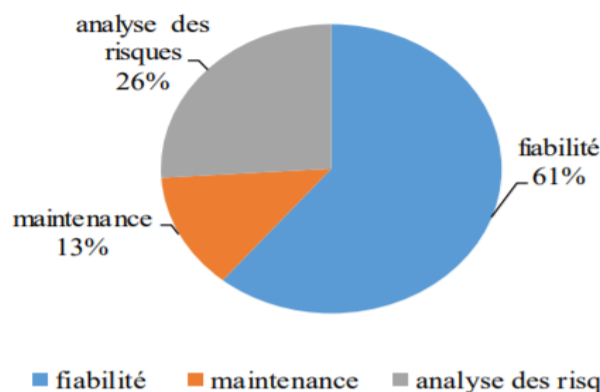
Le modèle de risque proposé est basé sur une vision systémique de l'analyse des risques, il s'agit donc d'essayer de comprendre comment ce système réagit en fonction de ses éléments et de son environnement. Il a été observé à travers les résultats des inférences faites dans le modèle construit, que les moyens de protection électrique des utilisateurs restent un facteur déterminant dans la survenue des accidents, et que toute amélioration de la sécurité passe avant par ces moyens électriques. Protection, pour cela nous choisissons des équipements électriques très fiables et très sensibles pour protéger la vie des utilisateurs.

IV.10.Utilisation des réseaux bayésiens pour la fiabilité du système

IV.10.1.littérature sur l'application du BN à la fiabilité

Dans la littérature spécialisée sur le BN, la plupart des références sont liées aux algorithmes d'apprentissage et d'inférence. Néanmoins, nous avons trouvé un ensemble de 200 articles sur l'application du BN à la fiabilité, à l'analyse des risques et à la maintenance.

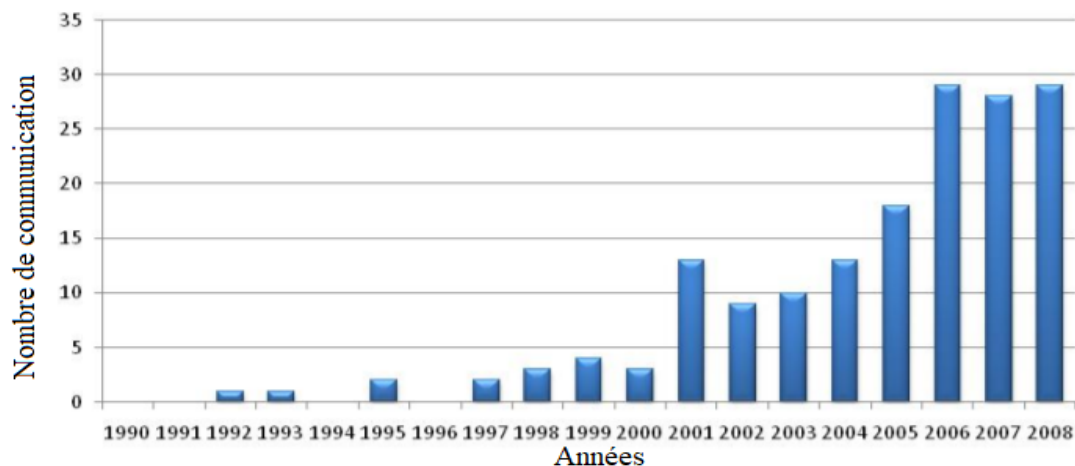
Il montre une augmentation continue du nombre de références et, un intérêt scientifique et industriel pour cet outil. La plupart des sélectionnés les références concernent la fiabilité avec 61% des publications, l'analyse des risques avec 26% et la maintenance avec 13%(Figures IV.15.).



Figures IV.15. Répartition des références sur les thèmes [124]

L'objectif de la fiabilité est de fournir une prédiction d'un paramètre (temps restant avant de tomber en panne, MTTF, fiabilité, etc.) qui est une donnée d'entrée pour l'étape de décision (par exemple optimisation de la maintenance, conception de système fiable...). Ainsi, il est nécessaire de prendre en compte certains aspects tels que les éléments multi-états, les dépendances des pannes, la redondance du système, l'évolution dynamique, par exemple. Le processus de dégradation et d'incorporer les facteurs influençant la fiabilité d'un système tels que les conditions d'exploitation.

Tendances des applications RB sur la fiabilité



Figures IV.16. Les nombres des publications liées à l'application RB sur la fiabilité [124]

Les modèles BN sont de plus en plus utilisés dans les analyses de fiabilité pour prendre en charge des aspects tels que la fiabilité, la disponibilité et la maintenabilité. La figure IV.16. Montre le nombre de références par an liées à l'application du BN aux analyses de fiabilité. Depuis 2000, on observe une augmentation significative de 800% sur leur application en raison des avantages de modélisation que BN peut offrir [124].

IV.10.2. Estimation de la fiabilité d'un système complexe

La fiabilité d'un système complexe a été estimée par quatre scénarios différents : (i) les distributions conditionnelles sont précises, (ii) les distributions marginales et conditionnelles sont imprécises (elles sont approximées selon la distribution uniforme), (iii) même cas que le

Chapitre IV. Réseau bayésien

précédent mais avec quelques données précises sur les distributions conditionnelles et (iv) les données sont collectées au fil du temps,

En raison de la difficulté de les avoir [125] où Les applications des RBs pour l'analyse de fiabilité ont reçu beaucoup d'attention dans les dernières années [126]. Ce constat peut être justifié par la nature des systèmes actuels qui deviennent de plus en plus complexes d'une part et par le besoin de considérer tous les facteurs ayant une influence (directe ou indirecte) sur la fiabilité du système d'autre part.

IV.10.2.1. Méthodologie générale

L'estimation de la fiabilité d'un système avec les RBs, les tables de probabilité a priori doivent être établies en utilisant l'équation III.1 pour chaque intervalle de discrétisation. En utilisant l'inférence bayésienne, la fiabilité du système global est estimée pour chaque intervalle de discrétisation. L'évolution de la fiabilité en fonction du temps, peut donc être obtenue à partir des résultats de l'inférence.

IV.10.2.2. Application

On mètre un exemple [76] d'un système de trois configurations suivantes :

- (a) les trois composants sont en série ;
- (b) les trois composants sont en parallèle ;
- (c) les trois composants sont de configuration complexe.

Considérons de chaque configuration (série parallèle complexe) un système S constitué de trois composants S_1 , S_2 et S_3 . comment montrons dans la figure IV .17 avec Les tables de probabilité conditionnelles du nœud S et Les paramètre de fiabilité des sous-systèmes S_1 , S_2 et S_3 .

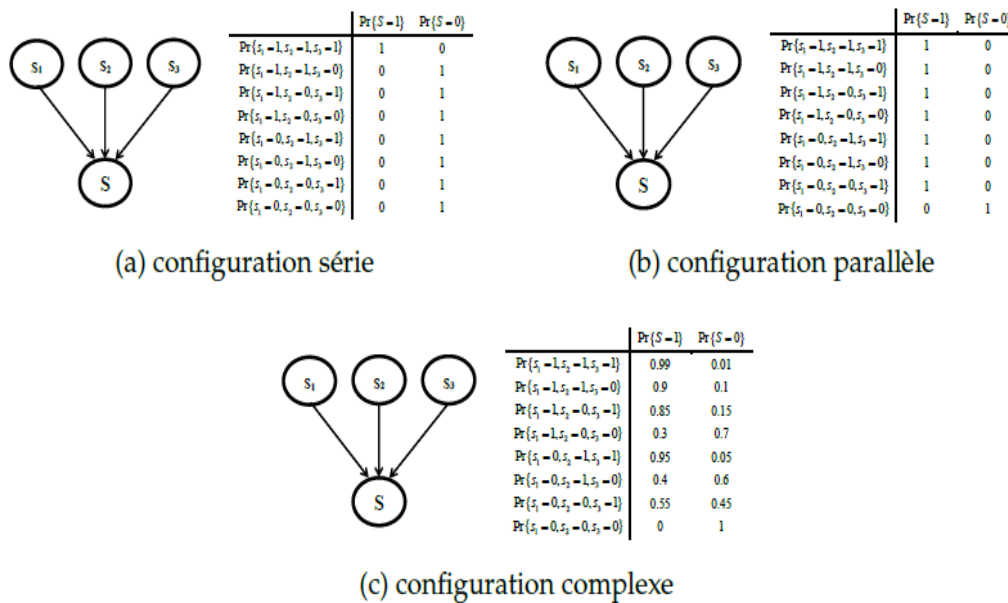


FIGURE IV .17. Réseau bayésien d'un système avec trois configurations différentes [150]

Chapitre IV. Réseau bayésien

La fiabilité du système est calculée par l'utilisation de l'algorithme de l'arbre de jonction qui a été programmé sous MATLAB. La FIGURE IV.18. Illustre les résultats de l'inférence bayésienne représentant l'évolution de la fiabilité du nœud S selon les trois configurations du système.

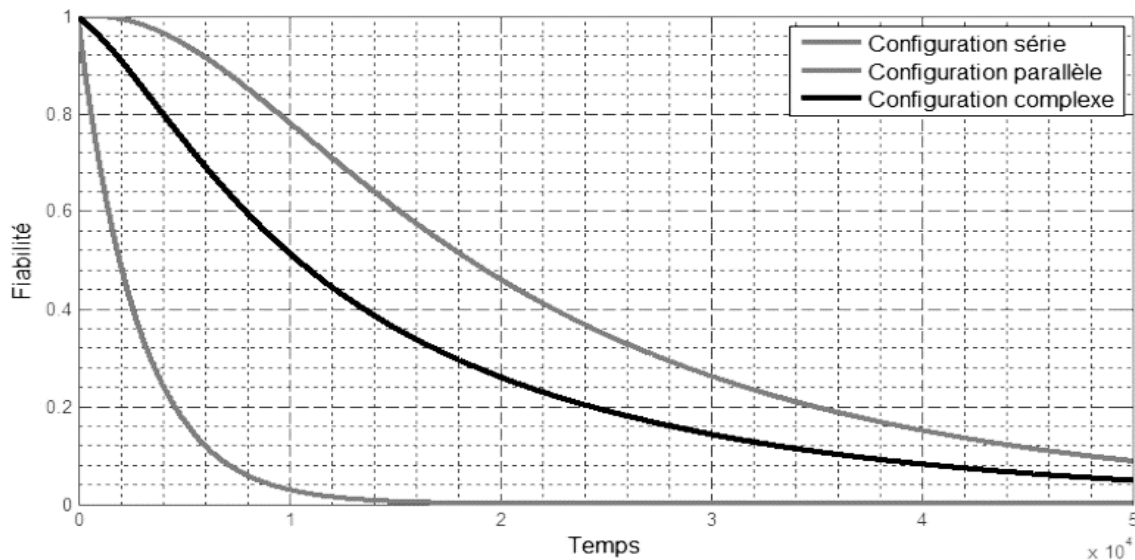


FIGURE IV.18. Évolution de la fiabilité d'un système estimée par les RBs [150]

IV.11. Conclusion

Dans Ce chapitre un aperçu de littérature sur les réseaux bayésiens en générale, ces réseaux qui font partie de la famille des modèles graphiques. Ils regroupent au sein d'un même formalisme la théorie des graphes et celle des probabilités afin de fournir des outils efficaces autant qu'intuitifs pour représenter une distribution de probabilités jointe sur un ensemble de variables aléatoires.

Où réseau bayésien étant considéré comme une méthode d'analyse probabilistes des systèmes et ses composants, il a été fréquemment utilisé pour une étude plus approfondie pour son efficacité visuelle et conceptuelle afin de représenter les relations entre les défaillances et les pannes d'un système.

Ces types de réseau ont été choisi comme étant démarche d'aide à la décision pour les intérêts suivant :

- Permet d'obtenir une connaissance enrichie, dont l'incertitude est plus faible : où la probabilité a posteriori représente la nouvelle connaissance pour l'analyste. grâce au principe d'actualisation dynamique des connaissances, utilisé en particulier pour l'actualisation des bases de données sur les défaillances.

Chapitre IV. Réseau bayésien

- La possibilité de convertir les méthodes d'analyse classiques tel que l'arbre de défaillance en réseau bayésien plus facilement et établir des analyses plus approfondies par l'utilisation des probabilités a priori, les bases des données, le retour d'expérience et le jugement d'experts.
- L'inférence dans les réseaux bayésien peut représenter les défaillances et pannes observés et les probabilités à posteriori permettent d'identifier les causes possibles. Ces probabilités peuvent être réutilisées comme probabilités de connaissance (à priori) pour une mise à jour du réseau.

Ainsi, ce chapitre comporte les aspects théoriques ainsi que notre contribution dans l'interprétation des facteurs d'importance dans les réseaux Bayésien à partir desquels seront élaborées des méthodes destinées à l'étude de notre cas réels dans le domaine de fiabilité des systèmes complexe .

Chapitre V.

L'efficacité de compensateur d'énergie réactive

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

V.1.LA Problématique

La pertinence des analyses de fiabilité a augmenté en raison de leur rôle dans l'amélioration de la disponibilité, de l'efficacité des performances, de la qualité des produits, des délais de livraison, des exigences environnementales et de sécurité et de la rentabilité totale de l'usine à des niveaux élevés. La fiabilité est l'une des branches de l'ingénierie reconnues et en développement rapide.

La production d'un produit parfait est une tâche phénoménale en raison des variations innées et comme le coût d'amélioration des pièces est très élevé, l'approche devient gênante lorsqu'il s'agit d'un système vaste et complexe. Étant donné que l'étude de fiabilité est considérée comme essentielle pour une bonne utilisation et maintenance des systèmes et des équipements d'ingénierie, il a acquis une grande validité parmi les ingénieurs en exercice et les ingénieurs de production.

De nos jours, l'un des problèmes majeurs dans le domaine de la fiabilité est d'aborder la modélisation du système en relation avec l'augmentation de sa complexité. Cette tâche de modélisation met en évidence des problèmes concernant la quantification des paramètres du modèle et la représentation, la propagation et la quantification de l'incertitude sur le comportement du système.

Les années précédentes, la fiabilité et l'analyse des risques des systèmes ont été étudiées en faisant des hypothèses simplifiant l'étude. L'une de ces hypothèses est de concentrer l'étude uniquement sur la partie technique du système [127].

Dans ce chapitre, nous mettons en évidence le problème de la modélisation d'une installation électrique avec un système de compensation d'énergie réactive (STATCOM) ce qui crée un système très complexe de point vu structurale et fonctionner .ensuite, nous étudions l'effet de la fiabilité du compensateur d'énergie réactive (STATCOM) sur l'amélioration de l'efficacité de ce système. Où La gestion de systèmes industriels complexes contribue à une compétitivité accrue et à des performances supérieures à moindre coût.

V.2. Introduction

La société moderne est de plus en plus dépendante de l'électricité avec une fiabilité élevée et une alimentation électrique requise [128]. La plupart des infrastructures industrielles ont besoin d'électricité pour leur fonctionnement et leur gestion. Les systèmes électriques sont donc particulièrement critiques. Cependant, le fonctionnement de ces systèmes peut être soumis à de nombreux types de risques, tels que les conditions météorologiques extrêmes, les risques naturels, le vieillissement des composants, les erreurs humaines, les animaux, etc. Le dysfonctionnement des systèmes électriques peut causer des dommages socio-économiques graves et étendus [129], comme ceux qui ont souffert d'une panne de courant lors du tremblement de terre de Northridge en 1994 qui a frappé Los Angeles et qui a touché 2,5 millions de clients. De plus, la panne d'électricité en 2003 en Amérique du Nord a affecté environ 50 millions de clients. L'architecture du réseau électrique industriel est plus complexe en fonction de trois éléments principalement : le niveau de tension, la puissance requise et la

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

nécessité de la sécurité d'alimentation. Le but des réseaux électriques est de transmettre l'énergie des sources aux centres de consommation sous une forme de courant alternatif interprétée par une puissance apparente (S) qui a deux composantes; puissance active (P) et puissance réactive (Q) [130]. En effet, la différence de tension entre deux extrémités d'une ligne est liée au transit de puissance réactive consommée par la charge. La pollution harmonique et la perte de puissance réactive sont les deux principaux problèmes de qualité de puissance (PQ) [131], qui peuvent introduire des perturbations de tension telles que des creux de tension et peuvent provoquer une défaillance grave des équipements électriques et réduire l'efficacité de la fiabilité du système électrique [132].

L'utilisation du compensateur statique (STATCOM) est l'une des solutions importantes aux problèmes de puissance réactive. STATCOM est un dispositif de systèmes FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) basé sur l'électronique de puissance [133], [134]. Le dispositif cité ci-dessus contient un convertisseur de source de tension qui convertit une tension continue à ses bornes d'entrée en un ensemble de tensions alternatives triphasées à une fréquence fondamentale avec une amplitude et un angle de phase contrôlables [135]. En effet, la tension STATCOM est injectée en phase avec la tension du jeu de barres ligne V; dans ce cas il n'y a pas d'échange d'énergie active avec le réseau, néanmoins seule la puissance réactive sera injectée (ou absorbée) par le compensateur statique [136],[137].

Le réseau électrique se compose de sous-systèmes en combinaison complexe de composants série-parallèle, ainsi que de l'installation STATCOM dans le système électrique impliquant une configuration et un fonctionnement compliqués du système, lorsque le réseau électrique-STATCOM n'est pas structuré en série ni en parallèle. Dans le cadre général, les systèmes à haute fiabilité jouent un rôle déterminant dans l'industrie. De plus, le monde industriel est en constante évolution, ce qui nécessite le développement de nouvelles techniques, garantissant une fiabilité élevée.

Les systèmes électriques deviennent de plus en plus complexes et encombrants ; Par conséquent, le développement de nouvelles méthodes pour évaluer la fiabilité et analyser le comportement des systèmes est une exigence assez importante pour adapter l'évolution réelle.

Malgré cela, de nombreuses méthodes ont été développées telles que l'arbre de défaillances, le diagramme de fiabilité, le graphe de fiabilité et la chaîne de Markov pour évaluer la fiabilité [138] [139] [140]. Par ailleurs, des méthodes d'analyse de fiabilité ont été proposées dans plusieurs études par Monte Carlo séquentielle. Une technique de simulation était souhaitée pour améliorer l'évaluation de la fiabilité des systèmes de distribution complexes ; cette analyse a été mise en œuvre dans le test pratique [141]. Billinton et al [142] ont illustré une technique pratique pour évaluer la fiabilité d'un système de distribution électrique radial complexe.

La fiabilité du réseau de distribution basse tension a été évaluée par Guanglin et al [143]. Le fait que la fiabilité des systèmes électriques utilisant un compensateur statique (STATCOM) pour la compensation d'énergie n'a pas été étudié dans la littérature existante, la contribution actuelle est un modèle développé qui peut être appliqué en application pratique sur un réseau électrique en prenant en compte l'énergie réactive effet compensateur (STATCOM) et analyse donnée concernant l'environnement réel du système électrique.

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

Un examen détaillé de l'évaluation de la fiabilité a été rapporté dans [144] [145] [146] [147], l'étude nécessite la modulation de grands systèmes complexes, dans des situations telles que le diagnostic de défaut et l'évaluation de la fiabilité.

Les auteurs de l'article [148] ont présenté un outil couramment utilisé dans le raisonnement probabiliste de l'incertitude dans les processus industriels. Les travaux rapportés dans [149] illustrent une approche basée sur le réseau bayésien appelé DAG (Direct Acyclic Graph) développé sur la base du théorème de Bayes et des relations mathématiques. De toute évidence, la méthode bayésienne est l'une des méthodes les plus appropriées utilisées dans ce contexte [150]. Selon Kelly et Smith [151], l'approche bayésienne permet de combiner des informations et des données dans un cadre probabiliste. Le réseau a une distribution de probabilité conjointe complète ou cause à effet et effet à causer [152]. L'évaluation de la fiabilité peut être obtenue en convertissant les modèles de fiabilité traditionnels en modèle de réseau bayésien Bob bio et al [148]. De plus, la fiabilité du système peut être obtenue en utilisant des techniques de probabilité d'occurrence [153]. Le fait que la fiabilité des systèmes électriques utilisant un compensateur statique (STATCOM) pour la compensation d'énergie n'a pas été étudié dans la littérature existante, la contribution actuelle est un modèle développé qui peut être appliqué en application pratique sur un réseau électrique en prenant en compte l'énergie réactive effet compensateur (STATCOM) et analyse donnée concernant l'environnement réel du système électrique.

L'aspect complexe n'est pas seulement lié à la complexité de l'architecture des composants du système électrique, mais est étendu pour comprendre le lien et l'interaction entre le réseau électrique et le STATCOM.

Le reste de chapitre est organisé comme suit : Premièrement, le système électrique complexe de la société algérienne de l'industrie sidérurgique est décrit. Ensuite, une procédure de modélisation de la fiabilité des systèmes supportée par les réseaux bayésiens est présentée. Enfin, le modèle développé a été appliqué par un système électrique complexe avec et sans considération de compensateur d'énergie réactive où les résultats obtenus ont été analysés et discutés.

V.3. Description du système

SIDER EL HADJAR est un complexe industriel unique en Afrique, assurant toutes les étapes de la production de la fonte et de l'acier (Bobines et tôles d'acier, tiges de béton et tubes sans soudure ...). Les premières unités ont démarré la production en 1964. Selon APS (Service de presse algérien) du 19 novembre 2018, un investissement a été mis à jour avec l'intégration d'investissements structurants et stratégiques en vue d'atteindre une production annuelle de 1,1 million de tonnes de ferreux produits d'ici 2021. Ce complexe se compose de plusieurs unités d'ateliers et l'une des unités les plus consommées en électricité est le laminoir à froid (LAF).

La production et la distribution d'énergie au sein du LAF sont assurées par un système électrique très complexe. Ces systèmes ont des caractéristiques de fonctionnement spécifiques qui les différencient des autres types d'industries. Il s'agit d'assurer : (1) l'alimentation électrique des trois cages tandem et la ventilation à l'intérieur du skimpass-1 ; (2) la fourniture du pont roulant, l'éclairage et la commande du LAF qui se tient à skimpass-2.

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

Ces caractéristiques et la coordination entre les composants du système sont essentielles pour garantir un système électrique fiable en permanence. La fiabilité est d'atteindre des objectifs fonctionnels de haut niveau (production, transport et distribution). Toutes ces fonctionnalités créeront une installation complexe qui est divisée en différents sous-systèmes avec des composants bien définis. Le schéma de principe du système électrique LAF est présenté à la figure V.1.

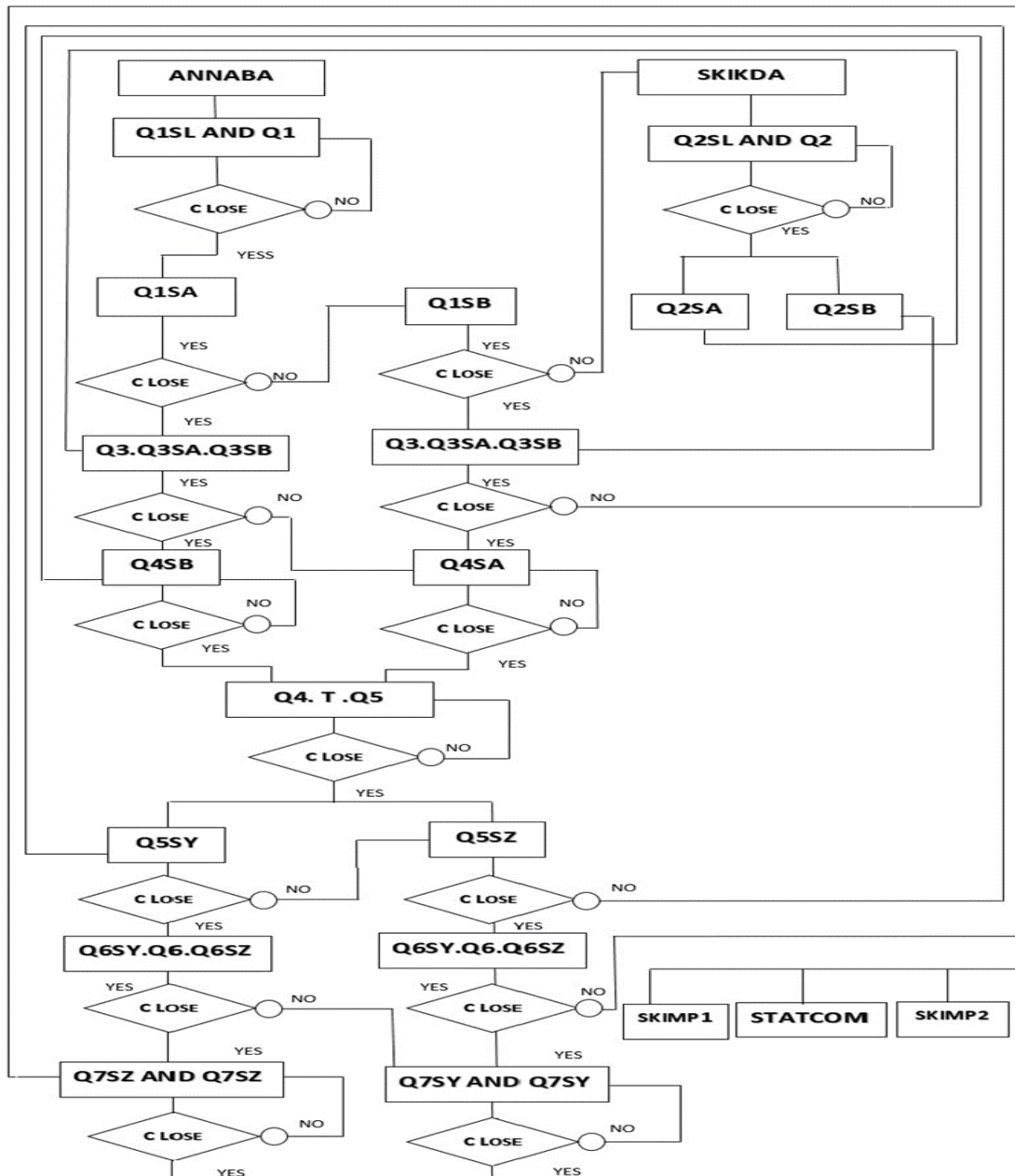


Figure V.1 : Le schéma fonctionnel de l'unité de laminage à froid (LAF).

V.3.1. Configuration du système électrique

La figure V. 1 du schéma fonctionnel de l'unité (LAF), la principale source d'énergie est la base Annaba, celle-ci est suivie d'un sectionneur (Q1SL) et d'un disjoncteur Q1.

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

Ce dernier alimente les jeux de barres à travers les interrupteurs-sectionneurs (Q1SA ou Q1SB). Il existe deux possibilités pour alimenter les jeux de barres, la première par l'interrupteur-sectionneur (Q1SA), si les interrupteurs de couplage (Q3SA et Q3SB) et le disjoncteur (Q3) sont allumés, les jeux de barres alimentent le transformateur abaisseur (T) via l'interrupteur-sectionneur (Q4SB) et le disjoncteur (Q4) mais si les interrupteurs de couplage (Q3SA et Q3SB) et le disjoncteur (Q3) sont éteints, le jeu de barres alimente le transformateur abaisseur (T) via l'interrupteur-sectionneur (Q4SA) et le disjoncteur (Q4).

Nous avons également deux possibilités pour alimenter les jeux de barres via l'interrupteur-sectionneur (Q1SB).

- Si le sectionneur de couplage (Q3SA et Q3SB) et le disjoncteur (Q3) sont allumés, le jeu de barres alimente le transformateur abaisseur (T) via l'interrupteur-sectionneur (Q4SA) et le disjoncteur (Q4).
- Si les sectionneurs de couplage (Q3SA et Q3SB) et le disjoncteur (Q3) sont éteints, les jeux de barres alimentent le transformateur (T) à travers l'interrupteur-sectionneur (Q4SB) et le disjoncteur (Q4).

Une fois le transformateur abaisseur (T) mis sous tension, il permet d'abaisser la tension de 220 kV / 60 KV pour alimenter skimpass1 et skimpass2. Ces deux alimentations par les jeux de barres à travers le disjoncteur (Q5) et les interrupteurs-sectionneurs (QS5Y ou QS5Z).

Dans ce cas également, il existe deux possibilités d'alimenter les jeux de barres par l'interrupteur-sectionneur (QS5Y), si le sectionneur de couplage (Q6SY et Q6SZ) et le disjoncteur (Q6) sont allumés, les jeux de barres alimentent skimpass1 et skimpass2. Par l'interrupteur-sectionneur (Q7SZ et Q8SZ) et le disjoncteur (Q7, Q8) respectivement.

Si les sectionneurs de couplage (Q6SY et Q6SZ) et le disjoncteur (Q6) sont arrêtés, les jeux de barres alimentent respectivement skimpass1 et skimpass2. via l'interrupteur-sectionneur (Q7SY et Q8SY) et le disjoncteur (Q7, Q8) respectivement.

Nous avons également deux possibilités pour alimenter les jeux de barres via l'interrupteur-sectionneur (QS5Z) et l'interrupteur-sectionneur (Q7SY et Q8SY) et le disjoncteur (Q7, Q8) respectivement.

- Si le sectionneur de couplage (Q6SY et Q6SZ) et le disjoncteur (Q6) sont allumés, les jeux de barres alimentent skimpass1 et skimpass2. Par l'interrupteur-sectionneur (Q7SY et Q8SY) et le disjoncteur (Q7, Q8) respectivement.
- Si les sectionneurs de couplage (Q6SY et Q6SZ) et le disjoncteur (Q6) sont à l'arrêt, les jeux de barres alimentent skimpass1 et skimpass2. Par l'interrupteur-sectionneur (Q7SZ et Q8SZ) et le disjoncteur (Q7, Q8) respectivement.

Après tout, nous pouvons également mettre le système supplémentaire STATCOM entre SKIMPAS 1 et 2 pour améliorer la qualité de l'énergie.

En cas de panne de la source d'énergie de la base d'Annaba, l'énergie électrique est fournie par la source de sauvetage (Skikda) avec son équipement spécifique. Ce dernier remplit les mêmes fonctions que la station d'Annaba pour alimenter le (LAF). En conséquence, notre système électrique est une configuration compliquée. Nous montrons une photo du site de notre système électrique dans la figure V.2.

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive



Figure V.2. Photo du site de notre système électrique

Le système étudié est choisi pour fournir de l'énergie électrique avec une grande fiabilité. Ce système électrique est divisé en deux sous-systèmes : le STATCOM et le sous-système qui garantissent l'énergie. Ce dernier est divisé en deux sous-systèmes : (a) le premier représenté sur la figure V.3 (a) qui montre le sous-système d'unités et le début de l'énergie électrique et (b) le second représenté sur la figure V.3 (b) qui montre une étape- station de descente et distribution d'énergie électrique.

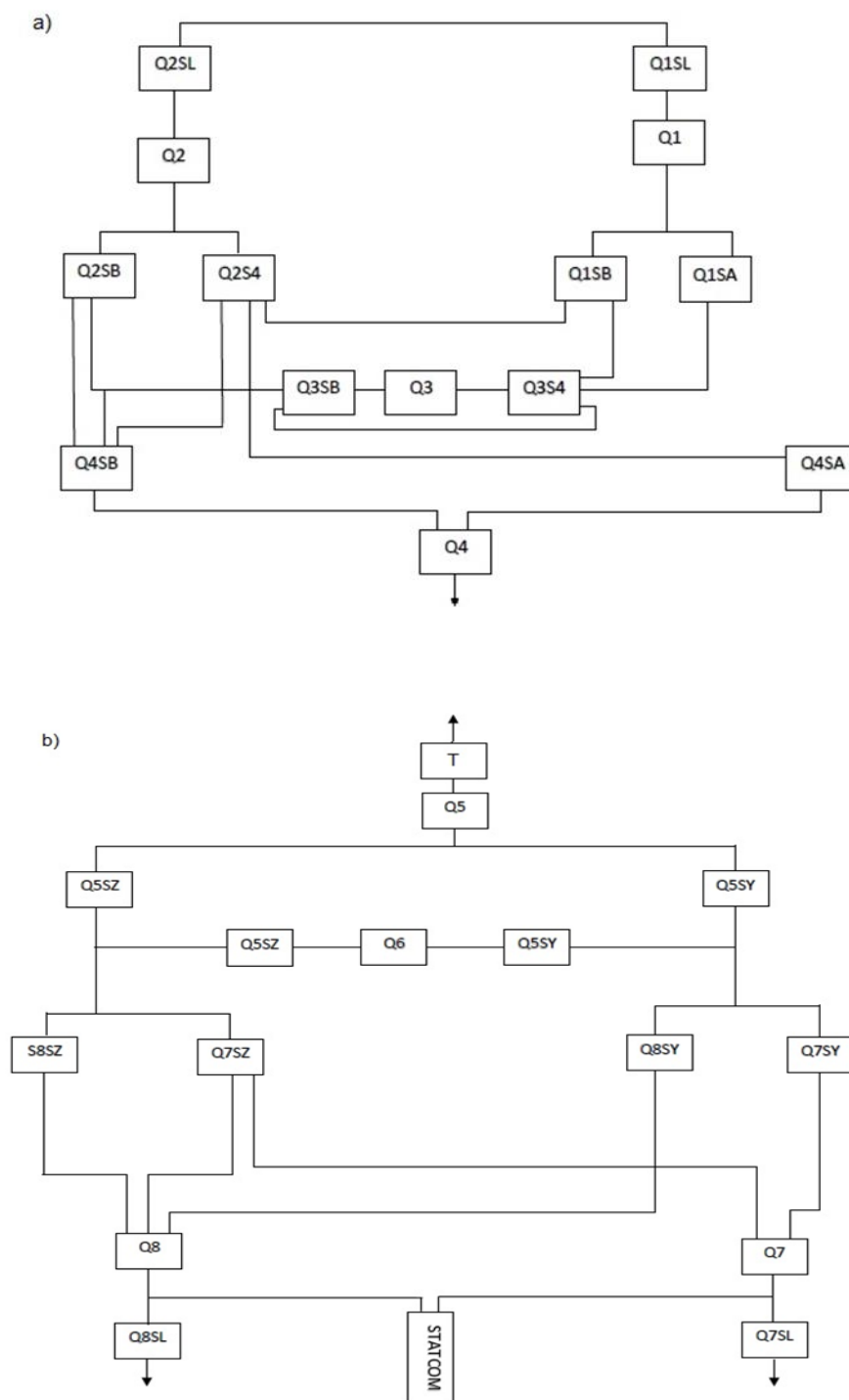


Figure V.3. Diagrammes de fiabilité (a) du sous-système des unités et du démarrage de l'énergie électrique et (b) du sous-système de la station d'abaissement et de transport, distribution de l'énergie électrique.

Le LAF est l'une des plus grandes unités qui consomme une grande quantité d'énergie réactive qui peut causer tant de problèmes :

- Augmenter le taux des coûts d'énergie et de paiement.
- Arrêt énergétique dans toutes les sous-stations.

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

- Endommagement des appareils et équipements dans l'installation avec le temps.

Comme solution, la zone nécessite un compensateur d'énergie réactive pour éviter tous ces problèmes et optimiser également les réseaux internes. Ce dernier, appelé STATCOM, est un convertisseur de source de tension (VSC) connecté en shunt à l'aide de commutateurs automatiques tels que le thyristor est un arrêt de grille (GTO) utilisé pour le contrôle de la puissance réactive [154]. Le STATCOM placé au milieu pour contrôler la tension et pour améliorer la qualité de l'énergie [155].

V.4. Procédure de modélisation de la fiabilité du système à l'aide de réseaux bayésiens

V.4.1. Réseaux bayésiens

Les réseaux bayésiens (RB) ont été utilisés au cours des dernières décennies dans l'analyse de la fiabilité et des risques de systèmes complexes, Weber et al [156]. Présentent un examen détaillé et introduisent la base des RBs en expliquant leur importance dans la modélisation de systèmes complexes.

Le RB est un DAG dans lequel les nœuds représentent les variables système et les arcs représentent les dépendances ou les relations causales directes entre ces nœuds. Les variables peuvent être discrètes ou continues, et l'arc est un ensemble de liens dirigés (flèches) qui relie des paires de nœuds. S'il y a une flèche du nœud X au nœud, Y alors X est dit être un parent de Y , et chaque nœud X_i a une distribution de probabilité conditionnelle.

Les tables de probabilité conditionnelle (CPT) affectées aux nœuds du réseau dénotent des dépendances conditionnelles et sont utilisées pour exprimer la probabilité de chaque nœud compte tenu de la condition de son parent. Sur la base de l'indépendance conditionnelle et de la règle de la chaîne, la distribution de probabilité conjointe d'un ensemble de variables $\theta = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ peut être déterminée par :

$$P(\theta) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Pa(X_i)) \quad \text{V.1}$$

Où $Pa(X_i)$ est l'ensemble parent de X_i

L'approche BN est basée sur le théorème de Bayes pour mettre à jour la probabilité d'occurrence antérieure (ou d'échec) d'événements à partir de nouvelles preuves E dans un cadre probabiliste incluant la théorie de la probabilité subjective, qui fournit la distribution postérieure. Par conséquent, la forme générale continue du théorème de Bayes est donnée par [151] :

$$P(\theta|E) = \frac{p(E|\theta)P(\theta)}{\int_{\theta} p(E|\theta)P(\theta)d\theta} \quad \text{V.2}$$

Où $P(\theta|E)$ est la distribution postérieure (θ peut-être un vecteur de paramètres) $P(\theta)$, est la distribution a priori de θ , $p(E|\theta)$ est la fonction de vraisemblance (les données observées entrent via cet aléatoire modèle) et E peut être un ensemble d'observations.

Dans le cas discret, la règle de décision de Bayes est inchangée. Les intégrales sont remplacées par les sommes des probabilités conditionnelles pour toutes les valeurs possibles de E dans la distribution discrète [157] [158] [159] :

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

$$P(\theta|E) = \frac{P(E,\theta)}{\sum_{\theta} P(E,\theta)} \quad \text{V. 3}$$

V.4.2. Systèmes en série et parallèles

Du point de vue de la fiabilité, le système est supposé être un système en série si la défaillance d'un composant entraîne une défaillance du système. En revanche, si un seul composant suffit pour que le système fonctionne, alors le système est dit parallèle [160].

Une représentation graphique, au moyen d'un BN, d'un système en série ou en parallèle avec deux composants (A, B) et un nœud supplémentaire (N) est montrée sur la figure V.4.

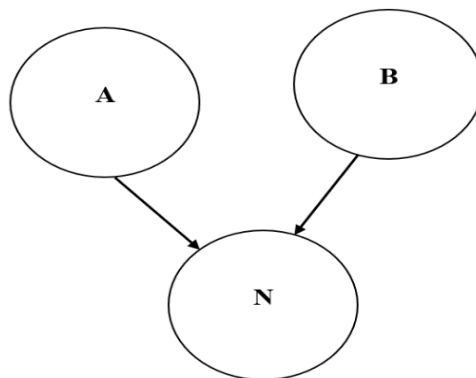


Figure V.4. Réseau bayésien pour deux composants

Selon l'équation (V.1), la probabilité conjointe du système série à deux composants est :

$$P(N, A, B) = P(N/A, B)P(A, B) \quad \text{V.4}$$

Les éléments du CPT $P(N/A, B)$ sont la combinaison des états des nœuds parents, tels que A et B ont défiant, A défiant et B est fiable, A est fiable et B a défiant et A et B sont fiables. Le CPT correspondant au cas du système série est donné dans le tableau V. 1. Dans le cas parallèle, seul le CPT est modifié, comme indiqué dans le tableau V. 2.

Tableau V .1. CPT dans le boîtier système série avec deux composants

| A | DEFIANT | | FIABLE | |
|---------|---------|--------|---------|--------|
| | DEFIANT | FIABLE | DEFIANT | FIABLE |
| DEFIANT | 1 | 1 | 1 | 0 |
| FIABLE | 0 | 0 | 0 | 1 |

Tableau V.2. CPT dans le cas du système parallèle avec deux composants

| A | DEFIANT | | FIABLE | |
|---------|---------|--------|---------|--------|
| | DEFIANT | FIABLE | DEFIANT | FIABLE |
| DEFIANT | 1 | 0 | 0 | 0 |
| FIABLE | 0 | 1 | 1 | 1 |

V. 4.3. Combinaison complexe d'une configuration système série-parallèle

On présente deux différents exemples pour modéliser et déterminer la fiabilité de la Combinaison complexe par le réseau bayésien

V. 4.3.1. Exemple d'un système complexe

Afin d'illustrer les avantages de l'utilisation de BN, le schéma de principe de fiabilité schématique de la figure V.5. [161] est considéré. Tout d'abord, le composant C5 est choisi pour simplifier la solution. Le système est divisé en deux sous-systèmes représentés sur les figures 3b et 3c - un lorsque C5 est considéré comme bon et un autre où C5 a échoué. Ensuite, la sélection du composant C1 à considérer comme bon ou mauvais produit les deux sous-systèmes représentés sur les figures 3d et 3e. Dans le cas de la figure 3d, les composants C2 et C3 n'apparaissent pas car lorsque C1 est bon, le signal atteint C4 indépendamment du fait que C2 et C3 soient bons ou mauvais ; par conséquent, ils ne sont plus pertinents.

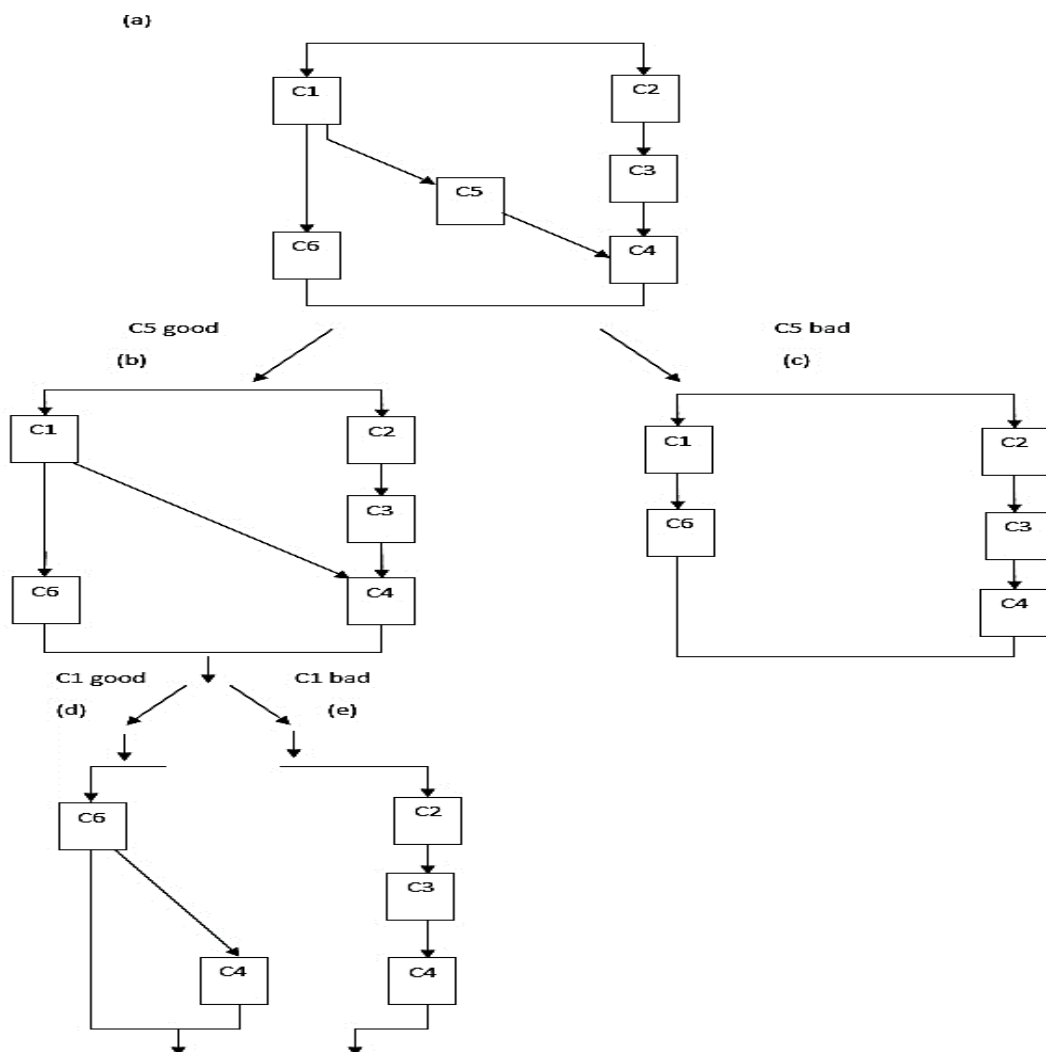


Figure V.5. Diagramme de fiabilité de l'exemple illustratif [161].

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

-La fiabilité du système peut être déduite comme suit

- $R_S = R_S(\text{if } C_5 \text{ is good}) * R_{C_5} + R_S(\text{if } C_5 \text{ is bad}) * (1 - R_{C_5})$
- $R_S(\text{if } C_5 \text{ bad}) = 1 - (1 - R_{C_2} * R_{C_3} * R_{C_4})(1 - R_{C_1} * R_{C_6})$
- $R_S = R_S(\text{if } C_5 \text{ is good}) = R_S(\text{is good } C_1) * R_{C_1} + R_S(\text{if } C_1 \text{ is bad}) * (1 - R_{C_1})$
- $R_S(\text{is good } C_1) * R_{C_1} = [1 - (1 - R_{C_6})(1 - R_{C_4})] * R_{C_1}$
- $R_S(\text{if } C_1 \text{ is bad}) * (1 - R_{C_1}) = (R_{C_2} * R_{C_3} * R_{C_4}) * (1 - R_{C_1})$

- La substitution Donne :

$$R_S = [1 - (1 - R_{C_6})(1 - R_{C_4}) * R_{C_1} + (R_{C_2} * R_{C_3} * R_{C_4}) * (1 - R_{C_1})] * R_{C_5} + [1 - (1 - R_{C_2} * R_{C_3} * R_{C_4})(1 - R_{C_1} * R_{C_6})] * (1 - R_{C_5})$$

- Si chaque composant a une fiabilité comme suit :

$$R_{C_1} = 0.7, R_{C_2} = 0.8, R_{C_3} = 0.9, R_{C_4} = 0.6, R_{C_5} = 0.55 \text{ and } R_{C_6} = 0.7.$$

- La substitution de valeurs numériques dans la dernière équation donne :

$$R_S = 0.72972 \text{ and } F_S = 0.27028$$

La méthode précédente est difficile ; ainsi, en utilisant une approche BN, la solution est simplifiée de sorte que la fiabilité (Reliability) du système peut être obtenue à partir d'un seul réseau, comme le montre la figure V.6. En utilisant le logiciel de gestion des risques Agena [162].

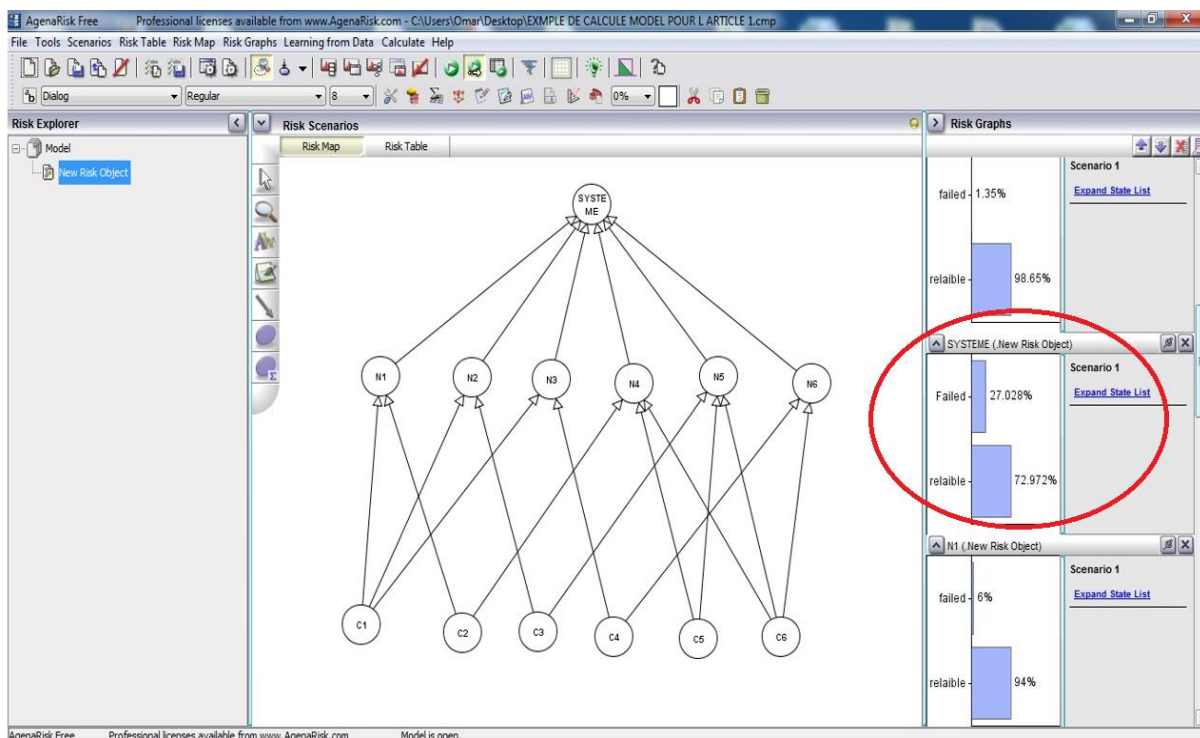


Figure V.6. Modèle de fiabilité du système utilisant le logiciel de gestion des risques Agena (exemple 1)

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

V. 4.3.2.Exemple d'un système complexe

La manière habituelle de calculer la fiabilité est de sélectionner un composant et de considérer deux alternatives : Le composant fonctionne (bon) ou a échoué (mauvais). Dans ce cas, l'élément P5 est choisi, ce qui est le meilleur choix pour simplifier la solution. Le système est divisé en deux sous-systèmes, l'un lorsque P5 est considéré comme bon et l'autre lorsque P5 échoue. Lorsqu'un ensemble de sous-systèmes est défini à l'aide de configurations série-parallèle connectées, il est possible d'évaluer la fiabilité totale en appliquant le théorème de Bayes. La distribution de probabilité en termes de probabilités conditionnelles est :

$$R(S) = P(S / P5 = \text{good}) P(P5 = \text{good}) + P(S / P5 = \text{bad}) P(P5 = \text{bad}).$$

$$R_S(t) = R_{S/P5}(t) \cdot R_{P5}(t) + R_{S/\bar{P5}}(t)[1 - R_{P5}(t)]$$

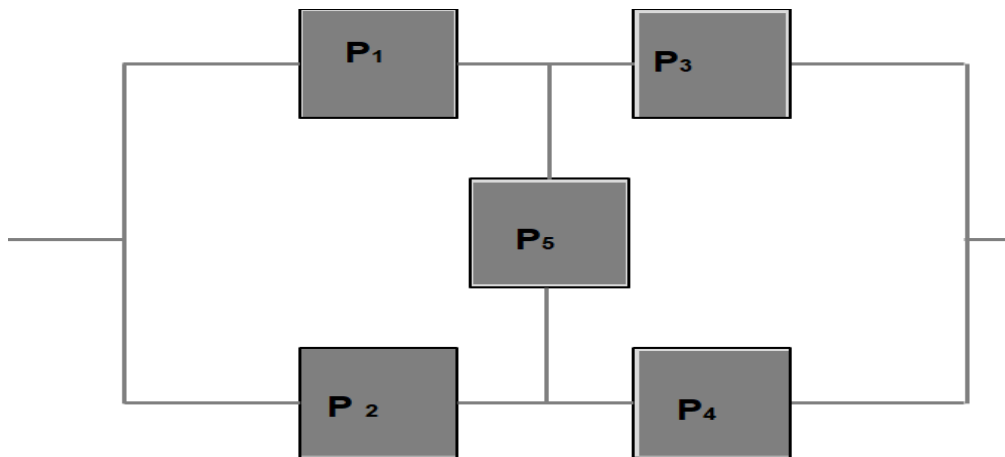


Figure .V.7. Diagramme de fiabilité

à partir du diagramme de fiabilité du système qui est présenté précédemment Figure V.7, on considère P1, P2, P3, P4, P5 les composants qui sont dans notre exemple les sous-systèmes E1, E2, E3, E4, E5 qui contiennent ces composants du système (S) configurés comme suit (E1), (E2), (E3) en série et (E1), (E2), (E3) se présente comme suit: E1 (P1 se configure en parallèle avec P2), E3 (P3 se configure en parallèle avec P4) , E2 (E4 se configure en série avec E5). E4 (P1, P5, P4 configurés en série), E5 (P2, P5, P3 configurés en série). On propose des valeurs aléatoires voir tableau

Tableau V.3. Valeur des composants aléatoires

| composants | fiabilité de composants $R(t)$ | Défaillance de composants $F(t)$ |
|------------|--------------------------------|----------------------------------|
| P1 | $R_1(t) = 0.3$ | $F_1(t) = 0.7$ |
| P2 | $R_2(t) = 0.2$ | $F_2(t) = 0.8$ |
| P3 | $R_3(t) = 0.9$ | $F_3(t) = 0.9$ |
| P4 | $R_4(t) = 0.7$ | $F_4(t) = 0.3$ |
| P5 | $R_5(t) = 0.8$ | $F_5(t) = 0.2$ |

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

Nous déterminons la fiabilité du système (S) avec Application numérique :

$$R_{System} = \begin{cases} F_{E1}(t) = 0.5732 \\ R_{E1}(t) = 0.4268 \end{cases}$$

À partir du diagramme de fiabilité du système illustré à la Figure V.7. Un modèle peut être vu pour déterminer la fiabilité de ce système à l'aide du logiciel (Agena risk), comme illustré à la Figure V.8.

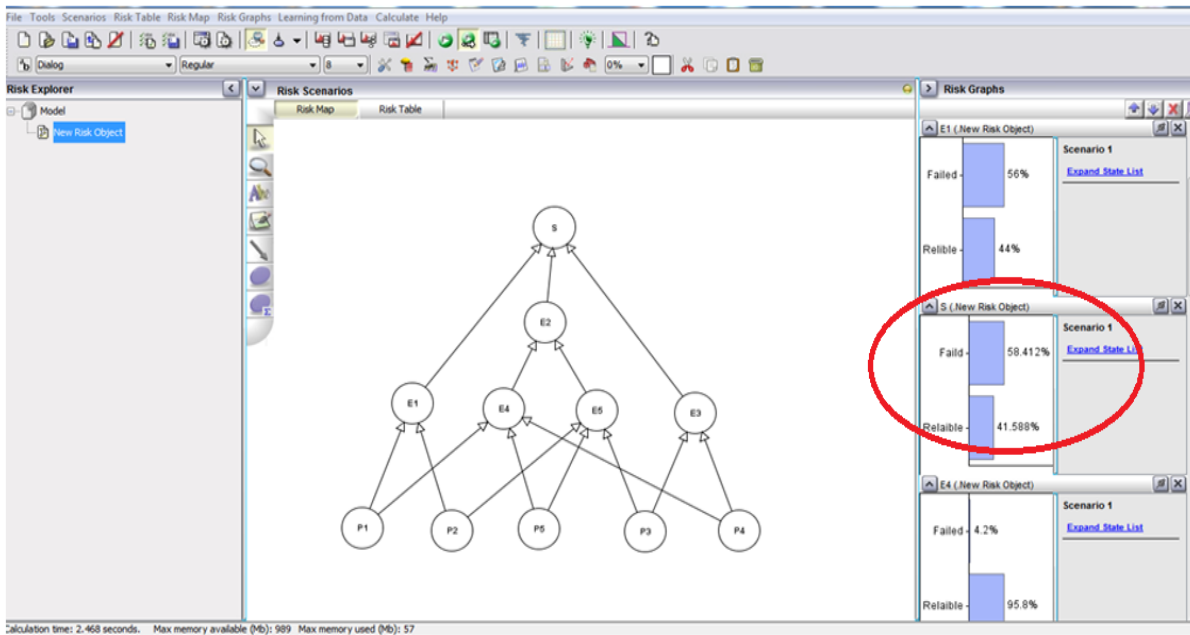


Figure V.8. Modèle de fiabilité du système utilisant le logiciel de gestion des risques Agena (exemple 2)

Dans les deux exemples précédant noter que les résultats obtenus à partir de la simulation numérique sont identiques à ceux obtenus à partir des calculs mathématiques.

V.4.4. Interaction entre le réseau électrique et STATCOM

Le flux d'énergie réactive sur les réseaux de distribution a des conséquences techniques et économiques importantes. En d'autres termes, lorsque la puissance réactive consommée par les consommateurs est trop élevée par rapport à la puissance active, l'augmentation du courant du réseau électrique entraîne des surcharges au niveau des transformateurs de puissance et des câbles électriques chauffants, ainsi que des chutes de tension importantes et des pertes supplémentaires. Il est donc nécessaire de produire de l'énergie réactive au plus près des charges, pour éviter sa transmission vers le réseau. C'est ce qu'on appelle la "compensation d'énergie réactive".

En pratique, pour éviter le surdimensionnement des installations et les risques de panne, le distributeur d'énergie pénalise financièrement les consommateurs d'énergie réactive à partir d'un certain seuil fixé à **tang φ** [163] [164].

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

Où $\tan \varphi$ est un seuil d'intervention utile pour améliorer l'installation électrique, seuil à partir duquel il y a une panne du système «Réseaux électriques-STATCOM» (Fig. V.9). C'est à dire. L'état du système de défaillance est alors donné comme :

$$\frac{\text{Reactive power}}{\text{Active power}} \geq \tan \varphi \quad \text{V.5}$$

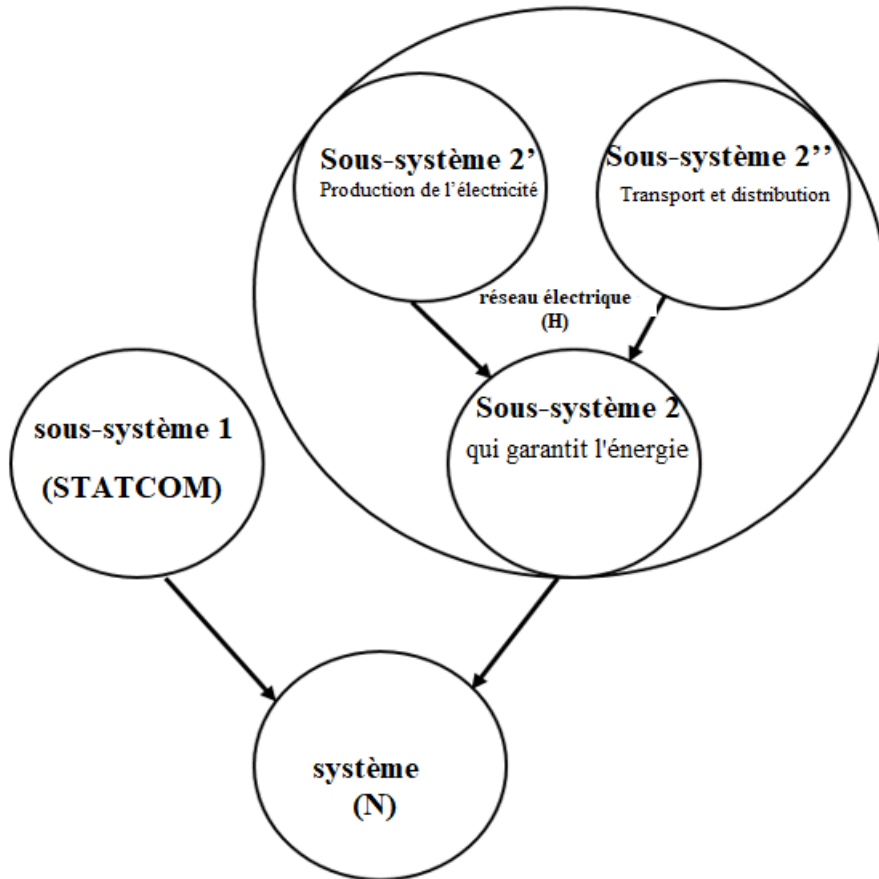


Figure V.9. Le couplage Réseaux électriques-STATCOM

Dans l'analyse de fiabilité, il est nécessaire de définir une fonction d'état limite (également appelée fonction de performance) qui exprime la condition de «sécurité du système» ou l'équation de défaillance du système [165]. Par conséquent, la fonction d'état limite $G(x_i)$ correspond à la marge de sécurité, est définie comme suit :

$$G = \tan \varphi \cdot P - Q \quad \text{V.6}$$

Cette marge est définie de manière $G(x_i) > 0$ à indiquer la sécurité et $G(x_i) \leq 0$ correspond à une défaillance conventionnelle ; où sont les variables aléatoires dans le système. Dans cette expression, P est la charge de puissance active, Q est la charge de puissance réactive et $\tan \varphi$ est un seuil fixé par le distributeur d'énergie (φ exprime la phase de tension par rapport au courant).

Dans le présent travail, la méthode de fiabilité du premier ordre, connue sous le nom de FORM [166], est programmée et appliquée pour calculer les indices de fiabilité et la probabilité de défaillance. La méthode FORM définit l'indice de fiabilité β comme la distance

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

minimale entre l'origine de l'espace et le domaine de défaillance dans l'espace gaussien équivalent \mathbf{u}_i , où β est évaluée en résolvant le problème d'optimisation contraint :

$$\beta = \text{minimiser } \sqrt{\sum_i u_i^2} \quad \text{Soumis à } G(x_i) \leq 0 \quad \text{V.7}$$

Où, $u_i = T_i(x_i)$ est le vecteur de variables aléatoires de base dans l'espace normal standard obtenu par la transformation probabiliste appropriée $T_i(x_j)$ et $G(x_j)$ représente la surface de défaillance ; dans l'espace normal standard, il prend la forme $G(T_i(u_i))$. Dans FORM, la probabilité de défaillance P_f est calculée comme suit :

$$P_f = P[G(X) \leq 0] = \Phi(-\beta) \quad \text{V.8}$$

Où $P[G(X) \leq 0]$ est l'opérateur de probabilité et $\Phi(-\beta)$ est la fonction de probabilité gaussienne cumulative. En raison de la complexité du système électrique, la probabilité de défaillance mentionnée dans l'équation (8) est utilisée pour exprimer la probabilité conditionnelle de défaillance (CP_f) conditional probability of failure) afin d'évaluer le CPT (tableau V.4) du nœud N (figure V.9).

Tableau V.4. Tableau de probabilité conditionnelle du nœud N sur la figure V.9

| STATCOM | DEFIANT | | FIABLE | |
|---------|---------|------------|---------|------------|
| H | DEFIANT | FIABLE | DEFIANT | FIABLE |
| DEFIANT | 1 | CP_f | 1 | CP_f |
| FIABLE | 0 | $1 - CP_f$ | 0 | $1 - CP_f$ |

L'idée clé présentée dans la déclaration précédente est d'effectuer un arrangement logique d'événements pour quantifier les dépendances [167] entre le sous-système 1 (STATCOM) et le sous-système 2 qui garantissent l'énergie (H).

La disposition logique conduit à différents états du système (fiable ou défaillant) par rapport à la fonction d'état limite dans l'équation V.6. Par conséquent, plusieurs situations peuvent être envisagées. En cas de défaillance du réseau électrique (H), la situation obtenue est un arrêt du système quelle que soit la situation STATCOM (défaillante ou fiable). Par contre, si le réseau électrique (H) est fiable, le CP_f doit être calculé selon l'équation V.8.

En traduisant les dépendances probabilistes entre les variables en modèles graphiques [168], l'outil BN fournit une et un cadre modulaire pour représenter ce système électrique complexe. La méthodologie pour l'évaluation de la fiabilité du système est illustrée à la Fig. V.10.

En raison de leur pertinence pour les applications du monde réel, cette approche bayésienne adaptée est appliquée dans la section suivante à un cas réel de la Société Algérienne de l'Industrie Sidérurgique (SIDER).

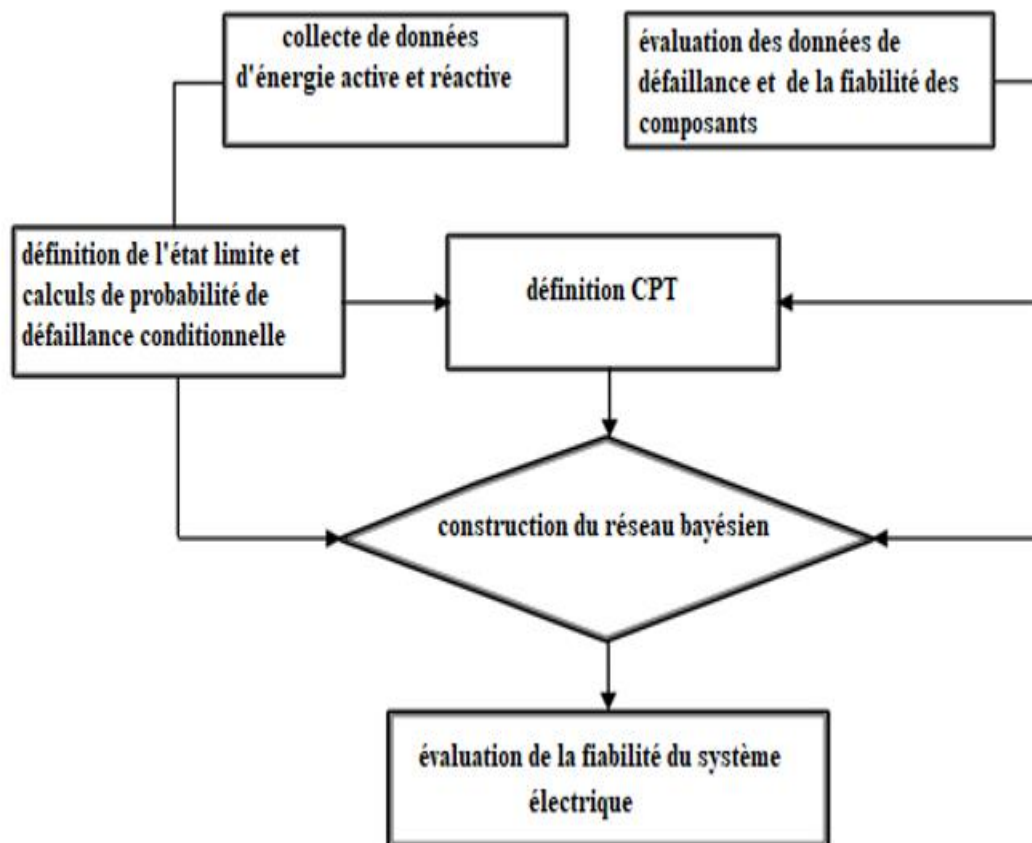


Figure .V.10.Approche bayésienne pour l'évaluation de la fiabilité du système électrique

V.5. Application industrielle

Le système étudié est un système électrique haut tension (HT) constitué des équipements électriques qui sont présentés dans le tableau V.4 et la configuration du réseau est illustrée dans (Fig. V.11). Dans cette partie, une étude illustrative pour évaluer la fiabilité du système électrique est démontrée.

Il a commencé par trouver un modèle composé de deux sous-systèmes STATCOM et réseau électrique. En conséquence, la complexité du système peut être classée en termes de configuration et de fonctionnement. Enfin, l'effet STATCOM sur la fiabilité du système a également été étudié. Dans les sections suivantes, l'analyse numérique est effectuée comme suit :

- Données de défaillance et fiabilité des composants électriques individuels.
- Consommation d'énergie électrique et modélisation du système par les réseaux bayésiens.
- Évaluation de la fiabilité du système électrique avec et sans STATCOM.
- Estimation de la fiabilité du système pour trois configurations STATCOM.

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

Tableau V.5. Présentation des équipements électriques du système (HT)

| Composant (HT) | Code |
|---------------------------------------|--|
| Disjoncteur HT | (Q ₁ , Q ₂ , Q ₃ , Q ₄ , Q ₅ , Q ₆ , Q ₇ , Q ₈) |
| Transformateur abaisseur 220kv à 60kv | T |
| Compensateur synchrone statique | STATCOM |
| Interrupteurs- sectionneurs HT | (Q ₁ SA, Q ₁ SB, Q ₂ SA, Q ₂ SB, Q ₃ SA, Q ₃ SB, Q ₄ SA, Q ₄ SB, Q ₅ SA, Q ₅ SB, Q ₆ SA, Q ₆ SB, Q ₇ SA, Q ₇ SB, Q ₈ SA, Q ₈ SB) |
| Sectionneurs des lignes | (Q ₁ SL, Q ₂ SL, Q ₇ SL, Q ₈ SL) |

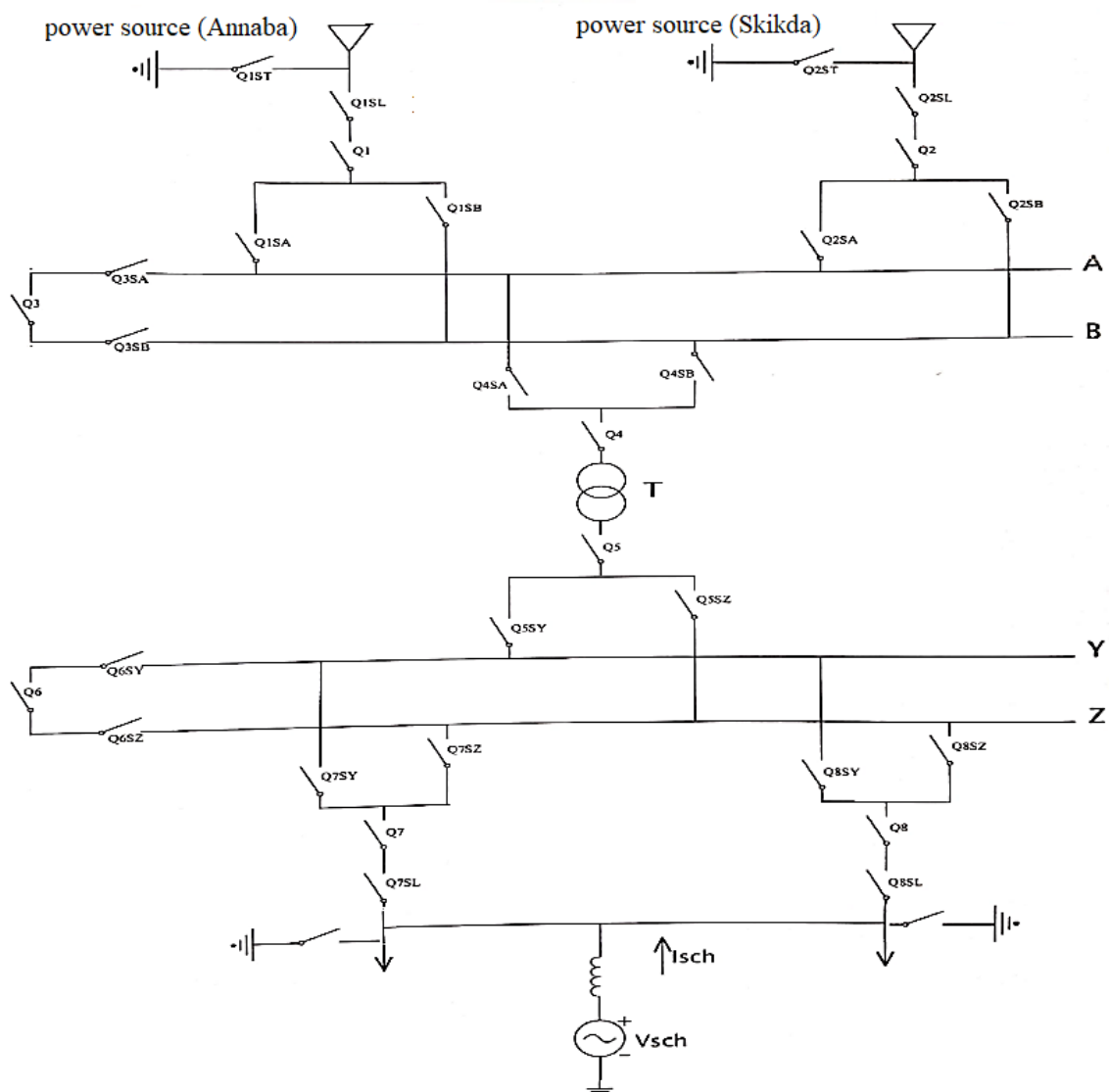


Figure . V.11. Schéma électrique de (HT) dans l'unité (LAF)

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

V.5.1. Données de défaillance et fiabilité des composants électriques individuels

Sur la base des données de retour d'expérience opérationnelle disponibles auprès de la société algérienne de l'industrie sidérurgique, les distributions de durée de vie des différents composants du système électrique ont été estimées.

La première analyse consiste à extraire les temps de défaillance de chaque composant afin de constituer les échantillons, qui sont ensuite ajustés par un modèle de Weibull à deux paramètres [169]. Ce modèle statistique a été choisi en raison de sa flexibilité qui permet, avec un minimum de cinq échecs seulement [170], d'ajuster correctement et efficacement toutes sortes de résultats opérationnels ou expérimentaux obtenus pendant les périodes de jeunesse, d'adulte et de vieillissement (i.e., échec précoce, constant défaillance et défaillance d'usure, respectivement).

Ainsi, la fiabilité des composants électriques individuels en fonction du temps de service (t) est donnée par :

$$R_i(t) = 1 - F_i(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta_i} \right)^{B_i} \right] \quad \text{V.9}$$

B_i Et η_i sont respectivement les paramètres de forme et d'échelle de la distribution de Weibull pour chaque composant électrique i . L'estimation des paramètres de Weibull est obtenue à l'aide de MATLAB et les résultats de l'estimation sont résumés dans le tableau V.6.

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

Tableau V.6. Paramètres Weibull des composants du système.

| composants | Code | Taille de l'échantillon | paramètres de forme B_i | paramètres d'échelle η_i |
|---------------------------------------|---------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Disjuncture HT | Q1 | 10 | 0.871 | 9.631 |
| | Q2 | 8 | 0.445 | 7.515 |
| | Q3 | 9 | 0.715 | 5.312 |
| | Q4 | 12 | 1.178 | 11.404 |
| | Q5 | 11 | 0.993 | 6.271 |
| | Q6 | 10 | 0.755 | 5.545 |
| | Q7 | 13 | 1.224 | 8.653 |
| | Q8 | 13 | 1.117 | 6.116 |
| Transformateur abaisseur 220kv à 60kv | T | 15 | 1.230 | 7.775 |
| Compensateur synchrone statique | STATCOM | 14 | 1.036 | 3.861 |
| Sectionneurs des lignes | Q1SL | 13 | 1.192 | 4.414 |
| | Q2SL | 10 | 0.746 | 10.913 |
| | Q7SL | 9 | 0.726 | 5.829 |
| | Q8SL | 11 | 0.732 | 5.452 |
| | Q1SA | 9 | 0.617 | 8.714 |
| | Q1SB | 9 | 0.992 | 6.672 |
| | Q2SA | 11 | 0.726 | 1.911 |
| | Q2SB | 12 | 0.776 | 9.355 |
| | Q3SA | 12 | 0.993 | 6.271 |
| | Q3SB | 14 | 1.004 | 9.718 |
| | Q4SA | 11 | 0.737 | 7.120 |
| | Q4SB | 10 | 0.687 | 6.110 |
| | Q5SY | 11 | 0.758 | 6.645 |
| | Q5SZ | 12 | 0.763 | 6.436 |
| | Q6SY | 13 | 0.769 | 6.302 |
| | Q6SZ | 12 | 0.676 | 5.806 |
| | Q7SY | 11 | 0.732 | 5.452 |
| | Q7SZ | 11 | 0.670 | 4.250 |
| Q8SY | 14 | 1.420 | 10.783 | |
| Q8SZ | 12 | 0.723 | 6.031 | |

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

V.5.2. Consommation d'énergie électrique et modélisation du système à l'aide des réseaux bayésiens

Les données d'entreprise collectées utilisées dans ce travail datent de 2017. À l'aide d'un PC d'enregistrement, un exemple de fonctionnement du système électrique sans et avec STATCOM est présenté, et les différents résultats sont illustrés sur les Fig. 8a et 8b à 10 h 33 m et 10 h 38m, respectivement.

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive



Figure.V.12.Fonctionnement du système électrique sans et avec STATCOM (respectivement a et b).

Tout d'abord, il a été décidé de faire fonctionner l'installation sans STATCOM, ce qui nous a permis d'enregistrer une valeur de puissance réactive $Q1 = 8,54$ MVAR pendant un temps donné de 10 h 33 m, comme le montre la figure V.12.a.

Lors de l'utilisation de STATCOM, une valeur de puissance réactive $Q2 = 5,9$ MVAR a été enregistrée à un instant donné de 10 h 38 m, comme le montre la figure V.12.b. On constate que, pour une même charge, une variation de puissance réactive importante a été observée, ce qui s'explique par l'effet principal du STATCOM sur la fonction d'installation.

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

L'ajustement des données à une distribution log-normale pour une période de mesure de référence d'un an conduit aux résultats de la figure V.13, où la variation de puissance réactive est décrite pour les cas avec et sans STATCOM.

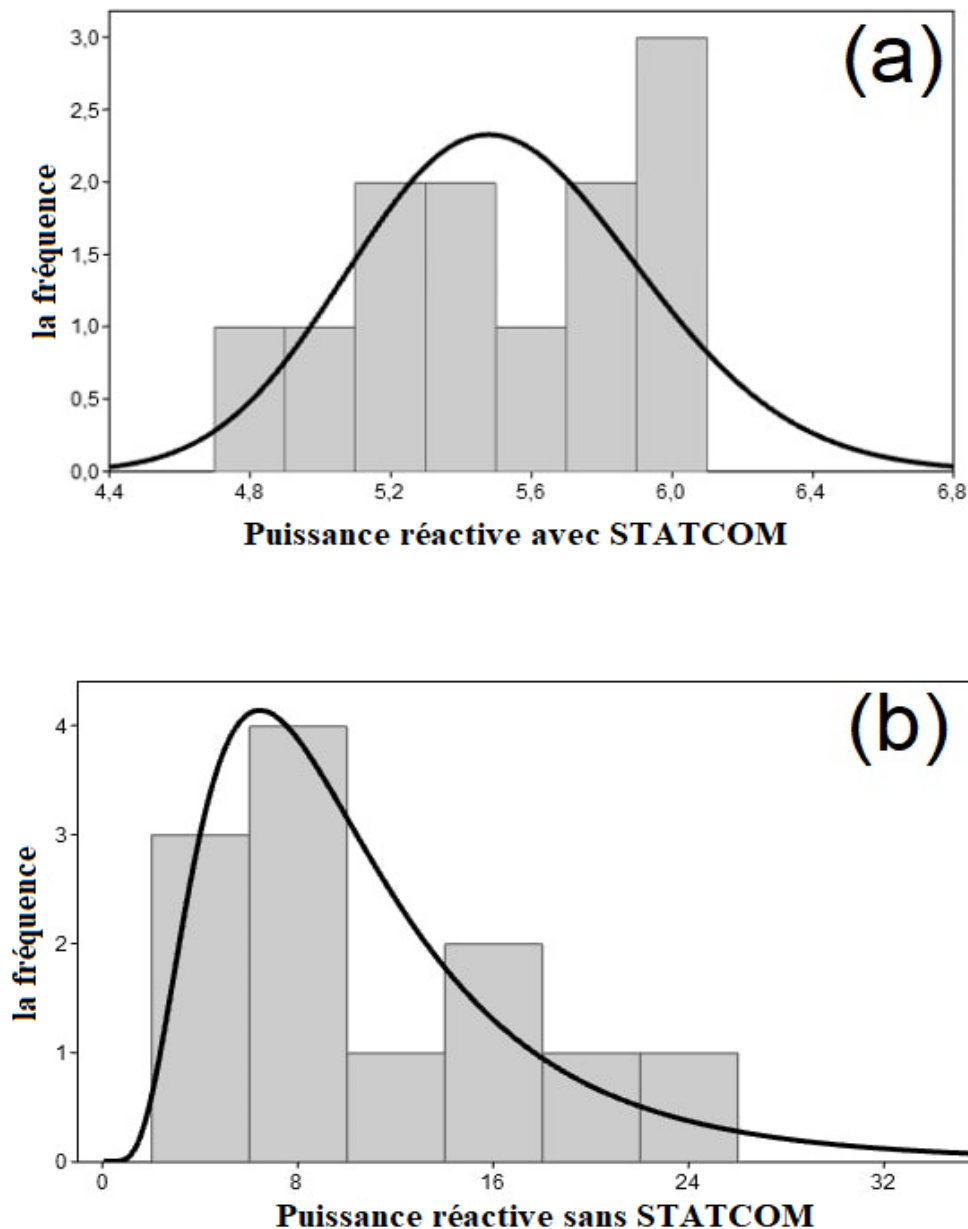


Figure.V.13. Fonction de densité de probabilité de la puissance réactive avec et sans STATCOM (respectivement a et b).

L'ajustement d'une courbe de distribution du système avec STATCOM (Fig.V.13 a) montre une distribution presque symétrique avec un mode, une médiane et une moyenne de 5,48, 5,50 et 5,52, respectivement. La distribution de la courbe pour le système sans STATCOM (Fig.V.13 b) montre une distribution asymétrique positive avec un mode de 6,40, une médiane de 9,18 et une moyenne de 11,31.

L'échelle et l'écart type avec STATCOM sont respectivement de 0,07 et 0,42 et ceux sans STATCOM sont de 0,64 et 8,15, respectivement. Les résultats de révélation observés à partir

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

des deux histogrammes impliquent que le système est influencé par la présence de STATCOM d'une manière positive.

Le principal objectif du modèle est de quantifier l'impact du STATCOM sur la fiabilité des systèmes électriques complexes. Les interactions des composants du système ainsi que les dépendances probabilistes entre le système et STATCOM sont traduites en modèles graphiques. Comme on peut le voir sur la figure V.9, le système électrique est divisé en deux sous-systèmes

Le premier assurant la compensation de l'énergie réactive (STATCOM) et le second garantissant l'énergie - où chaque sous-système est représenté par un nœud dans le RB et est lié à un nœud (N) afin de quantifier les dépendances entre eux.

En Algérie, le seuil d'intervention $\tan \varphi$ est fixé à **0,5** [171], ce qui équivaut à maintenir le facteur de puissance à environ 0,9. En d'autres termes, le rapport puissance réactive / puissance active ne doit pas dépasser 0,5 et le dépassement de cette valeur entraîne une pénalité financière

Ainsi, le consommateur est responsable de contrôler sa propre charge de puissance réactive. La fonction d'état limite correspondante définie par l'équation V.6 prend par conséquent la forme suivante :

$$G = 0.5P - Q \quad \text{V.10}$$

Les données d'essai pour la consommation d'énergie électrique sont introduites dans le modèle probabiliste pour le calcul de la probabilité conditionnelle de défaillance selon l'équation V.8, où les données d'entrée sont fournies dans le tableau V.7.

Tableau V.7. Données d'entrée de la consommation d'énergie électrique

| Variable | Symbole | Valeur moyenne (MVAR) | | Coefficient de variation | |
|-------------------------|----------------|-----------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| | | Sans STATCOM | Avec STATCOM | Sans STATCOM | avec STATCOM |
| puissance active | P | 18.57 | 19 | 0.14 | 0.13 |
| puissance réactive | Q | 11.31 | 5.52 | 0.72 | 0.08 |
| le seuil d'intervention | $\tan \varphi$ | 0.5 | 0.5 | - | - |

L'autre partie de BN consiste en une combinaison complexe de nœuds série-parallèles représentant des interactions variables exprimées en arcs entre variables ; néanmoins, les arcs ne sont pas autorisés à former une boucle fermée.

À partir du processus réseau bayésien (RB), un modèle pour déterminer la fiabilité du système entier est développé. Le modèle conçu peut prévoir, diagnostiquer et prendre des décisions en combinant des données et des connaissances sur les dépendances causales complexes dans des cas industriels réels.

La structure globale du RB est construite selon la méthodologie développée dans la section 3. La figure V.14 représente les nœuds des composants du système électrique, et les nœuds

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

permettent la quantification des interdépendances entre ces composants ainsi que la relation entre le STATCOM et le réseau électrique.

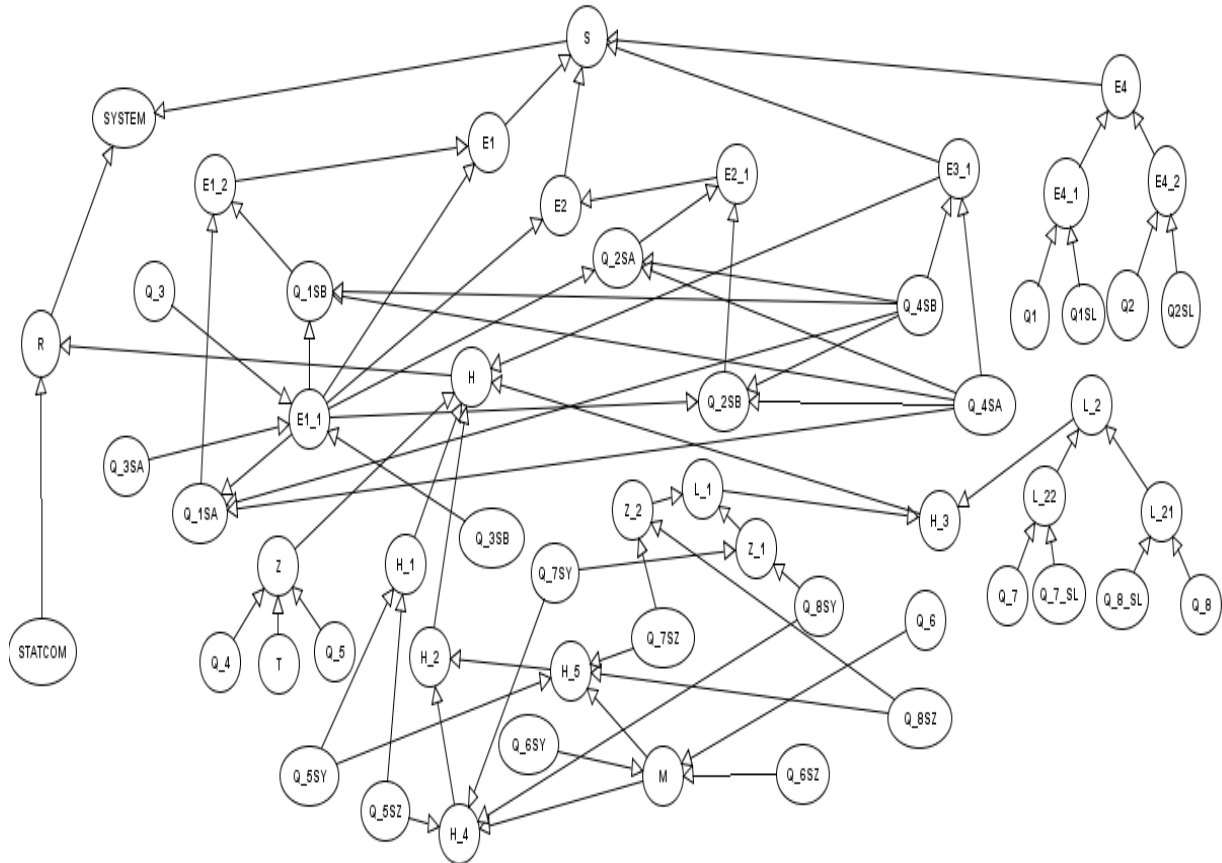


Figure V.14. Réseau bayésien du système électrique

V.5.3.Évaluation de la fiabilité du système électrique avec et sans STATCOM

L'évaluation de la fiabilité du système électrique, prenant en compte l'effet de STATCOM, est désormais considéré et réalisée par couplage des modèles ci-dessus. Par conséquent, pour une durée de vie de référence de 25 ans, le résultat de l'inférence bayésienne reporté sur la Fig. V.15.

Compare l'évolution de la fiabilité en fonction de la durée de vie du système électrique pour les deux cas de système, avec et sans STATCOM (lignes pleines et pointillées, respectivement), en afin de montrer cet effet.

Comme prévu, une tendance similaire se produit dans les deux cas : la fiabilité diminue avec l'âge du système électrique et la probabilité de défaillance augmente en conséquence. Cependant, une diminution significative de la fiabilité est notée sans STATCOM.

Par exemple, la fiabilité sans STATCOM après cinq ans de fonctionnement du système s'est avérée être de 39%, ce qui est considéré comme une fiabilité faible, en particulier dans les premières années de fonctionnement. Au cours de la vie réelle du système électrique étudié,

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

ce rapport diminue de manière tangible. La fiabilité après 10 ans de service est d'environ 5%, et la fiabilité de 15 à 25 ans est proche de 0%. Cependant, le résultat obtenu de la fiabilité du système électrique avec STATCOM montre de bonnes améliorations de fiabilité ; après cinq ans de service, la fiabilité est d'environ 60%.

Pendant la durée de vie réelle du système électrique, le taux de fiabilité est réduit. A 10, 15 et 20 ans, les fiabilités respectives sont de 19%, 5% et 1%. Ainsi, les résultats obtenus confirment que l'ignorance de la compensation d'énergie réactive conduit à des impacts significatifs sur la probabilité de défaillance du système. Pour ces raisons, il est nécessaire d'optimiser la conception du système électrique, et le transport de la puissance réactive doit être limité pour utiliser le réseau à sa capacité maximale, c'est-à-dire produire de la puissance réactive là où elle est consommée.

En conclusion, ces courbes fournissent au concepteur et au service de maintenance une image réaliste du risque de panne du système électrique à différentes durées de vie en ce qui concerne la compensation d'énergie réactive.

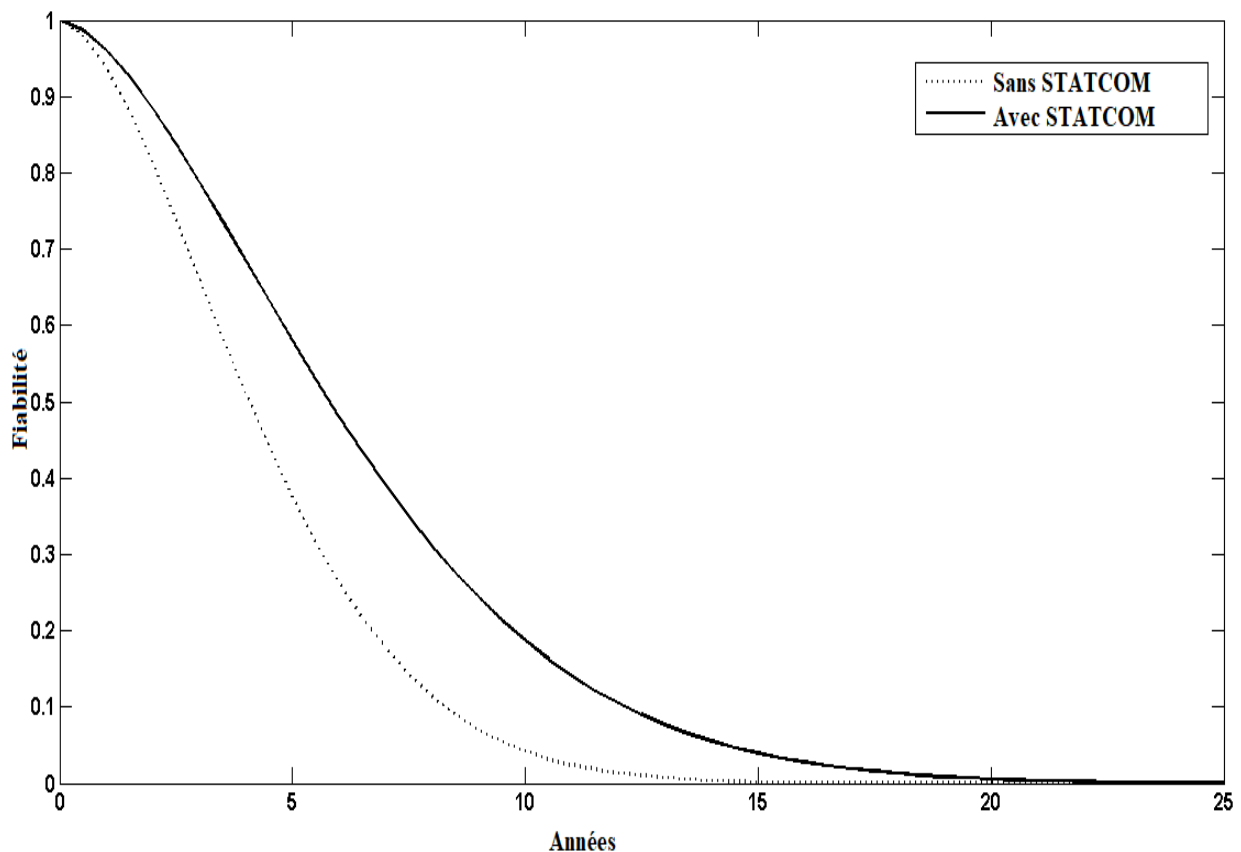


Figure V.15. Fiabilité du système électrique sans et avec STATCOM

V.5.4. Estimation de la fiabilité du système pour trois configurations STATCOM

Selon trois configurations du STATCOM au sein du réseau électrique (série, parallèle et configuration proposée), la figure V.16 représente l'évolution de la fiabilité en fonction de la

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

durée de vie écoulée du système électrique pour les différentes configurations et les compare entre elles.

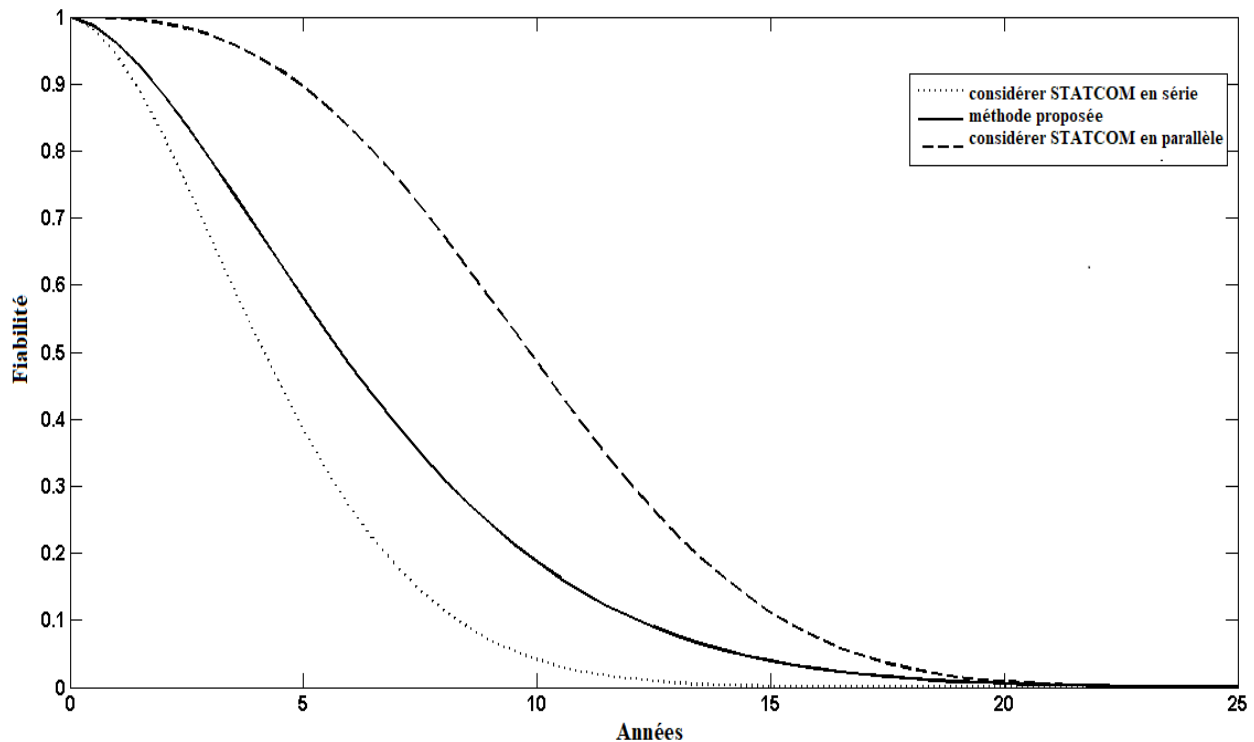


Figure. V.16 Fiabilité du système électrique selon les trois configurations

En pratique, les séries et positions parallèles ne sont pas réalistes, mais elles ont été prises en compte dans notre étude pour s'assurer que les résultats du modèle proposé diffèrent des résultats des séries et des positions parallèles et que le modèle proposé peut être recommandé. De plus, le STATCOM doit être connecté à la position appropriée afin de surveiller correctement le système. Cependant, la fiabilité du système sera difficile et compliquée à déterminer. Une approche bayésienne adaptée est utilisée pour faire face à cette contrainte et définir la fiabilité de ce système électrique complexe.

La figure.V.16 montre que les trois configurations considérées ont quasiment les mêmes tendances, avec une diminution de la fiabilité en fonction du temps, et la courbe obtenue par la méthode proposée ne représente ni la configuration en série ni la configuration en parallèle. Sur la figure.V.16, la comparaison des courbes de fiabilité montre que considérer le STATCOM en série avec le réseau électrique conduit à une sur-pénalisation et peut arrêter prématurément le système électrique.

Par exemple, à cinq ans de service, la fiabilité du système est estimée à près de 0,40 - bien inférieur à l'estimation de la fiabilité de 0,60 dans le modèle proposé. De plus, la prise en compte du STATCOM en parallèle avec le réseau électrique conduit à une fiabilité du système

Électrique surestimée et peut conduire à des décisions erronées dans une situation de risque. À titre d'exemple, après cinq ans de service, la fiabilité du système en parallèle est égale à 0,90 - bien plus élevée que les estimations de fiabilité de 0,60 dans le modèle proposé.

Chapitre V. l'efficacité de compensateur d'énergie réactive

D'après les résultats ci-dessus, on peut conclure que les configurations en parallèle et en série peuvent conduire à des erreurs dans l'évaluation de la fiabilité du système électrique.

V.6.Conclusion

Cette étude présente un modèle pratique d'évaluation de la fiabilité d'un système électrique à l'aide de BN, qui s'est imposé comme l'un des cadres de modélisation et d'analyse les plus prometteurs en termes de maîtrise des risques et de fiabilité. L'utilisation de BN permet de constater l'effet d'un compensateur d'énergie réactive STATCOM sur le réseau électrique et de quantifier les dépendances entre le STATCOM et le réseau électrique constituant l'ensemble du système. À partir des résultats de l'étude, les principales conclusions suivantes peuvent être résumées :

- L'étude de la distribution log-normale de l'énergie réactive d'un système sans et avec STATCOM montre que la stabilité du système électrique avec STATCOM est meilleure que sans STATCOM. Il a également été prouvé que les performances d'un système électrique avec un compensateur sont meilleures que celles sans compensateur, et une influence positive sur la fiabilité a été observée.
- La connexion de STATCOM est importante pour améliorer les performances globales de fiabilité du système ; de plus, les configurations en parallèle et en série peuvent conduire à des évaluations erronées de la fiabilité du système, ce qui peut conduire à une situation d'insécurité (c'est-à-dire un faux intervalle de confiance).
- Le modèle développé peut aider les spécialistes à mener des enquêtes et peut fournir des informations précieuses aux décideurs pour améliorer les performances de fiabilité du system.

Conclusion générale

Le thème de ce mémoire de thèse consiste à l'amélioration de l'efficacité d'une installation de compensation d'énergie réactive et cela s'inscrit dans l'option de la méthodologie d'évaluation de la fiabilité du système électrique.

Les systèmes électriques sont des systèmes dynamiques d'où, le choix et l'application de la méthodologie que nous avons retenue et qui repose sur le modèle graphique dit réseau bayésien RB.

Les raisons qui ont motivé notre choix sont les suivantes :

1. intégration des différentes technologies dans la modélisation du système.
2. l'utilisation de ce modèle dans chaque étape du cycle de développement.
3. l'analyse du comportement fonctionnel et dysfonctionnel du système.
4. la prise en compte de l'aspect dynamique du système.

Par ailleurs cette méthodologie est complétée par une analyse de sensibilité afin de déterminer la contribution de chaque composant quant à la fiabilité du système.

Quant à notre étude sur le système électrique, nous avons identifié les composants les plus au moins fiables et également l'observation du rôle que peut jouer la compensation d'énergie réactive dans l'évaluation de la fiabilité du système en question.

Plusieurs perspectives sont envisageables pour améliorer et poursuivre le travail effectué au cours de cette thèse. De manière non exhaustive, nous pouvons citer :

- Élargir le modèle élaboré de la fiabilité du système électrique à d'autres unités du complexe SIDER. Ce qui permet de distinguer l'influence de chaque unité sur le système.
- Ce sujet de recherche encourage l'exploration d'autres pistes pour développer des modèles de prédiction par d'autres méthodes par exemple : les réseaux de neurones artificiels (ANN), les algorithmes génétiques (GA)...etc. ce qui permettra de comparer les résultats avec ceux obtenus par le modèle de bayésien.
- Proposer des modèles de structures du réseau bayésien pour la prise en charge de scénarios catastrophiques et risques de panne des systèmes électriques.

Bibliographies

- [1] H.R. Baghaee, B. Vahidi, S. Jazebi, G.B. Gharehpetian, A.Kashefi, "Power system security improvement by using differential evolution algorithm based FACTS allocation", IEEE/ICPST, pp.1-6, October 2008.
- [2] G. Shahgholian, E. Haghjoo, A. Seifi, I. Hassanzadeh, "The improvement DSTATCOM to enhance the quality of power using fuzzy 0 neural controller", Jour. of Trans. on Elec. Tech. (JTET), Vol.2, No.5, pp.3- 17, Wint. 2010.
- [3] S.Sankar, S.Ramareddy, "Digital simulation of closed loop controlled IPFC using PSPICE", Inter. Jou. of Elec. and Pow. Engi., Vol.2, pp.99-103, 2008.
- [4] K.M.Sze, L.A.Snider, T.S.Chung, K.W.Chan, "Applications of PWM based static synchronous series compensator (SSSC) to enhance transient stability of power system", IEEE/APSCOM, pp.409-413, 2003.
- [5] D.Jovicic, G.N.Pillai, "Analytical modeling of TCSC dynamics", IEEE Trans. On Pow. Del., Vol.20, No.2, pp.1097-1104, April 2005.
- [6] A.M.El-Zonkoly, "Optimal sizing of SSSC controllers to minimize transmission loss and a novel model of SSSC to study transient response", WASET, Vol.18, pp.255-261, December 2006.
- [7] A.M.A.Amin, "A multilevel advanced static VAR compensator with current hysteresis control", IEEE/ISIE, pp.837-842, Slovenia 1999.
- [8] G.Shahgholian, S.Eshtehardiha, H.Mahdavinassab, M.R.Yousefi, "A novel approach in automatic control based on the genetic algorithm in STATCOM for improvement power system transient stability", IEEE/ICIS, pp.14-19, 2008.
- [9] R. Kuiava, R.A. Ramos, N.G. Bretas, "Control design of a STATCOM with Energy Storage System and power quality improvements", IEEE/ICIT, pp.1-6, February 2009.
- [10] C.Collins, N.Watson, A.Wood, "UPFC modeling in the harmonic domain", IEEE Tran. On Pow. Deli., Vol.21, No.2, pp.933-938, April 2006.
- [11] S.Mishra, P.K.Dash, P.K.Hota, M.Tripathy, "Genetically optimized neuro fuzzy IPFC for damping modal oscillations of power system", IEEE Trans. On Pow., Vol.17, No.4, pp.1140-1147, November 2002
- [12] D.Povh, "Modeling of FACTS in Power System Studies", IEEE/, pp.1435-1439, 2004.
- [13] J.Park, G.Jang, K.M. Son, "Modeling and control of VSI type FACTS controllers for power system dynamic stability using the current injection method", Inte. Jou. of Con., Aut., and Sys., Vol. 6, No.4, pp.495-505, August 2008.
- [14] M.S.Castro, A.B.Nassif, V.F.Costa, L.C.P.Solva, "Impacts of FACTS controllers on damping power systems low frequency electromechanical oscillations", IEEE/PES, pp.291-296, 2004.

- [15] Gotham, D. J., & Heydt, G. T. (1998). Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(1), 60–65. doi:10.1109/59.651614
- [16] Haque, M. H, “New optimal location of shunt FACTS devices in long transmission lines,” *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Volume 147, issue 4, pp. 218-222,2000.
- [17] Mínguez, Roberto, Federico Milano, Rafael Zárate-Miñano, and Antonio J. Conejo, “Optimal network placement of SVC devices,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 22, Volume 4, pp.1851-1860,2007.
- [18] Ustun, Taha Selim, and Saad Mekhilef, “Effects of a static synchronous series compensator (SSSC) based on a soft switching 48-pulse PWM inverter on the power demand from the grid,” *Journal of Power Electronics*, Volume 10, issue 1, pp. 85-90, 2010.
- [19] MEZAACHE Mohamed Contribution à l’Etude du Choix Optimal de l’Emplacement du Dispositif UPFC dans les Réseaux Electriques en Utilisant une des Méthodes Artificielles these doctora l’Université de Batna 30 / 04 / 2016
- [20]Zhang, J., & Yokoyama, A. (2006). Optimal Power Flow Control for Congestion Management by Interline Power Flow Controller (IPFC). 2006 International Conference on Power System Technology. doi:10.1109/icpst.2006.321421
- [21] SEBAA Karim, "Commande intelligente pour l'amélioration de la stabilité dynamiques des réseaux d'énergie électrique", Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Spécialité Systèmes Electroénergétiques, Université des Sciences & des Technologies Houari Boumediene -Alger, Algérie, 15 Septembre 2008.
- [22]. Naresh Acharya, Arthit Sode-Yome, Nadarajah Mithulananthan” Facts about Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Controllers: Practical Installations and Benefits September 2005
- [23] P. Petitclair, « Modélisation et commande de structures FACTS : Application au STATCOM », Thèse de doctorat de l’INGP, 16 Juillet 1997.
- [24] Shahgholian, G., Faiz, J., Fani, B., & Yousefi, M. R. (2010). Operation, modeling, control and applications of static synchronous compensator: A review. 2010 Conference Proceedings IPEC. doi:10.1109/ipecon.2010.5697064
- [25] Rahimzadeh, S., & Tavakoli Bina, M. (2011). Looking for optimal number and placement of FACTS devices to manage the transmission congestion. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 437–446. doi:10.1016/j.enconman.2010.07.019
- [26] Xing K, Kusic G. Application of thyristor-controlled phase shifters to minimize real power losses and augment stability of power systems. *IEEE Trans Energy Convers* 1988;3:792–8.
- [27] Feng W, Shrestha GB. Allocation of TCSC device to optimize total transmission capacity in a competitive power market. In: *IEEE power engineering society winter meeting (IEEE PESGM 2001)*, Columbus, Ohio; 28 January–1 February 2001. p. 587–93.

- [28] Arabkhaburi D, Kazemi A, Yari M, Aghaei J. Optimal placement of UPFC in power systems using genetic algorithm. In: IEEE international conference on industrial technology (ICIT 2006), Bhubaneswar, India; December 2006. p.1694–9.
- [29] Paterni P, Veitet S, Bena M, Yokoyama A. Optimal location of phase shifters in the French network by genetic algorithm. *IEEE Trans Power Syst* 1999;14(1):37–42.
- [30] Gerbex S, Cherkaoui R, Germond AJ. Optimal location of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms. *IEEE Trans Power Syst* 2001;16(3):537–44.
- [31] Sharma A, Chanana S, Parida S. Combined optimal located of FACTS controllers and load ability enhancement in competitive electricity markets using MILP. In: IEEE power engineering society general meeting (IEEE PESGM 2005), San Francisco, California, USA; 12–16 June 2005. p. 670–7.
- [32] Kazemi A, Vahidinasab V, Mosallanejad A. Study of STATCOM and UPFC controllers for voltage stability evaluated by saddle node bifurcation analysis. In: IEEE first international power and energy conference (IPECon 2006), Putrajaya, Malaysia; 28–29 November 2006. p. 191–5.
- [33] Wei X, Chow JH, Fardanesh B, Edris AA. A common modeling framework of voltage-sourced converters for load flow, sensitivity and dispatch analysis. *IEEE Trans Power Syst* 2004;19(2):934–41.
- [34] Berizzi A, Delfanti M, Marannino P, Pasquadibisceglie MS, Andrea S. Enhanced security-constrained OPF with FACTS devices. *IEEE Trans Power Syst* 2005;20(3):1597–605.
- [35] Chanana S, Kumar A. Effect of optimally located FACTS devices on active and reactive power price in deregulated electricity markets. In: IEEE India power conference, New Delhi, India; 10–12 April 2006. p. 1–7.
- [36] Xiao Y, Song YH, Liu CC, Sun YZ. Available transfer capability enhancement using FACTS devices. *IEEE Trans Power Syst* 2003;18(1):305–12.
- [37] Palma-Behnke R, Vargas LS, Perez JR, Nunez JD, Torres RA. OPF with SVC and UPFC modeling for longitudinal systems. *IEEE Trans Power Syst* 2004;19(4):1742–53.
- [38] Srivastava SC, Kumar P. Optimal power dispatch in deregulated market considering congestion management. In: IEEE international conference on electric utility deregulation and restructuring and power technology (DRPT2000), London, UK; April 4–7 2000. p. 53–9.
- [39] Youness Magnoun. Placement optimal de dispositif FACTs dans un réseau de puissance. *Energie électrique*. 2014. ffdumas-01224006f
- [40] S. Gerbex « Métaheuristique appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique » Faculté des sciences et Techniques de l'ingénieur, EPFL-Lausanne 2003, Suisse.

- [41] Raghad Hameed Ahmed "QUALITY IMPROVEMENT OF THE VOLTAGE LEVEL IN THE TRANSMISSION LINES USING STATIC VAR COMPENSATOR CONTROLLERS "ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences ,VOL. 14, NO. 5, MARCH 2019 .
- [42] Nasiru B. Kadandani, Yusuf A. Maiwada "An Overview of FACTS Controllers for Power Quality Improvement" The International Journal Of Engineering And Science (IJES), Volume 4 , Issue 9 , Pages , PP -09-17, 2015
- [43]. Y.N. Vijayakumar, Sivanagaraju "APPLICATION OF INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER (IPFC) FOR POWER TRANSMISSION SYSTEM "INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN ELECTRICAL, ELECTRONICS, INSTRUMENTATION AND CONTROL ENGINEERING Vol. 2, Issue 10, October 20
- [44] Adepoju, G. A. , Komolafe, O.A." Analysis and Modelling of Static Synchronous Compensator (STATCOM): A comparison of Power Injection and Current Injection Models in Power Flow Study" International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 36, November, 2011
- [45] Wendy Carolina BRICEÑO VICENTE » Modélisation des réseaux de distribution sous incertitudes » THÈSE Pour de Doctorat DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE le 20 septembre 2012
- [46] A. Rodriguez Monter, "Contributions to cascade linear control strategies applied to grid-connected Voltage-Source Converters," Ph.D. dissertation, Departamento Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, España, 2013.
- [47] P. Lavy, Production d'électricité par petites centrales hydroélectriques, Techniques de l'ingénieur n° d4009, août 2004.
- [48] W. La Cruz Bastidas. Transformada de Laplace. Universidad Central de Venezuela. July 2002. http://neutron.ing.ucv.ve/electronica/materias/c2515/temas1_archivos/tema10.pdf
- [49] A.-M. Borbely and J. F. Kreider, Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium, CRC Press, 2001.
- [50] B. MULTON. Production d'énergie électrique par sources renouvelables Techniques de l'ingénieur n° d4005, mai. 2003
- [51] Michael I. Henderson, Damir Novosel, and Mariesa L. Crow" Electric Power Grid Modernization Trends, Challenges, and Opportunities" IEEE November 2017
- [52] Egor GLADKIKH «THÈSE de Doctorat Optimisation de l'architecture des réseaux de distribution de l'énergie électrique » L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES 8 Juin 2015.
- [53] ERDF, «Histoire du réseau de distribution de l'électricité,» [En ligne]. Available: http://www.erdf.fr/ERDF_Histoire.
- [54] Schneider Electric, «les réseaux de distribution publique MT dans le monde,» [En ligne].
- [55] Technique de l'ingénieur, Condensateurs de puissance (d4 710), 1996.
- [56] Technique de l'ingénieur, Postes à moyenne tension (d 4600), 1996.
- [57] M. C. Alvarez-Hérault, «Architectures des réseaux de distribution du futur en présence de production décentralisée,» Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2009.
- [58] B. Enacheanu, «Outils d'aide à la conduite pour les opérateurs des réseaux de distribution,» Grenoble, 2007.

- [59] W.C. Briceno Vicente, R. Caire, N. Hadjsaid, Probabilistic load flow for voltage assessment in radial systems with wind power, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 41, Issue 1, October 2012, Pages 27-33, ISSN 0142-0615, 10.1016/j.ijepes.2012.02.014.
- [60] H. Ghasemi, "On line monitoring and oscillatory stability margin prediction in power system based on system identification", PHD thesis, Electrical and computer Engineering waterloo, Ontario, Canada, 2006.
- [61] P. Kundur, et al. "Definition and Classification of Power System Stability," IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp.1387-1401, May 2004.
- [62] P.W. Sauer et M.A. Pai, Power System Dynamics and Stability. Prentice Hall, Upper Saddle River (1998)
- [63] P. Kundur, Power System Stability and Control. McGraw-Hill, New York, 1994
- [64] Electric Power Research Institute, Dynamics of Interconnected Power Systems, A Tutorial for System Dispatchers and Plant Operators, prepared by Power Technologies, Inc., Schenectady, N.Y., for the Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., May 1989.
- [65] Trial Use Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. Organization: IEEE Power and Energy Society; 31-05-2012 P1366
- [66] John D. Kueck and Brendan J. Philip N .Lawrence C. Markel "MEASUREMENT PRACTICES FOR RELIABILITY AND POWER QUALITY": A TOOLKIT OF RELIABILITY MEASUREMENT PRACTICES Oak Ridge National Laboratory National Laboratory and U.S. Department of Energy Sentech, Inc. June 2004
- [67] IEEE, "Probability Analysis of Power System Reliability," IEEE Tutorial, Course Text 71 M30- PWR, 1971.
- [68] DO Minh Thang "Approche probabiliste pour l'évaluation de la fiabilité du système électrique intégrant des énergies renouvelables peu prévisibles" THÈSE doctora UNIVERSITE LILLE 1 – SCIENCES ET TECHNOLOGIES le 05 Décembre 2012
- [69] A.Leroy et J.P.Signoret, « le risque technologique » , Presse universitaire de France 1992.
- [70] M.Gireau, « Sûreté de fonctionnement des systèmes - Principes et définitions », Techniques de l'ingénieur, E 3 850, 2005.
- [71] J.-C. Laprie. Guide de la sûreté de fonctionnement. C'épandues, 1996.
- [72] Y. Mortureux. "La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques". Techniques de l'ingénieur, octobre 2001.
- [73] P. Procaccia et P. Morilhat. Fiabilité des structures des installations industrielles. Théorie et Applications de la mécanique probabiliste. 1996.
- [74] A. Villemeur. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteurs humains, informatisation. Eyrolles, Paris, 1988.
- [75] AFNOR. En 13306-x60-319 (2001). Terminologie de la maintenance, 2001.
- [76] AIT MOKHTAR El Hassene 'Optimisation de la sûreté de fonctionnement et de la maintenance des systèmes complexes par les réseaux bayésiens 'THÈSE DOCTORAT Université A.MIRA-BEJAIA le : 13 Octobre 2016

- [77] A.G.Mihalache, « Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarque », thèse de doctorat, décembre 2007.
- [78] Benmansour, “Contribution à l’étude des mécanismes de défaillances de l’igbt sous régimes de fortes contraintes électriques et thermiques”, thèse au la boratoire IMS Bordeaux, décembre 2008, n° 3752
- [79] M. Ciappa, “Selected failure mechanisms of modern power modules”, *Microelectronics Reliability*, Vol.42, n°4-5, pp.653-667, April-May 2002.
- [80] J.Y.Delétage, « Étude de la durée de vie d’assemblages microélectroniques par l’utilisation de simulation, de modèles de dégradation et de circuits intégrés spécifiques de test », Thèse de doctorat de l’Université Bordeaux 1, décembre 2003, n°2796.
- [81] Sherif, Y.S. and M.L., Smith. Optimal maintenance models for systems subject to failure: A review. *Naval Research Logistics Quarterly*, 28, p. 47–74, 1981.
- [82] J.Y.Delétage, « Étude de la durée de vie d’assemblages microélectroniques par l’utilisation de simulation, de modèles de dégradation et de circuits intégrés spécifiques de test », Thèse de doctorat de l’Université Bordeaux 1, décembre 2003, n°2796.
- [83] S Fiorèse and JP Meinadier. Découvrir et comprendre ingénierie système.CEPADUES Editions, ISBN, 978(36493.005) :6, 2012.
- [84] PhilippeWeber and Lionel Jouffe. Complex system reliability modelling with dynamic object oriented bayesian networks (doobn). *ReliabilityEngineering & System Safety*, 91(2) :149–162, 2006.
- [85] Philippe Weber, Gabriela Medina-Oliva, Christophe Simon, and BenoîtIung. Overview on bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(4) :671–682, 2012.
- [86] Patil, R. B., Kothavale, B. S., Waghmode, L. Y., and Joshi, S. G., (2017), “Reliability Analysis of CNC Turning Center Based on the Assessment of trends in Maintenance Data –A Case Study”, *International Journal of Quality and Reliability Management (IJQRM)*, Emerald, Vol. 34, Issue 9, pp. 1616-1638.
- [87] Y. Dutuit, A. Rauzy, Approximate estimation of system reliability via fault trees, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 87 (2005) 163–172
- [88] R. Buende, Reliability, availability and quality assurance considerations for fusion components, *Fusion Eng. Des.* 29 (1995) 262–285.
- [89] AndrijaVolkanovski, Marko Cepin, BorutMavko, “Application of the Fault Tree Analysis for Assessment of Power System Reliability.” *Reliability Engineering and System Safety*, Volume 94, pp. 1116-1127, 2009.
- [90] Alain Pages, Michel Gondran , , *Fiabilité des systèmes*, Eyrolles, Paris, 1980.
- [91] Balbir S Dhillon. *Reliability, quality, and safety for engineers*. CRC Press, 2004.
- [92] Karim Bourouni « Availability assessment of a reverse osmosis plant: Comparison between Reliability Block Diagram and Fault Tree Analysis Methods” *Desalination* 313 (2013) 66–76

- [93] Claudine Chaouiya « Petri net modelling of biological networks” BRIEFINGS IN BIOINFORMATICS. VOL 8. NO 4. 210 -219 July 9, 2007.
- [94] Alin Gabriel Mihalache. Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué. PhD thesis, Université d’Angers, 2007.
- [95] Gabriela Medina-Oliva. Modélisation conjointe des connaissances multipoints de vue d’un système industriel et de son système de soutien pour l’évaluation des stratégies de maintenance. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2011.
- [96] F Guerin, A Todoskoff, MBarreau, J-Y Morel, A Mihalache, and B Dumon. Reliability analysis for complex industrial real-time systems : application on an antilock brake system. In Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE International Conference on, volume 7, pages 6–pp. IEEE, 2002.
- [97] Florence PETIET « Réseau bayésien dynamique hybride : application à la modélisation de la fiabilité des systèmes à espaces d’états discrets »thèse doctorat l’Université Paris-Est École doctorale le 1 /05/ 2019
- [98] Jensen, Finn V. (1996), Introduction to Bayesian Networks, 1st, Secaucus, NJ, USA : Springer-Verlag New York, Inc., isbn : 0387915028.
- [99] Akila DJEBBAR-ZAIDI « Optimisation de la recherche d’un cas Bayésien »thèse doctorat en informatique l’ UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA Année : 2013.
- [100] Pearl J., Probabilistic reasoning intelligent systems: networks of plausible inference. Morgan kaufman, Palo Alto, 1988.
- [101] Finn V.J., An introduction to Bayesian Networks. Eyrolles, Première Edition, 1996.
- [102] Leray PH. Et Gallinari P., Une architecture neuro-bayésienne pour le traitement spatio-temporel d’alarmes, Application au diagnostic dans le réseau téléphonique. In Journées Nationales sur les Modèles de Raisonnement, JNMR’99, pp. 134-145, 1999.
- [103] Olivier François. De l’identification de structure de réseaux bayésiens à la reconnaissance de formes à partir d’informations complètes ou incomplètes. PhD thèses, INSA de Rouen, 2006.
- [104] Franck Corset. Aide à l’optimisation de maintenance à partir de réseaux bayésiens et fiabilité dans un contexte doublement censuré. PhD thèses, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2003.
- [105] Naim P., Wullemin P., Leray H., Pourret P.O., et Becker A., Réseaux Bayésiens. Groupe Eyrolles, ISBN 2-212- 11371, 2004.
- [106] Andrea Bobbio, Luigi Portinale, Michele Minichino, and Ester Ciancamerla. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into bayesian networks. Reliability Engineering & System Safety, 71(3) :249–260, 2001.
- [107] Guetarni Islam Hadj Mohamed «Analyse Quantitative des Risques : Application sur les Bacs de Stockage »these doctora Université d’Oran 2 Le 06 Mai 2019
- [108] Islam H.M. Guetarni ,Nassima Aissani, Eric Châtelet, and Zoubida Lounis, Reliability Analysis by Mapping Probabilistic Importance Factors into Bayesian Belief Networks for Making Decision in Water Deluge System, Process Safety Progress, 2018.
- [109] D.N. Dongiovanni and T. Iesmantas, Failure rate modeling using fault tree analysis and Bayesian network: DEMO pulsed operation turbine study case, Fusion Eng Des. 109-111 (2016), 613–617.

- [110] B. Cai, Y. Liu, Y. Zhang, Q. Fan, and S. Yu, Dynamic Bayesian networks based performance evaluation of subsea blowout preventers in presence of imperfect repair, *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 18 (2013), 7544–7554.
- [111] N. Khakzad, F. Khan, and P. Amyotte, Quantitative risk analysis of offshore drilling operations: A Bayesian approach, *Saf Sci.* 57 (2013), 108–117.
- [112] N. Khakzad, F. Khan, and P. Amyotte, Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches, *Reliab Eng Syst Saf.* 96(8) (2011), 925–932.
- [113] Andrea Bobbio, Luigi Portinale, Michele Minichino, and Ester Ciancamerla. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 71(3) :249–260, 2001.
- [114] Patrick Naïm, Pierre-Henri Wuillemin, Philippe Leray, Olivier Pourret, and Anna Becker. Réseaux bayésiens. Editions Eyrolles, 2011.
- [115] Judea Pearl. Probabilistic reasoning in intelligent systems : Networks of plausible reasoning. Morgan Kaufmann Publishers, Los Altos, 1988.
- [116] Steffen L Lauritzen and David J Spiegelhalter. Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, pages 157–224, 1988.
- [117] Cecil Huang and Adnan Darwiche. Inference in belief networks : A procedural guide. *International Journal of Approximate Reasoning*, 15(3) :225–263, 1996.
- [118] Andrés Cano, Serafín Moral, and Antonio Salmerón. Algorithms for approximate probability propagation in bayesian networks. In *Advances in Bayesian Networks*, pages 77–99. Springer, 2004.
- [119] Marvin Faix. Conception de machines probabilistes dédiées aux inférences bayésiennes. Probabilités [math.PR]. Université Grenoble Alpes, 2016. Français
- [120] Uffe Kjærulff. Reduction of computational complexity in Bayesian networksthrough removal of weak dependences. In *Proceedings of the tenth international conference on uncertainty in artificial intelligence*, pages 374–382. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1994.
- [121] Bruce D’Ambrosio. Incremental probabilistic inference. In *Proceedings of the Ninth international conference on Uncertainty in artificial intelligence*, pages 301–308. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993.
- [122] Sylvain Verron. Diagnostic et surveillance des processus complexes par réseaux bayésiens. *Automatique / Robotique*. Université d’Angers, 2007. Français.
- [123] Helge Langseth and Luigi Portinale. Bayesian networks in reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(1) :92–108, 2007.
- [124] Philippe Weber, Gabriela Medina-Oliva, Christophe Simon, Benoît Iung. Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, 2012, 25 (4), pp.671-682. [ff10.1016/j.engappai.2010.06.002](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.06.002). [ffhal00546144](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.06.002)
- [125] Alyson G Wilson and Aparna V Huzurbazar. Bayesian networks for multilevel system reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(10) :1413–1420, 2007.
- [126] L Mkrtyan, L Podofilini, and VN Dang. Bayesian belief networks for human reliability analysis : A review of applications and gaps. *Reliability Engineering & System Safety*, 139 :1–16, 2015.
- [127] Zio “method for system reliability and risk analysis” Springer - 2013 -

- [128] Farughian A, Kumpulainen L, Kauhaniemi K . Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks. *Electric power systems research*, 2018, 154: 373-380
- [129] Ouyanga M, Xua M, Zhangc CH, Huang S. Mitigating electric power system vulnerability to worst-case spatially localized attacks. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017,165: 144-154
- [130] Zimann F, Batschauer A,Mezaroba M, Neves F. Energy storage system control algorithm for voltage regulation with active and reactive power injection in low-voltage distribution network. *Electric Power Systems Research*, 2019,174: 105825
- [131] Qianyi L, Yong L, Sijia H, Longfu L. A controllable inductive powerfiltering system: modeling, analysis and control design. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019,105:717-728
- [132] Zhen W, Xianggen Y, Yu Ch, Jinmu L, Langzi L, Zhenyu Q. DSTATCOM integrated with Y-y connection transformer for reactive power compensation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020,117:105721
- [133] Singh B, Saha R, Chandra A, Al-Haddad K. Static synchronous compensators (STATCOM). *IET Power Electronics*, 2009. doi: 10.1049/iet-pel.2008.0034doi: 10.1049/iet-pel.2008.0034
- [134] Zarghami M, Crow M. Damping inter-area oscillations in power systems by STATCOMs, 40th North American Power Symposium, IEEE, 2008:1-6.
- [135] Movahedia M, Halvaei Niasara A, Gharehpetianb G. Designing SSSC, TCSC, and STATCOM controllers using AVURPSO, GSA, and GA for transient stability improvement of a multi-machine power system with PV and wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019,106: 455-466
- [136] Arulampalam A, Ekanayake J B, Jenkins N. Application study of a STATCOM with energy storage, in *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 2003,150: 373-384
- [137] Arsoy A, Liu Y, Chen S, Yang Z, Crow M, Ribeiro P. Dynamic performance of a static synchronous compensator with energy storage," 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), Columbus, OH, USA, 2001, 2: 605-610
- [138] Rausand M, Hoylanc A. *SYSTEM RELIABILITY THEORY Models, Statistical Methods, and Applications*, Second Edition, A JOHN WILEY & SONS, INC ,2003, 396.
- [139] Villmeur A. *Reliability, Availability, Maintainability, and Safety Assessment. Methods and Techniques*, 1992.Wiley, New York.

- [140] Hayati, H., Ahadi, A, Aval S M M. New concept and procedure for reliability assessment of an IEC 61850 based substation and distribution automation considering secondary device faults. *Frontiers in Energy*,2015, 9:387–398.
- [141] Billinton R, Peng Wang P. Teaching Distribution System Reliability Evaluation Using Monte Carlo Simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*,1999, 14: (2), 397-403
- [142] Billinton R, Fellow, Wang P. Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*,1998, 145: (2), 149-153.
- [143] Guanglin C, Yong L, Jiajia H, Ya C, H. Bo and L. Bo. Reliability evaluation of medium voltage distribution network with private electric vehicle, *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, Beijing, 2016, 1-8
- [144] Siirto O, Vepsäläinen J, Hämäläinen A, Loukkalahti M. Improving reliability by focusing on the quality and condition of medium-voltage cables and cable accessories, in *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2017, 2017, 1:229-232.
- [145] Masood B, Haider A, Baig S. Modeling and characterization of low voltage access network for narrowband power line communications. *Journal of Electrical Engineering and Technology* ,2017, 12: (1), 443-450.
- [146] Huda A.S. N, Živanović R. Large-scale integration of distributed generation into distribution networks: Study objectives, review of models and computational tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017,76:974-988.
- [147] Zuboa R.H.A, Mokryani G, Rajamania H.S, Aghaeib J, Niknamb T, Pillaia P. Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017,72:1177-1198.
- [148] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, Ciancamerla E. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliability Engineering and System Safety*, 2001,71:249–60
- [149] Fenton N., Neil M. Risk assessment and decision analysis with Bayesian networks. *CRC Press Taylor & Francis Group*, 2012
- [150] Ait Mokhtar E, Chateaneuf A, Laggoune R. Bayesian approach for the reliability assessment of corroded interdependent pipe networks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2016, 148: 46-58.
- [151] Kelly DL, Smith CL. Bayesian inference in probabilistic risk assessment the current state of the art. *Reliability Engineering and System Safety*,2009, 94:628–643

- [152] Ibne Hossain N, Hosseini S, Jaradat R, Marufuzzaman M. A Framework for Modeling and Assessing System Resilience Using a Bayesian Network: A Case Study of An Interdependent Electrical Infrastructure System. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2019, 25:62-83
- [153] Kim MC. Reliability block diagram with general gates and its application to system reliability analysis. *Annals of Nuclear Energy* ,2011,38 :2456–2461
- [154] Skandarama K, R.C. Mala , Nagesh Prabhu.” Control of Bifurcation in a VSC Based STATCOM” *Procedia Technology* 21 (2015) 187 – 195
- [155] Bindeshwar Singh,Rajesh Kumar “A comprehensive survey on enhancement of system performances by using different types of FACTS controllers in power systems with static and realistic load models “*Energy Reports* 6 (2020) 55-79
- [156] Weber P, Medina-Oliva G, Simon C, Iung B. Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas. *Engineering Application Artificial Intelligence* 2012; 25:671-682. doi:10.1016/j.engappai.2010.06.002.
- [157] Cai B, Liu Y, Liu Z, Tian X, Dong X,Yu S. Using Bayesian networks in reliability evaluation for subsea blowout preventer control system. *Reliability Engineering & System Safety* 2012; 108: 32–41.doi:10.1016/j.ress.2012.07.006.
- [158] Darwiche A. *Modeling and reasoning with Bayesian networks*. New York: Cambridge University Press 2009.
- [159] Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network, *Process Safety and Environmental Protection* 2013;91:46-53. doi:10.1016/j.psep.2012.01.005.
- [160] Gola A. Reliability analysis of reconfigurable manufacturing system structures using computer simulation methods. *Eksploatacja i Niezawodnosc Eksploatac–Maintenance and Reliability* 2019; 21 (1): 90–102, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2019.1.11>
- [161] Billinton R, Allan RN. *Network modelling and evaluation of complex systems*. In: *Reliability Evaluation of Engineering Systems*. Springer, Boston, MA 1992: 101-154, https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0685-4_5.
- [162]. Agena-Risk Software Version 6.1, 2014, Bayesian Network and simulation software for risk analysis and decision support. Available at <http://www.agenarisk.com>.
- [163] Hanzelka Z, Szpyra W, Cziker A, Piątek K. Reactive power compensation. *Electrical Energy Efficiency: Technology and Application* 2012: 371-98, <https://doi.org/10.1002/9781119990048.ch13>.
- [164] Jovanovic S, Gajic B, Mijailovic S. Reactive power compensation and loss reduction in large industrial enterprises. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 1991; 13:337-342, [https://doi.org/10.1016/0142-0615\(91\)90042-T](https://doi.org/10.1016/0142-0615(91)90042-T).
- [165] Sahraoui Y, Chateaufneuf A, Khelif R. Inspection and Maintenance Planning of Underground Pipelines Under the Combined Effect of Active Corrosion and Residual Stress.

International Journal of Steel Structures 2017; 17(1): 165-174, <https://doi.org/10.1007/s13296-014-0005-9>.

[166] Ditlevsen O, Madsen HO. Structural reliability methods. New York, Wiley 1992.

[167] Mi J, Li YF, Beer M, Broggi M, Cheng Y. Importance measure of probabilistic common cause failures under system hybrid uncertainty based on bayesian network. *Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability* 2020; 22 (1): 112-120, <https://doi.org/10.17531/ein.2020.1.13>.

[168] Li J, Wang Z, Ren Y, Yang D, LV X. A novel reliability estimation method of multi-state system based on structure learning algorithm. *Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability* 2020; 22 (1): 170-178, <https://doi.org/10.17531/ein.2020.1.20>.

[169] Ferreira LA, Silva JL. Parameter estimation for Weibull distribution with right censored data using EM algorithm. *Eksploatacja i Niezawodnosc- Maintenance and Reliability* 2017; 19 (2): 310-315, <https://doi.org/10.17531/ein.2017.2.20>.

[170] Summers-Smith JD. Fault diagnosis as an aid to process machine reliability. *Quality and Reliability Engineering International* 1989; 5:203-205, <https://doi.org/10.1002/qre.4680050304>

[171] Electricity rates applicable to Customer in Algeria. Resource document. <http://www.creg.gov.dz/index.php/consommateurs/tarification>. Accessed 12 June 2019

Annexe (Activités scientifiques)

Communications Internationales

1. 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2019 (ICAME2019)” scheduled from 17 – 19 December 2019 in Istanbul. **BAYESIAN NETWORK FOR RELIABILITY ANALYSIS OF COMPLEX ELECTRICAL SYSTEMS.** Omar reffas^{1*}, Yacine Sahraoui², Rachida Ghoul³, Issam Bousba¹, Haithem Boumediri⁴.

2. 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2019 (ICAME2019)” scheduled from 17 – 19 December 2019 in Istanbul. **PREDECTION MODEL FOR THE PHENOMENON OF ELECTRIC SHOCK USING A BAYESIAN NETWORKS.** Omar reffas^{1*}, Haithem Boumediri², Issam Bousba¹, Yacine Sahraoui², Bilal Zerouali⁴.

3. 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2019 (ICAME2019)” scheduled from 17 – 19 December 2019 in Istanbul. **STATISTICAL ANALYSIS OF THE ACTIVE AND REACTIVE POWER OF ELECTRICAL STATION IN STEEL COMPLEX OF EL-HADJAR USING LOG-LOGISTIC DISTRIBUTION.** Omar reffas^{1*}, Haithem Boumediri², Issam Bousba¹, Yacine Sahraoui²

4. 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2019 (ICAME2019)” scheduled from 17 – 19 December 2019 in Istanbul. **USE OF THE FACTORIAL METHOD FOR THE PREDICTION OF THE PERFORMANCE OF THE CENTRIFUGAL PUMPS UNDER THE EFFECT OF THE VISCOSITY.** Issam Bousba^{1,*}, Hocine Cheghib¹, Omar Reffas¹, Haithem Boumediri²

5. 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2019 (ICAME2019)” scheduled from 17 – 19 December 2019 in Istanbul. **Influence of the viscosity of liquids on the value of different losses of the centrifugal pump.** Issam Bousba^{1,*}, Hocine Cheghib¹, Omar Reffas¹, Haithem Boumediri²

6. 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2019 (ICAME2019)” scheduled from 17 – 19 December 2019 in Istanbul. **ANALYZING CENTRIFUGAL PUMPS FOR PERFORMANCE EVALUATION USING TWO-LEVEL SPLIT-PLOT DESIGNS AND REGRESSION ANALYSIS .** Issam Bousba^{1,*}, Haithem Boumediri², Hocine Cheghib¹, Omar Reffas¹

Publications

Omar Reffas, Yacine Sahraoui, Mourad Nahal, Ghoul Hadiby Rachida , Salah Saad
“Reactive energy compensator effect on the reliability of a complex electrical system using Bayesian networks” *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2020; 22 (4): 684–693,<http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.4.12>.