

République Algérienne Démocratique et Populaire  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES**  
**Faculté de Génie Electrique**  
**Département d'Electrotechnique**

Thèse présenté par :

**AMARA Mohamed**

Pour l'obtention du diplôme de :

**Doctorat en Sciences**  
**Spécialité : Electrotechnique**

**Option : RESEAUX ELECTRIQUES**

Intitulé de la thèse :

**CONCEPTION OPTIMALE DES SYSTEMES  
ELECTRIQUES CONFIGURABLE PAR COLONIES DE  
FOURMIS**

Présentée devant le jury composé de :

Abid Mohamed  
Zebelah Abdelkader  
Massim Yamani  
Allali Ahmed  
Meziane Rachid  
Mostefai Mohamed

Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)  
Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)  
Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)  
Professeur (U.S.T.O. Oran)  
Professeur (U.T.M. Saida)  
MC A (U.T.M. Saida)

Président  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur

Année Universitaire 2020 / 2021

*Laboratoire de Recherche .....*

# Remerciements

*Je remercie Dieu le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce modeste travail.*

*Mes premiers remerciements s'adressent à Monsieur Zeblah Abdelkader qui a encadré cette thèse.*

*Je remercie également Le président de jury qui a accepté de présider le jury de thèse.*

*Je souhaite aussi exprimer toute ma reconnaissance envers les membres de jury de thèse qui m'ont accordé de leur temps et m'ont fait l'honneur de juger les travaux présentés dans cette thèse.*

*Enfin, je veux remercier du fond du cœur mes parents et ma famille pour leur soutien financier et encouragements au long de mes études.*

*Je remercie chaleureusement tous les membres du Laboratoire leur écoute et leurs conseils toujours judicieux.*

*Merci à toutes et à tous de loin ou de près.*

# Table des Matières

REMERCIEMENTS.....	i
TABLE DES MATIERES.....	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS.....	viii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
PLAN DE PRESENTATION DE LA THESE.....	2
CHAPITRE 1 État de l’Art des Réseaux Electrique.	
1.1. Introduction.	3
1.2. Structure Générale d’un Reseau Electrique.	4
1.2.1. Sous-Systèmes Production.	5
1.2.1.1. Centrales Thermiques.	5
1.2.1.2. Centrales Nucléaires.	5
1.2.1.3. Energies Renouvelables.	5
1.2.1.4. Les Sources Energies Renouvelables.	6
1.2.1.4.1. Centrales Hydrauliques.	6
1.2.1.4.1.1. Types des Centrales Hydrauliques.	6
1.2.1.4.2. Centrales Eoliennes.	7
1.2.1.4.3. Géothermie.	7
1.2.1.4.4. Centrales Solaires Photovoltaïques.	7
1.2.1.4.5. Centrales Solaires Thermique.	8
1.2.1.4.2. Biomasse et Déchets.	8
1.2.1.4.3. Centrales Marémotrices.	8
1.2.1.4.4. Centrales Hydroliennes.	8
1.2.2. Sous-Systèmes Transport.	8
1.2.2.1. Réseau de Transport et d’Interconnexion	8
1.2.2.2. Réseau de Répartition.	9
1.2.3. Sous-Systèmes de Distribution.	9
1.2.4. Les Tensions.	10
1.2.5. Consommation D’électricité.	11
1.2.5.1. Fluctuations de la Consommation.	11
1.2.5.1.1. Fluctuations Journalières.	11
1.2.5.1.2. Fluctuations Saisonnères.	13
1.2.5.2. La Prévision de la Consommation de Puissance.	13
1.2.5.2.1. Journalières.	15
1.2.5.2.2. Hebdomadaires.	15
1.2.5.2.3. Annuelles.	15
1.2.6. Les Contraintes du Réseau.	15
1.2.6.1. Les Contraintes de Capacité des Ouvrages	15
1.2.6.2. Les Contraintes de Fiabilité et de Vétusté des Ouvrages.	15

1.3. La Cible à Long Terme.	15
1.3.1. Les Stratégies de Développement des Réseaux.	16
1.3.2. Le Bilan des Investissements.	16
1.4. Constitution du Réseau.	16
1.4.1. Lignes Aériennes et Câbles Souterrains.	16
1.4.2. Pylônes.	17
1.4.3. Câble de Garde.	17
1.4.4. Les Transformateurs de Puissance.	17
1.4.5. Les Postes Electriques.	18
1.5. Conclusion	19
CHAPITRE 2 Modele Mathématique et les Methodes d'évaluation de la Fiabilité.	
2.1. Introduction.	22
2.2. Systèmes.	22
2.2.1. Différentes Structures du Système Electriques.	22
2.2.1.1. Système Série.	22
2.2.1.2. Système Parallèle.	23
2.2.1.3. Système Série-Parallèle.	24
2.2.1.4. Système Parallèle-Série.	24
2.3. La Sûreté de Fonctionnement d'un Système .	25
2.3.1. Défaillances.	25
2.3.1.1. La Défaillance d'un Composant Essentiel.	26
2.3.1.2. La Défaillance d'un Composant Non Essentiel.	26
2.4. Eléments Constituent de la Sûreté de Fonctionnement.	27
2.4.1. La Fiabilité.	27
2.4.2. Maintenabilité.	27
2.4.3. Disponibilité.	27
2.4.4. Sécurité.	28
2.5. Lois Usuelles de Probabilité.	28
2.5.1. Loi Exponentielle.	28
2.5.2. Loi de Weibull.	29
2.5.3. Loi Normale.	29
2.5.4. Loi Lognormale.	29
2.5.5. Les Paramètres Temporels Moyens.	30
2.6. Fiabilité.	31
2.6.1. Historique de la Fiabilité.	31
2.6.2. Impact Economique de l'Amélioration de la Fiabilité.	32
2.6.3. Objectifs et Intérêts de la Fiabilité.	32
2.6.4. Décomposition de l'Evaluation de la Fiabilité.	33
2.6.4.1. Régime Statique et Régime Transitoire.	33
2.6.4.2. Hiérarchisation du Système Electrique dans l'Evaluation de la Fiabilité.	34
2.7. L'Evaluation de la Fiabilité du Système de Réseau Electrique.	34
2.8. Analyse de la Fiabilité des Systèmes.	35
2.8.1. Modèle Binaire Simple.	35
2.8.2. Modèle Binaire Etendu.	35
2.9. Méthodes d'Evaluations de la Fiabilité.	35
2.9.1. Méthode Classique.	35
2.9.1.1. Configuration Série.	36
2.9.1.2. Configuration Parallèle.	36

2.9.1.3. Configuration Série-Parallèle.	36
2.9.1.4. Configuration Parallèles-Séries.	37
2.9.2. Exemple de la Méthode Classique.	37
2.9. Méthode Numérique.	38
2.9.1. Formulation Mathématique du Problème d'Optimisation.	38
2.9.2. Problématique.	38
2.9.3. Proposition du Problème.	39
2.9.3.1. Système Parallèle-Série.	39
2.9.3.1.1. Formulation du Problème.	39
2.9.3.1.2. Problème Primal.	40
2.9.3.1.3. Problème Dual.	40
2.9.3.1.4. Problème Multi- Objective.	40
2.9.3.1. Système Série-Parallèle.	41
2.9.3.1.1. Problème Primal.	42
2.9.3.1.2. Problème Dual.	42
2.9.3.1.3. Problème Multi-Objective.	42
2.10. Conclusion	43
CHAPITRE 3 Méthodes d'Optimisation.	
3.1.Introduction.	47
3.2.Problème d'Optimisation.	47
3.2.1. Problème Mono-objectif.	48
3.2.2. Problème Multi objectif.	48
3.3. Les Methodes de Résolution.	49
3.3.1. Les Méthodes Exactes.	49
3.3.1.1. Les Méthodes Analytiques.	49
3.3.1.2 Les Méthodes Algorithmiques.	49
3.3.2. Méthodes Approchées ou Heuristiques.	49
3.3.2.1. Méthode Heuristiques.	50
3.3.2.2. Méthode Méta-heuristiques.	50
3.4. Applications.	51
3.4.1. Recuit Simulé.	51
3.4.2. Recherche Tabou.	52
3.4.3. Algorithme Génétique (AG).	52
3.4.4. Colonies de Fourmis.	54
3.5. Conclusion.	57
CHAPITRE 4 La Fiabilité des Systèmes Multi-États.	
4.1. Introduction.	60
4.2. Evaluation de la Fiabilité des Systèmes Binaires.	60
4.2.1. Modèle Binaire.	61
4.3. Evaluation de la Fiabilité des Systèmes Multi-Etats.	61
4.3.1. Modèle Multi-Etats.	62
4.3.2. Modèles Mathématiques des SME.	62
4.4. Méthodes d'Evaluation des Performances des Systèmes Multi-Etats.	64
4.4.1. Méthodes Existantes.	65
4.4.1.1. La Méthode de Monte-Carlo.	65
4.4.1.2. Méthode de Markov (Processus Stochastique).	65
4.4.1.2.1. Modèle de Markov pour l'Evaluation de la Fiabilité des Eléments Multi-états.	66

4.4.1.2.2. Les Eléments Multi-Etats Réparables.	66
4.4.1.2.3. Exemple D'un Composant Multi-Etats Réparable.	70
4.4.1.3. La Fonction Génératrice Universelle (UMGF).	73
4.4.1.3.1. Système de Production Electro-Energétique.	73
- Systèmes en Parallèle.	74
- Système en Séries.	74
4.4.1.3.1.1. Fiabilité du Modèle de La Demande.	76
4.4.1.3.1.2. Fiabilité Couplée à la Charge.	77
4.5. Exemple Illustratif de la Méthode (UMGF).	77
4.5.1. Cas de Deux Etats.	77
4.5.2.1. Modèle de Charge.	78
4.5.2. Cas de Multi Etats.	79
4.6. Algorithme d'Ushakov.	81
4.7. Les Systèmes Multi Etat (Multi States Systems).	84
4.7.1. Vue D'ensemble D'un Système Electro-Energétique.	84
4.7.2. Exemple d'un Système Multi-Etats.	84
4.7.2.1. Description du Système.	84
4.7.2.1 Description de la Charge.	85
4.8. Conclusion.	87
CHAPITRE 5 Simulation Globale du Système Electro énergétique	
5.1. Introduction.	91
5.2. Etude et Evaluation de la Fiabilité des Systèmes Multi-Etats Réparables.	92
5.2.1. Exemple Illustratif d'un Système Multi-Etats Séries- Parallèles Réparables.	92
5.2.2. Description du Système.	93
5.2.3. Résultats et Discussion.	96
5.3. Minimiser le Coût Sous Contrainte Fiabilité.	99
5.3.1. Exemple Illustratif d'un Système.	99
5.3.1.1. Description du Système à Optimiser.	99
5.3.1.2. Niveau de la Demande (la Charge).	101
5.3.1.3. Modèle de la Charge à Optimise.	103
5.3.1.4. Résultats et Discussion.	103
5.4. Maximiser la fiabilité Sous Contrainte Cout et Performance	106
5.4.1 Description du Système à Optimiser.	106
5.4.2 Résultats et Discussion.	110
5.5. Conclusion.	111
6. Conclusion Générale et Perspective.	114
6.1. Conclusion Générale.	114
6.2. Perspective.	116
7. Bibliographie.	117
8. ANNEXE A.	128
9. ANNEXE B.	130

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Tableau des domaines de tension.	10
Tableau 2.1	Paramètres du système électrique.	37
Tableau 4.1	Paramètres du système électrique.	77
Tableau 4.2	Caractéristiques de la demande.	78
Tableau 4.3	Paramètres du système électrique.	79
Tableau 4.4	Caractéristiques de la demande.	79
Tableau 5.1	Les données des composants du système disponibles.	101
Tableau 5.2	Données de la demande cumulative annuelle.	103
Tableau 5.3	Solution optimal des structures avec différentes contraintes de fiabilité.	103
Tableau 5.4	Comparaison de l'algorithme ACO avec l'algorithme HSA.	104
Tableau 5.5	Les données des composants du système disponibles.	107
Tableau 5.6	Données de la demande cumulative annuelle.	108
Tableau 5.7	Solution optimal des structures avec différentes contraintes de cout.	108
Tableau 5.8	Comparaison de l'algorithme ACO avec la algorithme CSA.	109

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Les différents sous-systèmes constituant un système électrique.	4
Figure 1.2	La configuration du réseau de transport réseau très haute tension.	10
Figure 1.3	Structure nationale du réseau électrique.	11
Figure 1.4	La fluctuation journalière de la courbe de charge en France.	12
Figure 1.5	La fluctuation journalière de la courbe de charge en Algérie.	12
Figure 1.6	La fluctuation saisonnière de la courbe de charge en Algérie.	13
Figure 1.7	Les prévisions de la consommation de charge en France.	14
Figure 1.8	Pylône en acier d'une ligne à haute tensions.	17
Figure 1.9	Un transformateur de puissance dans un poste électrique.	18
Figure 1.10	Modèle d'un poste électrique.	19
Figure 2.1	Système à structure série.	23
Figure 2.2	Poteaux en série.	23
Figure 2.3	Système à structure parallèle.	23
Figure 2.4	Deux transformateurs en parallèle.	24
Figure 2.5	Système à structure série-parallèle.	24

Figure 2.6	Système à structure parallèle- série.	25
Figure 2.7	État d'un SME à la défaillance d'un composant essentiel.	26
Figure 2. 8	État d'un SME à la défaillance d'un composant non-essentiel.	27
Figure 2.9	Diagramme des temps moyens établi par un système.	31
Figure 2.10	Variation de la fiabilité en fonction du coût.	32
Figure 2.11	Hiérarchisation du système électrique.	34
Figure 2.12	Schéma détaillé d'un système parallèle- série.	39
Figure 2.13	Schéma synoptique d'un système série- parallèle.	41
Figure. 4.1	Diagramme fonctionnel d'un composant multi-états.	62
Figure. 4.2	Courbes de représentation cumulatives de multi-états.	63
Figure. 4.3	Diagrammes de transitions d'état pour élément réparable avec mineures défaillances et réparation.	67
Figure. 4.4	Diagramme état-transition pour la détermination de la fonction de fiabilité.	80
Figure. 4.5	Diagrammes d'état-transition pour l'élément à quatre états avec défaillances.	70
Figure 4.6	Disponibilité instantanée d'un élément à quatre états.	71
Figure. 4.7	Diagramme état-transition pour la détermination de la fonction.	72
Figure. 4.8	La fiabilité $R_w(t)$ d'un élément à quatre états.	73
Figure. 4.9	Approche de détermination de la fonction génératrice d'un SME.	74
Figure. 4.10	Système parallèle et son équivalent.	75
Figure. 4.11	Système série et son équivalent.	75
Figure. 4.12	Système Série Parallèle.	77
Figure 4.13	Système électro-énergétique parallèle-série.	84
Figure 4.14	Un exemple de la courbe cumulative par morceaux.	86
Figure 5.1	Un système multi-états avec 3 éléments (transformateurs).	92
Figure 5.2	Diagramme d'état-transition pour SME.	94
Figure 5.3	Disponibilité et probabilités de différents niveaux de performance. $w = 115 Kv$	96
Figure 5.4	Disponibilité et probabilités de différents niveaux de performance. $w = 230 Kv$	97
Figure 5.5	Disponibilité et probabilités de différents niveaux de performance. $w = 345 Kv$	97
Figure 5.6	Probabilités des différentes performances.	98
Figure 5.7	Disponibilités des différentes performances.	98
Figure 5-8	La fiabilité du système pour une période.	99
Figure 5.9	Structure parallèle- série d'un Parc éolienne.	100
Figure 5.9	Modèle de parc éolien et détail du système de production d'énergie.	101
Figure 5.10	Schémas Synoptique.	
Figure. 5.11	Minimisation de Cout Sous Contrainte Fiabilité.	105
Figure 5.12	Structure Parallèle- Série d'un Réseau Electrique Décentralise.	106
Figure 5.13	Maximisation Fiabilité Sous Contrainte Cout et Performance.	110

## LISTES DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

### SYMBOLES

R, A	Fiabilité
C	Cout
G, $\Xi$	Performance
R <sub>ij</sub> , A <sub>ij</sub>	Fiabilité du composant j du type i
G <sub>ij</sub>	performance de l'élément i dans l'état j
C <sub>ij</sub>	Coût de composants électriques j de type i
R <sub>0</sub> , A <sub>0</sub>	Fiabilité minimale requise
C <sub>0</sub>	Cout minimale requis
M	Nombre de niveaux de Charges
P <sub>i</sub>	Probabilité de la performance du i <sup>ème</sup> dispositif
Q <sub>j</sub>	Probabilité de la performance du j <sup>ème</sup> dispositif
P <sub>ij</sub>	Probabilité de transition avec la performance qui correspond à G <sub>ij</sub>
a <sub>i</sub> , b <sub>j</sub>	physiquement sont interpréter comme performances des éléments n et J
j	Index des niveau de performance ( $j = 1 ; 2 ; \dots ; J$ )
i	Index des niveau de performance ( $i = 1 ; 2 ; \dots ; n$ )
T	Temps correspondant aux niveaux de Charges
n	Nombre maximale des systèmes en séries
J	Nombre maximale des systèmes en parallèle
W	Niveau de la demande.
$\lambda$	Taux de defaillance
$\mu$	Taux de réparation
$\tilde{\sim}$	Opérateur de calcul pour le dispositif parallèle
$\delta$	Opérateur de calcul pour le dispositif série
F	Fonction objective

### ABREVIATIONS

HTB	Haute tension catégorie B
HTA	Haute tension catégorie A
BTB	Basse tension catégorie B
BTA	Basse tension catégorie A
HT	Haute tension

MT	Moyen tension
BT	Basse tension
TBT	Très basse tension
AC	Courant alternatif (Alternating Current)
DC	Courant continu (Direct Current)
RDT	Réseau de transport et d'interconnexion
RDR	Réseau de répartition
OS	Operateur système
MW	Méga watt
MVA	Méga volt ampère
IMAP	Intensité maximale admissible en régime permanent
CRC	Centre de conduite régional
STEG	Société tunisienne d'électricité et du gaz
ONE	Office national de l'électricité (Maroc)
GRTE	Gestionnaire régional de transport d'électricité
MTTF	Temps moyen de bon fonctionnement
UMGF	Fonction génératrice moment universelle
RAP	problème d'allocation de la redondance
$A(t)$	Disponibilité instantanée
$M(t)$	Maintenabilité instantanée
$r(t)$	Fonction de taux de défaillance
MLV	Logique multi valeurs (Multiple Valued Logic)
SME	Systèmes multi états (Multi State System)
SMETA	Méta-heuristiques à base de solution unique
PMETA	Méta-heuristiques à base de population
LOLP	Probabilité de Perte de la charge (Loss of Load Probability)
GA	Algorithme génétique (Genetic Algorithm)
TS	La recherche tabou (Tabu Search)
SP/TG	Hybride Algorithme Génétique et Tabu Search
ACO	Optimisation par colonies de fourmis (Ant Colony Optimization)

## Introduction Générale

La consommation d'énergie, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmentée à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer, voire amplifier cette tendance notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques.

L'augmentation permanente et continue de la dépendance électrique de la société moderne implique un fonctionnement des systèmes de puissance à 100% de leur capacité et une sûreté maximale. En outre, une grande partie des systèmes industriels et notamment les systèmes électriques ne sont pas à l'abri des pannes qui d'origines internes ou externes peuvent nuire au bon fonctionnement de l'ensemble centrale réseau électrique. Cette défaillance se traduit par une rupture de continuité de service et dans certains cas par la panne générale connue sous le nom de « blackout ». Les blackouts à grande échelle sont rares, mais ils causent d'énormes pertes sur l'économie et la société. Les conséquences des blackouts sont à la fois économiques et sociales. Même de courtes interruptions d'électricité peuvent endommager de façon importante des processus industriels, car la remise en marche de ces processus peut prendre plusieurs heures selon les cas. De longues interruptions arrêtent les systèmes de communication, de transport, la distribution de l'eau, le chauffage, etc. d'autre part, Ces défaillances peuvent, ainsi, engendrer d'énormes pertes de production, pertes financières, pertes de temps, accidents, blessures, décès, insatisfaction de la clientèle, etc.

De tels scénarios peuvent être évités par l'amélioration de la fiabilité du système électrique. Cette opération nécessite l'engagement de moyens financiers et peuvent avoir des conséquences sur maintient du prix du kilowattheure. Alors, que l'investissement étant fixé par le budget annuel alloué au secteur énergétique.

Une fois qu'un système électrique peut présenter plusieurs niveaux de performances, il est considéré comme un système multi-états (SME). Ces performances peuvent être d'ordre structurel, de fiabilité, de disponibilité, productive ou de capacité. Notre objectif s'appuie sur une démarche qui favorise la continuité du service des systèmes de production, l'accroissement de ses performances à répondre à une demande donnée. Pour réaliser cette tâche, un compromis souvent difficile à réaliser consiste à améliorer la performance sous contrainte d'un budget alloué. C'est dans cette optique que ce travail de recherche tente à trouver des solutions à ce problème par l'introduction de l'optimisation.

Dans un monde qui change au quotidien, avec une technologie qui évolue à grande vitesse et des moyens de communication face auxquels les distances ne sont plus un obstacle, la prise de décision devient un outil capital pour la réussite. Une prise de décision où on ne cherche plus "la meilleure solution" mais plutôt «*la solution optimale*». L'optimisation est désormais un critère indiscutable dans la prise de décision. Les efforts fournis par les scientifiques et les chercheurs dans le domaine des mathématiques appliquées et la recherche opérationnelle trouvent désormais des applications dans tous les domaines. Dans le cadre de

cette thèse, nous nous intéressons d'abord à la conception de systèmes réparables de type parallèle-série pour le développement du modèle analytique des systèmes réparables en mode dégradé. Dans ce contexte, notre objectif est de trouver une méthodologie qui permet d'optimiser la conception optimale des systèmes électriques à composants multi-états configurables, on se basera principalement sur le coût d'un côté, et la qualité en terme de disponibilité de l'autre, afin de trouver le meilleur compromis entre ces deux caractères.

Pour cela, on adopte l'algorithme colonies de fourmis comme technique d'optimisation où une exploration en utilisant des fourmis artificielles, cette méthode nous a permis de trouver des résultats intéressants au niveau de coût et de performance.

## **Plan de Présentation de la Thèse**

Le travail de cette thèse comporte cinq chapitres:

*Dans le chapitre 1*, on présentera un état de l'art sur la structure générale d'un système électrique, et la description des différents éléments des différents systèmes de productions, la charge et sa fluctuation et les prévisions adéquates. Le développement du réseau et sa description sera abordé dans ce chapitre.

*Dans le chapitre 2*, on décrira les différentes configurations possibles, les indices de fiabilités, les modèles mathématiques et les méthodes d'évaluation de la fiabilité ainsi que les différentes méthodes de calculs.

*Dans le chapitre 3*, on s'intéressera aux méthodes d'optimisations. Une attention particulière sera donnée aux méthodes heuristiques et métaheuristiques et plus particulièrement la méthode des colonies de fourmis.

*Dans le chapitre 4*, on se focalisera sur les différentes méthodes d'évaluation de la fiabilité en partant des méthodes de calcul binaires, en passant par les méthodes de chaînes de Markov et en arrivant vers la méthode universelle d'Ushakov appliquées aux systèmes multi états. Une application aux systèmes électro-énergétique sera également calculée.

*Dans le chapitre 5*, la simulation globale du système électro-énergétique sera proposée et principalement les systèmes multi-états réparables. L'idée est d'améliorer la performance sous contrainte coût où une optimisation de la fiabilité d'un système hybride solaire éolien sous ses différentes configurations sera effectuée.

On finira notre thèse par une conclusion générale et des perspectives d'avenir.

# CHAPITRE 1

## État de l'Art des Réseaux Électriques

Dans toutes nos activités quotidiennes, nous faisons appel à l'énergie sous ses différentes formes. Elle est une source stratégique pour le développement durable. Pour la majorité des pays importateurs d'énergie, l'approvisionnement en ressources énergétiques en quantités suffisantes relève de la sécurité nationale dans la mesure où son manque peut immobiliser l'appareil productif et freiner la croissance économique du pays.

### 1.1. Introduction

La fonction de base d'un système d'énergie électrique est de répondre aux exigences de l'électricité des clients, avec une qualité et une fiabilité raisonnable, et d'une façon économique. Les sociétés électriques ont pour la plupart, atteint cet objectif. Ceci a été accompli en utilisant des critères de fiabilité dès la production, la transmission, la distribution et la planification basée sur l'application des techniques probabilistique et qui ont évolué sur beaucoup d'années d'expérience de fonctionnement.

Pendant les dernières décennies, le système électrique algérien, comme d'ailleurs la majorité des autres systèmes électriques mondiaux, ont été confrontés à une forte croissance de la consommation de l'énergie électrique alors que le développement du réseau correspondant est confronté à une opposition croissante à l'implantation de nouvelles lignes et de nouvelles centrales électriques. Ceci non seulement en raison des contraintes environnementales mais aussi à cause des problèmes liés au manque d'investissement dans les différents secteurs de production et de transport de l'énergie électrique surtout après l'ouverture du marché de l'électricité [2, 3, 4]. Ceci a amené les gestionnaires des réseaux électriques à exploiter leurs systèmes électriques avec des marges de sécurité et de stabilité réduites. [1].

Ce chapitre présente Les différents sous-systèmes constituant un système électrique, les caractéristiques générales des éléments constituant le système électrique seront présentées.

Ensuite, les moyens mis en place par l'opérateur système, permettant de garantir la sûreté du système électrique en Algérie, seront détaillés.

## 1.2. Structure Générale d'un Réseau Electrique

Le système électrique est un ensemble d'installations électriquement connectées qui assure, via le réseau, le transfert de l'énergie électrique, des producteurs aux consommateurs. Cette énergie peut être produite à partir de sources aussi variées que l'hydraulique, les combustibles fossiles, la fission nucléaire, le vent, le soleil. Le stockage à grande échelle de l'énergie électrique n'est, actuellement, pas possible dans des conditions économiques satisfaisantes. Le problème majeur de l'exploitant du système est donc de maintenir en permanence, l'équilibre entre l'offre disponible et la demande potentielle, étant donné que l'équilibre instantané entre production et consommation est une condition nécessaire au fonctionnement du système production-transport-consommation. L'exploitation du système repose donc sur l'adaptation permanente de la production aux fluctuations de la demande, dans le respect des contraintes liées au réseau [5.6.7].

En général on distingue quatre sous-systèmes principaux du système électrique figure 1.1:

1. Les sous-systèmes de production.
2. Les sous-systèmes de transport.
3. Les sous-systèmes de distribution.
4. La consommation.

Le réseau de transport et d'interconnexion international forme un réseau maillé (THB, 400-220kV). La fonction de base du réseau de transport est d'acheminer l'énergie électrique des grands groupes de production jusqu'aux grands centres de consommation. Le réseau de répartition (60 à 150 kV) fait le lien, entre les lignes de transport qui acheminent l'énergie des grandes centrales et le réseau de distribution. Ces réseaux sont généralement disposés en boucle. Le réseau de distribution a pour rôle de couvrir l'ensemble du territoire pour acheminer l'énergie électrique jusqu'au client ultime. Il est le plus conséquent en termes de taille [8. 9]. Par exemple pour le réseau Algérien le réseau de distribution compte 1 100 000 km contre 400 000 km pour le réseau de transport.

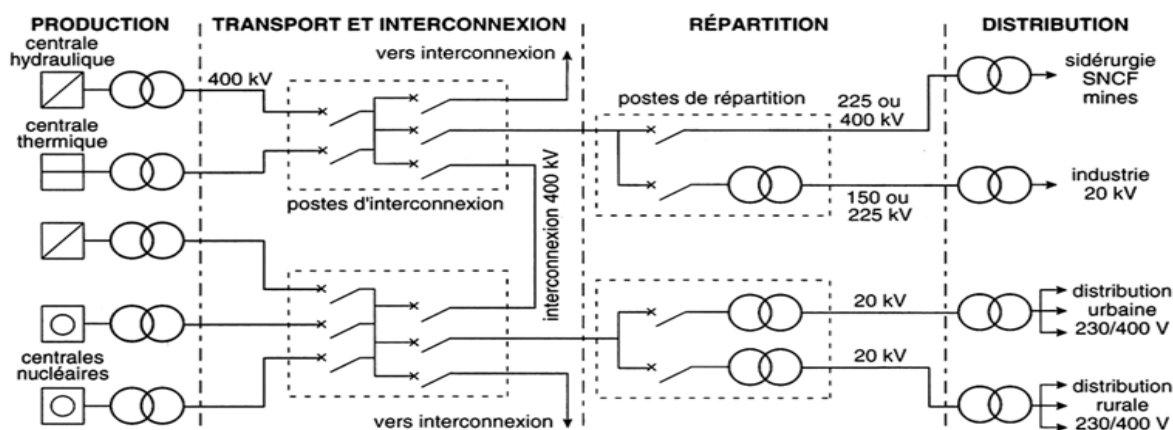


Figure 1.1 : Les différents sous-systèmes constituant un système électrique [11]

### 1.2.1. **Sous-Systèmes Production :**

Un système de production est toujours constitué d'un alternateur et d'une turbine. La production doit en tout instant être capable de satisfaire la demande (consommation+ pertes). Elle doit donc prévoir des moyens de production pour couvrir l'extrême pointe de la demande. L'énergie électrique peut être produite à partir des sources primaires comme l'hydraulique, les combustibles fossiles, la fission nucléaire, le vent, le soleil etc., du point de vue des approches de planification et d'exploitation [10].

Il existe trois principaux types de centrales électriques :

1. Les centrales à combustible fossile (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques.
2. Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermique.
3. Les énergies renouvelables.

Le principe de fonctionnement de chaque type de ces centrales électriques est présenté ci-dessous:

#### 1.2.1.1. **Centrales Thermiques**

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel. La plupart ont une capacité comprise entre 200MW et 2000MW. Les centrales thermiques font usage de l'énergie calorifique contenue dans les combustibles. La combustion dégage une grande quantité de chaleur utilisée pour chauffer de l'eau dans la chaudière (ou générateur de vapeur). On dispose alors de vapeur d'eau sous pression. Cette vapeur sous pression fait tourner à grande vitesse une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. A la sortie de la turbine la vapeur est refroidie pour se transformer en eau, puis renvoyée dans la chaudière. Il existe trois principaux types de centrales électriques [3] :

- Centrale à Vapeur.
- Centrale à Combustion (Turbine à Gaz).
- Centrale à Cycle Combiné.

#### 1.2.1.2. **Les Centrales Nucléaires**

Les centrales nucléaires produisent l'électricité à partir de la chaleur libérée par une réaction nucléaire. Ce phénomène est provoqué par la division du noyau d'un atome qu'on appelle fission nucléaire. Remarquons qu'une réaction chimique produit un simple regroupement des atomes sans que leurs noyaux soient affectés.

Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission [3,11].

### 1.2.1.3. **Énergies Renouvelables**

Les politiques de développement durable mises en place dans le monde ont permis une meilleure exploitation du vaste potentiel que représentent les ressources renouvelables. L'indépendance énergétique, couplée à la diminution des émissions de gaz à effet de serre et la volonté de diversification des ressources, ont été les moteurs d'un développement industriel très conséquent, permettant d'initier des filières nouvelles tout en soutenant des technologies plus matures. Les perspectives économiques du domaine des énergies renouvelables sont en outre confortées par le contexte d'appauvrissement des énergies fossiles. De plus, ces énergies ont des aptitudes diverses au stockage [12]. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance végétale, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales et génèrent des emplois. Le solaire (solaire photovoltaïque, solaire thermique), l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont des énergies à flux inépuisables par rapport aux « énergies stock » tirées des gisements de combustibles fossiles en voie de raréfaction : pétrole, charbon, lignite, gaz naturel [12.13].

### 1.2.1.4. **Les Sources d'Énergies Renouvelables**

Il existe différentes sources d'énergie renouvelables disponibles sur la planète dont les principales sont: l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire. Depuis les années 1990, les énergies renouvelables connaissent un essor important. Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (à partir du vent, des mouvements de l'eau...), l'énergie à finalité électrique (à partir de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes, de barrages hydrauliques...) et l'énergie d'origine et à finalité thermique (géothermie, solaire thermique...). La plupart de ces formes d'énergie proviennent du soleil, à quelques exceptions près (marées, géothermie...). Les formes d'énergie renouvelables à finalité électrique qui sont actuellement les plus exploitées tout en respectant au mieux l'environnement sont l'hydraulique, le solaire photovoltaïque et l'éolien. Ces formes d'énergie sont décrites dans ce qui suit [13].

#### 1.2.1.4.1. **Centrales Hydrauliques**

Les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. Celle-ci est transformée en énergie électrique par un alternateur entraîné par une turbine mue par la force de l'eau. Cette force est due soit à la

hauteur de chute dans le cas de centrales alimentées par une conduite forcée, soit au débit dans le cas de centrales au fil de l'eau. L'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus répandue puisqu'elle est également utilisée dans la production centralisée [13,14].

#### 1.2.1.4.1.1 Types des Centrales Hydrauliques

Suivant la hauteur de chute, on distingue :

- Les centrales de haute chute :

Elles ont des hauteurs de chute supérieure à 300 m; elles utilisent des turbines Pelton. Ces centrales se trouvent dans les Alpes et dans d'autres régions très montagneuses. La capacité du réservoir est relativement faible.

- Les centrales de moyenne chute :

Elles ont des hauteurs comprises entre 30m et 300m; elles utilisent des turbines Francis. Ces centrales sont alimentées par l'eau retenue derrière un barrage construit dans le lit d'une rivière de région montagneuse. Elles comportent un réservoir de grande capacité.

- Les centrales de basse chute :

Au fil de l'eau, ces centrales ont des hauteurs de chute inférieures à 30m; elles utilisent des turbines Kaplan ou Francis. Ces centrales sont établies sur les fleuves ou les rivières à fort débit.

#### 1.2.1.4.2. Centrales Eoliennes

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable favorisant la diversification et l'indépendance énergétique de notre pays. C'est une énergie propre qui ne produit pas de gaz à effet de serre. Elle utilise des machines dont le cycle de vie est favorable au respect de l'environnement: matériels restituant en quelques mois l'énergie utilisée pour leur fabrication, matériaux recyclables, démantèlement réalisable à tout moment et en quelques jours, assurant une totale remise en état du site. C'est une énergie décentralisée plus proche des consommateurs. L'Algérie possède un potentiel immense en énergie renouvelable qui lui permet de diversifier ses sources énergétiques [15].

Les aérogénérateurs, ou les éoliennes, tirent leur énergie du vent qui est transmise par le rotor et le multiplicateur de vitesse à une génératrice. Cette source d'énergie commence à atteindre sa maturité technologique, est de plus en plus répandue grâce à son aspect écologique.

#### 1.2.1.4.3. Géothermie

Les centrales géothermiques utilisent la chaleur de nappes d'eau souterraines qui peuvent atteindre 350 °C dans les zones les plus favorables. Cette eau chaude est pompée vers la surface pour passer dans des échangeurs. La vapeur produite est turbinée dans une installation thermique classique [16].

#### 1.2.1.4.4. Centrales Solaires Photovoltaïques

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement solaire. Les panneaux photovoltaïques, composés de cellules photovoltaïques à base de silicium, ont la capacité de transformer l'énergie photonique en énergie électrique. Le courant continu ainsi produit est directement utilisable [9,15].

#### 1.2.1.4.5. Centrales Solaires Thermique

Les centrales solaires thermiques sont des centrales thermiques utilisant des turbines à vapeur, celle-ci étant produite par chauffage de l'eau via un fluide caloporteur en utilisant le rayonnement solaire concentré sur un échangeur par des miroirs paraboliques. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant la technique désormais classique et éprouvée de recherche du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracker: MPPT). Cette solution est également utilisable pour la production d'énergie éolienne [9 ,15].

#### 1.2.1.4.6. Biomasse et Déchets

Certaines centrales thermiques à flamme utilisent comme source primaire des combustibles issus de la biomasse (bois, biogaz, paille, déchets organiques, etc.) ou de déchets industriels et domestiques [16].

#### 1.2.1.4.7. Centrales Marémotrices

Les centrales marémotrices peuvent s'apparenter à des centrales hydrauliques au fil de l'eau à ceci près que les turbines sont réversibles pour profiter du flux et du reflux des marées.

#### 1.2.1.4.8. Centrales Hydroliennes

Les centrales hydroliennes utilisent l'énergie cinétique de la houle dont l'énergie provient du vent. De nombreuses solutions techniques ont été imaginées, mais l'hostilité du milieu sous-marin compromet sérieusement leur développement à l'heure actuelle.

### 1.3.2 .Sous-Systèmes de Transport

Comme l'électricité ne se stocke pas en grande quantité, la production doit s'adapter sans cesse à la consommation. C'est pourquoi l'énergie produite doit être acheminée en temps réel jusqu'aux consommateurs.

Comme l'électricité ne se stocke pas en grande quantité, la production doit s'adapter sans cesse à la consommation. C'est pourquoi l'énergie produite doit être acheminée en temps réel jusqu'aux consommateurs. L'électricité circule instantanément depuis les centrales de production jusqu'aux lieux de consommation finale. Elle emprunte pour cela un réseau de lignes aériennes et souterraines. Les lignes à très haute tension, les postes de transformation, des lignes à haute tension et les lignes à basse tension [17.18].

Le réseau de transport d'électricité est situé en amont des réseaux de distribution il se compose de deux sous-ensembles :

#### 1.3.2.1. Réseau de Transport et d'Interconnexion

Le réseau de grand transport et d'interconnexion est destiné à transporter des quantités importantes d'énergie sur de longues distances. Il constitue l'ossature principale pour l'interconnexion des grands centres de production. Son niveau de tension est de 400 000 volts, soit le niveau le plus élevé en France.

- Les réseaux de répartition régionale ou locale sont destinés à répartir l'énergie en quantité moindre sur des distances plus courtes. Le transport est assuré en très haute tension (225 000 volts) et en haute tension (90 000 et 63 000 volts).

#### 1.3.2.2. Réseau de Répartition

Le réseau de répartition achemine l'énergie électrique des grandes régions de consommation vers leurs centres de distribution régionaux ou locaux. Grâce à des postes de transformation, la tension 400 kV est abaissée à des tensions de 225 kV, 90 kV ou 63 kV (ces deux derniers niveaux représentant la « haute tension basse », ou HTB). Ce réseau, d'une longueur totale d'environ 80 000 kilomètres, achemine également l'énergie électrique à de grands clients industriels [5]. [19].

En Algérie, les réseaux de répartition sont caractérisés par deux niveaux de tension, 150 kV et 90kV. Par contre, en Europe, on trouve une grande variété de choix : 90 kV et 63 kV en France, 150 kV en Belgique, Italie, Portugal, 132 kV en Espagne, 110 kV en Allemagne et Finlande, etc.

Le réseau de distribution achemine l'énergie électrique des centres de distribution vers le client final (en France, la « limite légale » séparant le réseau de transport des réseaux de distribution est un niveau de tension de 50 kV). Grâce à des postes de transformation, la HTB est abaissée en haute tension A (HTA, 20 kV) ou basse tension (BT, 400 ou 230 volts).

#### 1.3.3. Sous-Systèmes de Distribution

Les réseaux de distribution sont destinés à acheminer l'électricité à l'échelle locale, c'est-à-dire directement vers les consommateurs de plus faible puissance. La distribution est assurée en moyenne tension (20 000 volts) et en basse tension (400 et 230 volts) [1]. Le réseau de distribution est le réseau d'alimentation de l'ensemble de la clientèle, à l'exception de quelques gros clients industriels alimentés directement par le réseau de transport et de répartition. Nous distinguons deux sous-niveaux: le réseau à moyenne tension (HTA : inférieure à 63 kV) et le réseau à basse tension (BTB : inférieure à 1 kV). De la même façon que pour les autres caractéristiques, la structure du réseau de distribution dépend du pays où l'on se trouve. Le réseau peut être radial ou maillé. Un avantage bien connu des systèmes triphasés est de permettre de transporter la même quantité d'énergie avec une section de conducteur deux fois plus faible qu'en monophasé. Ceci faisant, la distribution moyenne tension dans la plupart des pays est généralement triphasée [20.21].

Les réseaux Basse Tension (BTA) sont généralement issus d'une source triphasée (4 fils:3 phase + le neutre) mais dans certains pays tels les États-Unis ou le Canada, le réseau BTA est monophasé (2 fils: 1 phase + le neutre). On trouve également le réseau BTA biphasé comme en Angleterre ou en Australie (3 fils: 2 phases + le neutre). En triphasé, le neutre est pratiquement toujours distribué [22].

1.3.4. Les Tensions

Les différentes tensions que l'on rencontre sur les réseaux sont classées selon leur tension efficace. Les plages de tension ainsi définies sont appelées domaine de tension selon le domaine de tension, des normes spécifiques s'appliquent aux installations aux ouvrages et intervenant Tableau 1.1.

Domaine de tension		Valeur de la tension composée nominale (Un en Volt)	
		Tension Alternative	Tension Continue
Très Basse Tension (TBT)		$Un \leq 50$	$Un \leq 120$
Base Tension	BTA	$50 < Un \leq 500$	$120 < Un \leq 750$
	BTB	$500 < Un \leq 1000$	$750 < Un \leq 1500$
Haute Tension	HTA ou MT	$1000 < Un \leq 50\ 000$	$1500 < Un \leq 75\ 000$
	HTB	$Un > 50\ 000$	$Un > 75\ 000$

Tableau 1.1 Tableau des domaines de tension [23]

La carte ci-après présente la configuration du réseau de transport réseau très haute tension à l'horizon 2015 Figure 1.2 :

Graphique 11 : Carte réseau 400kV en Algérie en 2015

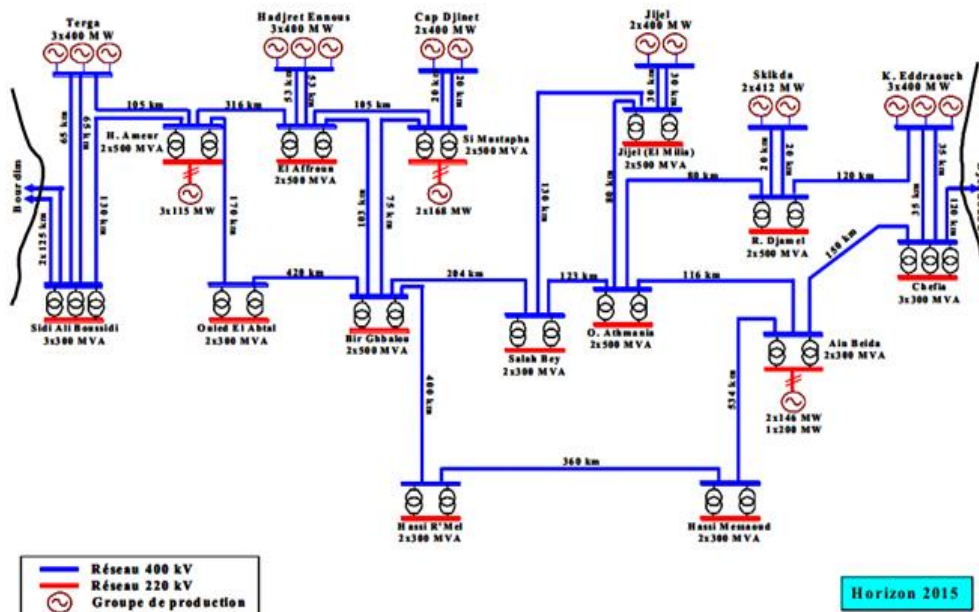
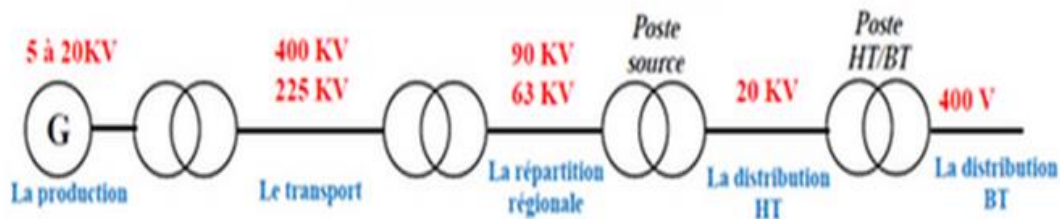


Figure 1.2 La configuration du réseau de transport réseau très haute tension [24]



Ancienne dénomination		Nouvelle dénomination	
Type de ligne	Tension alternative	Domaine	Tension alternative
Très Haute Tension (THT)	400KV ou 225KV	Haute Tension B (HTB)	>50 000V
Haute Tension (HT)	90KV ou 63KV	Haute Tension A (HTA)	1KV <U< 50KV
Moyenne Tension (MT)	30KV, 20KV ou 15KV	Basse Tension B (BTB)	500V<U<1000V
Basse Tension (BT)	400V, 230V	Basse Tension A (BTA)	50V<U<500V

Figure 1.3 Structure nationale du réseau électrique

### 1.3.5. Consommation D'électricité

C'est le point d'arrivée dans un réseau électrique, La consommation d'électricité correspond à un appel de puissance active sur le réseau pour une période de temps bien déterminée ; cela correspond à une consommation d'énergie. L'électricité est consommée par des différents types de consommateurs (résidentiels, commerciaux et industriels). La consommation d'électricité se caractérise par :

- ses fortes fluctuations.
- La difficulté de la prévoir de manière exacte.

#### 1.3.5.1. Fluctuations de la Consommation

La consommation d'électricité varie d'une façon permanente en fonction des multiples variables (la température, l'heure de la journée, le jour de la semaine, les conditions météorologiques), ces fluctuations peuvent être :

##### 1.3.5.1.1. Consommations Journalières :

Durant une journée, la consommation d'électricité peut fluctuer d'une façon importante. La figure (1.4) montre un exemple d'écarts entre les valeurs de la consommation prévue et de la consommation réelle pour le cas de la France.

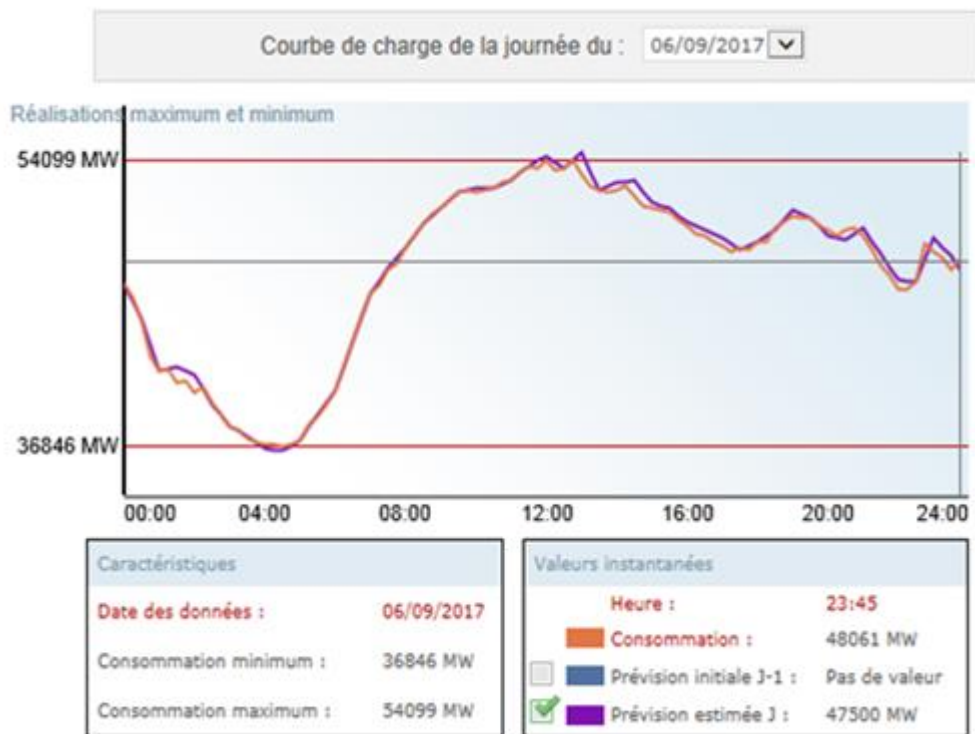


Figure 1. 4 : La fluctuation journalière de la courbe de charge en France [25]

La figure (1.5) montre un exemple d'écarts entre les valeurs de la consommation prévue et de la consommation réelle pour le cas de l'Algérie.

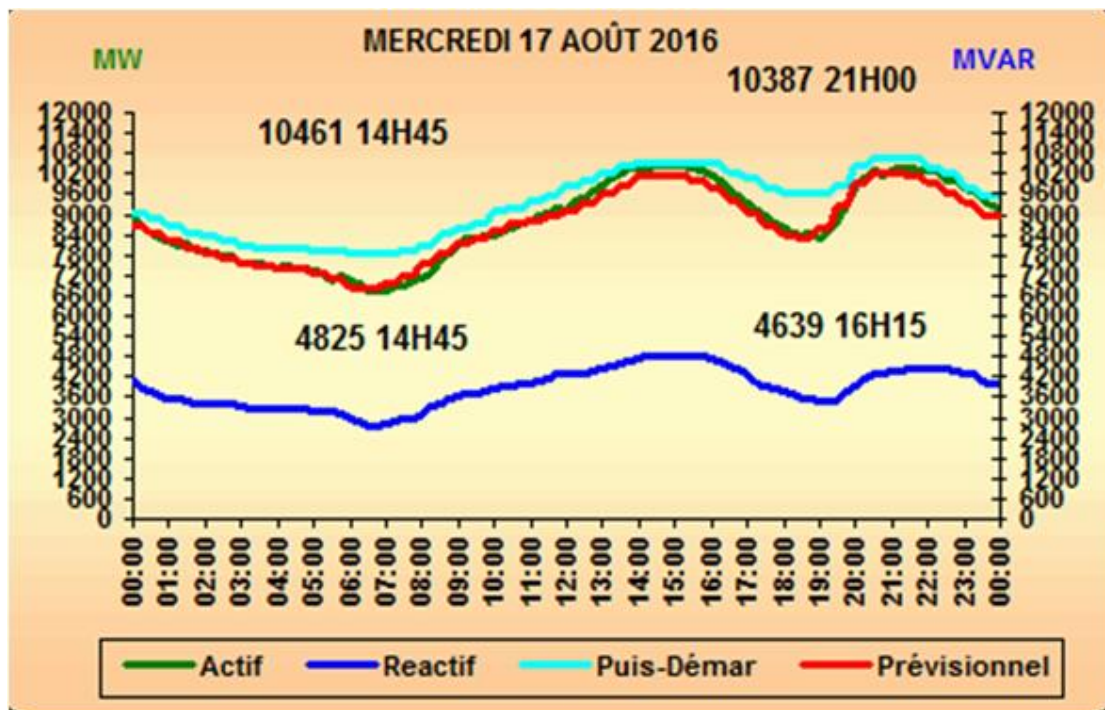


Figure 1. 5 : La fluctuation journalière de la courbe de charge en Algérie [26]

### 1.3.5.1.2. Consommations Saisonnières

Les différences entre les consommations (maximales et minimales) entre un jour ouvrable en été et un jour ouvrable en hiver peuvent aller jusqu'à plus de 16 % de la consommation maximale comme est illustré dans la figure 1.6.

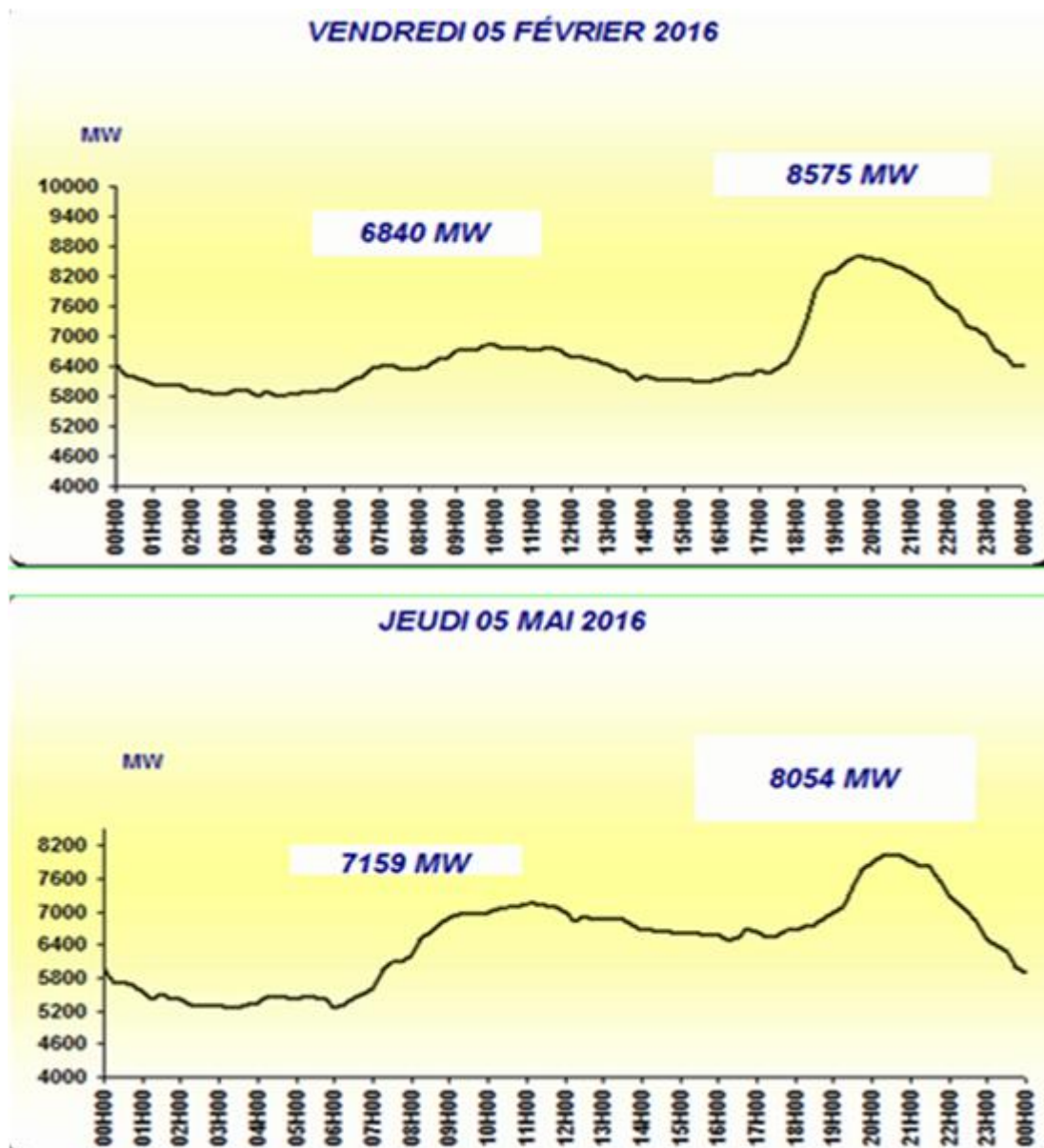


Figure 1.6 : La fluctuation saisonnière de la courbe de charge en Algérie [26]

### 1.3.5.2. La Prévision de la Consommation de Puissance

Une multitude de variables sont utilisées pour expliquer et prédire le niveau de consommation d'électricité : la température, l'heure de la journée, le jour de la semaine (jour

ouvrable, week - end). La plupart de ces variables ont une relation directe avec : les conditions climatiques, habitudes de consommation, rythmes de vie et pays considéré figure1.7.

Il s'agit de déterminer les taux d'évolution des charges électriques à alimenter pour des zones englobant un ou plusieurs postes sources. Les facteurs d'évolution peuvent conduire à une hausse, une baisse ou une stagnation des charges. Ainsi, un secteur dynamique va voir sa charge augmenter du fait du développement de l'industrie ou du tertiaire et parallèlement des zones résidentielles. A l'inverse, la charge d'un secteur déjà fortement urbanisé va évoluer plus faiblement, stagner, voire diminuer, le développement des équipements et applications de l'électricité étant contrebalancé par les efforts collectifs en faveur de la maîtrise de la demande d'énergie (isolation des bâtiments, amélioration de la performance énergétique des équipements électro domestiques et industriels [25,27].

Des prévisions éloignées du temps réel génèrent des erreurs, elles sont effectuées plusieurs fois par jour se basant principalement sur la combinaison des consommations réelles des jours précédents et la prévision des conditions climatiques, etc. Donc une actualisation en permanence à fin que les erreurs soient le plus minimum possible, pour ce faire les prévisions sont divisées en trois parties [3] :

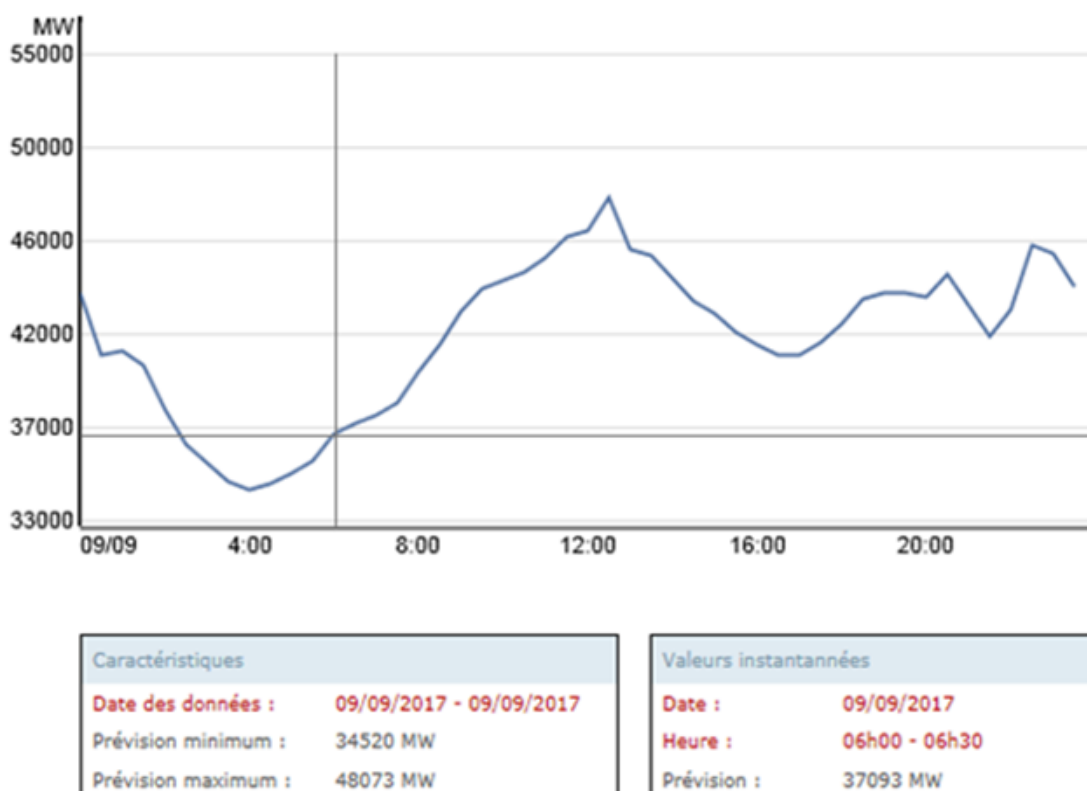


Figure 1. 7 : Les prévisions de la consommation de charge en France [25]

#### 1.3.5.2.1. Les Prévisions Journalières:

Pendant toute la semaine (Le jour :  $j+1$  jusqu'à  $J+7$ ) en s'appuyant sur les statistiques faites, les conditions météorologiques, les jours fériés, les weekends, les vacances, les événements qui peuvent y avoir (grèves, événements sportifs, etc.).

#### 1.3.5.2 2. Les Prévisions Hebdomadaires:

Autrement dit la semaine  $s+1$ , en tenant compte des programmes de démarrage et marche des centrales, la réserve, l'interconnexion internationale.

#### 1.3.5.2 3. Les Prévisions Annuelles :

Pour l'année  $n+1$ , détermination du calendrier de production et des besoins en combustibles, maintenance et entretien des moyens de production et des ouvrages de transport.

Bien que la prévision de la consommation s'affine lorsqu'on s'approche de la période prévue. Mais il y'aura toujours des écarts entre les prévisions faites et la consommation réelle. Ces écarts, peuvent conduire à des erreurs de prévision [28, 31,32].

À titre d'exemple, une baisse de la température moyenne de  $1^{\circ}$  C sur l'ensemble de la France peut entraîner, en hiver, une augmentation de la consommation de plus de 1000 MW (approximativement la taille d'une tranche nucléaire).

### 1.2.6. L'analyse des Contraintes du Réseau

Le diagnostic et les hypothèses d'évolution des charges conduisent à mettre en évidence plusieurs contraintes sur le réseau électrique.

#### 1.3.6.1. Les Contraintes de Capacité des Ouvrages

L'apparition de nouvelles charges (nouveaux utilisateurs, nouveaux usages, producteurs) peut mettre en contrainte les ouvrages des réseaux : capacité insuffisante de transit liée à la limite thermique des lignes, câbles ou transformateurs, problème de tenue de tension, ou perturbation sur l'onde électrique (phénomène de flicker, harmoniques).

#### 1.3. 6.2. Les Contraintes de Fiabilité et de Vétusté des Ouvrages

Le vieillissement des ouvrages entraîne une augmentation du taux de panne des ouvrages et par conséquent du nombre et de la durée de coupures des utilisateurs. Le remplacement des ouvrages doit être planifié pour respecter les obligations contractuelles et réglementaires.

### 1.4. La Cible à Long Terme

La construction de la cible à long terme est l'étape fondamentale de la réalisation du schéma de développement. La cible représente le schéma du réseau HTB, le positionnement des postes sources et la structure des réseaux HTA nécessaires et suffisants, à terme, pour alimenter dans de bonnes conditions les utilisateurs du réseau. Le corps des principales hypothèses de travail nécessaires est constitué du choix des structures de réseau HTA et HTB

visées, de la taille des postes sources et des caractéristiques physiques et électriques des ouvrages HTA et HTB - ces derniers paramètres ayant une influence forte sur la qualité de fourniture. L'élaboration de la cible à long terme s'effectue en restructurant les réseaux existants.

#### **1.4. 1. Les Stratégies de Développement des Réseaux**

L'étape consiste à déterminer différentes stratégies de développement des ouvrages permettant de passer de l'état initial à l'état final (la cible à long terme) Chaque stratégie est constituée d'une succession d'opérations élémentaires. L'ensemble des opérations doit rester cohérent avec les règles de fonctionnement des réseaux.

#### **1.4. 2. Le Bilan des Investissements**

L'utilisation de l'approche technico-économique permet de déterminer la date optimale de chaque opération élémentaire et d'en déduire le bilan actualisé de chaque stratégie étudiée. A l'issue de cette phase, on obtient un échéancier théorique (coût de l'opération, date optimale de réalisation) de l'ensemble des opérations étudiées. Le Maître d'Ouvrage en ressort un échéancier pratique des opérations à mener à moyen terme en y intégrant des opérations complémentaires telles que le traitement des contraintes électriques résiduelles ainsi que divers autres éléments tels que la qualité de fourniture

#### **1.5. Constitution du Réseau**

Le réseau est constitué de lignes aériennes, de câbles souterrains et de postes électriques, à divers niveaux de tension.

##### **1.5.1. Lignes Aériennes et Câbles Souterrains**

Les lignes électriques assurent la fonction « transport de l'énergie » sur les longues distances. Elles sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en lignes, différentes des pertes Joule. L'ensemble de ces 3 phases électriques constitue un terme.

Les lignes aériennes sont composées de pylônes, de conducteurs, d'isolateurs et de câbles de garde. Le dimensionnement de ces composants peut être divisé en trois catégories : le dimensionnement géométrique, le dimensionnement mécanique et le dimensionnement électrique [29.31-32].



Figure 1.8 : Pylône en acier d'une ligne à haute tension [30]

### 1.5.2. Pylônes

Un pylône électrique peut supporter plusieurs lignes : en France jamais plus de 4, rarement plus de 2, mais d'autres pays comme l'Allemagne ou le Japon font supporter à leur pylône jusqu'à 8 lignes. Les pylônes sont tous soigneusement reliés à la terre par un réseau de terre efficace comme illustré dans la figure 1.8. Les pylônes supportent les conducteurs par des isolateurs en verre ou en porcelaine qui résistent aux tensions élevées des lignes électriques. Généralement la longueur d'un isolateur dépend directement de la tension de la ligne électrique qu'il supporte. Les isolateurs sont toujours munis d'éclateurs qui sont constitués de deux pointes métalliques se faisant face. Leur distance est suffisante pour qu'en régime normal la tenue de tension puisse être garantie. Leur utilité apparaît lorsque la foudre frappe la ligne électrique : un arc électrique va alors s'établir au niveau de l'éclateur qui contournera l'isolateur. S'il n'y avait pas d'éclateur, la surtension entre le pylône et la ligne électrique foudroyée détruirait systématiquement l'isolateur [31.33-34].

### 1.5.3. Câble de Garde

Un câble de garde, constitué d'un seul conducteur, surplombe parfois les lignes électriques. Il est attaché directement au pylône, et ne transporte aucune énergie : il est relié au réseau de terre et son but est d'attirer la foudre afin qu'elle ne frappe pas les 3 phases de la ligne, évitant ainsi les "creux de tension" perturbant les clients. Au centre du câble de garde on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale la fibre optique autour du câble de garde [31.34].

### 1.5.4. Les Transformateurs de Puissance

Appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et

courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre de la puissance électrique<sup>1</sup> ». Sa principale utilité est de réduire les pertes dans les réseaux électriques. Il peut être monophasé ou triphasé et recevoir divers couplages : étoile, triangle et zigzag.

On retrouve les transformateurs de puissance dans différents types d'applications : dans les réseaux de transmission électrique, dans la distribution électrique, dans les usines en amont de fours électriques notamment et dans les trains. Chacun répondant à des contraintes et des usages très différents. La CEI divise les transformateurs de puissance dans l'huile en trois catégories en fonction de la puissance apparente : jusqu'à 2 500 kVA en triphasé ou 833 kVA en monophasé (divisé par 3) on parle de « transformateur de distribution », au-delà et jusqu'à 100 MVA en triphasé respectivement 33,3 MVA en monophasé de « transformateur de moyenne puissance », au-delà de « transformateur de grande puissance ». Les transformateurs de distribution sont très nombreux dans le monde figure 1.9 [28.31].



Figure 1.9 Un transformateur de puissance dans un poste électrique [28]

#### 1.4.5. Les Postes Electriques

Les postes électriques sont les nœuds du réseau électrique. Ce sont les points de connexion des lignes électriques comme illustré dans la figure 1.10. Les postes des réseaux électriques peuvent avoir 2 finalités:

- L'interconnexion entre les lignes de même niveau de tension : cela permet de répartir l'énergie sur les différentes lignes issues du poste ;

- La transformation de l'énergie : les transformateurs permettent de passer d'un niveau de tension à un autre.

De plus, les postes électriques assurent des fonctions stratégiques :

- Assurer la protection du réseau : un système complexe de protection permet qu'un défaut sur un seul ouvrage n'entraîne pas la mise hors tension de nombreux ouvrages, ce qui risquerait de mettre une vaste zone hors tension. Cette protection est assurée par des capteurs qui fournissent une image de la tension et du courant à des relais de protection, lesquels élaborent des ordres de déclenchement à destination des disjoncteurs ;
- Permettre l'exploitation normale du réseau : présence de plusieurs jeux de barre et de couplage afin de pouvoir prendre différents schéma électriques ;
- Assurer la surveillance du réseau : la tension du réseau et l'intensité dans les lignes sont surveillées dans les postes électriques, via des transformateurs de mesure, de tension et de courant [30.35-36].



Figure 1.10 : Modèle d'un poste électrique [30]

### 1.6. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons donné une présentation détaillée sur la structure générale d'un système électrique, qui comprend la production, le réseau de transport, de répartition et de distribution. Les moyens de production sont le premier pas pour commencer une étude quelconque sur la réserve de puissance vu que ce sont la source des différents paramètres qui concernent ce problème.

Dans la seconde partie, nous avons présenté le rôle et les techniques de gestion du réseau électrique élaboré par l'opérateur système qui permet de faire face à plusieurs aléas en gardant un fonctionnement optimal. Ces événements aléatoires peuvent être liés à l'indisponibilité d'un groupe de production, d'une ligne de transport, d'un transformateur ou à

la variation de la consommation. Le prochain chapitre est spécialement consacré aux Modèles Mathématiques et les Methodes d'évaluation de la fiabilité appliquée dans les réseaux électriques.

### 1.7. Bibliographie du Chapitre 1

- [1] H, Alkhatib, "Etude de la stabilité aux Petites Perturbations dans les Grands Réseaux Electriques Optimisation de la Régulation par une Méthode Méta-heuristique", Thèse de Doctorat, Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, France, 2008.
- [2] I. Labed, "Dispatching Economique dans un Système de Puissance Electrique Par l'Intelligence Artificielle", Thèse de Magister, Université de Constantine 1, 2013.
- [3] K. Alcheikh-Hamoud "Modélisation des grands systèmes Electriques interconnectes : Application a l'analyse de sécurité dans Un environnement compétitif ", Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France, 2010.
- [4] A. Bensalem, "Analyse et Gestion de la Production des Centrales Electriques Liées Aux Réseaux Electrique de Grande Taille", Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Batna, 2007.
- [5] P. Bornard, "Conduite d'un système de production transport", Techniques de l'ingénieur, Traité Génie électrique D4080, 2009.
- [6] Rezig .Missoum « Etude d'un dispatching économique des puissances actives par les algorithmes de fourmis » Université Hassiba Ben Bouali Chlef, Algérie mémoire de magister 2008.
- [7] KETFI Nadhir « Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d'énergie dispersée » Thèse de Doctorat, Université batna, algerie, 2014.
- [8] Mémento de la sûreté du système électrique, Paris: Tiempo Editions, RTE (2004).
- [9] A. Vergnol, "Intégration dans le réseau électrique et le marché de l'électricité de production décentralisée d'origine renouvelable : gestion des congestions locales", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2010.
- [10] D. Louardi, "Contrôle de l'écoulement de puissance active par système FACTS", Thèse de Magister, Université de El-Hadj Lakhdar, Batna, 2009.
- [11] Guard's Formation, "La production d'énergie - les centrales nucléaires", 2009.
- [12] O. Gergaud, "Modélisation Énergétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et Associe à un Accumulateur", Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2002.
- [13] A. Mirecki, "Etude Comparative de Chaines de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance", Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 200.
- [14] L. Miguel, " Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien pour une Unité de Production Isolée", Thèse de Doctorat, Paris Sud 11, France.

- [15] D. Minh Thang, “Approche Probabiliste pour l’Evaluation de la Fiabilité Du Système Electrique Intégrant des Energies Renouvelables peu Prévisibles“, Thèse de Doctorat, Université Lille 1, France, 2012.
- [16] Recherche ECRIN entreprise, “ l’Electronique de Puissance Vecteur d’Optimisation pour les Energies Renouvelables“, Rapport de Synthèse, Mai 2002.
- [17] P. Bornard, “ Conduite d’un Système de Production-Transport“, TI D4080.
- [18] M. Saguan, “l’Analyse Economique des Architectures de Marché Electrique Application au Market Design du Temps Réel“, Thèse de Doctorat, Université Paris Sud 11, France, 2007.
- [19] M. Zellagui, “Etude des Protections des Réseaux Electriques MT (30 & 10 KV)“, Thèse de Magister, Université de Constantine, 2010.
- [20] J.L. Lilien, “Transport et Distribution del'Energie Electrique“, Cours Donné à l’Institut d’Electricité Montefiore, Université de Liège, 2006.
- [21] J.L. Lilien, “Transport et Distribution del'Energie Electrique“, Cours Donné à l’Institut d’Electricité Montefiore, Université de Liège, 2010.
- [22] M. Saguan, “l’Analyse Economique des Architectures de Marché Electrique Application au Market Design du Temps Réel“, Thèse de Doctorat, Université Paris Sud 11, France, 2007.
- [23] Electrotechnique, ThéodorWildi, 3me édition, 2000.
- [24] Union européenne Intégration progressive des marches d’électricité de l’Algérie, du Maroc et de la Tunisie dans le marché intérieure de l’électricité de l’union européenne juin 2010.
- [25] Centre National d'Exploitation du Système (CNES). RTE, Réseau de transport d’électricité. <http://www.rte-france.com/bp2017>.
- [26] Opérateur du système électrique OSE, <http://www.ose.dz/courbes.php>.
- [27] Agirr .YZN Réseau Public de Distribution d’électricité. Description physique du Réseau Public de Distribution (RPD) d’électricité novembre 2015.
- [28] <http://fr.wikipedia.org> « Réseau de transport et de distribution d’électricité ».
- [29] Groupe Sonelgaz, “Guide Technique de Distribution“, Document technique de Groupe SONELGAZ.
- [30] ERDERDF, Électricité Réseau Distribution France « Description physique du réseau public » ERDF-NOI-RES\_ 07E - Version 2 - 01/04/2008.
- [31] GRTG, “ Centrales à cycle combiné : une solution d’avenir pour l’électricité “, janvier 2008.
- [32] Guard’s Formation, “La production d’énergie - les centrales nucléaires”, 2009.
- [33] O. Gergaud, “Modélisation Énergétique et Optimisation Economique d’un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et Associe à un Accumulateur“, Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2002.
- [34] A. Mirecki, “Etude Comparative de Chaines de Conversion d’Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance“, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [35] L. Miguel, “ Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien pour une Unité de Production Isolée“, Thèse de Doctorat, Paris Sud 11, France.

# CHAPITRE 2

## Modèle Mathématique et Les Methodes d'évaluation de La Fiabilité

### 2.1. Introduction

La définition de la fiabilité, appliquée aux réseaux électriques, est relative à son aptitude de satisfaire la demande énergétique de tous les clients du système, en quantité et en qualité sachant que la fréquence et la tension doivent rester dans un intervalle acceptable. Plus une société se développe et plus elle dépend de l'énergie électrique, tant du point de vue de quantité que de la qualité, l'énergie électrique contribue de plus en plus largement à la sécurité publique et l'activité économique et au confort domestique. L'utilisation d'appareil de plus en plus sophistiqué par la clientèle donne une plus grande importance à la question de la qualité d'alimentation en électricité. Selon les cas, cas appareils peuvent être soit perturbateurs, soit au contraire très sensible (ordinateur, automates) à la qualité d'alimentation. Ceci explique l'intérêt croissant porté à la fiabilité du système électrique.

La fiabilité du système d'énergie électrique est un facteur important lors de la planification, conception et la phase de fonctionnement d'un système d'énergie électrique. La fiabilité du système électrique peut être améliorée en augmentant le cout d'investissement du système. Cela ne signifie pas que les systèmes électriques doivent être conçus pour être aussi fiables que possible que le coût associé peut être inacceptable. Donc les contraintes économiques et la fiabilité sont souvent en conflit et peuvent conduire à des décisions de gestion difficiles [1.2]. Ces questions créent de nouvelles préoccupations en matière d'évaluation de la fiabilité du système électrique [3.4].

### 2.2. Systèmes

Par définition, un système est un ensemble d'éléments indépendant orientés vers la réalisation d'un objectif. Tout système fait appel à des composantes qui doivent être organisées de façon à former un ensemble cohérent. Chaque composant exécute une fonction différente. Un réseau électrique est un exemple de systèmes dont la tâche principale est d'assurer une capacité de transport pour une puissance donnée [5.6].

### 2.2.1. Différentes Structures du Système Electriques

#### 2.2.1.1. Système Série

Une structure série fonctionne si tous les composants fonctionnent, et tombe en panne dès Qu'un composant devienne défaillant Figure 2.1. En pratique ce genre de structure pose de Nombreuses difficultés dans le sens de continuité de service de production [7.8].

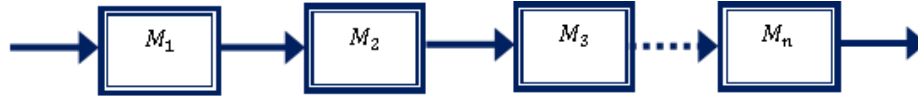


Figure 2.1 : Système à Structure Série [7]

**Exemple :** Poteaux en série Figure 2.2

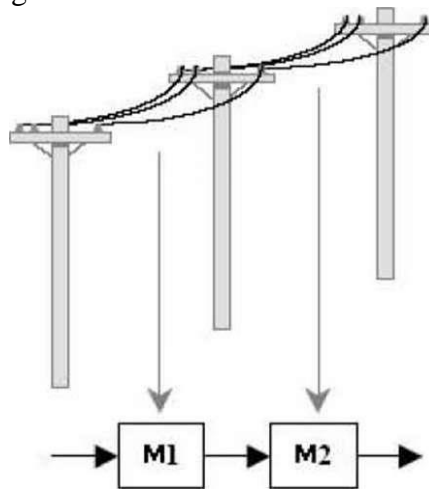


Figure 2.2: Poteaux en Série

#### 2.2.1.2. Système Parallèle

Une structure en parallèle fonctionne si et seulement si au moins l'un des composants Fonctionne Figure 2.3. Cette forme de structure satisfait à la règle de redondance qui augmente la performance globale du système[7.8].

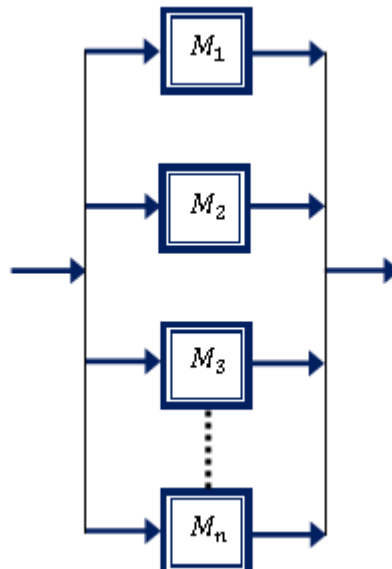


Figure 2.3: Système à Structure Parallèle [7]

**Exemple :** Deux Transformateurs en Parallèle Figure 2.4

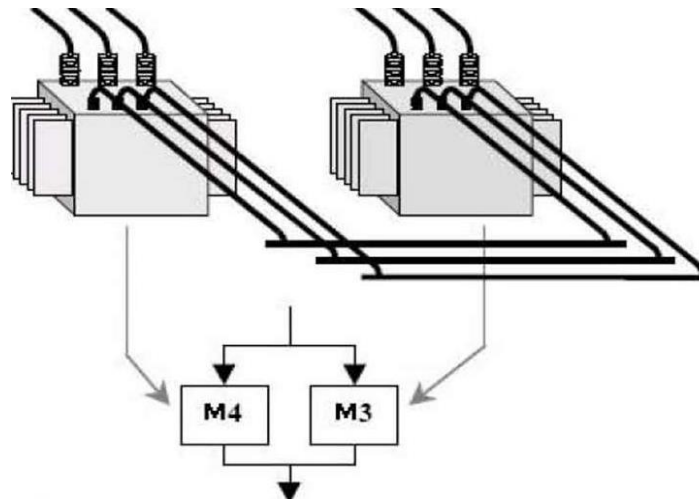


Figure 2.4 deux Transformateurs en parallèle

### 2.2.1.3. Système Série-Parallèle

Un système série-parallèle est un système formé de  $N$  blocs en parallèle qui comportent chacun  $M_n$  composants disposés en série Figure 2.5. Cette structure série-parallèle fonctionne si au moins un bloc fonctionne et chaque bloc fonctionne si tous ses composants fonctionnent.

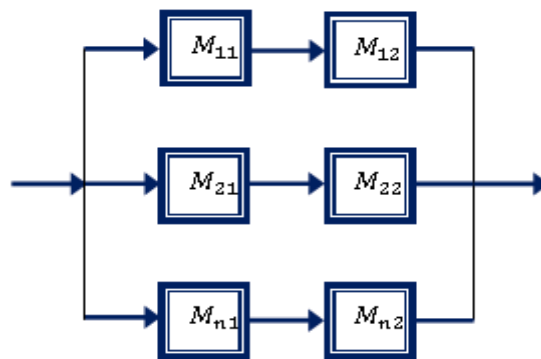


Figure 2.5: Système à Structure Série-Parallèle [7.8]

### 2.2.1.4. Système Parallèle-Série

Un système parallèle-série est un système formé de  $N$  blocs en série qui comportent chacun des composants disposés en parallèle Figure 2.6. Cette structure parallèle-série fonctionne Si tous les blocs fonctionnent et chaque bloc fonctionne si au moins un composant fonctionne.

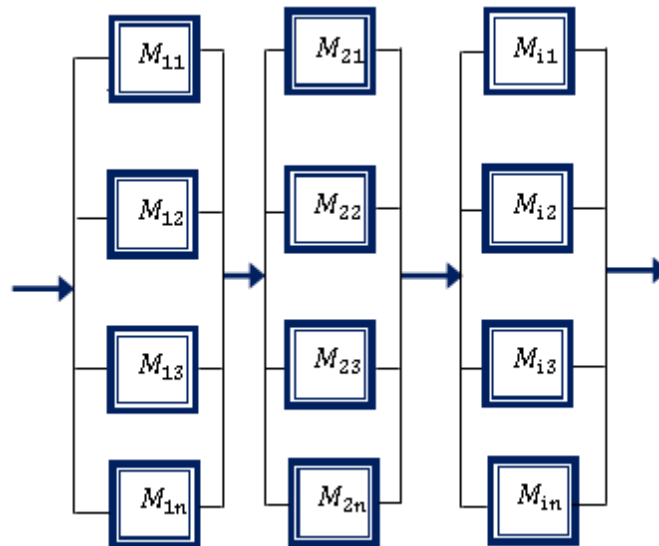


Figure 2.6: Système à Structure Parallèle-Série

### 2.3. La Sûreté de Fonctionnement d'un Système

La complexité croissante des systèmes, la réduction de leurs coûts de conception et l'exploitation ainsi que leur utilisation de plus en plus importante dans ma vie quotidienne font, de la sûreté de fonctionnement, un domaine incontournable dans le développement de tout système industriel [2.4.6].

La sûreté de fonctionnement est souvent appelé la science des défaillances ; elle inclut leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise. Il s'agit d'un domaine transverse qui nécessite une connaissance globale du système comme les conditions d'utilisation, les risques extérieurs, les architectures fonctionnelle et matérielle, la structure et fatigue des matériaux. Beaucoup d'avancées sont le fruit du retour d'expérience et des rapports d'analyse d'accidents[2.4].

Les études de sûreté ont pris un grand essor à partir des années 60 et 70 dans l'industrie de l'armement et dans le secteur du nucléaire où les enjeux étaient de grande taille.

La sûreté de fonctionnement d'un système est une préoccupation majeure dans les domaines des systèmes électriques. En effet, les risques qui peuvent mettre en cause la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité d'un matériel ou d'une installation doivent être maîtrisés.[4].

#### 2.3.1. Défaillances :

La défaillance est la cessation de l'aptitude d'un composant à accomplir une fonction pour laquelle il a été conçu, ou encoure l'apparition de toute situation rendant un équipement incapable de fonctionner à l'intérieure des limites spécifier par ses paramètres de performances à sa conception.

Les différents composants d'un système électrique n'ont pas tous les mêmes fonctionnalités. Certains remplissent des fonctions plus importantes et leur défaillance peut avoir une incidence catastrophique sur le fonctionnement du système ou bien une défaillance complète. Tandis que pour les autres cela conduira à un nouvel état opérationnel et le système perde sa performance. De cette catégorisation des composants permet distinguer deux fonctions défaillances qui peuvent se définir comme suit[9].

#### 2.3.1.1. La Défaillance d'un Composant Essentiel :

La défaillance d'un composant essentiel désigne une interruption totale du service. Autrement dit, en cas de défaillance d'un composant essentiel, le système ne remplit plus la fonction pour laquelle il a été conçu. La figure 2. 7 Représente l'impact de la défaillance d'un composant essentiel sur les performances globales du système[6 .9].

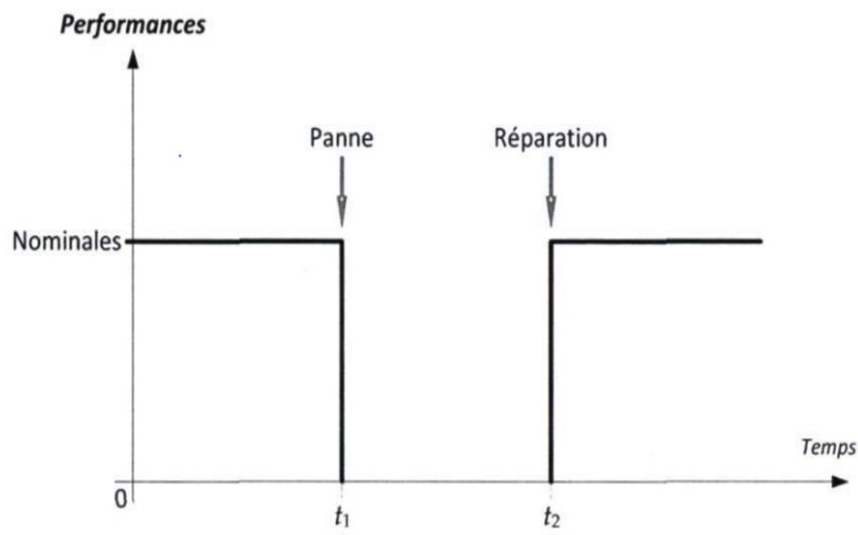


Figure 2.7: État d'un SME à la Défaillance d'un Composant Essentiel [9]

T1 : Défaillance .

T2: Réparation et Reprise du Fonctionnement.

#### 2-3-1-2. La Défaillance d'un Composant Non Essentiel :

La défaillance d'un composant non-essentiel est perçue comme une Perturbation tolérée qui dégrade la performance nominale du système c'est-à-dire qu'il fonctionne avec des performances dégradées. La figure 2. 8 représente l'impact de la défaillance d'un composant non-essentiel sur les performances globales du système [9].

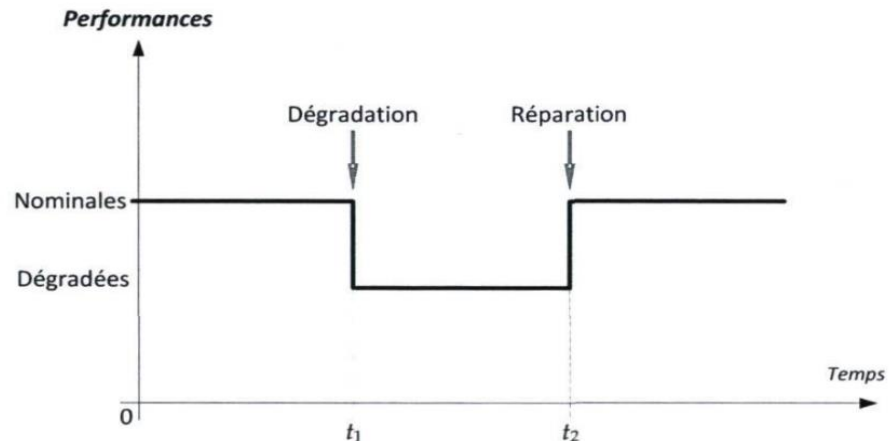


Figure 2.8 : État d'un SME à la Défaillance d'un Composant Non-Essentiel

T1: Dégradation et début du mode dégradé

T2: Réparation et Reprise du fonctionnement

## 2.4. Eléments Constituent de la Sûreté de Fonctionnement :

### 2.4.1. La Fiabilité $R(t)$ :

Elle est définie comme la probabilité qu'une entité fonctionne entre 0 et t. La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données. Elle est caractérisée par la probabilité  $R(t)$  que l'entité E accomplisse ces fonctions, dans les conditions données pendant l'intervalle de temps  $[0, t]$ , sachant que l'entité n'est pas en panne à l'instant 0 [1.6.8].

$$R(t) = \text{Prob}\{E \text{ non défaillant sur } [0, t]\} \quad (2.1)$$

### 2.4.2. Maintenabilité $M(t)$ :

La maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est réalisée dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits. Elle est caractérisée par la probabilité  $M(t)$  que l'entité E soit en état, à l'instant t, d'accomplir ses fonctions, sachant que l'entité était en panne à l'instant 0 [1.2.9].

$$M(t) = \text{Prob}\{E \text{ est réparable sur } [0, t]\} \quad (2.2)$$

### 2.4.3. Disponibilité :

La disponibilité est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir les fonctions requises dans les conditions données et à un instant donné. Elle est caractérisée par la probabilité  $A(t)$  que l'entité E soit en état, à l'instant t, d'accomplir les fonctions requises dans des conditions données [1.2.6].

$$A(t) = \text{Prob}\{E \text{ non défailante à l' instant } t\} \quad (2.3)$$

#### 2.4.4. Sécurité :

La sécurité est l'aptitude d'une entité a éviter de faire apparaitre, dans des condition données, des événements critiques ou catastrophiques. Elle est caractérisée par la probabilité  $S(t)$  que l'entité E ne laisse pas apparaitre dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques [1.2.10].

$$S(t) = \text{Prob}\{E \text{ évite des événements critiques ou catastrophique sur } [0, t]\} \quad (2.4)$$

### 2.5. Lois Usuelles de Probabilité :

La fiabilité est une grandeur quantitative qui nécessite la connaissance des distributions de durée de vie afin de l'estimer. Dans la cadre d'un système complexe, ces distributions doivent absolument tenir compte de tous les mécanismes de défaillance associés aux différentes technologies.

Nous présentons dans cette section les lois et les modèles de fiabilité susceptibles, selon L'expérience, de représenter des distributions de durée de vie qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse de la fiabilité de système. Nous rappelons les principales propriétés de ces lois, les fonctions de fiabilité associées, les densités de probabilité, les taux de défaillance ainsi que les durées de vie moyennes[1.2.3.4].

#### 2.5.1. Loi Exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales. La loi exponentielle est la plus couramment utilisée en fiabilité de système pour décrire la période durant laquelle le taux de défaillance des équipements est considéré comme constant (défaillance aléatoire). Elle décrit le temps écoulé jusqu'à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances. Elle est définie par un seul paramètre, le taux de défaillance,  $\lambda$  [1.2.6].

Elle est caractérisée par :

- Fiabilité :  $R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.5)$

- La Densité de Probabilité :  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.6)$

- Le Taux de Défaillance  $\lambda(t) = \lambda \quad (2.7)$

- La Durée de vie moyenne ou MTTF :  $MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.8)$

### 2.5.2. Loi de Weibull :

La loi de Weibull, est souvent utilisée en mécanique ; elle caractérise bien le comportement du produit dans les trois phases de vie selon la valeur du paramètre de forme  $\beta$  : période de jeunesse ( $\beta < 1$ ), période de vie utile ( $\beta = 1$ ) et période d'usure ou vieillissement ( $\beta > 1$ ). La loi de Weibull est définie par deux paramètres  $\eta$  et  $\beta$  [1.2.6.12].

Elle est caractérisée par :

$$\text{La Fiabilité : } R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.9)$$

$$\text{La Densité de Probabilité : } f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.10)$$

$$\text{Le Taux de Défaillance : } \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.11)$$

### 2.5.3. Loi Normale

La loi normale est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes. La loi normale est définie par la moyenne  $\mu$  et l'écart type  $\sigma$  [1.6.12].

$$\text{La fonction de répartition : } F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2.12)$$

$$\text{La densité de probabilité : } f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.13)$$

$$\text{La durée de vie moyenne ou MTTF : } MTTF = \mu \quad (2.14)$$

-

### 2.5.4. Loi Lognormale:

Une variable aléatoire continue et positive  $t$  est distribuée selon une loi lognormale si son logarithme est distribué suivant une loi normale. Cette distribution est utilisée en fiabilité pour modéliser les défaillances par fatigue. La loi lognormale a deux paramètres  $\mu$  et  $\sigma$  [1.6.12].

$$\text{La Densité de Probabilité : } f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.15)$$

$$\text{La Fonction de Répartition : } F(t) = \Phi\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right) \quad (2.16)$$

$$\text{La Durée de vie Moyenne ou MTTF : } MTTF = e^{\mu - \frac{\sigma^2}{2}} \quad (2.17)$$

### 2.5.5. Les paramètres temporels moyens

Quelques définitions de paramètres employés dans les études de la sûreté :

**Définition de MTTF, MTTR, MUT, MDT, MTBF**

- **MTTF** : Durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance (mean Time To Failure) [2.6].

$$MTTF = - \int_0^{\infty} t \frac{dF(t)}{dt} dt \quad (2.18)$$

Après l'intégration par partie

$$MTTF = \int_0^{\infty} F(t) dt - [t.F(t)] \quad (2.19)$$

- **MTTR** : Durée moyenne de réparation (Mean Time To Repair)

$$MTTR = \int_0^{\infty} tG(t) dt \quad (2.20)$$

Tel que :  $G(t) = \frac{dM(t)}{dt}$  c'est la variation de la maintenance suivant le temps.

Après l'intégration par partie.

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1-M(t)] dt \quad (2.21)$$

- **MUT** : Durée moyenne de fonctionnement après réparation (Mean Up Time)
- **MDT** : Durée moyenne d'indisponibilité (Mean Down Time).cette durée correspond à phases suivantes :
  - Détection de la Panne
  - Réparation de la panne
  - Remise en service

Le **MDT** traduit en effet, la moyenne des durées de l'indisponibilité consécutive a des défaillances.

**MTBF** : Durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée (Mean Time Between Failure).

Elle est donnée par l'expression suivant :

$$T = E(\tau) = \int_0^{\infty} t d(t) dt = - \int_0^{\infty} t \frac{dF(t)}{dt} dt = - \int_0^{\infty} t dF(t) dt \quad (2.22)$$

$$MTBF = - \int_0^{\infty} F(t) dt \quad (2.23)$$

Si  $\tau$  est une constante, et elle est, car le composant en son temps d'exploitation.

Ces différentes notions sont illustrées par le schéma suivant figure 2.9.

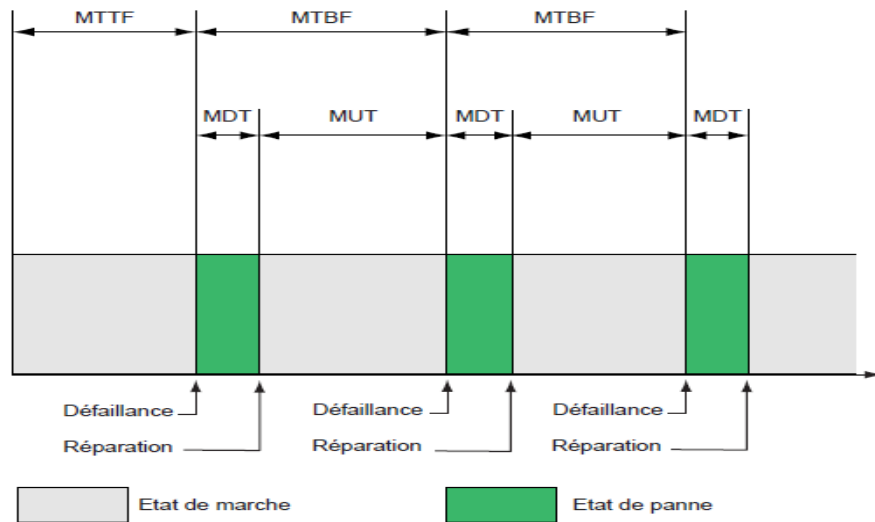


Figure 2.9 : Diagramme des Temps Moyens Etabli par un Système [6.12]

## 2.6. Fiabilité :

La fiabilité est la caractéristique d'un système exprimé par la probabilité qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données e pendant une durée donnée. Ainsi, la durée de vie d'un système est utilisée pour mesurer la quantité de service rendu. D'une manière générale, on mesure la durée de vie d'un système par le nombre d'heures durant lesquelles il a effectivement fonctionné.

### 2.6.1. Historique de la Fiabilité

Le développement historique qui a donné naissance aux techniques utilisés actuellement est extrêmement intéressant. Les premiers travaux de recherche ont débuté vers les années trente. Basés sur les méthodes probabilistes un ensemble d'articles est apparu. Calabrese, Lyman, Seelye, Loane et Watchorn ont proposés dans un ensemble de publications quelques concepts de bases sur lesquelles les méthodes actuelles sont fondées. Ces travaux ont eu un impact important que le comité American Institute of Electrical Engineers (AIEE) se soit réuni en 1948 sous la présidence de Calabrese. Le comité a reconnu la nécessité d'une cohérence entre les données statistiques. La réunion a été clôturée par un rapport détaillé comportant les premiers fondements théoriques de la théorie de fiabilité en 1949. Ce rapport a été la base des premières méthodes de calcul de fiabilité à savoir la méthode de probabilité de perte de charge «Loss of Load Probability» LOLP et fréquence et durée des pannes "Frequency and Duration of Outage Approach". Ces travaux ont été revues et améliorés en 1954 et 1957. La finalisation a été faite vers 1960. Ces méthodes sont souvent appelées méthodes de Calabrese. L'effet de l'interconnexion, la détermination et l'allocation des bienfaits résultant de l'interconnexion ont été évoqués pour la première fois par Watchorn et Calabrese en 1950 et 1953. Jusqu'en 1954 la plus part des études de probabilité ont été calculés manuellement ou par l'utilisation de calculateurs de faibles capacités. Les avantages de l'utilisation des calculateurs numériques par la réduction considérable des calculs mathématiques ont été signalés par Watchorn en 1954 et bien prouvé lors du travail effectué par Kirchmayer durant l'évaluation économique des unités de production associés à une

extension du réseau. Plusieurs travaux intéressants sont apparus après jusqu'en 1958 où un second groupe de publication est apparu où l'on note l'utilisation de nouvelles techniques de résolution. Les années 1961 et 1962 n'ont pas connues de nouveau et l'attention accordée à ce type de problème semble avoir baissé. Il fallait attendre l'année 1963 pour voir de nouveaux travaux de recherche apparaître [14-20].

### 2.6.2. Impact Economique de l'Amélioration de la Fiabilité

L'impact économique joue un rôle important dans l'étude de la fiabilité. La question qui se pose souvent est où faut-il investir pour obtenir une fiabilité maximale, Il serait très difficile de répondre à cette question. Quoiqu'elle est un passage obligatoire pour avoir des indices de fiabilités quantitatives et consistantes. Il serait donc évident que l'économie et la fiabilité joue un rôle important dans la prise de décision, La figure 2.10 illustre la variation de la fiabilité en fonction du coût [2-3.21].

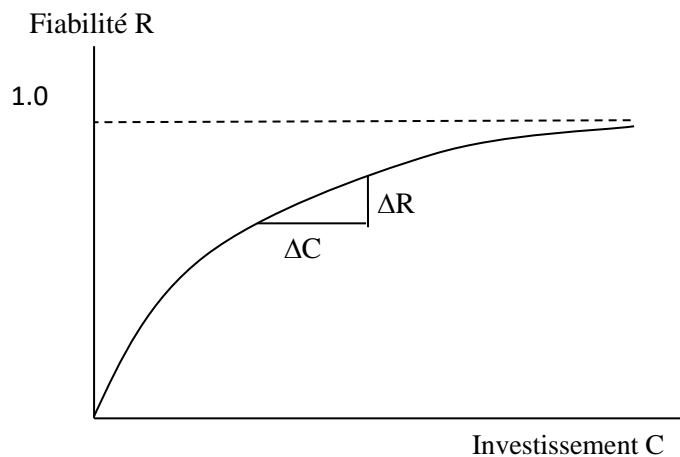


Figure 2.10 : Variation de la Fiabilité en Fonction du Coût

On peut facilement remarquer qu'une augmentation de la fiabilité entraîne une augmentation du coût et qu'une diminution de la fiabilité entraîne une diminution du coût. Donc une amélioration de la fiabilité nécessite un coût supplémentaire.

Le coût incrémental  $\Delta C/\Delta R$  est un élément essentiel permettant de décider si un investissement vaut bien la peine d'être entrepris. Cependant il ne permet pas de refléter les bénéfices obtenus par les producteurs, service industriel, consommateur ou par les consommateurs.

Les deux aspects, la fiabilité et le coût apparaissent de manière plus consistante en comparant le coût (investissement engagé pour atteindre un certain niveau de fiabilité) avec le niveau de fiabilité (les bénéfices encourus par l'utilisateur et la société).

### 2.6.3. Objectifs et Intérêts de la Fiabilité

L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. A l'origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial). Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des (composants, produits et processus "grand public": Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques...) de nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût/Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance.

L'analyse de la fiabilité dans tous les domaines est un outil très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie, mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission. L'analyse de la fiabilité apporte des réponses à plusieurs interrogations.

Quels sont les composants qui provoquent la panne du système? Quelles sont les influences des incertitudes sur les données, en particulier sur la performance du produit ? Quel niveau de contrôle de qualité doit-on satisfaire, Quelles sont les paramètres qui interviennent dans le dimensionnement de la structure pour une précision donnée, Comment optimiser l'utilisation du matériel [6.21].

### 2.6.4. Décomposition de l'Evaluation de la Fiabilité

L'évaluation de la fiabilité du système nécessiterait la simulation de son fonctionnement sur un temps long. Malheureusement, cette tâche apparaît tout à fait hors de portée, compte tenu de la grande dimension du système (ouvrages de production et de transport) et de la complexité des phénomènes à simuler l'événement affectant le système (pertes d'ouvrages de production ou de transport, variations de la demande), avec les phénomènes transitoires qui s'ensuivent forcent l'optimisation en permanence l'exploitation. Pour surmonter ces difficultés, on utilise deux décompositions de l'évaluation la décomposition par hiérarchisation des fonctions du système (production, transport). Décomposition en régime statique et en régime transitoire.

#### 2.6.4.1. Régime Statique et Régime Transitoire

On dit que le système fonctionne en régime statique tant qu'il n'y a pas de variation brutale de son état, telle que la défaillance soudaine d'un ou plusieurs ouvrages de production ou de transport. Inversement une variation brutale de l'état du système crée un régime transitoire, jusqu'à ce qu'à ce que le système soit ramené dans des conditions normale de fonctionnement.

Les solutions (choix du plan de production et de la topologie du réseau) sont optimisées, en fonction de la disponibilité des composants du système, afin de minimiser les

coûts d'exploitation, tout en gardant le système sûr vis-à-vis des incidents les plus probables. L'évaluation de la fiabilité en régime statique, qui consiste à étudier comment le système fonctionne en régime statique, exige donc en général la mise en œuvre des méthodes d'optimisation.

En régime transitoire, (ou post-incident), à la suite d'une variation brutale de l'état du système, il y a une réponse dynamique complexe du système, et des actions correctives (principalement la modification du plan de production et de topologie du réseau). L'évaluation de la fiabilité en régime transitoire, qui consiste à étudier comment le système répond aux variations brutales de d'état du système, requiert généralement une simulation dynamique.

### 2.6.4.2. Hiérarchisation du Système Electrique dans l'Evaluation de la Fiabilité des Systèmes Electriques

Les fonctions du système électrique comportent la production, le transport et la distribution. L'évaluation de la fiabilité du système électrique se décompose en trois niveaux. Le premier niveau (HL-I) correspond à la production, le deuxième (HL-II) le réseau de transport (y compris les interconnexions) et le troisième (HL-III) le système global intégrant le réseau de distribution. La fiabilité peut être évaluée à plusieurs niveaux figure 2.11 [2.6.21].

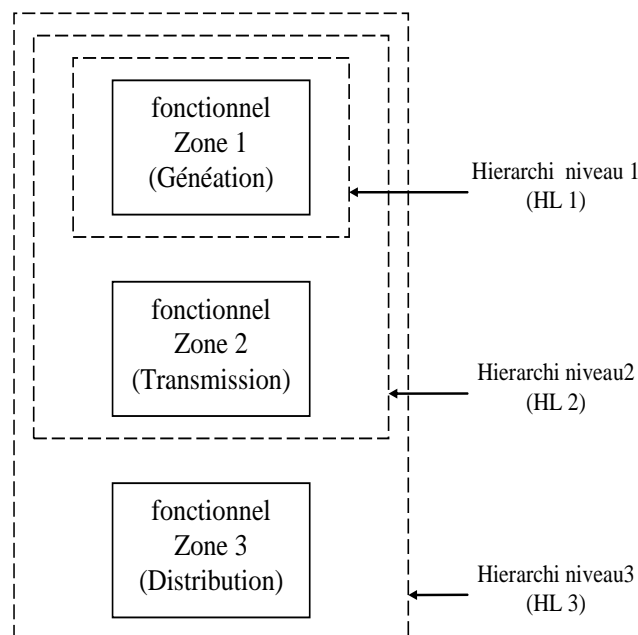


Figure 2.11 : Hiérarchisation du Système Electrique

### 2.7. L'Evaluation de la Fiabilité du Système de Réseau Electrique

L'évaluation de fiabilité du système du réseau électrique est un processus important dans la planification et la conception du système afin d'assurer une exploitation saine à l'avenir. Différentes méthodes ont été employées pour l'évaluation d'adéquation au niveau de (HL-I) en produisant de la planification de système. Des techniques de fiabilité peuvent être largement groupées en techniques déterministes et probabilistes. Les techniques déterministes étaient les méthodes les plus tôt employées dans des entreprises d'électricité pour déterminer

la capacité de production appropriée. Ces techniques ont été remplacées par des techniques probabilistes dans la plupart des entreprises d'électricité principales [22.24.25].

## 2.8. Analyse de la Fiabilité des Systèmes

L'analyse de la fiabilité a été largement appliquée dans différents secteurs de transport et de distribution de l'énergie électrique. Elle est devenue le principal sujet durant la conception, la planification et le contrôle des systèmes. L'approche par l'évaluation de la fiabilité exploite une variété de modèles pour la modélisation et le calcul des indices de fiabilité. Le modèle discret fait partie de ces modèles et il comporte (modèle binaire simple et modèle binaire étendu) [22.23.24].

### 2.8.1. Modèle Binaire Simple

Ce modèle se base sur la logique du système, Il considère que le système et ses composants ne peuvent avoir que deux états possibles : fonctionnement parfait ou la panne totale.

### 2.8.2. Modèle Binaire Etendu

Ce modèle présente l'avantage de la prise en considération des performances partielles du système et ses composants. La disponibilité du système s'étend sur une gamme bornée par la présence totale (disponibilité de 100%) à l'absence totale (disponibilité de 0%). En se basant sur ce modèle, deux approches ont été utilisées :

- La logique multi valeurs (Multiple Valued Logic **MLV**).
- Les systèmes multi états (Multi State System **MSS**).

## 2.9. Méthodes d'Évaluations de la Fiabilité

### 2.9.1. Méthode Classique

En général, l'analyse de la fiabilité du système d'état binaire utilise des modèles statiques. La fiabilité des sous-systèmes ou des composants sont supposés être constants, La structure des composants dans le système définit la fiabilité du système. Cela signifie que les composants sont soit en série, soit en parallèle ou une combinaison de système série et parallèle. De plus, dans le modèle d'état binaire-statique, chaque composant est supposé être dans l'un des deux états; bon fonctionnement ou défaillance. Composants série, composants parallèles et des combinaisons complexes de composants parallèle-série seront expliquées dans la section suivante [26,40].

Dans le paragraphe suivant, nous décrivons certaines configurations de fiabilité.

$n$  : nombre de composants

$P_r (A_i)$  : probabilité de l'événement  $A_i$  ce composant  $i$  travail acceptables ( $1 \leq i \leq n$ )

$r_i$  : fiabilité de composant  $i$

$R_s$  : La fiabilité du système

### 2.9.1.1. Configuration Série

Dans cette configuration, le système fonctionne lorsque tous les n composants fonctionnent. En d'autres termes, si l'un des n composants est défaillant alors il provoque la défaillance de tout le système. Puis, sous condition d'état stable, la fiabilité d'un système série est:

$$R_S = \prod_{i=1}^n P_r(A_i) \quad (2.24)$$

- Pour un système homogène la fiabilité du système série est:

$$R_S = \prod_{i=1}^n r_i \quad (2.25)$$

### 2.9.1.2. Configuration Parallèle

Dans cette configuration, le système est défaillant si tous les composants m présentent une défaillance. Par conséquent, la fiabilité d'un système parallèle est:

$$R_S = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_r(A_j)) \quad (2.26)$$

- Pour un système homogène la fiabilité du système parallèle est:

$$R_S = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - r_j) \quad (2.27)$$

### 2.9.1.3. Configuration série-Parallèle

Considérons un système qui se compose de k sous-systèmes connectés en parallèle. Chaque sous-système i est constitué de  $n_i$  composants en série ( $i = 1, \dots, k$ ). Un tel système est appelé un système série-parallèle [26,27-39].

La fiabilité du sous-système i est  $R_i$ , et  $r_{ij}$  est la fiabilité du composant j du sous-système i. La fiabilité du système est:

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - \prod_{j=1}^{n_j} r_{ij}) \quad (2.28)$$

Lorsque les composants de chaque sous-système sont identiques, la fiabilité du système peut être écrite comme suit:

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - r_i^{n_j}) \quad (2.29)$$

où  $r_i$  est la fiabilité de chaque composant dans le sous-système.

#### 2.9.1.4. Configuration Parallèles-Séries

Considérons un système composé de k sous-systèmes en série et sous-système i,  $1 < i < k$ , à son tour se compose de  $n_i$  composants en parallèle. Un tel système est appelé système parallèle-série [27.28] et sa fiabilité est:

$$R_S = \prod_{i=1}^k \left[ 1 - \prod_{j=1}^{n_j} (1 - r_{ij}) \right] \quad (2.30)$$

Lorsque les composants de chaque sous-système sont identiques, la fiabilité du système peut être écrite comme suit:

$$R_S = \prod_{i=1}^k (1 - q_i^{n_i}) \quad (2.31)$$

où  $q_i = 1 - r_i$  est la probabilité de défaillance d'un composant dans le sous-système i. Lorsque  $r_{ij}$  est grande, la fiabilité du système dans l'équation (2.10) est approximée par:

$$R_S = 1 - \sum_{i=1}^k q_i^{n_i} \quad (2.32)$$

#### 2.9.2. Exemple de la Méthode Classique

Considérons un système électrique de petite taille constitué de deux sous-systèmes.

- Sous-système 1 : Deux alternateurs connectés en parallèles.
- Sous-système 2: Un transformateur.

Tableau 2.1 Paramètres du système électrique [5.28]

Etat	Sous-système 1				Sous-système 2	
	Unité 1		Unité 2		Unité 3	
	1	2	1	2	1	2
Capacité G (%)	0	60	0	80	0	150
Probabilité	0.10	0.90	0.05	0.95	0.05	0.95

Pour l'évaluation de la fiabilité d'un système multi état, on utilise l'équation (2.27).

$$R_S = \prod_{i=1}^k \left[ 1 - \prod_{j=1}^{n_j} (1 - r_{ij}) \right]$$

$$R_S = \prod_{i=1}^2 \left[ 1 - \prod_{j=1}^2 (1 - r_{ij}) \right]$$

$$R_S = [1 - (1 - r_{11})(1 - r_{12})]. [1 - (1 - r_{21})]$$

$$R_S = [1 - (1 - 0.1)(1 - 0.05)]. [1 - (1 - 0.05)]$$

$$R_S = [1 - 0.9 \cdot 0.95]. [1 - 0.95]$$

$$\text{Alors : } R_S = 0.725.$$

### 2.9.3. Méthode Numérique

Elle est utilisée pour la détermination de la fiabilité des systèmes décrits par le modèle binaire étendu [5, 6, 7.28, 40], elle prend en considération les performances partielles du système et ses composants. Pour l'évaluation de la fiabilité d'un système multi état, on utilise la méthode de la fonction universelle appelée technique d'Ushakov, qui sera traitée dans le quatrième chapitre.

#### 2.9.3.1. Formulation Mathématique du Problème d'Optimisation

#### 2.9.3.2. Problématique

Le système proposé à l'étude est composé par un certain nombre de sous-système réseaux de répartition (production, transformation MT/HT, transport en HT et charge en HT, transformation HT/MT, transport et distribution en MT) tous les éléments du réseau sont prédisposées aux pannes.

La production représente la puissance ou bien l'énergie produite dans l'intervalle de temps annuelle, mensuelle, trimestrielle, hebdomadaire, journalière ou bien en temps réel. La dimension est bien que les valeurs soient présent en % de leurs valeurs nominales [18.28.29].

#### 2.9.3.3. Proposition du Problème

Lors de l'exploitation d'un système fluide de type (ROP), aucun équipement n'est à l'abri d'une défaillance. Cette dernière se traduit par une perte de production qui se répercute par une insatisfaction à la demande. Afin de prévoir des moyens de couvrir cette perte de production, en se procure au domaine d'étude des systèmes à haute Disponibilité [40-47].

Généralement la reformulation optimale d'un tel système complexe devient un problème de type combinatoire *NP*- dur. S'il s'agit de solution exacte à ces problèmes les méthodes à la recherche deviennent moins puissantes et demandent assez d'espaces et de temps, leur nature est exhaustif impossible parfois à atteindre cette solution. Alors le recours aux méthodes approchées devient nécessaire soit aux heuristiques ou aux méta- heuristique.

Ce travail consiste à optimiser (Min / Max) des fonctions objectives sous forme budget (investissement) / ou fiabilité de la structure à choisir sous un ensemble de contraintes de type fiabilité, budget et production des systèmes fluides à concevoir.

2.9.3.4. **Formulation du Problème**

Généralement, le système électro- énergétique se présente sous deux principales structures :

- Structure série- parallèle : la moins rencontrée dans la pratique, exemple les systèmes de production décentralisés cas de la production photo voltaïque.
- Structure parallèle- série : la plus rencontrée dans la pratique, exemple les systèmes de production centralisés cas des réseaux électriques.

2.9.3.5. **Système Parallèle-Série**

Considérons un système parallèle- série contenant n sous-système  $C_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) dans un arrangement série comme est illustré dans la figure 2.12. Chaque sous-système  $C_i$  contient un certain nombre d'éléments ou composant connecté en parallèle. Pour chaque sous-systèmes  $i$ , il existe différente version des éléments (générateurs, transformateurs et lignes) disponible dans le marché. Pour chaque sous-système d'éléments, différentes versions et nombre de composant peut être choisi. Pour chaque sous-système  $i$  les éléments sont caractérisés par leurs coûts ( $C_{iv}$ ), fiabilité ( $A_{iv}$ ) ou ( $R_{iv}$ ) et leurs performances ( $G_{iv}$ ) ou ( $\Xi_{iv}$ ) accordés à leurs versions. La structure du système d'éléments  $i$  peut être définit par le nombre des éléments ou composants en parallèle (de chaque version)  $k_{iv}$  pour  $1 \leq v \leq V_i$ , ou  $V_i$  est le nombre de versions pour les éléments de type  $i$ . La structure du système entier est définit par les vecteurs  $k_i = \{k_{iv}\} (1 \leq i \leq n, 1 \leq v \leq V_i)$ . Pour un ensemble de vecteurs  $k_1, k_2, \dots, k_n$  le coût total du système est donné par l'expression suivante[18.28] :

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{V_i} k_{iv} C_{iv} \tag{2.33}$$

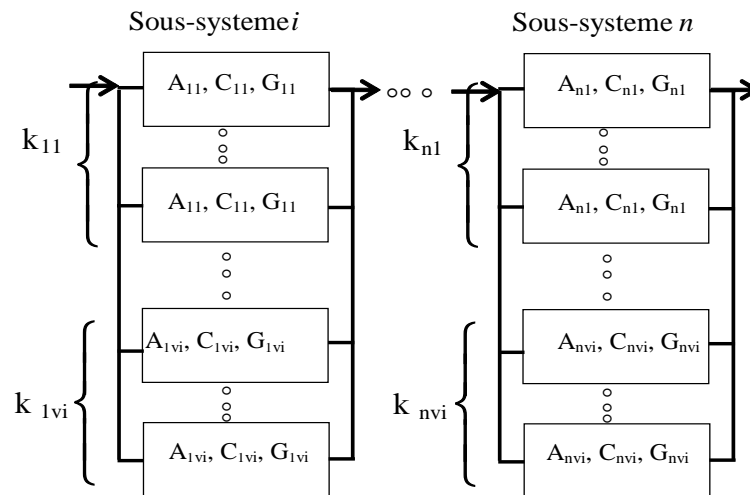


Figure 2.12 : Schéma détaillé d'un système parallèle- série [18]

### 2.9.3.6. Problème Primal

Le problème d'optimisation d'un système multi état redondant peut être formulé comme suite: trouver la configuration ou structure du système à coût minimal  $k_1, k_2, \dots, k_n$  qui est à un niveau de fiabilité supérieure ou égale au seuil donné  $R_0$  ou  $A_0$ .

#### Minimiser

$$\text{Min}[C = \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{V_i} k_{iv} C_{iv}] \quad (2.34)$$

#### Sous la contrainte

$$\prod_{i=1}^n \left[ \prod_{j=1}^{j_i} p, q(z) \min_{i=1}^n \sum_{j=1}^j G_{ij} \right] \geq R_0 \quad (2.35)$$

### 2.9.3.7. Problème Dual

Le problème d'optimisation d'un système multi état redondant peut être formulé comme suite: maximiser  $R$  d'une structure  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$  dont le coût soit inférieur ou égal à un certain budget donné.

#### Maximiser

$$\text{Max} \left[ R(t) = \prod_{i=1}^n \left[ \prod_{j=1}^{j_i} p, q(z) \min_{i=1}^n \sum_{j=1}^j G_{ij} \right] \geq R_0 \right] \quad (2.36)$$

#### Sous les contraintes

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{V_i} k_{iv} C_{iv} \leq C_0 \quad (2.37)$$

$$G^{\min \{a_i, b_j\}} \geq G_0$$

### 2.9.3.8. Problème Multi- Objective

Ce problème englobe une fonction bi- objective à optimiser pour un système multi état redondant qu'on peut le formuler comme suite:

Trouver la configuration / ou structure du système  $k_1, k_2, \dots, k_n$  à coût minimal au même temps sa fiabilité soit maximale  $R$  sous un ensemble de contraintes.

#### Minimiser-Maximiser

$$\text{Min}[C = \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{V_i} k_{iv} C_{iv}] \quad (2.38)$$

$$\text{Max} \left[ R(t) = \prod_{i=1}^n \left[ \prod_{j=1}^{j_i} p, q(z) \min_{i=1}^n \sum_{j=1}^j G_{ij} \right] \geq R_0 \right] \quad (2.39)$$

**Sous les contraintes**

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{V_i} k_{iv} C_{iv} \leq C_0 \tag{2.40}$$

$$\prod_{i=1}^n \left[ \prod_{j=1}^{j_i} p, q(z) \min_{i=1}^n \sum_{j=1}^j G_{ij} \right] \geq R_0 \tag{2.41}$$

**2.9.3.10. Système Série-Parallèle**

Considérons un système série- parallèle contenant n sous-système  $C_j(j=1,2,\dots,J)$  dans un arrangement parallèle. Chaque sous-système  $C_j$  contient un certain nombre d'éléments ou composant connecté en série. Pour chaque sous-système, différentes versions et nombres de composants peut être choisi. Les éléments sont caractérisés par leurs coûts ( $C_{jv}$ ), disponibilité ( $A_{jv}$ ) ou ( $R_{jv}$ ) et leurs performances ( $G_{jv}$ ) ou ( $\Xi_{jv}$ ) accordés à leurs versions. La structure du système d'éléments j peut être définit par le nombre des éléments ou composants en série (de chaque version)  $k_{jv}$  pour  $1 \leq v \leq V_j$ , ou  $V_j$  est le nombre de versions pour les éléments de type j. La figure 2.13 illustre ces notations par un schéma synoptique d'un sous-système j de production. La structure du système entier est définit par les vecteurs  $k_j = \{k_{jv}\}$  ( $1 \leq j \leq J, 1 \leq v \leq V_j$ ). Pour un ensemble de vecteurs  $k_1, k_2, \dots, k_J$  le coût total du système est donné par l'expression suivante[18,48-53] .

$$C = \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^{V_j} k_{jv} C_{jv} \tag{2.42}$$

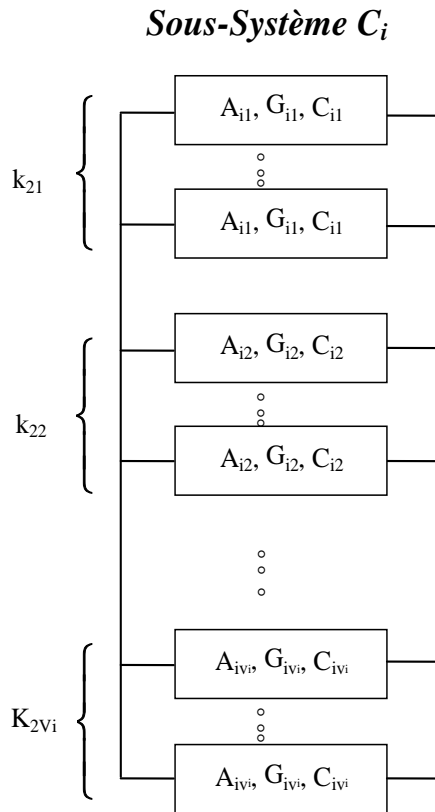


Figure 2.13 : Schéma Synoptique d'un Système Série-Parallèle [18]

### 2.9.3.11. Problème Primal

Le problème d'optimisation d'un système multi état redondant peut être formulé comme suite: trouver la configuration ou structure du système à coût minimale  $k_1, k_2, \dots, k_n$  qui est à un niveau de fiabilité supérieur ou égale au seuil donné  $R_0$  ou  $A_0$ .

#### Minimiser

$$Min [C = \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^{V_j} k_{jv} C_{jv}] \quad (2.43)$$

#### Sous la contrainte

$$\prod_{j=1}^J [\prod_{i=1}^{n_j} p, q(z) \sum_{i=1}^n minG_{ij}] \geq R_0 \quad (2.44)$$

### 2.9.3.12. Problème Dual

Le problème d'optimisation d'un système multi état redondant peut être formulé comme suite: maximiser R d'une structure  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$  dont le coût soit inférieur ou égal à un certain budget donné [28.29].

#### Maximiser

$$Max [R(t) = \prod_{j=1}^J [\prod_{i=1}^{n_j} p, q(z) \sum_{i=1}^n minG_{ij}] \geq R_0] \quad (2.45)$$

#### Sous les contraintes

$$C = \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^{V_j} k_{jv} C_{jv} \leq C_0 \quad (2.46)$$

$$G^{\min \{a_i, b_j\}} \geq G_0 \quad (2.47)$$

### 2.9.3.13. Problème Multi-Objective

Ce problème englobe une fonction bi- objective à optimiser pour un système multi état redondant qu'on peut le formuler comme suite:

Trouver la configuration / ou structure du système  $k_1, k_2, \dots, k_n$  à coût minimale au même temps sa fiabilité soit maximale R .sous un ensemble de contraintes [28.29].

#### Minimiser-Maximiser

$$Min [C = \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^{V_j} k_{jv} C_{jv}] \quad (2.48)$$

$$Max [R(t) = \prod_{j=1}^J [\prod_{i=1}^{n_j} p, q(z) \sum_{i=1}^n minG_{ij}] \geq R_0] \quad (2.49)$$

**Sous les contraintes**

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{V_i} k_{iv} C_{iv} \leq C_0 \quad (2.50)$$

$$\prod_{j=1}^J \left[ \prod_{i=1}^{n_j} p, q(z) \sum_{j=1}^J \min G_{ij} \right] \geq R_0 \quad (2.51)$$

**Remarque**

Dans le cas d'un système binaire simple ou on utilise la méthode classique, seule l'équation qui détermine la fiabilité change.

- *Pour un système parallèle- série :*

$$\prod_{i=1}^n \left[ 1 - \prod_{j=1}^J (1 - p_{ij}) \right] \geq R_0 \quad (2.52)$$

- *Pour un système série- parallèle :*

$$1 - \prod_{j=1}^J \left[ 1 - \prod_{i=1}^{n_j} (p_{ji}) \right] \geq R_0 \quad (2.53)$$

**2.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux concepts des systèmes électriques. Nous avons donné quelques définitions de base telles que la fiabilité, la disponibilité et la maintenabilité ainsi que la formulation mathématique des systèmes (série, parallèle et parallèle-série).

Dans de nombreuses situations un système peut fonctionner avec des niveaux de performance dégradés entre le fonctionnement normal et l'état de panne. Ces systèmes sont appelés systèmes multi-états. La mesure de la fiabilité des systèmes par les méthodes classique donne une mesure quantitative. Par contre, les méthodes numériques déterminent la fiabilité des modèles binaires simples et étendus. Le chapitre suivant, est consacré pour quelques méthodes de résolution des problèmes d'optimisation qui ont été proposées dans la littérature.

## 2.11. Bibliographie du Chapitre 2

- [1] R.Laronde, (2014), « Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédié aux énergies renouvelables : Application à un système photovoltaïque», Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers thèse de doctorat 2011.
- [2] Salman. K “Reliability modeling and evaluation of distributed energy resources and smart power distribution systems”july2014.
- [3] DO .Minh Thang « Approche probabiliste pour l'évaluation de lafiabilité du système électrique intégrant desénergies renouvelables peu prévisibles » thèse de doctorat 2012.
- [4] Mohamad EL SAMROUT « Optimisation de la maintenance préventive des systèmes série-parallèle à l'aide de méta heuristiques » thèse de doctorat 2011.
- [5] Andreea Bianca .OCNASU « Evaluation de la sureté de fonctionnement des réseaux de distribution par la simulation Monte Carlo : application `a des stratégies de maintenance optimales » thèse de doctorat octobre 2008.
- [6] Nouredine .HADJSAÏD « Sûreté de fonctionnement des réseaux de distribution en présence deproduction décentralisée » thèse de doctorat octobre 2004.
- [7] S. Bouri, “Optimisation de la Production et la Structure d'Energie Electrique par les Colonies de Fourmis“, Thèse de Doctorat en science, Université de Sidi Bel Abbés, 2008.
- [8] A. Yalaoui, “Allocation de Fiabilité et de Redondance dans les Systèmes Parallèle-Série et Série-Parallèle“, Thèse de Doctorat, 2004.
- [9] WASSY ISAAC. SORO « Modalisation et optimisation des performances et de la maintenance » Université Québec thèse de doctorat octobre 2011.
- [10] D. W. Coit et A. E. Smith, “Reliability Optimization of Series-Parallel System Using a Genetic Algorithm“, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 52, pp. 254-260, 1996.
- [11] Y. Liang et A. E. Smith, “An Ant Colony Optimization Algorithm for the Redundancy Allocation Problem“, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 53, pp. 417-423, 2004.
- [12] Ahmed BELLAOUAR »polycopié de fiabilité, maintenabilité et disponibilité (FMD) » Polycopié de fiabilitéUniversité Constantine -1-decembre 2013.
- [13] Olivier .Gaudoin « Fiabilité des Systèmes et des LogicielsNotes de cours »Grenoble NIP.
- [14] K. Gordon, “Optimum Component Redundancy for Maximum System Reliability“, Operations Research, Vol. 5, pp. 229-243, 1957.
- [15] R. Zhao et K. Song, “A Hybrid Intelligent Algorithm for Reliability Optimization Problems“, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol. 2, pp. 1476-1481, 2003.
- [16] H.Yu, F. Yalaoui, E. ChateletetC. Chu, “Optimal design of a Maintainable Cold-Standby System“, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 92, pp. 85-91, 2007.
- [17] J. E. Ramirez-Marquez et D. W. Coit, “A Heuristic for Solving the Redundancy Allocation Problem for Multi-State Series- Parallel Systems“, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 83, pp. 341-349, 2004.
- [18] R. Meziane, Y. Massim, A. Zeblah, A. Ghoraf et M. Rahil, “Reliability Optimization Using Ant Colony Algorithm under performance and cost constraints“, Electric Power System Research, Vol. 76, pp. 1-8, 2005.

- [19] Z. Tian, G. Levitin et M. J. Zuo, "A Joint Reliability Redundancy Optimization Approach for Multi-State Series-Parallel Systems", Vol. 94, pp. 1568-1576, 2009.
- [20] C. Y. Li, X. Chen, X. Yi et J. Tao, "Heterogeneous Redundancy Optimization for Multi-State Series-Parallel Systems Subject to Common Cause Failures", Vol. 95, pp. 202-207, 2010.
- [21] I. F. Mauricio, "Electricité et Sécurité de Fourniture de Long Terme La Problématique de l'Evaluation de l'Adéquation de Capacité en Environnement Concurrentiel", Mémoire de Master Recherche, Ecole du Pétrole et des Moteurs, 2007.
- [22] R. Meziane, "Optimisation de la Structure d'un Réseau de Production d'Energie Electrique et Amélioration de sa Performance", Thèse de Doctorat, USTO 2007.
- [23] D. Salazar, C. M. Rocco et B. J. Galvan, "Optimization of Constrained Multiple Objective Reliability Problems Using Evolutionary Algorithms", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 91, pp. 1057-1070, 2006.
- [24] D. W. Coit et A. E. Smith, "Redundancy Allocation to Maximize a Lower Percentile of the System Time to Failure Distribution", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 47, pp. 79-87, 1998.
- [25] V. R. Prasad et W. Kuo, "Reliability optimization of coherent systems", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 49, pp. 323-330, 2000.
- [26] S. A. Reza, "Ant Colony for Optimization of Imperfect Preventive Maintenance for Multi-State Systems", Thèse de Doctorat, Université de Laval Québec, 2006.
- [27] D. E. Fyffee, W. W. Hines et N. K. Lee, "System Reliability Allocation and a Computational Algorithm", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 17, pp. 64-69, 1968.
- [28] Gregory Levitin The Universal Generating Function in Reliability Analysis and Optimization. Springer series in reliability engineering) .Springer-Verlag London Limited 2005.
- [29] Mohamed Ouzineb Heuristiques efficaces pour l'optimisation de la performance des systèmes séries-parallèles thèse de doctorat Juin 2009.
- [30] M. Nourelfath et N. Nahas, "Artificial Neural Networks for Reliability Maximization Under Budget and Weight Constraints", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 11, pp. 139-151, 2005.
- [31] M. Aggarwal et R. Gupta, "Genetic Search for Redundancy Optimization in Complex Systems", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 12, pp. 338-353, 2006.
- [32] D. W. Coita et A. Konak, "Multiple Weighted Objectives Heuristic for the Redundancy Allocation Problem", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 55, pp. 551-558, 2006.
- [33] C. Ha et W. Kuo, "Multi-Path Heuristic for Redundancy Allocation the Tree Heuristic", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 55, pp. 37-43, 2006.
- [34] Z. Tian et Zuo M. J, "Redundancy Allocation for Multi-State Systems Using Physical Programming and Genetic Algorithms", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 91, pp. 1049-1056, 2006.
- [35] Y. Liang et Y. Chen, "Redundancy Allocation of Series-Parallel Systems Using a Variable Neighborhood Search Algorithm", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 92, pp. 323-331, 2007.
- [36] N. Nahas, M. Nourelfath et D. AitKadi, "Computing Ant Colony and the Degraded Ceiling Algorithm for the Redundancy Allocation Problem of Series-Parallel System", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 92, pp. 211-222, 2007.

- [37] A. J. Federowicz et M. Mazumder, "Use of Geometric Programming to Maximize Reliability Achieved by Redundancy", *Operations Research*, Vol. 19, pp. 948-954, 1968.
- [38] F. A. Tillman, C. L. Hwang et W. Kuo, "Determining Component Reliability and Redundancy for Optimum System Reliability", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 26, pp. 162-165, 1977b.
- [39] T. Chen, "IA Based Approach for Reliability Redundancy Allocation Problems", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 182, pp. 1556-1567, 2006.
- [40] Guerraike .Khaled, "Conception Optimale des Systèmes de Production d'Énergie Électrique à l'Aide de Méta-heuristiques", Thèse de Doctorat, USTO 2015
- [41] H. Kim, C. Baet D. Park, "Reliability Redundancy Optimization Using Simulated Annealing Algorithms", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 12, pp. 354-363, 2006.
- [42] F. A. Tillman, C. L. Hwang et W. Kuo, "Optimization Technique for System Reliability with Redundancy", A Review, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 26, pp. 148-155, 1977a.
- [43] W. Kuo et R. Wan, "Recent advances in optimal reliability allocation", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Systems and Humans*, Vol. 37, pp. 143-156, 2007b.
- [44] R. Bellman et S. Dreyfus, "Dynamic Programming and the Reliability of Multi Component Devices", *Operations Research*, Vol. 6, pp. 200-206, 1958.
- [45] F. A. Tillman, C. L. Hwang et W. Kuo, "System Effectiveness Models", An Annotated Bibliography, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 29, pp. 295-304, 1980.
- [46] L. S. Coelho, "An Efficient Particle Swarm Approach for Mixed-Integer Programming in Reliability Redundancy Optimization Applications", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94, pp. 830-837, 2009.
- [47] L. Sahoo, "Studies on Reliability Optimization Problems by Genetic Algorithm", Thèse de Doctorat, Université de Burdwan Bengal India, 2012.
- [48] W. I. Soro, "Modélisation et Optimisation des Performances et de la Maintenance des Systèmes Multi- Etats", Thèse de Doctorat, Université de Laval Québec, 2011.
- [49] R. Zhao et K. Song, "A hybrid intelligent algorithm for reliability optimization problems", *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 2, pp. 1476-1481, 2003.
- [50] Y. Liang, et A. E. Smith, "An Ant Colony Optimization Algorithm for the Redundancy Allocation Problem", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 53, pp. 417-423, 2004.
- [51] M. Sakawa, "Multiobjective Optimization by the Surrogate Worth Trade-Off Method", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 27, pp. 311-314, 1978.
- [52] M. Sakawa, "An Interactive Computer Program for Multi-Objective Decision Making by the Sequential Proxy Optimization Technique", *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 14, pp. 193-213, 1981b
- [53] W. Kuo et R. Wan, "Recent Advances in Optimal Reliability Allocation", *Computational Intelligence in Reliability Engineering (SCI)*, Vol. 39, pp. 1-36, 2007.

# CHAPITRE 3

## Méthodes d'Optimisation

### 3.1. Introduction

Résoudre un problème d'optimisation revient à déterminer parmi un ensemble de solutions ceux qui vérifient les contraintes données, là où les solutions qui rendent minimale (ou maximale) une fonction en mesurant la qualité de cette solution. Cette fonction est appelée fonction-objective. En général, pour modéliser un problème d'optimisation, on commence par définir les éléments qui composent les contraintes et la fonction objective. Parmi ces éléments, certains sont connus et sont appelés paramètres du problème, alors que d'autres sont inconnus et sont appelés inconnues ou variables. Les contraintes et la fonction objective s'expriment à l'aide des formules mathématiques qui combinent les paramètres connus et les variables du problème. Ces derniers correspondent souvent à des décisions à prendre de manière à obtenir l'optimum souhaité. Nous allons donner quelques généralités sur les algorithmes d'optimisation avant de présenter quelques méthodes couramment utilisées pour l'optimisation de la réserve de puissance [1-3].

L'objectif de ce chapitre est de comprendre les méta-heuristiques, mais aussi de souligner l'intérêt d'apporter de nouveaux outils pour assister la conception et l'implantation de ces méthodes d'optimisation. Dans un premier temps, les termes liés à l'optimisation combinatoire et aux méta-heuristiques sont définis. Puis nous donnons un aperçu des principales méta-heuristiques. Malgré la diversité des approches existantes, nous nous efforçons dans cet état de l'art de faire ressortir les concepts communs des méta-heuristiques.

### 3.2. Problème d'Optimisation

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum donc) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquels les variables de la fonction à optimiser sont contraintes d'évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes [3-5].

Mathématiquement parlant, un problème d'optimisation se présentera sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \text{minimiser : } & f(x) \quad (\text{fonction à optimiser}) \\ \text{avec} & g(x) \leq 0 \quad (m \text{ contraintes d'inégalité}) \\ \text{et} & h(x) = 0 \quad (p \text{ contraintes d'égalité}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Le problème d'optimisation peut présenter des contraintes d'égalité (ou d'inégalité) sur  $s$ , être dynamique si  $f(s)$  change avec le temps ou encore un problème d'optimisation mono-objectif est défini par un ensemble de variables, une fonction objective et un ensemble de contraintes.

Un problème d'optimisation multi-objectif est défini par un ensemble de variables, un ensemble de fonctions objectif et un ensemble de contraintes [6-7].

### 3.2.1. Problème Mono-Objectif

Tout problème d'optimisation revient à définir une ou plusieurs fonctions de coûts  $f(X)$ , Qu'il faut minimiser ou maximiser par rapport à certains paramètres. Ces paramètres, appelés variables d'optimisation, constituent les inconnus du problème à résoudre et correspondent aux composantes du vecteur  $X$  [7-8] :

$$\begin{aligned} & \text{Minimiser (ou maximiser)} f(X) \\ & \text{Soumis aux contraintes} \\ & C(X) \geq 0 \\ & g(X) = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

### 3.2.2. Problème Multi Objectif

L'optimisation multi objectif peut être définie de la façon suivante. Déterminer un vecteur de variables de décisions satisfaisant les contraintes et optimisant une fonction vectorielle dont chaque élément représente une fonction objective du problème. Ces fonctions objectives sont généralement en conflit les unes par rapport aux autres. L'optimisation multi objectif consiste donc à déterminer une solution rendant les valeurs de l'ensemble des fonctions objectives acceptables par l'utilisateur [9].

De façon formelle, un problème multi objectif consiste à définir des fonctions objectives.

$$\begin{aligned} & \text{Minimiser (ou maximiser)} \quad f_i(X) \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \text{Soumis aux contraintes} \\ & g_i(X) \geq 0 \\ & h_k(X) = 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

### 3.3. Méthodes de Résolution :

Les méthodes de résolution peuvent être réparties en deux principales familles: les méthodes de résolution Exactes et les méthodes de résolution générales, ou heuristiques.

Les méthodes dédiées sont conçues pour résoudre un problème particulier. Elles sont extrêmement efficaces pour résoudre le problème pour lequel elles ont été conçues, mais inapplicables à d'autres problèmes.

Les méta-heuristiques sont des méthodes applicables à un très grand nombre de problèmes, mais sont susceptibles d'offrir des performances inférieures aux méthodes exactes. Avant d'aborder l'étude des principales méta-heuristiques dans une prochaine section, nous présentons une classification des méthodes de résolution afin de situer les méta-heuristiques parmi ces méthodes. Cette classification ne prétend pas être exhaustive, mais a pour objectif de faire ressortir les principales caractéristiques des méthodes de résolution [10-12].

Les méthodes d'optimisation peuvent être réparties en deux catégories :

1. Méthodes exactes.
2. Méthodes approchées.

#### 3.3.1. Méthodes Exactes

Ces méthodes sont basées soit sur une résolution algorithmique ou analytique, soit sur une énumération exhaustive de toutes les solutions possibles. Elles s'appliquent donc aux problèmes qui peuvent être résolus de façon optimale et rapidement. On trouve essentiellement deux types de méthodes [13-14].

##### 3.3.1.1. Les Méthodes Analytiques

Les Méthodes Analytiques sont basées sur l'existence de dérivées, donc sur l'existence d'équations ou de systèmes d'équations, linéaires ou non linéaires. Le principe général consiste à rechercher un extremum hypothétique en déterminant les points de pente nulle dans toutes les directions. La méthode du Gradient ou du Quasi-Newton consiste à se déplacer dans une direction dépendant du gradient de la fonction objectif. Ces méthodes sont donc peu efficaces pour résoudre des problèmes d'optimisation en production [15-16].

##### 3.3.1.2. Les Méthodes Algorithmiques

Les Méthodes Algorithmiques C'est La programmation linéaire qui permet de déterminer l'optimum d'une fonction linéaire tout en respectant des contraintes linéaires.

#### 3.3.2. Méthodes Approchées ou Heuristiques

Les méthodes approchées fournissent une solution approchée au problème traité. Elles sont en général conçues de manière à ce que la solution obtenue puisse être située par rapport

à la valeur optimale : de telles méthodes permettent d'obtenir des bornes inférieures ou supérieures de la valeur optimale telle que [17-19].

- Méthodes Heuristiques
- Méthodes Méta-heuristiques

### 3.3.2.1. Méthode Heuristiques

La méthode heuristique est un algorithme qui fournit rapidement (en un temps polynomial) une solution approchée et réalisable, pas nécessairement optimale, pour un problème d'optimisation difficile. Cette méthode approximative est le contraire d'un algorithme exact qui donne une solution optimale pour un problème donné.

### 3.3.2.2. Méthode Méta-Heuristiques

Les méthodes méta-heuristiques sont des algorithmes pouvant être appliqués à la résolution d'un grand nombre de problèmes d'optimisation. Les méta-heuristiques forment une famille d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile. Il existe un grand nombre de méta-heuristiques différentes, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale [10, 17-19].

Les méta-heuristiques sont souvent inspirées de processus naturels qui relèvent de la physique (l'algorithme du recuit simulé), de la biologie de l'évolution (les algorithmes génétiques) ou encore de l'éthologie (les algorithmes de colonies de fourmis ou l'optimisation par essaim particulière).

Les méta-heuristiques se caractérisant par leur capacité à résoudre des problèmes très divers, elles se prêtent naturellement à des extensions. Pour illustrer celles-ci, nous pouvons citer :

- Les méta-heuristiques pour l'optimisation multi-objective [23-24] : où il faut optimiser plusieurs objectifs contradictoires. Le but ne consiste pas ici à trouver un optimum global, mais à trouver un ensemble d'optima, qui forment une surface de compromis pour les différents objectifs du problème;
- Les méta-heuristiques pour l'optimisation multimodale [25] : où l'on ne cherche plus l'optimum global, mais l'ensemble des meilleurs optima globaux et/ou locaux ;
- Les méta-heuristiques pour l'optimisation de problèmes bruités : où il existe une incertitude sur le calcul de la fonction objectif, dont il faut tenir compte dans la recherche de l'optimum ;
- Les méta-heuristiques pour l'optimisation dynamique [26] : où la fonction objectif varie dans le temps, ce qui nécessite d'approcher l'optimum à chaque pas de temps ;
- Les méta-heuristiques hybrides [27-28] : qui consistent à combiner différentes méta-heuristiques, afin de tirer profit des avantages respectifs ;

– Les méta-heuristiques parallèles [27] : où l'on cherche à accélérer le calcul, en répartissant la charge de calcul sur des unités fonctionnant de concert. Le problème revient alors à adapter les méta-heuristiques pour qu'elles soient distribuées.

### 3.4. Applications

Les méta- heuristiques sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (les méthodes de voisinage comme le recuit simulé et la recherche tabou), en biologie de l'évolution (les algorithmes évolutifs comme les algorithmes génétiques et les stratégies d'évolution) ou encore en étiologie (les algorithmes de colonies de fourmis).

#### 3.4.1. Recuit Simulé

Le domaine de la métallurgie a donné naissance aux métaheuristiques dit de *recuit simulé*. Ce principe consiste en un refroidissement lent d'une pièce de métal lui conférant un état cristallin d'énergie minimum. Cet état peut être assimilé à celui du métaheuristique lorsque toutes ses fonctions objectifs ont atteint leur optimum : plus aucune itération (= énergie en métallurgie) n'est alors nécessaire afin d'atteindre un état stable. On peut alors extraire la ou les solutions du problème à partir de cet équilibre. Elle s'inspire des méthodes de simulation de Metropolis (années 50) en mécanique statistique. L'analogie historique s'inspire du recuit des métaux en métallurgie : un métal refroidi trop vite présente de nombreux défauts microscopiques, c'est l'équivalent d'un optimum local pour un problème d'optimisation combinatoire. Si on le refroidit lentement, les atomes se réarrangent, les défauts disparaissent, et le métal a alors une structure très ordonnée, équivalente à un optimum global. La méthode du recuit simulé aux problèmes d'optimisation, considère une solution initiale et recherche dans son voisinage une autre solution de façon aléatoire. L'originalité de cette méthode est qu'il est possible de se diriger vers une solution voisine de moins bonne qualité avec une probabilité non nulle. Ceci permet d'échapper aux optima locaux. Au début de l'algorithme, un paramètre  $T$ , apparenté à la température, est déterminé et décroît tout au long de l'algorithme pour tendre vers 0. De la valeur de ce paramètre va dépendre la probabilité  $p$  d'acceptation solutions détériorants (plus la température  $T$  est élevée, plus cette probabilité sera forte).

La performance du recuit simulé dépend, entre autres, de la règle de refroidissement (c'est à dire la décroissance du paramètre  $T$ ) que l'on utilise. Un refroidissement trop rapide mènerait vers un optimum local pouvant être de très mauvaise qualité. Un refroidissement trop lent serait très coûteux en temps de calcul. Le réglage des différents paramètres (température initiale, nombre d'itérations par palier de température, décroissance de la température,...) peut être long et difficile [29,35].

#### - **Avantages :**

- Très simple et très rapide à mettre en place.
- Convergence vers un optimum global démontrée: la prédiction du futur à partir du présent ne nécessite pas la connaissance du passé. Plus clairement cette

métaheuristique ne nécessite pas de mémoire afin de trouver les espaces de recherche locaux futur.

### - **Inconvénients:**

- La non utilisation des mémoires antérieures qui peuvent parfois guider la recherche.
- Nécessité d'une détermination manuelles des paramètres et ceci en testant divers valeurs.

### 3.4.2. Recherche Tabou :

La recherche tabou est une méta-heuristique d'optimisation présentée par Fred Glover [Glover, 1986; Glover et Laguna, 1997]. Cette méthode est une méta-heuristique itérative qualifiée de recherche locale au sens large. Les idées de bases de la recherche Tabou se retrouvent également dans le travail de P. Hansen . Elle n'a aucun caractère stochastique et utilise la notion de mémoire pour éviter de tomber dans un optimum local. Le principe de l'algorithme est le suivant : à chaque itération, le voisinage (complet ou sous-ensemble de voisinage) de la solution courante est examiné et la meilleure solution est sélectionnée. En appliquant ce principe, la méthode autorise de remonter vers des solutions qui semblent moins intéressantes mais qui ont peut être un meilleur voisinage. Cette méthode consiste, à partir d'une position donnée, à en explorer le voisinage et à choisir la position dans ce voisinage qui minimise la fonction objective. Il est essentiel de noter que cette opération peut conduire à augmenter la valeur de la fonction : c'est le cas lorsque tous les points du voisinage ont une valeur plus élevée. C'est à partir de ce mécanisme qu'il est possible de sortir d'un minimum local [30-33].

### 3.4.3. Algorithme Génétique (AG)

Les algorithmes génétiques appartiennent à une famille d'algorithmes appelés méta-heuristique ont été introduits par Holland [37, 38] dont le but est d'obtenir une solution approchée [35, 36,37], en un temps correct, à un problème d'optimisation, lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte pour le résoudre. Les algorithmes génétiques utilisent la notion de sélection naturelle développée par le scientifique Charles Darwin au XIXème siècle. Ils s'appuient sur un codage de l'information sous forme de chaînes binaires de longueur fixe et d'un ensemble d'opérateurs génétiques : la sélection, la mutation, le croisement, Un individu sous ce codage, appelé un chromosome [34-36,].

La valeur d'adaptation obtenue pour chaque chromosome lors de l'évaluation est utilisée, notamment lors des opérations de sélection, pour choisir les individus amené à se reproduire par des croisements ou à être utilisées par d'autres opérateurs génétiques.

- **Gène**

Est un ensemble de symboles représentant la valeur d'une variable. Dans la plupart des cas, un gène est représenté par un seul symbole (un bit, un entier, un réel ou un caractère).

- **Chromosome**

Est un ensemble de gènes, présentés dans un ordre donné de manière qui prend en considération les contraintes du problème à traiter. Par exemple, dans le problème du

voyageur de commerce, la taille du chromosome est égale au nombre de villes à parcourir. Son contenu représente l'ordre de parcours de différentes villes. En outre, on doit veiller à ce qu'une ville (représentée par un nombre ou un caractère par exemple) ne doit pas figurer dans le chromosome plus qu'une seule fois.

- ***Individu***

Est composé d'un ou de plusieurs chromosomes. Il représente une solution possible au problème traité.

- ***Population***

Est représentée par un ensemble d'individus (i.e. l'ensemble des solutions du problème).

- ***La taille de la population***

Elle représente le nombre d'individus de la population. S'il est trop grand, le processus de recherche demande un coût de recherche élevé, que se soit en termes d'espace mémoire ou du temps de calcul nécessaires. Cependant, s'il est trop petit, l'algorithme risque d'être tombé dans le cas de la convergence prématurée à cause du manque de la diversité au sein de la population. Il est préférable donc de choisir une taille moyenne en prenant en considération l'instance du problème à traiter.

- ***Croisement***

Le croisement permet de produire deux nouveaux individus, appelés les enfants, à partir de deux individus, appelés les parents.

- ***Mutations***

La mutation consiste à changer la valeur de certaines variables du chromosome. Les variables à modifier sont le plus souvent choisies aléatoirement. Les algorithmes génétiques, et plus généralement les algorithmes évolutionnaires ont permis de résoudre un grand nombre de problèmes, notamment en optimisation. Dans le contexte multi-objectif, l'approche évolutionnaire offre, par le biais de la notion de population, des mécanismes pertinents pour approcher la solution optimale (front Pareto).

- ***Reproduction***

Pour déterminer quels individus sont plus enclins à obtenir les meilleurs résultats, une sélection est opérée. Ce processus est analogue à un processus de sélection naturelle, les individus les plus adaptés gagnent la compétition de reproduction tandis que les moins adaptés meurent avant la reproduction, ce qui améliore globalement l'adaptation.

- ***La probabilité de croisement***

Elle représente la probabilité d'échange de patrimoine (i.e. les gènes) entre deux individus (ou plus). Plus elle est grande, plus elle permet la génération de nouveaux enfants qui peuvent être meilleurs que leurs parents.

- ***La probabilité de mutation***

Elle est en général faible, dans le but d'échapper aux possibilités de modifications radicales des solutions, particulièrement, des solutions de bonnes qualités qui ne nécessitent que peu d'amélioration pour passer aux solutions optimales.

- ***Le nombre maximum de génération***

Ce paramètre peut jouer le rôle d'un critère d'arrêt. Il peut construire un obstacle pour l'algorithme. En fait, il peut empêcher les différents opérateurs d'aboutir à la meilleure solution s'il est trop petit. Comme il peut engendrer un temps de calcul prohibitif dans le cas où il est trop grand. Ainsi, le choix de sa valeur peut se baser sur des tests préliminaires.

**Avantage:**

- Aucune hypothèse à faire sur l'espace de recherche
- Nombreuses méthodes disponibles.
- Solutions intermédiaires interprétables.
- Adaptation rapide à de nouveaux environnements.

**Inconvénients:**

- Aucune garantis de solution optimale n un temps fini.
- Initialisation de plusieurs paramètres, choix des méthodes important.
- Coût d'exécution important.

### 3.4.4. Colonies de Fourmis

Les algorithmes de colonies de fourmis ont été découverts suite à l'observation des colonies de fourmis réelles. Lorsque les fourmis quittent en colonies leurs nids ils ont un comportement social, le comportement social est dirigé plus à la survie de la colonie par le comportement individuel de chaque membre de la colonie. Le comportement le plus particulier et le plus intéressant est celui de leur capacité de trouver le plus court chemin entre la source de nourriture et le nid, en se rendant compte qu'ils sont presque aveugles. Le chemin pris par les fourmis individuelles en se déplaçant du nid vers la recherche de la nourriture est essentiellement aléatoire [40]. En effet, lorsque les fourmis se déplacent, ils déposent une substance appelée phéromone. Cette continuation de dépôt forme une piste de phéromone et qui sera utilisé comme un moyen de la communication indirect.

En sentant la phéromone, il y a une plus grande probabilité que la piste avec une plus haute concentration du phéromone sera choisie. La piste de phéromone permet aux fourmis de

retrouver leur chemin de retour en revenant de la source de la nourriture et vice versa. Dans le cas où plusieurs chemins sont disponibles entre le nid et une source de la nourriture, une colonie de fourmis peut être capable d'exploiter la piste du phéromone déposée par les autres membres de la colonie pour découvrir le chemin le plus court.

Comme la plus parts des fourmis choisissent de suivre des chemins les plus court , la phéromone déposée joue un très grand rôle pour la construction de ce chemin, en le rendant plus attirant par les autres fourmis qui cherchent de la nourriture et d'où la possibilité d'être suivi par les autres fourmis.

Si un obstacle est placé sur un chemin qui mène vers une source de nourriture, les fourmis peuvent choisir de se déplacer à droit ou à gauche de manière apparemment aléatoire. Cependant ceux qui choisissent le plus court chemin vont atteindre la source de nourriture et feront le voyage du retour de manière beaucoup plus rapide que les autres. Le phéromone sur le plus court chemin va être construit et de ce fait il deviendra plus renforcé, et éventuellement il deviendra le plus préféré par l'ensemble des fourmis en déplacement.

### 3.4.5 Les fourmis artificielles.

La fourmi artificielle se présente sous la forme d'un ensemble de procédures qui définissent son comportement. Celui-ci est très semblable à celui de la fourmi naturelle quand elle recherche de la nourriture.

Dans ce cas, une fourmi n'a qu'un rôle assez simple qui consiste à se déplacer du nid jusqu'à la source de nourriture et à y revenir. Le code qui définit leur comportement permet aux fourmis artificielles de se déplacer dans l'espace combinatoire formé par les différents éléments qui peuvent être utilisés pour le problème à résoudre. Pour utiliser un vocabulaire informatique, nous dirons qu'elle construit une solution. La mémorisation de ces déplacements donne la forme d'une solution où chaque étape est désignée par l'indice de l'élément et où l'ordre de parcours désigne la position des éléments dans la solution.

En se basant sur ces définitions, il est possible de décrire le comportement des fourmis virtuelles en tant qu'agents :

- 1- Les entités informatiques que nous venons de définir sont dites virtuelles car elles n'ont pas d'existence matérielle au contraire des entités physiques qui interagissent dans le monde concret (Des exemples de ces agents physiques sont un robot, un avion, une voiture).
- 2- Les agents sont capables d'agir : dans le cas des fourmis virtuelles, elles modifient les valeurs de phéromone associées aux différents éléments. Par cette action elles changent leur environnement, ce qui influera sur le choix des autres fourmis à l'itération suivante ;
- 3- Les agents sont capables de communiquer: les fourmis utilisent comme on l'a vu précédemment la phéromone comme médium de communication indirecte;

- les agents sont doués d'autonomie : chaque fourmi a pour but de construire une solution pour un problème donné, se contentant pour cela d'appliquer les règles de sélection qui définissent son comportement, la fourmi utilise la phéromone et parfois des valeurs heuristiques;

4- Les agents n'ont qu'une représentation partielle de leur environnement : lors de la construction d'une solution, la fourmi ne connaît à chaque étape que les éléments qu'elle a déjà choisis et les valeurs de phéromone correspondant aux éléments qui pourront l'être.

Les fourmis numériques dont nous parlerons dans ce mémoire peuvent donc être décrites sous la forme d'agents.

### 3.4.6. Le Modèle de Coopération:

C'est cette formalisation qui est également utilisée en robotique pour décrire le comportement des robots fourmis. Les robots fourmis réussissent à réaliser des actions complexes avec des modes de perception réduits.

Les fourmis peuvent résoudre collectivement des problèmes complexes. Un des exemples marquant est celui de la découverte du chemin le plus court dans l'expérience du choix entre les deux arcs d'un point. Chacune des fourmis, isolément, ne peut trouver la meilleure solution.

C'est grâce au mécanisme d'auto-organisation qui émerge de la communication indirecte (stigmergie) que le plus court chemin peut être découvert problème TSP (Traveling Salesman problem). Le modèle de la stigmergie peut être facilement étendu aux agents artificiels en associant aux éléments d'un problème des variables d'état spécifique, qui serviront de support à la communication indirecte entre fourmis.

Pour simuler ce mécanisme, il faut intégrer un processus de renforcement positif. Dans le cas des fourmis, plus le chemin est court, plus les fourmis le parcourront vite et plus la quantité de phéromone associée sera élevée. Afin de pouvoir comparer les solutions, il est nécessaire d'introduire une mesure qui donne l'adéquation de la solution au problème : c'est la fonction qualité (en anglais fitness). La valeur de cette qualité est utilisée dans le calcul de la mise à jour des valeurs associées aux éléments du problème lors de la phase de renforcement. Pour la recherche du plus court chemin, on peut prendre tout simplement la distance comme mesure de qualité : plus le chemin est court, plus il sera renforcé.

Une des propriétés de la phéromone est son caractère volatil. Dans le modèle virtuel, un mécanisme similaire sera utilisé afin d'éviter une convergence prématurée (stagnation) due à la découverte d'un optimum local.

Entre ces deux modèles, nous passons d'un univers continu à un univers discret. Ainsi, les fourmis virtuelles sautent d'un élément à un autre, tandis que les fourmis naturelles progressent de façon continue sur le chemin. Cette discrétisation impose que l'évaporation ou la modification des valeurs de phéromone ne puisse se faire en continu. Cet ajustement de valeurs n'est souvent réalisable qu'après la construction de la solution complète.

### 3.4.7. Algorithme de colonies de fourmis:

L'algorithme de colonies de fourmis est une méta-heuristique d'optimisation initialement proposée pour la recherche de chemins optimaux dans un graphe. Notons tout d'abord que cette méthode est différente de l'algorithme de colonies de particules. Elle est inspirée du comportement des fourmis recherchant un chemin de leur colonie vers leur nourriture. Plus généralement, les algorithmes de fourmis artificielles sont des méthodes qui s'inspirent des comportements de fourmis réelles [39-42].

Dans une vision simplifiée de la réalité, les fourmis commencent par se déplacer au hasard. Puis, lorsqu'elles ont trouvé de la nourriture, elles retournent vers leur colonie en balisant leur chemin à l'aide de traces. Si d'autres fourmis rencontrent ce chemin, il y a de fortes chances qu'elles arrêtent leurs déplacements aléatoires et qu'elles rejoignent le chemin balisé, en renforçant le balisage à leur retour s'il mène bien vers de la nourriture.

Ainsi, dès lors qu'une fourmi découvre un chemin de la colonie vers de la nourriture, elle va le renforcer en y déposant une trace et les autres fourmis seront alors plus enclines à suivre ce chemin. Dans le même temps, le chemin le plus court sera plus parcouru, et donc plus renforcé et plus attractif. En considérant que la trace s'évapore, les chemins les moins renforcés finissent par disparaître, ce qui amène toutes les fourmis à suivre le chemin le plus court. L'idée de l'algorithme de colonies de fourmis, introduite par Marco Dorigo [Dorigo, 1992], est d'imiter ce comportement à l'aide de fourmis artificielles se déplaçant à travers le graphe qui représente le problème à résoudre.

Pour résoudre le problème du voyageur de commerce. Il consiste à trouver le plus court cycle hamiltonien dans un graphe pondéré, où chaque noeud du graphe représente une ville. Soit  $d_{ij}$ , la distance entre les villes  $i$  et  $j$ , et le couple  $(i,j)$ , l'arête entre ces deux villes.

L'algorithme commence par positionner  $m$  fourmis sur  $n$  villes au temps  $t= 0$ . À chaque unité de temps, chaque fourmi  $k$  choisit la prochaine ville à visiter parmi l'ensemble des villes  $V_k$  à l'aide de la règle de transition définie à l'équation 3.1 L'ensemble de villes  $V_k$  contient les villes que la fourmi  $k$  n'a pas encore visitées. L'équation 3.1 représente la probabilité qu'une fourmi  $k$  se déplace de la ville  $i$  à la ville  $j$  en considérant la distance à parcourir pour atteindre cette ville à titre d'élément de visibilité ( $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$ ) et la quantité de phéromone  $\tau_{ij}(t)$  accumulée sur le chemin (arête du graphe),  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres contrôlant respectivement l'importance accordée à la trace de phéromone et à la visibilité [40-42].

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{u \in v_k} [\tau_{iu}(t)]^\alpha [\eta_{iu}]^\beta} \quad (3.4)$$

Une fois la tournée construite, chaque fourmi laisse une trace de phéromone sur les arêtes empruntées en mettant à jour la matrice de phéromone selon l'équation 3.6. On a  $0 < \rho < 1$  qui est un coefficient, tel que  $(1 - \rho)$  représente l'évaporation des phéromones, et  $\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k$  cumule la quantité de phéromone ( $\Delta\tau_{ij}^k$ ) laissée par unité de longueur sur l'arête (i, j) par l'ensemble des  $m$  fourmis. Plus précisément,  $\Delta\tau_{ij}^k = \frac{Q}{L_k}$  si la  $k^{\text{ième}}$  fourmi est passée sur l'arête (i, j) dans sa tournée;  $\Delta\tau_{ij}^k = 0$  dans le cas contraire.  $Q$  est une constante (généralement 1) et  $L_k$  est la longueur de la tournée de la  $k^{\text{ième}}$  fourmi calculée à la fin de chaque cycle. Ceci complète un cycle de l'algorithme.

$$\tau_{ij}(t + 1) = \rho\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (3.5)$$

### L'Algorithme de colonies de fourmis

#### Début

Initialiser une population de  $m$  fourmis ;  
Evaluer les  $m$  fourmis ;  
**Tant que** la condition d'arrêt n'est pas satisfaite **faire**  
**Pour**  $i=1$  à  $m$  **faire**  
Construire le trajet de la fourmi  $i$ ;  
Déposer des phéromones sur le trajet de la fourmi  $i$ ;  
**Fin pour**  
Evaluer les  $m$  fourmis;  
Evaporer les pistes de phéromones;  
**Fin Tant que**  
Retourner la ou les meilleures solutions ;

#### Fin

Différents paramètres doivent être fixés, tels que le nombre de fourmis, le nombre de cycles, les constantes  $Q$ ,  $a$  et  $\beta$ . Il existe plusieurs variantes de *L'OCF*, dont la version *AntColony System* qui représente la version la plus évoluée de la méta-heuristique. Ses principales particularités sont la mise-à-jour de la matrice de phéromone à l'aide de la meilleure fourmi de chaque cycle, l'utilisation d'une liste de candidats et une procédure de mise-à-jour locale pseudo-proportionnelle au niveau de la règle de transition.

L'algorithme de colonies de fourmis a été proposé pour la première fois pour résoudre le problème du voyageur de commerce [40- 43], il se base sur trois phases essentielles:

- La construction du trajet de chaque fourmi.
- La distribution de phéromones sur le trajet de chaque fourmi.
- Evaporation des pistes de phéromones.

## Chapitre 3: Méthodes d'Optimisation

L'algorithme de colonies de fourmis représente le schéma général pour le problème du voyageur de commerce (TSP: Traveling Salesman Problem). Il est à noter qu'à part le problème du voyageur de commerce, l'algorithme de colonies de fourmis a été appliqué avec succès sur d'autres problèmes d'optimisation comme: les problèmes des tournées de véhicules, le problème d'affectation quadratique...etc.

### **Avantage :**

- Très grande adaptabilité.
- Parfait pour les problèmes d'optimisation des chemins.
- Originalité d'application.

### **Inconvénients:**

- Un état bloquant peut arriver, mais on peut y remédier par un bon choix des paramètres.
- Temps d'exécution parfois long.

### **3.5. Optimisation d'Essaim des chats (Cat Swarm Optimization CSO) :**

Chaque chat dans l'essaim peut être considéré comme la solution ASA candidat. Il ya deux modes de recherche, à la recherche et de suivi, pour chaque chat. Pendant le processus de recherche, les chats sont choisis au hasard à partir de l'essaim et de leurs drapeaux sont mis à la recherche de mode ou de traçage. Cette opération de sélection est basée sur un paramètre MR. En CSO, ces deux modes de fonctionnement sont modélisés mathématiquement pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes.

#### **3.5.1. Mode de recherche (Seeking Mode):**

Le mode de recherche est utilisé pour modéliser le chat pendant une période de repos, mais être attentif en regardant autour de son environnement pour son prochain mouvement. Il contient essentiellement les éléments suivants (facteurs fondamentaux):

- Cherchant zone de mémoire (SMP),
- Cherchant intervalle de dimension choisie (SRD),
- Chiffres de dimension à changer (CDC),
- la position de l'auto examen (CPS).

Le SMP indique le nombre de copies d'un chat produites dans le mode de recherche. SRD déclare la ration mutative pour les dimensions sélectionnées. Alors que dans la recherche de mode, si une dimension est sélectionnée pour la mutation, la différence entre les anciennes et nouvelles valeurs peut ne pas être hors de portée. La CDC est le nombre de dimensions d'être changé. Le CPS est une variable booléenne valeur, qui représente si le point où le chat est déjà debout sera l'un des points candidats pour passer à.

## Chapitre 3: Méthodes d'Optimisation

Le mode de\_recherche\_peut être décrit comme suit :

**Étape 1.** Pour la solution ième (chat), faire des copies SMP.

**Étape2.** Basé sur le paramètre CDC, mettre à jour la position de chaque copie en ajoutant au hasard ou en soustrayant pourcentages SRD la valeur de position actuelle.

**Étape 3.** Calculer, les valeurs de conditionnement physique de toutes les copies.

**Étape 4.** Sélectionnez le meilleur candidat des copies SMP que la position du chat ième

### 3.5.2. Mode de traçage (Tracing Mode) :

Le mode de traçage correspond à une technique de recherche locale pour le problème d'optimisation [7]. Dans ce mode, un chat chasse la cible selon sa propre vitesse. L'opération de traçage est semblable au mouvement de particules dans PSO. En traçant modèle, chaque chat un vecteur de position (X) et un vecteur de vitesse (V). Pendant le processus de recherche, un chat se déplace selon les équations suivantes :

$$Vid = w \cdot Vid + c \cdot r \cdot (Pg_{id} - X_{id}) . \quad (3-6)$$

$$X_{id} = X_{id} + Vid \quad (3-7)$$

Vid: Est la vitesse du chat ième sur la dimension SRD,

Xid : Est la position du chat ième sur la dimension SRD,

Pgd: Est la dimension dth de la meilleure position globale.

Le paramètre w est la masse d'inertie,

C : Est la constante d'accélération,

R: Est un nombre aléatoire avec la plage de [0, 1].

Les étapes principales du CSO sont décrits comme ci-dessous

**Étape 1:** générer aléatoirement N chats (solutions) dans l'essaim, et de calculer leurs valeurs de fitness. Cette opération consiste à l'initialisation de positions et les vitesses de tous les chats.

**Étape 2.** Sélectionnez le meilleur chat (avec la meilleure valeur de remise en forme) que le Pg.

**Étape 3.** Selon le rapport de mélange (MR), les chats sont choisis au hasard à partir de l'essaim, et leurs drapeaux sont mis à la recherche de mode ou de traçage.

**Étape 4.** Pour chaque chat, si son drapeau est le mode cherche, mener le processus de mode de recherche (conformément à la section 1); autrement exécuter l'opération de mode de traçage (conformément à la section 2).

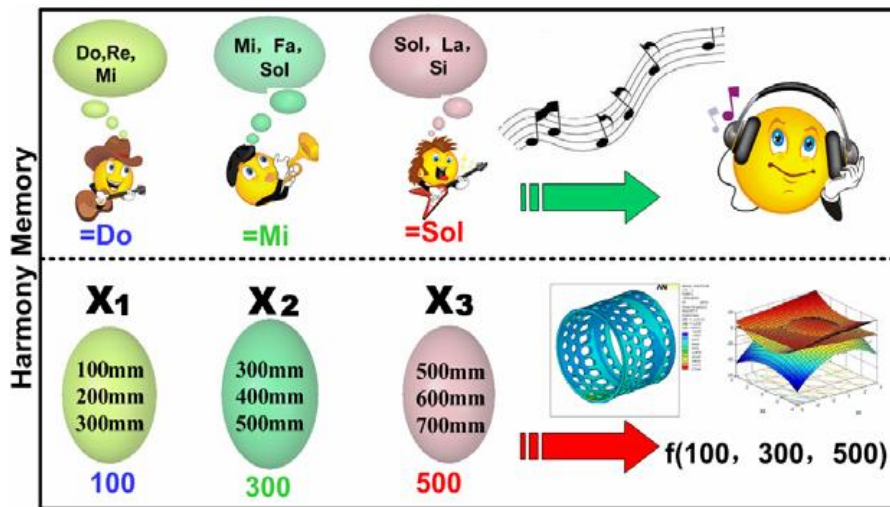
**Étape 5.** Calculer les valeurs de fitness de tous les chats.

**Étape 6.** Mise à jour Pg, si possible.

**Étape 7.** Si la condition d'arrêt est satisfait, mettre fin à l'algorithme et la sortie les résultats; sinon, passez à l'étape 3.

### 3.6. Optimisation par l'harmony search (HS)

L'harmony search (HS) est un algorithme métaheuristique, imitant le processus d'improvisation des musiciens. Dans le processus, chaque musicien joue une note pour trouver une meilleure harmonie avec l'ensemble. De même que, dans les processus d'optimisation, chaque variable de décision prend une valeur de façon à avoir une meilleure combinaison (vecteur) de l'ensemble.



L'harmony search (HS) repose sur cinq (05) étapes :

- 1- Initialiser le problème et les paramètres de l'algorithme
- 2- Initialiser la mémoire de l'harmonie (Harmony memory : HM)
- 3- Improviser une nouvelle harmonie
- 4- Faire la mise à jour de la mémoire de l'harmonie (HM)
- 5- Atteindre le critère d'arrêt

#### 3.6.1. Initialisation:

Soit la fonction objective  $f(x)$  suivante :

Minimiser  $f(x)$

Avec  $x_i \in X_i, i=1,2, \dots, N$

Où :

$x_i$  : les variables de décision

$\mathbf{X}_i$  : l'intervalle des valeurs possibles que peut prendre les variables de décision

L'algorithme repose sur des paramètres suivants qui doivent être initialisés au démarrage de celui-ci :

- La taille de la mémoire de l'harmonie (Harmony Memory size : HMS) ou le nombre de vecteurs solution dans la mémoire.
- Harmony Memory considering rate (HMCR), un paramètre aléatoire dont la valeur détermine le taux de sélection du vecteur de solution de la mémoire.
- Pitch adjusting rate (PAR), un paramètre aléatoire dont la valeur détermine l'ajustement ou non du vecteur de solution choisi de la mémoire.
- Nombre d'improvisation (number of improvisations : NI), détermine le nombre d'itération qu'il faut effectuer pour trouver le meilleur vecteur de solutions.

### 3.6.2. Initialisation de la mémoire:

$$\text{HM} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} f(x^1) \\ f(x^2) \\ \vdots \\ f(x^{HMS-1}) \\ f(x^{HMS}) \end{matrix}$$

### 3.6.2. Improvisation :

Improvisation ou génération d'un nouveau vecteur de solution  $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$  est basée sur trois règles suivantes :

- Prendre en considération des vecteurs de solution contenus dans la mémoire.
- Ajustement du vecteur sélectionné de la mémoire avec un pas donné.
- Randomiser une sélection à partir des valeurs possibles.
- 

#### 1- Mise à jour de la mémoire :

On compare le mauvais vecteur contenu dans la mémoire avec celui généré dans l'étape précédente, si celui-ci est meilleur alors on le substitue par le mauvais. Cette comparaison est faite suite à l'évaluation du vecteur généré par la fonction objective.

#### 2- Atteindre le critère d'arrêt :

Tant que le nombre d'itération ou improvisation n'est pas atteint, on répète l'étape 3 et 4.

### 3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, les méthodes de résolution possibles d'un problème d'optimisation sont présentées. Ces méthodes de résolution sont extrêmement nombreuses. Elles sont basées sur des principes totalement différents, chacune explore et exploite l'espace de recherche selon des techniques qui lui sont propres. Ces méthodes peuvent être réunies en deux différents groupes: les méthodes déterministes et les méthodes non déterministes.

Nous avons constaté que les méthodes déterministes permettent d'aboutir à la solution optimale, mais elles prennent un temps de calcul énorme et d'espace mémoire requis. Cependant, résolvant des problèmes pratiques où aucune de ces hypothèses ne peut être rendue, les méthodes déterministes convergent souvent vers un des minimums locaux de la fonction objectif. L'optimisation avec des méthodes stochastiques est recommandée à cause de leur la capacité de trouver l'optimum global. L'optimisation avec des méthodes stochastiques est recommandée à cause de leur la capacité de trouver l'optimum global.

Ensuite nous avons présenté quelques méthodes méta-heuristiques qui visent à résoudre un large nombre de problèmes, les méta-heuristiques sont facilement adaptables et/ou hybridables dans le but d'obtenir les meilleurs résultats/performances possibles. Nous avons retenu les colonies de fourmis pour notre étude car cette méta heuristique est extrêmement performante dans de nombreux domaines. C'est une méthode très efficace lorsqu'il s'agit d'exploiter une zone de l'espace de recherche. D'autre part, elle s'adapte assez bien au problème posé. Pour l'évaluation de la fiabilité d'un système multi état, on utilise la méthode de la fonction universelle appelée technique d'Ushakov et les concepts de base des systèmes multi-états seront présentés dans le prochain chapitre.

### Bibliographie du Chapitre 3

- [1] H. Omessaad, "Contribution au Développement de Méthodes d'Optimisation Stochastiques. Application a la Conception des Dispositifs", Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lile, 2003.
- [2] E.H.L. AARTS, J.K. LENSTRA (Eds.), Local search in combinatorial optimization, John Wiley & Sons, 1997.
- [3] H. Hanaa, "Hybridations d'Algorithmes Méta-heuristiques en Optimisation Globale et leurs Applications", Thèse de Doctorat, Université Mohamed V Agdal, 2013.
- [4] Meziane. R, Optimisation de la structure d'un réseau de production d'énergie électrique et amélioration de sa performance, thèse de doctorat, USTO 2007.
- [5] D. Corne, M. Dorigo and F. Glover, editors, New Ideas in Optimization, McGraw-Hill, 11-32.
- [6] A. Benyamina, "Application des algorithmes de colonies de fourmis pour l'optimisation et la classification des images", Thèse de Doctorat, USTO, 2013.
- [7] F. Tangour et P. Borne, "Presentation of Some Méta-heuristics for the Optimization of Complex Systems", Studies in Informatics and Control, Vol. 17, No. 2, juin 2008.

- [8] L. Idoumghar, “ Meta-heuristiques Hybrides et leurs Applications“, Mémoire d'Habilitation a Diriger des Recherches, Université de Haute Alsace, 2012.
- [9] J. Dipama, “Optimisation Multi-Objectif Des Systèmes Energétiques“, Thèse de Doctorat, Université de Montréal, Canada, 2010.
- [10] Jin-Kao Hao, Philippe Galinier, Michel Habib, « Méta heuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes », Revue d'Intelligence Artificielle, Vol : No. 1999.
- [11] J. P. Chrétien-Goni, “ Heuristique“, Encyclopædia Universalis, 2005.
- [12] E. G. Talbi, “ Méta-heuristics“, From Design to Implementation, Wiley, 2009.
- [13] C. Papadimitriou et K. Steiglitz, “Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity“, Prentice-Hall, 1982.
- [14] H. Alkhatib, “Etude de la stabilité aux Petites Perturbations dans les Grands Réseaux Electriques : Optimisation de la Régulation par une Méthode Méta-heuristique“, Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, France, 2008.
- [15] L.Slimani, “Contribution à l'application de l'optimisation par des méthodes méta-heuristiques à l'écoulement de puissance optimal dans un environnement de l'électricité déréglé“, Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2009.
- [16] Méta heuristique, Wikipédia encyclopédie, 20 décembre 2005.
- [17] N. Monmarché, Algorithmes de fourmis artificielles : applications à la classification et à l'optimisation, thèse de doctorat, l'Université de Tours, le 20 décembre 2000.
- [18] L. Jourdan, “Méta-heuristiques Coopératives : du Déterministe au Stochastique“, Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université Lille I, 2010.
- [19] J. Dreo, A. Petrowski, P. Siarry et E. Taillard, Métaheuristiques pour l'optimisation difficile, Eyrolles, 2003.
- [20] L. Idoumghar, “ Meta-heuristiques Hybrides et leurs Applications“, Mémoire d'Habilitation a Diriger des Recherches, Université de Haute Alsace, 2012.
- [21] S., Martello S., Osman I.H., Roucairol C. (eds.) Meta- Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization, Kluwer, Boston, 1999.
- [22] D. Meignan, “Une Approche Organisationnelle et Multi-Agent pour la Modélisation et l'Implantation de Méta-heuristiques“, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.
- [23] V. Barichard, “ Approches Hybrides pour les Problèmes Multi-objectifs“, Thèse de Doctorat, Université d'Angers.
- [24] A. Assadi-Haghi, “ Contribution au Développement de Méthodes d'Optimisation Structurelle pour la Conception Assistée par Ordinateur de Composants et de Circuits Hyperfréquences“, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2007.
- [25] C. Papadimitriou, “The Complexity of Combinatorial Optimization Problems“, Thèse de Doctorat, Princeton, 1976.
- [26] S. Noël, “Méta-heuristiques Hybrides pour la Résolution du Problème d'Ordonnancement de Voitures dans une Chaîne d'Assemblage Automobile“, Thèse de Doctorat, Université du Québec, 2007.
- [27] H. Hanaa, “Hybridations d'Algorithmes Méta-heuristiques en Optimisation Globale et leurs Applications“, Thèse de Doctorat, Université Mohamed V Agdal, 2013.

- [28] A. Berkani, "Méta-heuristique Hybride Réseaux de Neurones Artificiels-PSO du Recuit Simulé pour la Commande d'un Procédé Industriel Non-linéaire", Thèse de Magistère, Université de Batna, 2013.
- [29] J. K. Hao, R. Dorneet P. Galinier, "Tabu Search for Frequency Assignment in Mobile Radio Networks". *Journal of Heuristics*, Vol. 4, pp. 47-62, Juin 1998.
- [30] M. Ouzineb, "Heuristiques Efficaces pour l'Optimisation de la Performance des Systems Séries-Parallèles", Thèse de Doctorat, Université de Montréal, 2009.
- [31] F. Glover et M. Laguna, " Tabu Search", Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [32] J. K. Hao, R. Dorne et P. Galinier, "Tabu Search for Frequency Assignment in Mobile Radio Networks". *Journal of Heuristics*, Vol. 4, pp. 47-62, Juin 1998.
- [33] S. Chen, S. Smith., Commonality and genetic algorithms. Technical Report CMU-RITR- 96-27, The Robotic Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 1996.
- [34] Algorithmes génétiques, Wikipedia, encyclopédie, 20 décembre 2005.
- [35] S. Chen, S. Smith., Commonality and genetic algorithms. Technical Report CMU-RITR- 96-27, The Robotic Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 1996.
- [36] S., Martello S., Osman I.H., Roucairol C. (eds.) *Meta- Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, Kluwer, Boston, 1999.
- [37] V. Barichard, " Approches Hybrides pour les Problèmes Multi-objectifs", Thèse de Doctorat, Université d'Angers.
- [38] O. Roux, *La mémoire dans les algorithmes à colonie de fourmis : applications à l'optimisation et à la programmation automatique*, thèse de doctorat de l'Université du Littoral Cote d'Opale, 2001.
- [39] V. Maniezzo, M. Dorigo and A. Colorni, The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, 26(1) :29-41, 1996.
- [40] L. Bianchi, L.M. Gambardella, M.Dorigo. An ant colony optimization approach to the probabilistic traveling salesman problem. In *Proceedings of PPSN-VII, Seventh Inter17 national Conference on Parallel Problem Solving from Nature Science*. Springer Verlag, Berlin, Germany, 2002.
- [41] J.Dreo, A. Pétrowski, P. Siarry et T. Eric, "Méta-heuristiques pour l'Optimisation Difficile", Editions Eyrolles, 2003.
- [42] D. Maignan, "Une Approche Organisationnelle et Multi-Agent pour la Modélisation et l'Implantation de Méta-heuristiques", Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.

# CHAPITRE 4

## Fiabilité des Systèmes Multi-États

### 4.1. Introduction

Les réseaux électriques modernes sont caractérisés par leurs structures complexes. La plus part d'entre eux assurent leurs fonctions selon différents niveaux de charges [1, 2,3]. Lorsque le système fonctionne normalement, la capacité nominale de production est disponible. De plus chaque élément possède sa propre capacité de disponibilité en assurant sa tâche à un certain niveau. L'équilibre est obtenu lorsque la charge est totalement satisfaite. Dans le cas contraire, une situation de déséquilibre naît et le système de production se trouve dans l'incapacité de couvrir la demande. Deux cas sont envisageables.

- Le système est totalement défaillant.
- Le système fonctionne avec une capacité de production réduite.

La seconde configuration à laquelle nous allons nous intéresser s'inscrit avec les systèmes possédant différents niveaux de performances appelés systèmes multi états (Multi State System).

### 4.2. Evaluation de la Fiabilité des Systèmes Binaires

Avant d'aborder les systèmes multi -états, nous allons présenter les différentes Méthodes et techniques utilisées pour estimer la fiabilité des systèmes binaires à deux états de fonctionnement. Ceux-ci représentent un cas particulier des systèmes multi -états dont les éléments ne fonctionnent pas avec des niveaux de performance dégradés entre les deux états extrêmes « marche » et « arrêt », et évidemment les composants électroniques sont l'exemple le plus illustratif à cet égard [3,4,5].

Certes, il y a des méthodes plus efficaces, plus complexes, plus précises, plus générales ou plus rapides que d'autres, mais chacune de ces méthodes a ses avantages et ses inconvénients, et pour chaque type de structure l'une peut paraître plus performante que

l'autre. Pour concrétiser ces modèles d'évaluation de la disponibilité, nous allons déterminer la technique la plus adaptée pour chaque type de structure.

On trouve dans la littérature plusieurs travaux qui présentent d'une façon générale les différentes méthodes et techniques qui ont été développées pour traiter les problèmes de la fiabilité des systèmes binaires, ensuite ces méthodologies ont été évoluées et adaptées pour résoudre une large variété de problèmes.

### 4.2.1. Modèle Binaire

Ce modèle utilise toujours la loi binaire 1 ou 0, on peut étudier le modèle sous deux aspects :

Déterministe ou stochastique. Dans l'aspect déterministe, l'état du système ne dépend que des états actuels des composants du présent et dont dans le temps est considéré fixe. Soit  $X_i$  la variable binaire du composant  $\Phi$  et la fonction de structure du système on a :

$$\phi = \begin{cases} 1 & \text{si le système fonctionne} \\ 0 & \text{si le système est en panne} \end{cases} \quad \text{Avec } i \in (1, 2, 3, \dots, n) \text{ et } n \text{ désignant le nombre de composant.}$$

Comme on l'état du système dépend de l'état de ses composants alors on pose :

$$\phi = \phi(X) = \phi(X_1, \dots, X_n) \text{ avec } X = (X_1, \dots, X_n).$$

Dans l'aspect stochastique, les composants d'un système sont aléatoirement indépendants et l'état  $X_i$  d'un composant est lui-même une variable. On a [1, 5]:

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{si le composant fonctionne} \\ 0 & \text{si le composant est en panne} \end{cases}$$

On a  $P[X_i] = p_i$  avec  $i \in (1, 2, \dots, n)$  et  $p_i$  la fiabilité du  $i$ ème composant.

On note qu'un système binaire est dit cohérent si :

- Tous les éléments du système sont critiques et les défauts de tous les éléments conduisent aux défauts du système entier,
- La fonction de structure est monotone.

### 4.3. Evaluation de la Fiabilité des Systèmes Multi-Etats

Dans cette section, nous allons traiter brièvement les différentes approches et techniques d'évaluation de la fiabilité des systèmes multi-états dont les caractéristiques de fonctionnement sont soumises à la dégradation et aux défaillances.

Comme nous avons vu, il existe de nombreuses techniques probabilistes et algorithmiques développées par les scientifiques et les chercheurs pour modéliser et évaluer la fiabilité des systèmes binaires. Toutefois, une large gamme de ces méthodes ne peut être appliquée aux systèmes multi-états. La principale difficulté dans l'analyse de la fiabilité de

ce type de systèmes est la dimension de celui-ci où les éléments de ce dernier peuvent avoir de nombreux états différents, cela alourdit les algorithmes et nécessite un temps de calcul énorme pour la résolution du problème. Depuis 1998, les deux chercheurs G.Levitin&A.Lisnianski ont publié plusieurs travaux dans cette perspective, leurs ouvrages étaient dédiés à l'analyse, l'évaluation et l'optimisation de la disponibilité des SME. Ils ont énormément amélioré des approches qui simplifient les modèles d'évaluation en réduisant considérablement le temps de calcul [4,5].

#### 4.3.1. Modèle Multi-Etats

Un système multi-états est un système qui peut fonctionner avec des niveaux de performance dégradés entre le fonctionnement normal et l'état de panne Figure 4.1. Un élément est une entité du système qui ne peut pas être décomposée en d'autres éléments. Cette entité elle-même peut avoir plusieurs états de fonctionnement. Donc un SME peut être constitué d'éléments binaires ou d'éléments multi-états. Dans ce rapport nous allons nous intéresser spécialement aux SME à composants multi-états. La figure ci-dessous représente un schéma fonctionnel d'un composant ayant k états [5, 7,8].

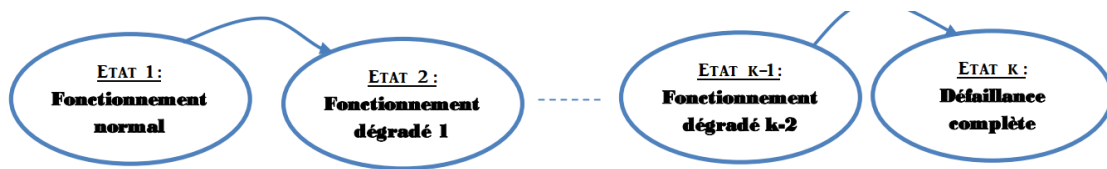


Figure 4.1 : Diagramme fonctionnel d'un composant multi-états

#### 4.3.2. Modèles Mathématiques des SME

Pour analyser le comportement d'un SME il faut connaître les caractéristiques de ses composants. Chaque élément  $i$  d'un réseau peut avoir  $K_i$  états différents, chaque état correspond à un niveau de performance. Les différents niveaux de performance sont représentés par l'ensemble [2, 3, 9, 10].

$$g_i = \{g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{iki}\}$$

$$J = \{1, 2, \dots, k_i\}$$

A chaque instant  $t \geq 0$ , la performance de l'élément  $i$  notée  $G_i(t)$  est une variable aléatoire qui prend ses valeurs dans l'ensemble  $g_i$ .

Les probabilités associées aux états de l'élément  $i$  avec  $J = \{1, 2, \dots, k_i\}$  sont représentées par l'ensemble :

$$P_i(t) = \{p_{i1}(t), p_{i2}(t), \dots, p_{ik}(t)\} \tag{4.1}$$

$$\text{Ou : } p_{ij} = \Pr \{G_i(t) = g_{ij}\}$$

Le niveau de performance d'un système à  $n$  composants multi-états est déterminé à partir des niveaux de performance de ses éléments. Donc le système global peut avoir  $K$

différents états. Le niveau de performance  $G(t)$  du système est une variable aléatoire qui prend ses valeurs dans l'ensemble figure 4.2.

$$g = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$$

L'espace des combinaisons possibles des niveaux de performance des  $n$  éléments du système s'écrit :

$$E^n = \{g_{11}, g_{12}, \dots, g_{1k_1}\} \times \{g_{21}, g_{22}, \dots, g_{2k_2}\} \times \dots \times \{g_{n1}, g_{n2}, \dots, g_{nk_n}\} \quad (4.2)$$

Le produit cartésien des performances de les éléments qui le constituent et

$$E = \{g_1, g_2, \dots, g_k\} \text{ Étant l'ensemble des valeurs des performances du système entier.}$$

On pourra alors écrire la transformée :

$$\phi(G_1(t), G_2(t), \dots, G_n(t)): E^n \rightarrow E$$

Qui appelée la fonction de structure du système multi-état.

La performance de sortie d'un système entier à tout instant  $t$  est :

$$G(t) = \phi(G_i(t)) = \phi(G_1(t), G_2(t), \dots, G_n(t)). \quad (4.3)$$

Où  $G(t)$  représente la performance des éléments du système et  $i = 1, 2, \dots, n$ .

**Le seuil de performance requis noté  $W(t)$**  (ou la demande requise) détermine le flux minimal qui doit être généré par le système au nœud de sortie. A partir de ce seuil, l'ensemble des états du système  $g$  peut être divisé en deux sous-ensembles disjoints [4,9,10,].

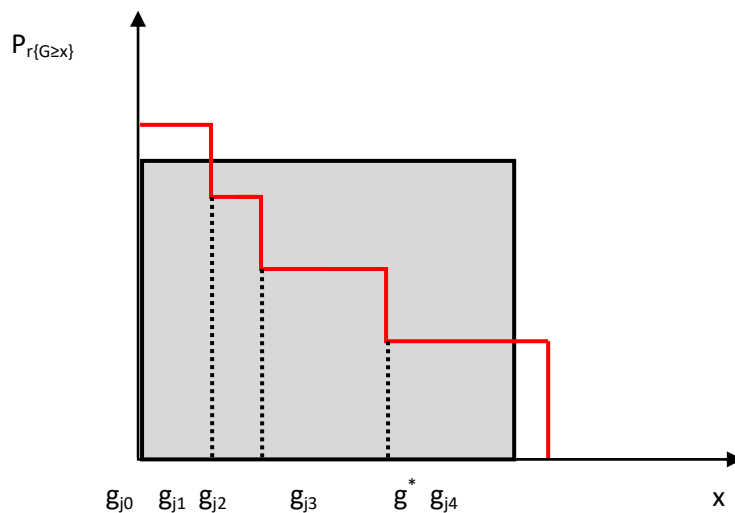


Figure 4.2: Courbes de représentation cumulatives de multi-états

$$\dot{g} = \{\text{etatacceptables}\} \text{ et } \bar{g} = \{\text{etatinacceptablesavec}\dot{g} \cup \bar{g} = g.$$

Le premier ensemble regroupe les états du système qui permettent de fournir un flux supérieur ou égal à la demande requise :

$$\bar{g} = \{ G(t) \in \mathcal{G} / G(t) \geq W(t) \}. \quad (4.5)$$

Le deuxième ensemble regroupe les états du système qui génèrent un flux inférieur à la demande :

$$g = \{ G(t) \in \mathcal{G} / G(t) < W(t) \}. \quad (4.6)$$

La disponibilité d'un système est la capacité qu'il soit dans ses états acceptables à un instant  $t$ . A partir de la formule (4.5), la disponibilité peut s'écrire comme suit:

$$A(t) = \sum_{G_i(t) \in \bar{g}} \Pr \{ G(t) \geq W(t) \} = \sum_{G_i(t) \in \bar{g}} q_i(t). \quad (4.7)$$

Tel que  $q_i(t)$  est la probabilité d'avoir la combinaison qui assure le niveau de performance.

$G_i(t)$ . Si nous supposons que  $G_i(t) = \emptyset(g1i(t), g2i(t), \dots, gni(t))$ . Alors  $q_i(t)$  s'écrit :

$$q_i(t) = \prod_{j=1}^n p_{ij} \quad (4.8)$$

L'étude de la fiabilité des SME a été abordée dans le milieu des années 70 et s'est avérée complexe [6,7, 8, 9, 10, 11]. Le comportement des SME et de leurs composants sont modélisés par plus de deux états avec des niveaux de performances différents associés à chacun de ces états. Dans la littérature, les configurations structurelles des SME sont variées. Plusieurs travaux étudient les configurations multi-états, séries, parallèles et en pont [2,4,12]. Pour ces systèmes, les principaux indices de la fiabilité ont leur caractérisation qui diffère des définitions classiques. Considèrent un SME comme un système pouvant avoir plusieurs niveaux de performance et sa fiabilité  $R_{SME}(t)$  comme une mesure de sa capacité à satisfaire une demande donnée [13]. Les principales méthodes d'évaluation des performances des SME abordées dans la littérature sont essentiellement basées sur trois approches l'approche des processus stochastiques (principalement l'approche de Markov), la simulation Monte-Carlo et la fonction génératrice moment universelle (UMGF) [4, 5,14,24 ].

#### 4.4. Méthodes d'Evaluation des Performances des Systèmes Multi-Etats

Les systèmes multi-état qu'on beaucoup dans la littérature sont les systèmes de production d'électricité ou la performance des composantes est caractérisée par la capacité de production électrique, et les systèmes informatiques ou la performance des composantes est caractérisée par la vitesse de traitement des donnés. Pour un système SME, l'effet de panne est différent selon chaque composante avec des taux de performances différents. Cela rend l'analyse de la fiabilité pour un SME très compliquée par rapport à un système binaire.

L'analyse de la fiabilité des systèmes multi-état s'avère plus complexe que celle des systèmes binaire [15,16,17] plusieurs méthodes d'évaluation des performances des SME ont

été développées ces dernières années, la plupart de ces méthodes sont basées sur la théorie des systèmes binaires pour les prolonger pour les SME. par exemple les approche markovienne [18,24] sont utilisées dans [18,19,20] pour calculer la fiabilité des systèmes multi-état. Puisque la méthode de Markov peut seulement s'appliquer a des SME de petite taille. Il est nécessaire de développer de nouvelles approches capables de calculer la fiabilité de SME de grandes tailles, et qui soit plus efficaces que les techniques traditionnelles.

En 1986 Ushakov a développé une approche d'évaluation de la fiabilité des SME basée sur la technique de la fonction génératrice universelle (FGU). La FGU constitue une extension de la fonction de génération des moments classique. L'approche de levitin [21,22,23] basée sur la FGU s'avère rapide, ce qui permet son utilisation dans des problèmes difficiles d'optimisation des SME. Dans la démarche d'évaluation des indices de fiabilité, les problèmes traités par levitin considèrent que les probabilités d'occurrences sont préalablement connues. Dans les littératures, les configurations structurelles des SME sont variées .plusieurs travaux étudient les configurations multi-états unitaires série parallèles [22, 23,24].

### 4.4.1. Méthodes Existantes

#### 4.4.1.1. La Méthode de Monte-Carlo

On appelle méthode de Monte-Carlo toute méthode visant à calculer une valeur numérique, et utilisant des procédés aléatoires, c'est-à-dire des techniques probabilistes. Le nom de ces méthodes fait allusion aux jeux de hasard pratiqués à Monte-Carlo. La méthode de Monte-Carlo est un algorithme de recherche aléatoire qui cherche l'optimum d'une fonction en engendrant une suite aléatoire de nombres en fonction d'une loi uniforme. La méthode de Monte-Carlo fournit des solutions approximatives à une variété de problèmes mathématiques [25].

Dans les années 1970, le développement de la théorie de la complexité a fourni des preuves rationnelles pour l'utilisation de la méthode de Monte-Carlo. Cette théorie de la complexité a identifié une classe de problèmes pour laquelle le temps de calcul augmente au mieux d'une façon exponentielle en fonction du nombre de variables N. La question était alors : la méthode de Monte-Carlo peut-elle approcher une solution à ce type de problème avec une précision statistique donnée, moyennant un temps de calcul polynomial ? En 1985, Karp a prouvé cette dernière propriété pour la fiabilité de l'estimation de la méthode de Monte-Carlo sur un réseau dont les terminaux tombent en panne d'une façon aléatoire. En 1989, Dyer a utilisé la méthode de Monte-Carlo pour estimer le volume d'un corps convexe dans un espace à M dimensions [26, 27,28].

#### 4.4.1.2. Méthode de Markov (Processus Stochastique)

Une chaîne de Markov est un type particulier de processus stochastique qui vérifie deux conditions, en considérant X comme une variable aléatoire :

à l'instant t, l'état du processus ne dépend que de son état à l'instant t-1 :

$$\Pr(X_t = j | X_1 = i_1, X_2 = i_2, \dots, X_{t-1} = i_{t-1}) = \Pr(X_t = j | X_{t-1} = i_{t-1}) \quad (4.9)$$

La probabilité conditionnelle de passage d'un état i à un état j ne varie pas avec le temps :

$$\forall t, 1 < t \leq N, \Pr(X_t = j | X_{t-1} = i) = C \text{ (constante)} \quad (4.10)$$

En général, la méthode de Markov s'articule essentiellement autour de deux variables stochastiques qui sont entre autres l'état  $S$  d'un système et la période d'observation  $t$  du comportement de ce système. Tout modèle de Markov est régi par un ensemble de probabilités  $P$ , qui définissent les probabilités de transition d'un état  $i$  vers un état  $j$ ; et qui sont indépendants des états précédents sauf du dernier [29,31]. Dans le domaine de la fiabilité, la combinaison usuellement utilisée pour représenter un système selon les modèles de Markov, est celle où le temps  $t$  est continu et l'état  $S$  est discret. La chaîne de Markov est le modèle le plus fréquemment utilisé. La chaîne de Markov permet de déterminer la fiabilité globale ou structurelle d'un système en tenant compte des possibilités de renouvellement de ce système [19]. Elle est, en outre, utilisée pour décrire le comportement dynamique d'un système [18]. Dans cette modélisation (chaîne de Markov), un système est caractérisé par ses états opérationnels et de défaillance. Ces états sont représentés par des nœuds. Les arcs correspondent aux probabilités de transition. La transition d'un état opérationnel vers un état de défaillance est définie dans l'intervalle  $[t, t+\Delta t]$  par la probabilité  $\lambda(t)\Delta t$  où  $\lambda(t)$  est le taux de défaillance. Par ailleurs, la transition d'un état de défaillance vers un état opérationnel est définie dans l'intervalle  $[t, t+\Delta t]$  par la probabilité  $\mu(t)\Delta t$  où  $\mu(t)$  est le taux de réparation. L'analyse de la fiabilité consiste, de ce fait, à calculer les probabilités d'état d'un système et, de là, à mesurer la fiabilité de ce système [29, 30,31, 32].

### 4.4.1.2.1. **Modèle de Markov pour l'Evaluation de la Fiabilité des Eléments Multi-états**

Selon le modèle générique du SME tout élément  $j$  du système peut avoir  $k_j$  différents états correspondant aux taux de performance, représentés par l'ensemble  $\mathbf{g}_j = \{g_{j1}, \dots, g_{jkj}\}$ . L'état actuel de l'élément  $j$ , et donc la valeur courante du taux de performance de l'élément  $G_j(t)$  à tout instant  $t$  sont des variables aléatoires.  $G_j(t)$  prend des valeurs de  $\mathbf{g}_j : G_j(t) \in \mathbf{g}_j$ . Par conséquent pour l'intervalle de temps  $[0, T]$ , ou  $T$  est la période d'opération du SME, le taux de performance de l'élément  $j$  est défini comme un processus stochastique.

Dans cette sous-section, lorsque nous traitons un seul élément multi-états, nous pouvons mettre l'index  $j$  pour la désignation d'un ensemble de taux de performance de l'élément. Ainsi, cet ensemble est noté  $\mathbf{g} = \{g_1, \dots, g_k\}$ . Nous supposons également que cet ensemble est ordonné de sorte que  $g_{i+1} \geq g_i$  pour tout  $i$ .

Les éléments peuvent être divisés en deux groupes. Les éléments qui sont observés seulement jusqu'à ce qu'ils soient défaillants, appartenant au premier groupe. Ces éléments ne peuvent pas être réparés, ou la réparation n'est pas rentable, Ce sont des éléments non réparables. Les éléments qui sont réparés en cas de défaillance et dont les cycles de vie consistent en périodes d'exploitation et de réparation appartenant au deuxième groupe. Dans les sous-sections suivantes, seule la deuxième partie est abordée.

### 4.4.1.2.2. **Les Eléments Multi-Etats Réparables**

Le modèle plus général d'un élément multi-états est le modèle avec réparation.



Nous supposant que le processus commence à partir du meilleur état  $k$  avec un taux de performance maximal  $g_k$ . Par conséquent, les conditions initiales sont.

$$P_k(0) = 1, P_{k-1}(0) = P_{k-2}(0) = \dots = P_1(0) = 0 \quad (4.12)$$

Avec les conditions initiales (4.12). En résolvant ce système on obtient les probabilités d'état  $P_i(t), i = 1, \dots, k$ .

Quand  $F(g_i, w) = g_i - w$  pour le niveau de demande constant  $g_i < w \leq g_{i+1}$ , les états acceptables ou la performance de l'élément est au-dessus de niveau  $g_i$  sont  $i+1, \dots, k$ . Ainsi, la disponibilité instantanée est

$$A_i(t) = \sum_{e=i+1}^k P_e(t) \quad (4.13)$$

La détermination de la fonction de fiabilité pour les éléments réparables multi-états est basée sur la découverte de la probabilité de l'événement lorsque l'élément entre dans l'ensemble des états inacceptables la première fois.

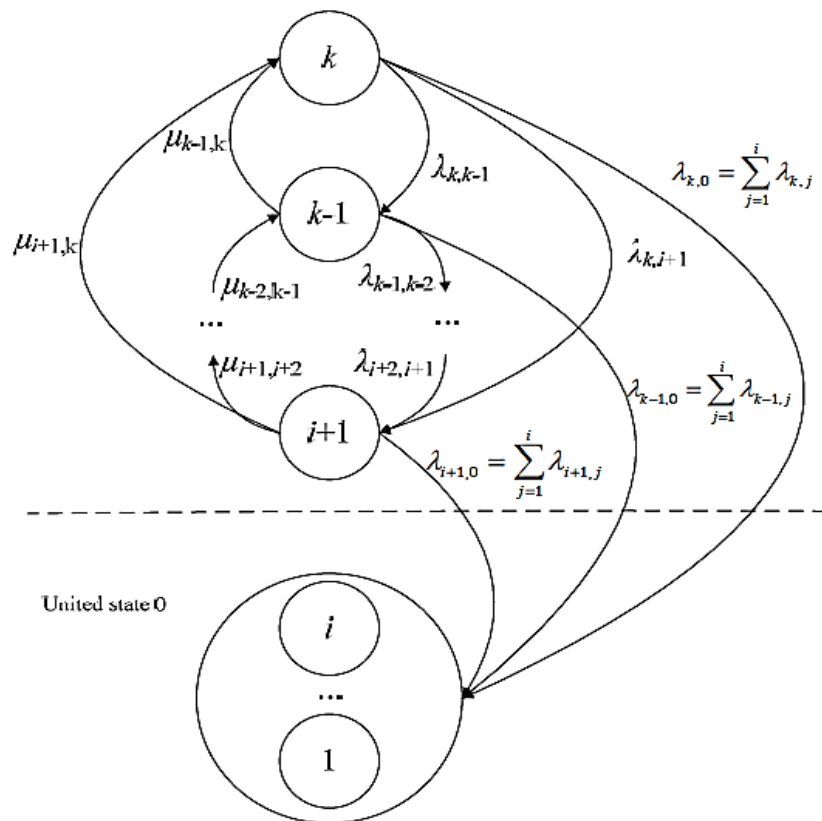


Figure 4.4 Diagramme état-transition pour la détermination de la fonction de fiabilité  $R_i(t)$  pour élément réparable (pour un taux de demande constant  $w: g_i < w < g_{i+1}$ )

Afin de trouver la fonction de fiabilité de l'élément  $R_i(t)$ , pour la demande constante  $w(g_i < w \leq g_{i+1})$ , un modèle de Markov supplémentaire doit être construit. Tous les états  $1, 2, \dots, i$  de l'élément correspondant aux taux de performance qui sont inférieurs à la demande  $w$  devrait être réunis dans un état absorbant. Cet état absorbant peut être considéré maintenant comme l'état 0 et tous les réparations qui ramènent l'élément de cet état à l'ensemble des états acceptables devraient être interdites. Cela correspond à la réduction à zéro toutes les intensités de transition  $\mu_{0,m}$  pour  $m = i+1$ . Le taux de transition  $\lambda_{m,0}$  de tout état acceptable  $m$  ( $m > i$ ) à l'état absorbant unifié 0, et égal à la somme des taux de transition de l'état  $m$  à tous les états inacceptables (états  $1, 2, \dots, i$ )

$$\lambda_{m,0} = \sum_{j=1}^i \lambda_{m,j}, m = k, k-1, \dots, i+1 \quad (4.14)$$

Le diagramme d'état-transition pour le calcul de la fonction de fiabilité est présenté à la figure 4.4. Pour ce diagramme, la probabilité d'état  $P_0(t)$  caractérise la fonction de fiabilité de l'élément, car après la première entrée dans l'état absorbant 0, l'élément ne quitte jamais :  $R_i(t) = 1 - P_0(t)$ .

Le système d'équation différentielle pour déterminer la fonction de fiabilité prend la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_k(t)}{dt} = \sum_{e=i+1}^{k-1} \mu_{e,k} P_e(t) - P_k(t) \left( \sum_{e=i+1}^{k-1} \lambda_{k,e} + \lambda_{k,0} \right), \\ \frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{e=j+1}^k \lambda_{e,i} P_e(t) + \sum_{e=1}^{j-1} \mu_{e,j} P_e(t) - P_j(t) \left( \sum_{e=i+1}^{j-1} \lambda_{j,e} + \lambda_{j,0} + \sum_{e=j+1}^k \mu_{j,e} \right), \\ \text{pour } i < j < k \\ \frac{dP_0(t)}{dt} = \sum_{e=i+1}^k \lambda_{e,0} P_e(t) \end{array} \right. \quad (4.15)$$

En résolvant ce système dans des conditions initiales

$$P_k(t) = 1, P_{k-1}(0) = \dots = P_i(0) = P_0(0) = 0 \quad (4.16)$$

On obtient la fonction de fiabilité comme

$$R_i(t) = 1 - P_0(t) = \sum_{j=i+1}^k P_j(t) \quad (4.17)$$

Evidemment, les probabilités d'état finales pour le système (4.15) sont les suivants :

$$P_k = P_{k-1} = \dots = P_{i+1} = 0, P_0 = 1 \quad (4.18)$$

Parce que l'élément entre toujours l'état absorbant 0 quand  $t \rightarrow \infty$

Basé sur la fonction de fiabilité calculée  $R_i(t) = \sum_{j=i+1}^k P_j(t)$  on peut trouver le temps moyen ou première défaillance, lorsque la performance de l'élément chute pour la première fois sous le niveau de la demande  $w$ , ou  $g_i < w \leq g_{i+1}$

$$MTTF_i = \int_0^{\infty} R_i(t) dt \quad (4.19)$$

Une fois que les probabilités d'état,  $P_i$  ou  $P_i(t)$ , ont été calculé, des mesures de fiabilité sont généralement obtenues sur la base de ces probabilités.

**4.4.1.2.3. Exemple d'un Composant Multi-Etats Réparable**

Un générateur électrique qui a  $k = 4$  niveaux de performance possibles (capacité de production) :  $g_4 = 100 (MW)$  ,  $g_3 = 80 (MW)$  ,  $g_2 = 50 (MW)$  , et  $g_1 = 0 (MW)$ .

Le générateur a les taux de défaillances suivants :

$\lambda_{4,3} = 0.5 (ans)$  ,  $\lambda_{3,2} = 1 (ans)$  ,  $\lambda_{2,1} = 1.5 (ans)$  (pour les défaillances mineurs),

$\lambda_{3,1} = 2.5 (ans)$  ,  $\lambda_{4,2} = 3 (ans)$  ,  $\lambda_{4,1} = 10 (ans)$  (pour les défaillances majeurs)

Et les taux de réparation suivants :

$\mu_{3,4} = 0.01 (ans)$  ,  $\mu_{2,3} = 0.01 (ans)$  ,  $\mu_{1,2} = 0.02 (ans)$  (pour les réparations mineurs)

$\mu_{1,3} = 0.02 (ans)$  ,  $\mu_{2,4} = 0.02 (ans)$  ,  $\mu_{1,4} = 0.03 (ans)$  (pour les réparations majeurs)

La demande est constant  $w = 60 (MW)$ .

Nous voulons trouver des mesures de fiabilité telles que la disponibilité, la fonction de fiabilité et le délai moyen avant la première défaillance  $MTTF$ .

**Solution**

Le diagramme espace-état du générateur est présenté à la figure 4.5. Nous supposons que l'état initial est le meilleur état 4.

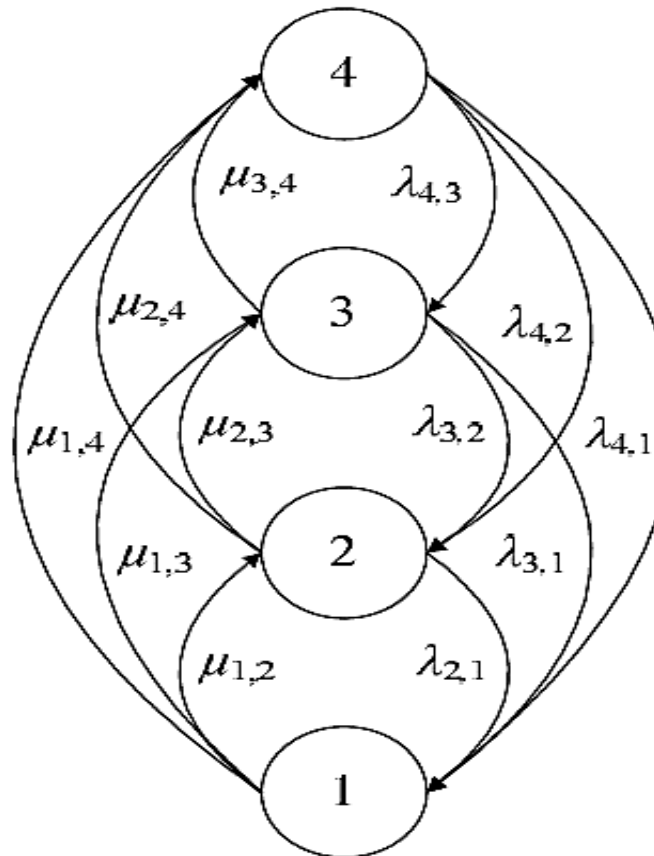


Figure 4.5 Diagrammes d'état-transition pour l'élément à quatre états avec défaillances et réparations mineures et majeures

Afin de trouver les probabilités d'état, le système suivant d'équations différentielles devrait être résolu:

$$\begin{cases} \frac{dP_4(t)}{dt} = -(\lambda_{4,3} + \lambda_{4,2} + \lambda_{4,1})P_4(t) + \mu_{3,4}P_3(t) + \mu_{2,4}P_2(t) + \mu_{1,4}P_1(t) , \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{4,3}P_4(t) - (\lambda_{3,2} + \lambda_{3,1} + \mu_{3,4})P_3 + \mu_{1,3}P_1(t) + \mu_{2,3}P_2(t) , \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{4,2}P_4(t) + \lambda_{3,2}P_3(t) - (\lambda_{2,1} + \mu_{2,3} + \mu_{2,4})P_2 + \mu_{1,2}P_1(t) , \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_{4,1}P_4(t) + \lambda_{3,1}P_3(t) + \lambda_{2,1}P_2(t) - (\mu_{1,2} + \mu_{1,3} + \mu_{1,4})P_1(t) . \end{cases} \quad (4-20)$$

Avec les conditions initiales  $P_4(0) = 1$ ,  $P_3(0) = P_2(0) = P_1(0) = 0$ .

La disponibilité instantanée de l'élément peut être obtenue pour différents niveaux de demande constante:

$$\begin{aligned} A_3(t) &= P_4(t), & \text{pour } g_3 < w \leq g_4 , \\ A_2(t) &= P_4(t) + P_3(t), & \text{pour } g_2 < w \leq g_3 , \\ A_1(t) &= P_4(t) + P_3(t) + P_2(t) = 1 - P_1(t), & \text{pour } g_1 < w \leq g_2 . \end{aligned} \quad (4-21)$$

Ces disponibilités instantanées sont présentées à la figure 4.6.

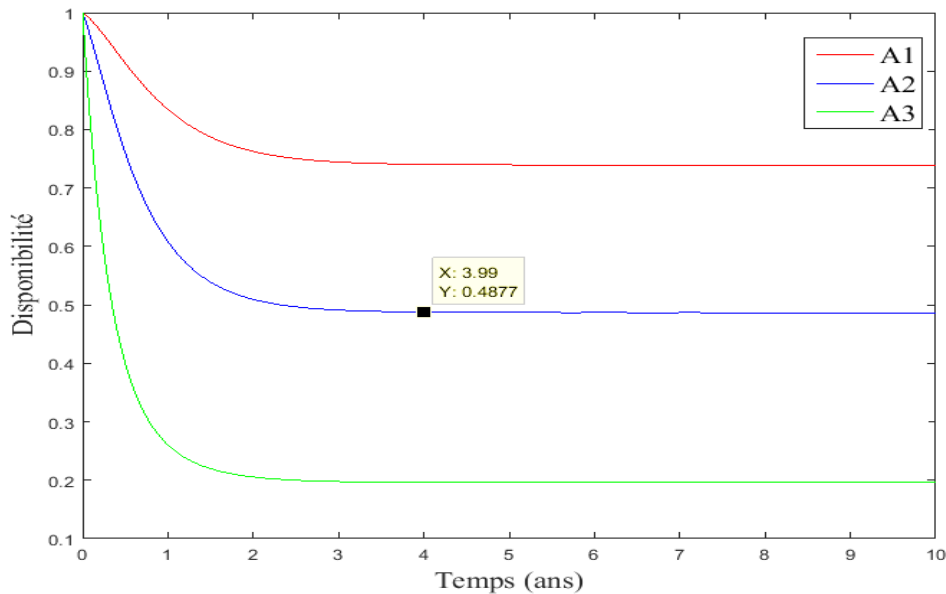


Figure 4.6 Disponibilité instantanée d'un élément à quatre états.

Pour la demande  $w = 60$  (MW) la disponibilité de l'élément sera la suivante :

$$A_w(t) = A_2(t)$$

Afin de trouver la fonction de fiabilité de l'élément  $R_w(t)$ , pour la demande constante  $w = 60$  (MW)  $g_2 < w \leq g_3$ , un modèle de Markov supplémentaire doit être construit. Les États 1 et 2 correspondant à des taux de performance inférieurs à la demande  $w$  devraient être réunis dans un état absorbant. Cet état absorbant peut être considéré maintenant comme l'état

0 et toutes les réparations qui ramènent l'élément de cet état à l'ensemble des états devraient être interdits. Cela correspond à la réduction à zéro des intensités de transition  $\mu_{0,3}$  et  $\mu_{0,4}$ . Les taux de transition entre les états acceptables 3 et 4 et l'état absorbant unifié 0 sont égaux à la somme des taux de transition correspondants entre ces états et les états inacceptables 1 et 2. Selon (4.7), nous obtenons  $\lambda_{4,0} = \lambda_{4,1} + \lambda_{4,2}$ ,  $\lambda_{3,0} = \lambda_{3,1} + \lambda_{3,2}$ .

Le diagramme espace-état pour le calcul de la fonction de fiabilité  $R_w(t)$  est présenté à la figure 4.7. Pour ce diagramme espace-état, la probabilité d'état  $P_0(t)$  caractérise la fonction de fiabilité de l'élément car après la première entrée dans l'état absorbant 0, l'élément ne le quitte jamais.

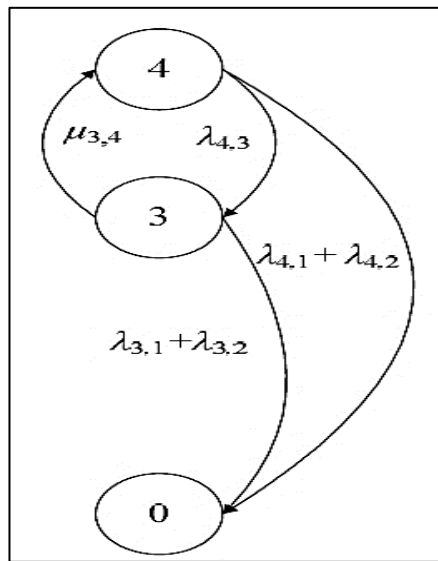


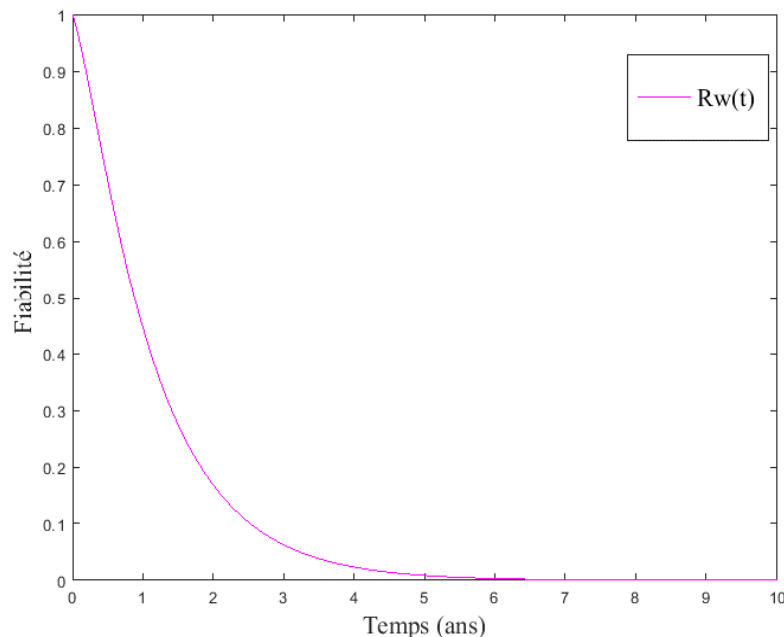
Figure 4.7 Diagramme état-transition pour la détermination de la fonction de fiabilité  $R_w(t)$ .

Le système d'équations différentielles pour déterminer la fonction de fiabilité de l'élément

Prend la forme:

$$\begin{cases} \frac{dP_4(t)}{dt} = -(\lambda_{4,3} + \lambda_{4,2} + \lambda_{4,1})P_4(t) + \mu_{3,4}P_3(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{4,3}P_4(t) - (\lambda_{3,2} + \lambda_{3,1} + \mu_{3,4})P_3(t) \\ \frac{dP_0(t)}{dt} = (\lambda_{4,1} + \lambda_{4,2})P_4(t) + (\lambda_{3,1} + \lambda_{3,2})P_3(t) \end{cases} \quad (4-22)$$

Résoudre ce système dans des conditions initiales  $P_4(0) = 1$ ,  $P_3(0) = P_0(0) = 0$  on obtient la fonction de fiabilité comme  $R_w(t) = 1 - P_0(t)$ . Cette fonction est présentée dans la figure 4.8.



Lorsque la fonction de fiabilité est connue, le délai moyen avant la première défaillance (une capacité inférieure à la demande  $w = 60$  (MW)) peut être trouvé en utilisant l'équation 4.19.

$$MTTF_w = \int_0^{\infty} R_w(t) dt \approx 1 \text{ (ans)} \quad (4 - 23)$$

#### 4.4.1.3. La Fonction Génératrice Universelle (UMGF).

##### 4.4.1.3.1. Système de Production Electro-Energétique.

Dans ce chapitre nous étudions la fiabilité couplée à la demande des systèmes séries-parallèles multi- états. Aucun système producteur n'est à l'abri de défaillances. Un système à Deux états (binaire) peut être soit opérationnel soit en défaillance totale. Cependant pour un système multi- états (SME) il existe deux types de pannes :

- a) Pannes qui causent l'arrêt total du système tout ou rien [0,1]
- b) Pannes qui causent une dégradation de la performance du système [0....1]

Les systèmes à défaillance partielles peuvent avoir plusieurs niveaux de performance. Ces systèmes sont appelés système multi-états (Multi State Systems). Les méthodes classiques sont inappropriées pour évaluer la fiabilité des systèmes SME [7, 8].

La fonction génératrice universelle (UMGF) a été développée et introduite par Ushakov [3]. Les principes de son application ont été formulés dans [4,7, 24]. Les aspects mathématiques de cette méthode sont entrepris dans [10] où est présentée comme une approche globale de génération de séquences figure 4.9. La fonction génératrice universelle (UMGF) est présentée comme une méthode très pratique dans les cas d'applications numériques [4,7]. Elle exige relativement peu de ressources informatiques pour évaluer les

indices de la fiabilité des SME, par conséquent elle peut être employée pour résoudre des algorithmes complexes d'optimisation de la fiabilité [4,7].

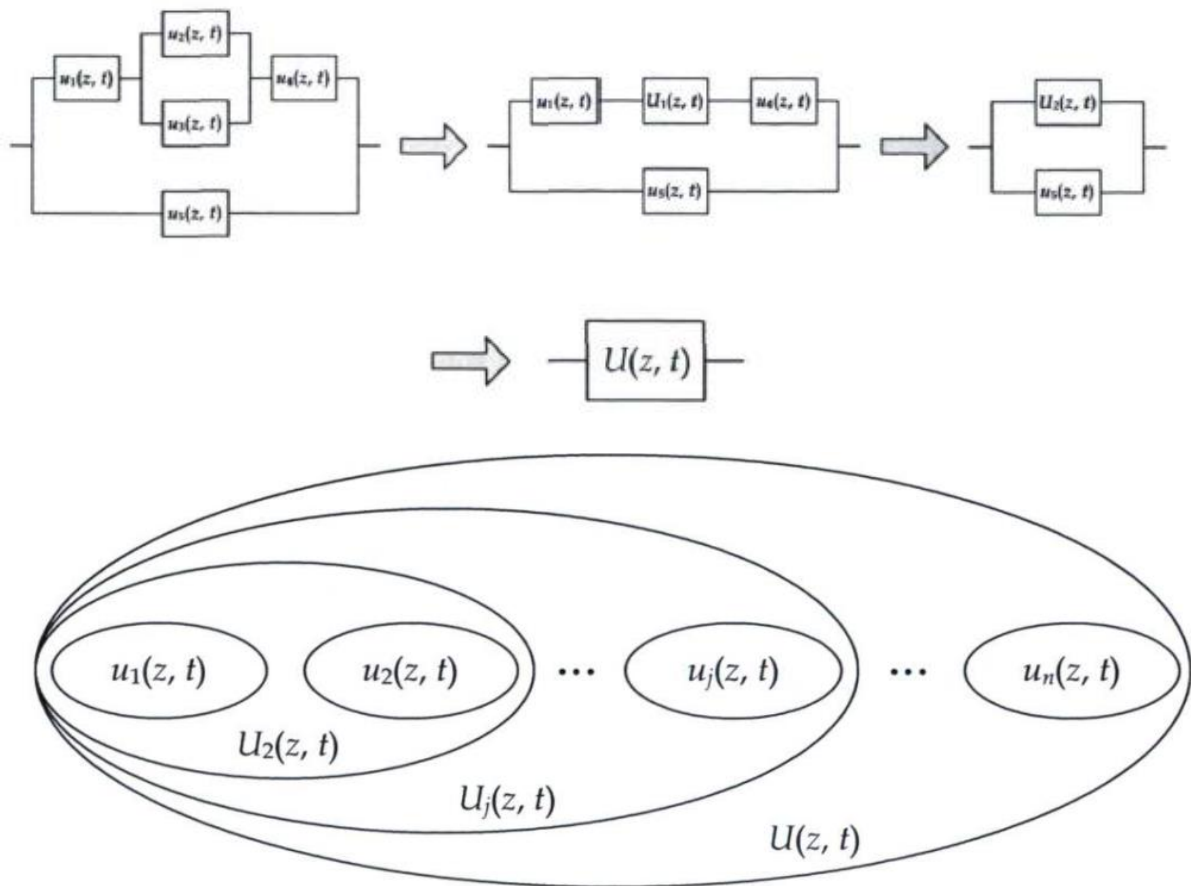


Figure 4.9 : Approche de détermination de la fonction génératrice d'un SME [2,7,24]

Les applications de la (UMGF) pour évaluer la fiabilité des SME est très utilisée pour l'optimisation de la fiabilité des systèmes électriques [2,7, 24].

Par définition l'UMGF d'une variable aléatoire G est défini par le polynôme :

$$u(z) = \sum_{j=1}^J P_j z^{G_j} \quad (4.24)$$

Où la variable G représente la performance et peut prendre J états possibles.  $P_j$  est la probabilité de l'état  $G_j$ .

Exemple : considérons un élément  $i$  à défaillance totale ayant une performance nominale  $G_i$  et une fiabilité  $A_i$ , l'UMGF d'un tel élément peut s'écrire [7,24]:

$$u_i(z) = (1 - A_i) z^0 + A_i z^{G_i} = (1 - A_i) + A_i z^{G_i} \quad (4.25)$$

**A) Systèmes en Parallèle**

Considérons un système parallèle et son équivalent décrit par la figure suivante

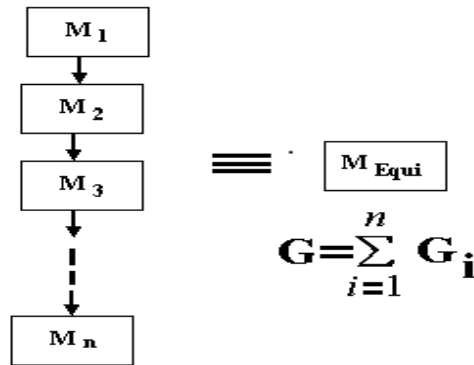


Figure 4.10 : Système parallèle et son équivalent [7,24]

L'UMGF d'un système SME contenant  $j_m$  éléments en parallèle peut être calculé par l'opérateur  $\pi$  :

$$u_p(z) = \pi(u_1(z), u_2(z), \dots, u_{j_m}(z)) \tag{4.26}$$

$$\mathfrak{Z}(G_1, G_2, \dots, G_n) = \sum_{i=1}^m G_i$$

Pour un système de deux éléments en parallèle L'UMGF est donnée par :

$$\pi(u_1(z), u_2(z)) = \pi\left(\sum_{i=1}^n P_i z^{a_i}, \sum_{j=1}^m Q_j z^{b_j}\right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i Q_j z^{a_i+b_j} \tag{4.27}$$

**B) Système en Séries**

Considérons un système série et son équivalent décrit par la figure suivante.

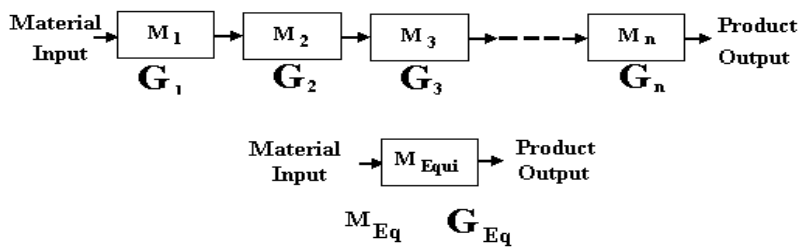


Figure 4.11 : Système série et son équivalent [7,24]

$(G_1 \succ G_2 \succ \dots \succ G_{n-2}) \succ G_{n-1} \prec G_n$  Alors  $G_{n-1}$  est la plus faible performance ou  $G$  ligne égale à  $G_{n-1}$ .

L'UMGF d'un système MSS contenant  $m$  éléments en série peut être calculé par l'opérateur  $\sigma$  :

$$u_s(z) = \sigma(u_1(z), u_2(z), \dots, u_m(z)) \quad (4.28)$$

$$\delta(G_1, G_2, \dots, G_n) = \min\{G_1, G_2, \dots, G_n\}$$

Pour un système de deux éléments L'UMGF est donnée par :

$$\sigma(u_1(z), u_2(z)) = \sigma\left(\sum_{i=1}^n P_i z^{a_i}, \sum_{j=1}^m Q_j z^{b_j}\right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i Q_j z^{\min\{a_i, b_j\}} \quad (4.29)$$

On obtient L'UMGF d'un système parallèle-série en appliquant consécutivement les opérateurs  $\pi$  et  $\sigma$ .

#### 4.4.1.3.2. Fiabilité du Modèle de La Demande

Pour l'application d'un système électro- énergétique, la disponibilité ou la fiabilité est considérée comme mesure de l'aptitude du système à satisfaire la charge (demande) ( $W$ ), afin de fournir une énergie électrique adéquate ( $G$ ) ou ( $\Xi$ ). Cette définition de la fiabilité est largement utilisée dans le système électro- énergétique [28]. L'index (Loss of Load Probability (LOLP)) est souvent utilisé pour estimer la fiabilité [21]. L'index de fiabilité est la probabilité que la charge ou la demande rencontrée est non satisfaite, en écrit par  $R = Probab(\Xi \geq W)$  or  $R = 1 - LOLP$  avec  $LOLP = Probab(\Xi < W)$ . Cet indice de fiabilité dépend de l'apport en demande  $W$ .

Pour les systèmes multi-états SME, l'index de disponibilité  $E$  est utilisé comme  $Probab(\Xi \geq W)$ , Bien la disponibilité stationnaire est donnée par:

$$P_j = \lim_{t \rightarrow \infty} [Probab(\Xi(t) = \Xi_j)] \quad (4.30)$$

$$E = \sum_{\Xi_j \geq D} P_j \quad (4.31)$$

Si la période  $T$  est subdivisée en  $M$  intervalles (avec des durées  $T_1, T_2, \dots, T_M$ ) et pour chaque intervalle un niveau de demande ( $W_1, W_2, \dots, W_M$ , respectivement), alors la forme générale de multi-state disponibilité  $A$  ou  $R$  sera:

$$\begin{cases} A = \frac{1}{\sum_{j=1}^M T_j} \sum_{j=1}^M Probab(\Xi \geq W_j) T_j \\ R = \frac{1}{\sum_{j=1}^M T_j} \sum_{j=1}^M Probab(\Xi \geq W_j) T_j \end{cases} \quad (4.32)$$

On note par  $W$  et  $T$  les vecteurs  $\{W_j\}$  et  $\{T_j\}$  ( $1 \leq j \leq M$ ), respectivement. Comme la disponibilité  $A$  est une fonction de  $k_1, k_2, \dots, k_n, W$  et  $T$ , et elle peut être écrite comme  $A(k_1,$

$k_2, \dots, k_n, D, T$  / ou  $R(k_1, k_2, \dots, k_n, W, T)$ . Dans le cas du système électro- énergétique, les vecteurs  $W$  et  $T$  définissent la courbe cumulative de la charge. En général, cette courbe est connue pour chaque système électro- énergétique.

#### 4.4.1.3.3. Fiabilité Couplée à la Charge

Généralement les modèles de charges sont bien connus pour chaque type de Production (Courbe de charge). Ces modèles sont de types à niveau discret et chaque Niveau à sa propre durée ou probabilité. La disponibilité  $A$  d'un système multi-états par rapport à la demande peut être évaluée par :  $Probab(Production \geq demande)$  pendant différents états du système et pour chaque niveau de demande  $D$ .

$$Probab(G \geq D) = \Psi(u(z)z^{-D})$$

(4.28)  $\Psi$  est un opérateur distributif défini par:

$$\Psi(Pz^{\sigma-D}) = \begin{cases} P, & \text{if } \sigma \geq D \\ 0, & \text{if } \sigma < D \end{cases} \quad (4.33)$$

$$\Psi\left(\sum_{j=1}^J P_j z^{G_j-D}\right) = \sum_{j=1}^J \Psi(P_j z^{G_j-D}) \quad (4.34)$$

### 4.5. Exemple Illustratif de la Méthode (UMGF)

#### 4.5.1. Cas de Deux Etats

Soit un système à configuration série – parallèle industriel à deux états de fonctionnement le suivant : Les caractéristiques sont :

Tableau 4.1 Paramètres du système électrique [7,24]

Etat	Sous système 1		Sous système 2
	Unité 1	Unité 2	Unité 1
Capacité G (%)	100	200	300
Probabilité	0.978	0.983	0.965

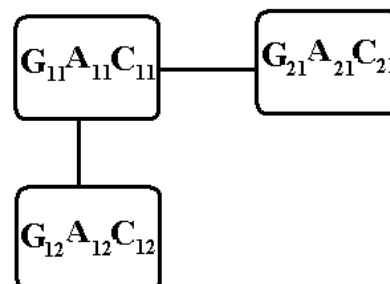


Figure 4.12 : Système Série Parallèle [7]

## Chapitre 4 : Fiabilité des Systèmes Multi-Etats

Calculons la fonction universelle pour ce système :

$$S(x) = S(x_1, x_2, x_3) = \sigma(x_3, \pi(x_1, x_2)) \Rightarrow$$

$$\varphi^S(z) = U^R \{ \varphi_3, U^R \{ \varphi_1, \varphi_2 \} \}$$

$$\sigma(a_1, a_2, \dots, x_n) = \min_{1 \leq i \leq n} \{ a_i \} \text{ et}$$

$$\text{On sait que : } \pi(a_1, a_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n a_i$$

$$\varphi_1^* = U^0 \{ \varphi_1, \varphi_2 \} = U^0 \{ (p_1 z^{100} + q_1 z^0), (p_2 z^{200} + q_2 z^0) \}$$

$$= p_1 p_2 z^{300} + p_2 q_1 z^{200} + p_1 q_2 z^{100} + q_2 q_1$$

$$\varphi_2^* = U^1 \{ \varphi_1^*, \varphi_2 \} = U^1 \{ (p_3 z^{300} + q_3 z^0), (p_1 p_2 z^{300} + p_2 q_1 z^{200} + p_1 q_2 z^{100} + q_2 q_1) \}$$

$$= p_1 p_2 p_3 z^{300} + p_3 p_2 q_1 z^{200} + p_3 p_1 q_2 z^{100} + p_1 p_2 q_3 + p_2 q_1 q_3 + p_1 q_2 q_3 + q_1 q_2 p_3 + q_1 q_2 q_3$$

$$= 0.92772 z^{300} + 0.02086 z^{200} + 0.01604 z^{100} + 0.03536$$

### 4.5.1.2. Modèle de Charge

Généralement ce modèle de charge est dit «La courbe de charge ». Elle peut être construite à la base des appels journaliers ou bien hebdomadaires, la demande peut être considérée comme des niveaux discrets de la puissance produite. Chaque niveau a une durée et une probabilité de séjour, on peut schématiser cette courbe de la façon suivante :

Niveau de la charge avec leurs durées :

Tableau 4.2 Caractéristiques de la demande [7]

<b>Wi (%)</b>	250	100	50	25
<b>Ti (h)</b>	4203	793	1228	2536
<b>Probabilité</b>	0.4797	0.09052	0.14018	0.28949

on applique l'opérateur  $\sigma \Rightarrow \sigma(u(z)z^{-W}) = P\{G \geq W\}$

$$\sigma(pz^{G-W}) = \begin{cases} p, & \text{si } G \geq W \\ 0, & \text{si } G < W \end{cases} = \sum_{j=1}^J p_j z^{G_j - W}$$

$$= (0.92772 z^{300} + 0.02086 z^{200} + 0.01604 z^{100} + 0.03536) z^{-W_1}$$

$$= 0.9277 * 0.4797 + (0.9277 + 0.0286 + 0.0160) * 0.09052 +$$

$$(0.9277 + 0.0286 + 0.0160) * 0.14018 +$$

$$(0.9277 + 0.0286 + 0.0160) * 0.28949$$

$$= 0.946928$$

Maintenant on couple la production avec la charge :

$$W_1 = 250 \Rightarrow P_{w_1} = 0.4797$$

$$W_2 = 250 \Rightarrow P_{w_2} = 0.09052$$

$$W_3 = 250 \Rightarrow P_{w_3} = 0.14018$$

$$W_4 = 250 \Rightarrow P_{w_4} = 0.28949 \Rightarrow$$

$$A = 0.9646 * (0.4797 + 0.09052 + 0.14018 + 0.28949) = 0.96463$$

#### 4.5.2. Cas de Multi Etats

Considérons par exemple un système de production d'énergie composé de deux sous-systèmes reliés en série. Le premier sous-système est composé à son tour par deux générateurs d'énergie connectés en parallèle et le second sous-système est constitué d'une unité de transformation. Les capacités des unités et leurs probabilités correspondantes sont présentées dans le Tableau 4.3 Les capacités sont données comme pourcentages du niveau maximum de la demande. Comme présentée dans le Tableau 4.4 la demande est caractérisée par deux niveaux, un niveau maximum de 100 MW pour 75% du temps et un niveau de 70 MW pour 25% du temps.

Tableau 4.3 Paramètres du système électrique [7,24]

	Sous-système 1							Sous-système 2		
	Unité 1			Unité 2				Unité 3		
Etat	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3
Probabilité	0.10	0.60	0.30	0.05	0.25	0.30	0.40	0.05	0.30	0.65
Capacités G (%)	0.0	30	60	0.0	30	50	80	0.0	100	150

Tableau 4.4 Caractéristiques de la demande [7,24]

Wi	100	70
Ti (h)	6570	2190
Probabilité	75	25

a) L'UMGF de chacun des trois unités sont par définition de l'UMGF  $u(z) = \sum_{j=1}^J P_j z^{G_j}$ ,

donc nous avons:

Pour l'unité 1 du sous-système 1 :

$$U_1^1(z) = p_{11}^1 Z^{G_{11}^1} + p_{12}^1 Z^{G_{12}^1} + p_{13}^1 Z^{G_{13}^1} = 0.1Z^0 + 0.6Z^{30} + 0.3Z^{60}$$

pour l'unité 2 du sous-système 1 :

$$U_2^1(z) = p_{21}^1 Z^{G_{21}^1} + p_{22}^1 Z^{G_{22}^1} + p_{23}^1 Z^{G_{23}^1} + p_{24}^1 Z^{G_{24}^1} = 0.05Z^0 + 0.25Z^{30} + 0.3Z^{50} + 0.4Z^{80}$$

Pour l'unité du sous-système 2 :

#### Chapitre 4 : Fiabilité des Systèmes Multi-Etats

$$U_1^2(z) = p_{11}^2 Z^{G_{11}^2} + p_{12}^2 Z^{G_{12}^2} + p_{13}^2 Z^{G_{13}^2} = 0.05Z^0 + 0.3Z^{100} + 0.65Z^{150}$$

- b) l'UMGF du système est obtenue par l'application des opérateurs  $\pi$  et  $\sigma$   
 $\pi$  Pour les éléments en parallèles et  $\sigma$  pour les éléments en série.

$$U_{sys} = \sigma[\pi(U_1^1(z), U_2^1(z)), U_1^2(z)]$$

$$U_{sys} = \sigma \left[ \begin{array}{l} (0.1Z^0 + 0.3Z^{30} + 0.6Z^{60}) (0.05Z^0 + 0.25Z^{30} + 0.3Z^{50} + 0.4Z^{80}) \\ , (0.05Z^0 + 0.3Z^{100} + 0.65Z^{150}) \end{array} \right]$$

$$U_{sys} = \sigma \left[ \begin{array}{l} (0.005Z^0 + 0.04Z^{30} + 0.03Z^{50} + 0.105Z^{60} + 0.13Z^{80} + 0.15Z^{90} + 0.3Z^{110} + 0.24Z^{140}) \\ , (0.05Z^0 + 0.3Z^{100} + 0.65Z^{150}) \end{array} \right]$$

$$U_{sys} = 0.0547Z^0 + 0.038Z^{30} + 0.0285Z^{50} + 0.0949Z^{60} + 0.123Z^{80} + 0.1425Z^{90} + 0.162Z^{100} \\ + 0.195Z^{110} + 0.156Z^{140}$$

Pour évaluer la probabilité  $Pr oba(G_m \geq W_s)$  que la capacité totale du système multi-états n'est pas inférieure aux différents niveaux requis de la demande  $W_s$ , nous appliquons l'opérateur  $\Psi$  défini par les équations (4.32) et (4.33).

$$Pr oba(G_m \geq W_s) = \Psi(U_{sys}(Z) Z^{-W_s})$$

Donc la disponibilité pour chaque niveau de demande est calculée par:

$$A(W_1) = Pr ob(G_m \geq W_1) = \Psi \left( \begin{array}{l} 0.05475Z^{(0-70)} + 0.038Z^{(30-70)} + 0.0285Z^{(50-70)} \\ + 0.0949Z^{(60-70)} + 0.1235Z^{(80-70)} + 0.1425Z^{(90-70)} \\ + 0.162Z^{(100-70)} + 0.195Z^{(110-70)} + 0.156Z^{(140-70)} \end{array} \right)$$

$$A(W_1) = Pr oba(G_m \geq W_1) = Pr oba(G_m \geq 70)$$

$$= \sum_{(G_m - W_1 \geq 0)} prob = 0.1235 + 0.1425 + 0.162 + 0.195 + 0.156 = 0.779$$

## Chapitre 4 : Fiabilité des Systèmes Multi-Etats

$$A(W_2) = Prob(G_m \geq W_2) = \Psi \left( \begin{array}{l} 0.05475Z^{(0-100)} + 0.038Z^{(30-100)} + 0.0285Z^{(50-100)} \\ + 0.0949Z^{(60-100)} + 0.1235Z^{(80-100)} + 0.1425Z^{(90-100)} \\ + 0.162Z^{(100-100)} + 0.1951Z^{(110-100)} + 0.156Z^{(140-100)} \end{array} \right)$$

$$A(W_2) = Prob(G_m \geq W_2) = Prob(G_m \geq 100) = \sum_{(G_m - W_2 \geq 0)} prob = 0.162 + 0.1951 + 0.156 = 0.5131$$

La disponibilité totale du système est calculée par :

$$A = \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M p_m q_s \{G_m \geq W_s\} = \sum_{s=1}^S \left( q_s \sum_{m=1}^M p_m \{G_m \geq W_s\} \right) = \sum_{s=1}^S q_s A(W_s)$$

Où  $S$  représente les différents niveaux de la demande et  $M$  les différents états du système.  $p_m$  c'est la probabilité que la production du système satisfait chaque niveau demande  $W_s$ ,  $q_s$  étant la probabilité de cette demande.

Donc la disponibilité totale du système par rapport à la demande est :

$$A = 0.25 \cdot (0.779) + 0.75 \cdot (0.5131) = 0.5795$$

On constate que le système considéré dans cet exemple satisfait la demande de **70MW** avec une probabilité de **77.9%** et la demande de **100MW** avec une probabilité de **51.31%**, la disponibilité moyenne du système est de **57.97%**.

### 4.6. Algorithme d'Ushakov

**Etape 1.** Lecture des données à partir du fichier de données :  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Disponibilité } A \\ \text{Coût } C \\ \text{Performance } G \end{array} \right.$

**Etape 2.** Set  $i:=0$

$j:=0$

For  $i:=1$  to  $n$  /\*  $n$  : Nombre maximale des systèmes en séries \*/

For  $j:=1$  to  $J$  /\*  $J$ : Nombre maximale des systèmes en parallèle \*/

Do Begin

$q = 1 - A$  /\*  $q$  : Indisponibilité d'un système ou composant \*/

**Etape 3.** Polynôme d'Ushakov /\* Ensemble de système parallèle \*/

## Chapitre 4 : Fiabilité des Systèmes Multi-Etats

$$u(Z) = qZ + AZ^{G_i} \quad /* Z : \text{transformé de Laplace} */$$

$$u_i(Z), \dots, u_{i-1}(Z), \dots, u_J(Z)$$

$$u(Z) \quad /* \text{Polynôme d'Ushakov de la colonne} */$$

$$u(Z) = u_i(Z), \dots, u_{i-1}(Z), \dots, u_J(Z) \\ = (q_i Z^0 + AZ^{G_i}), \dots, (q_J Z^0 + A_J Z^{G_J})$$

$$u_p(z) = \prod_{j=1}^{J_m} (1 - A_j) Z^0 + A_j Z^{G_i} = u_p(z) = \prod_{j=1}^{J_m} (q_j Z^0 + A_j Z^{G_i})$$

**Etape 4- Si** /\*Les machines sont identiques \*/

$$\text{Alors : } u_p(z) = (1 - A_j) Z^0 + A_j Z^{G_i} )^{KJ}$$

$$u_p(z) = (q_j Z^0 + A_j Z^{G_i} )^{KJ}$$

**Sinon** allez à **Etape 3**

**Etape 5.** Polynôme d'Ushakov /\* Ensemble de systèmes Séries \*/

For i :=1 to n /\* n : Nombre maximale des systèmes en séries \*/

$$u(z) = (q_j Z^0 + A_j Z^{G_i})$$

$$u(Z) = u_i(Z), \dots, u_{i-1}(Z), \dots, u_n(Z)$$

$$u_s(z) = (u_1(z), u_2(z), \dots, u_n(z))$$

$$u_s(z) = \prod_{i=1}^n (q_i Z^0 + A_i Z^{G_i})$$

$$\text{Avec : } \underset{i=1}{\text{Min}} \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$$

**Etape 6. Si** /\*Les systèmes sont identiques \*/

$$u_s(z) = (q_i Z^0 + A_i Z^{G_i})^n$$

**Sinon** allez à **Etape 5**

**Etape7.** Polynôme d'Ushakov /\* Ensemble de système Séries-Parallèles \*/

For i=1 to n /\* n : Nombre maximale des systèmes en séries \*/

For j :=1 to J /\* J: Nombre maximale des systèmes en parallèle \*/

## Chapitre 4 : Fiabilité des Systèmes Multi-Etats

$$u_{S-P}(z) = \prod_{j=1}^{J_m} (q_j Z^0 + A_j Z^{G_j}) * \prod_{i=1}^n (q_i Z^0 + A_i Z^{G_i})$$

$\begin{matrix} J \\ \text{Max} = \sum_{j=1}^J G_j \end{matrix}$ 
 $\begin{matrix} n \\ \text{Min} = \min(G_i) \\ i=1 \end{matrix}$

**STOP**

**Etape 8.** Polynôme d'Ushakov /\* Ensemble Charge + Production \*/

### ◆ La Charge

**Etape 9.** Lecteur des données de Charge à partir du fichier de donné :  $\begin{cases} \text{Niveaux} [\%] \\ \text{Temps de la Charge} [\%] \end{cases}$

For m :=1 to M /\* M : Nombre de niveaux de Charges \*/

For t :=1 to T /\* T : Temps correspondant aux niveaux de Charges \*/

$$u_{charg}(Z) = \frac{t}{T}$$

$$A = \frac{1}{\sum_{j=1}^M T_j} \sum_{j=1}^M \text{Probab}(G_T \geq W_j) T_j /* A : Disponibilité des aux niveaux de Charges */$$

$$u_{charg}(Z) = q_D(Z)^{-W} /* W : Niveaux de Charges */$$

### ◆ La Production

$$u_{S-P}(Z) = \prod_{j=1}^J \prod_{i=1}^n q_j Z^0 + A_j Z^{G_j}$$

$\begin{matrix} J \\ \text{Max} \\ j=1 \end{matrix}$ 
 $\begin{matrix} n \\ \text{Min}(G_{ij}) \\ i=1 \end{matrix}$

$$u(Z) = \sum q_m q_{ij} Z^0 + q_m q_{ij} Z^{G_{ij} - W_m}$$

*STOP*

## 4.7. Les Systèmes Multi Etat (Multi States Systems)

Dans ce cas le défaut peut entraîner l'incapacité du système à couvrir une charge donné sans causer la défaillance complète du système. De plus chaque élément du système réalise sa tâche à un certain niveau. Par exemple chaque unité de production d'un réseau électrique possède sa capacité.

#### 4.7.1. Vue D'ensemble D'un Système Electro-Energétique

La production et le transport de l'énergie électrique requiert l'engagement des éléments constituant l'ensemble du système afin de produire et d'acheminer l'énergie électrique vers les consommateurs. Il est avantageux d'estimer la capacité de l'ensemble à :

- Fonctionner sans interruption.
- Répondre à une charge variable.

La première alternative nous amène à introduire la notion de fiabilité, alors que la seconde fera intervenir la notion de disponibilité.

#### 4.7.2. Exemple d'un Système Multi-Etats

##### 4.7.2.1. Description du Système

Dans l'exemple ci-dessous (figure 4-13), on considère un système de transport d'énergie. Ce système est constitué de cinq sous systèmes en série :

- Unités de production d'énergies.
- Transformateurs de HT.
- Lignes de transport d'énergies de HT.
- Transformateurs de HT/MT.
- Lignes de transport d'énergies de MT.

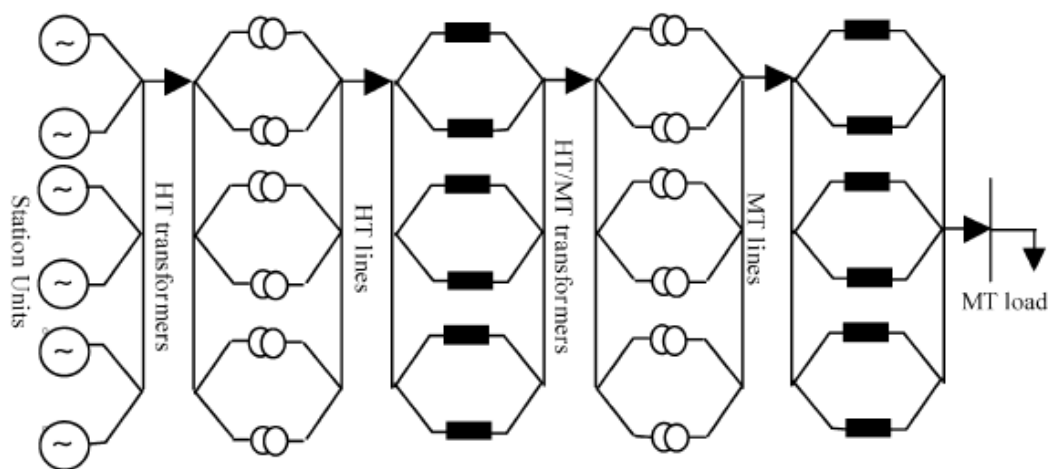


Figure 4.13 : Système électro-énergétique parallèle-série [11]

Le système est constitué d'un ensemble de sous systèmes suivant une configuration série et parallèle. Nous pouvons constater que l'extrant d'un sous système  $i$  constitue l'intrant du sous système  $(i+1)$ . Tous ces sous systèmes  $S_i ; i=1, \dots, n$  sont sujet à des défaillances aléatoires. La défaillance d'un poste entraîne l'arrêt complet de la production. Ceci affecte négativement la disponibilité du système qui ne sera pas en mesure de répondre à la charge  $j$  jusqu'à ce que le sous système en panne soit réparé.

Dans le cas d'un système composé de  $n$  unités. On suppose que chaque unité  $i$  possède  $K_i$  états de la panne totale au fonctionnement parfait. Le système complet possède  $K$

différents états eux mêmes déterminés par l'état de chaque unité. L'ensemble des états sont placés dans un vecteur  $Y(t)$  tels que :

$$Y(t) \in \{1,2,3,\dots,K\}$$

Où :  $Y(t) = 1$  Correspond l'état de la panne total

$Y(t) = 0$  Correspond à l'état du fonctionnement parfait.

A chaque état correspond un niveau de performance  $G_j$  de sorte que :

$$j \in \{1,2,3,\dots,K\} \text{ et } G_i \geq G_j \text{ si } i > j$$

Ces système de production électrique est considéré comme un système série parallèle multi-etats. en effet, il est formé de cinq sous systèmes en série, et chaque sous système est un ensemble de composantes parallèle qui ont un effet cumulatif sur la production. Son taux de production dépend de la disponibilité de ces composantes. Il peut occuper plusieurs états avec différentes niveaux de performances, allant du fonctionnement parfait à la défaillance complète. Un fonctionnement dégradé correspond par exemple aux pannes d'un des composants primaires et des composants secondaires, dans ce cas même si les taux de production des sous systèmes seront diminués, le système continuera à fournir le service demandé avec une performance moindre.

### 4.7.2.2. Description de la Charge

La demande de charge est prédite par une courbe de charge cumulative par morceaux figure (4-14). dans l'exemple d'application, on suppose que la période totale de production est divisée en trois périodes : dans 20 % de la période total, la demande est 100 % ; dans 30 % de la période total, la demande est 80 % ; pendant les 50 % restantes la demande est de 40 % la fiabilité (ou disponibilité dans le cas de systèmes réparables ) est mesurée la probabilité la fiabilité que sa performance soit supérieure ou égale a la demande [1,24].

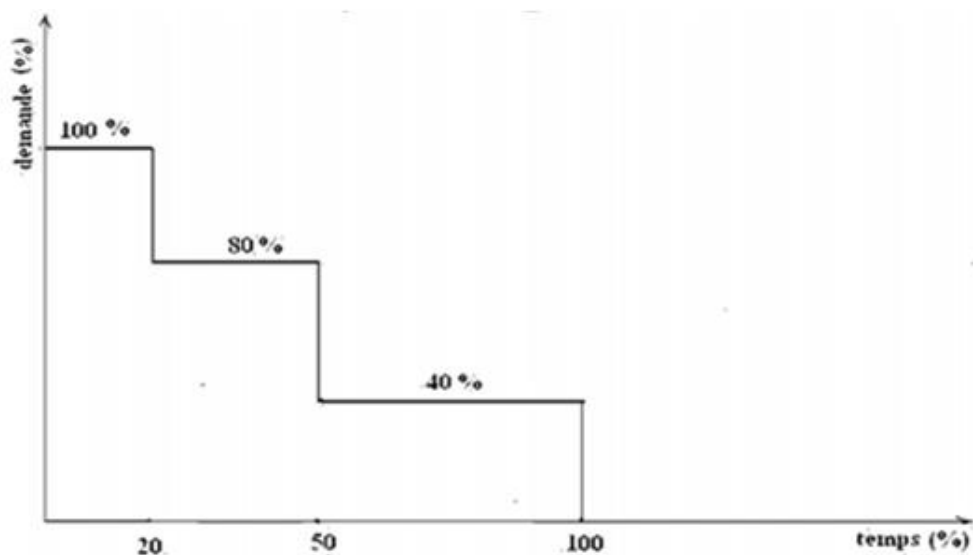


Figure 4.14 Un Exemple de la Courbe cumulative par morceaux

Le comportement d'un système multi états est caractérisé par son évolution dans l'espace des états. Pour traduire numériquement ce processus d'évolution, on doit tout d'abord déterminer les indices de fiabilité relatifs à chaque état. Ces indices représentent de manière très précise l'état de chaque composant lorsqu'il est influencé par les contraintes extérieures. Autrement dit, ces indices peuvent être une extension des indices utilisés dans la méthode binaire simple. Ils permettent ainsi de donner une vision assez précise de l'ordre de performance du système. Pour un système multi états, la disponibilité  $A(t)$  est la probabilité que le système soit dans des états avec un niveau de performance  $W \geq I$  à un instant donné  $t > 0$ . Sachant qu'il décrit le meilleur état noté  $m$  à l'instant initial ( $t=0$ ). Il peut également décrire un état  $l$  de sorte que  $l > k$ . Il faut noter que pour des temps suffisamment grands, l'état initial n'a pratiquement aucune influence sur la disponibilité. En outre, l'index  $A$  est souvent utilisé pour spécifier le cas du régime fonctionnel, il est appelé coefficient de disponibilité du système multi états [1,8].

La disponibilité du système multi état est une fonction de la demande désirée  $W$ , définie par :

$$A(W) = \frac{\sum_{m=1}^M A(W_m) \cdot T_m}{\sum_{m=1}^M T_m} \quad (4.35)$$

On utilise souvent l'index  $(1-E_A)$  pour faire l'analyse de la fiabilité du réseau électrique. Cet index permet également d'estimer la probabilité de perte de charge. Dans ce cas la performance est synonyme de la capacité de production au niveau de la centrale électrique. Les mesures de fiabilité définies jusqu'ici sont une extension de mesure déjà utilisée dans le cas des systèmes binaires. D'autres mesures supplémentaires seront rajoutées. Parmi ces mesures la performance d'un système multi états [1,7,8] :

$$E_G = \sum_{k=1}^K p_k G_k \quad (4.36)$$

Avec :

$p_k$  : la probabilité de fonctionnement normal d'un système multi états pour les états ( $k = 1 \dots K$ ).

On soulignera que la performance désirée  $E_G$  ne dépend pas de la demande  $W$ . Elle représente dans ce cas la production moyenne ou bien tout simplement la capacité du système. L'équilibre entre la demande et la production n'est obtenu que lorsque la charge est parfaitement satisfaite. Dans le cas contraire, le déséquilibre entraîne une charge non couverte désignée par  $E_U$ . Elle est définie par :

$$E_U = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K p_k q_m \max \{W_m - G_k, 0\}$$

(4.37)

L'indice  $E_U$  peut être utilisé pour estimer le coût de puissance non couverte dans les réseaux de distribution électriques.

### 4.8. Conclusion

Nous présentons dans ce chapitre une nouvelle approche pour étendre la théorie classique de la fiabilité basée sur l'hypothèse binaire au système multi-états réparable (SME). En général, certaines des méthodes traditionnelles, telles que la méthode processus stochastique.

La deuxième partie de ce chapitre nous avons présenté la définition de la fiabilité des systèmes multi-états (SME), certaines configurations importantes des systèmes multi-états ainsi que la méthode d'Ushakov. La méthode de la fiabilité classique est fondée sur l'hypothèse que le système binaire est soit en fonctionnent parfait ou défaillance totale. Puis ce que la dégradation de la performance est très fréquente dans les systèmes industriels, il est important de développer la théorie de la fiabilité (SME).La méthode (UMGF) nous a permis de calculer la performance d'un système parallèle-série par rapport à n'importe quelle courbe de charge. Le prochain chapitre aura pour but de présenter notre contribution pour l'optimisation des systèmes parallèle-série.

### 4.9. Bibliographie du Chapitre 4

- [1] M. Ouzineb, "Heuristiques Efficaces pour l'Optimisation de la Performance des Systems Séries-Parallèles", Thèse de Doctorat, Université de Montréal, 2009.
- [2] I. S. WASSY, "Modélisation et Optimisation des Performances et de la Maintenance des Systèmes Multi-Etats", Thèse de Doctorat, Université de Laval Québec, 2006.
- [3] S. A. Reza, "Ant Colony for Optimization of Imperfect Preventive Maintenance for Multi-State Systems", Thèse de Doctorat, Université de Laval Québec, 2006.
- [4] A. Lisnianski and G. Levitin, "Multi-State System Reliability ", World Scientific Publishing Co, 2003.
- [5] I. Ushakov, " Universal Generating Function", Soviet Journal of Computing System Science, Vol. 24, N°. 5, pp. 118-29, 1986.
- [6] J. Murchland, "Fundamental Concepts and Relations for Reliability Analysis of Multistate Mystems Reliability and Fault Tree Analysis", Theoretical and Applied Aspects of System Reliability, SI AM, pp. 581-618, 1975.

- [7] I. Ushakov, "Optimal Standby Problem and a Universal Generating Function", *Soviet Journal Computer Systems Science*, Vol. 25, N°. 4, pp. 61-73, 1987.
- [8] R. Meziane, "Optimisation de la Structure d'un Réseau de Production d'Énergie Électrique et Amélioration de sa Performance", Thèse de Doctorat, USTO, 2007.
- [9] I. Ushakov, "Reliability Analysis of Multi-State Systems by Means of a Modified Generating Function", *Journal Information Process, Cybernet*, Vol. 34, pp. 24-29, 1988.
- [10] G. Levitin, A. Lisnianski, H. Ben-Haim et D. Elmakis, "Redundancy Optimization for Series-Parallel Multi-State Systems", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 47, N°. 2, pp. 165-172, 1998.
- [11] B. Gnedenko, et I. Ushakov, "Probabilistic Reliability Engineering", Wiley, New York, 1995.
- [12] G. Levitin et A. Lisnianski, "Joint Redundancy and Maintenance Optimization for Multistate Series-Parallel Systems", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 64, pp. 33-42, 1999.
- [13] Levitin G., Lisnianski A. and Benhaim H., "Structure optimization of multi-state system with time redundancy", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 67, Elsevier, pp. 103-112, 2000.
- [14] Levitin G. and Lisnianski A., "Structure optimization of multi-state system with two modes failures", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 72, Elsevier, pp. 75-89, 2001.
- [15] Lisnianski A., Levitin G., Ben-Haim H. and Elmakis D., "Power system structure optimization subject to reliability constraints," *Electric Power System research*, Vol. 39, pp. 145-152, 1996.
- [16] Levitin G., Lisnianski A. and Elmakis D. "Structure optimization of power system with different redundant elements," *Electric Power System Research*, Vol. 43, pp. 19-27, 1997.
- [17] Levitin G. and Lisnianski A., "A new approach to solving problems of multi-state system reliability optimization". *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 47, No. 2, Elsevier, pp. 93-104, 2001.
- [18] Levitin G., Lisnianski A. and Benhaim H., "Structure optimization of multi-state system with time redundancy", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 67, Elsevier, pp. 103-112, 2000.
- [19] Levitin G. and Lisnianski A., "Survivability maximization for vulnerable multi-state systems with bridge topology", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 70, Elsevier, pp. 152-140, 2000.
- [20] Levitin G. and Lisnianski A., "Optimization of imperfect preventive maintenance for multi-state systems", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 47, No. 2, pp. 93-104, 2001.
- [21] Levitin G. and Lisnianski A., "Reliability optimization for weighted voting systems", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 71, Elsevier, pp. 131-138, 2001.

- [22] Levitin G. and Lisnianski A., “Structure optimization of multi-state system with two modes failures” , *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 72, Elsevier, pp. 75-89, 2001.
- [23] Levitin G, “Optimal unit grouping in weighted voting systems”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 72, Elsevier, pp. 179-191, 2001.
- [24] Levitin, Gregory “Universal generating function in reliability analysis and optimization”. Springer series in reliability engineering, August 2005.
- [25] Alexopoulos C, Fishman G. Characterizing stochastic flow networks using the Monte Carlo method. *Networks* 1991;21:775-798.
- [26] Alexopoulos C, Fishman G. Sensitivity analysis in stochastic flow networks using the Monte Carlo method. *Networks* 1993;23:605-21.
- [27] Lin Y. A simple algorithm for reliability evaluation of a stochastic-flow network with node failure. *Comput Oper Res* 2001;28:1277-85.
- [28] Alexopoulos C. A note on state-space decomposition methods for analyzing stochastic flow networks. *IEEE Trans Reliab* 1995;44:354-7.
- [29] Frenkel I, Khvatskin L, Lisnianski A « Markov reward model for performance deficiency calculation of refrigeration system ». *Reliability, risk and safety: theory and applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, London, 2009 pp 1591–1596.
- [30] Frenkel I, Khvatskin L, Lisnianski A « Management decision making based on Markov reward models for refrigeration system ». *J Pol Saf Reliab Assoc* 1, 2010:89–98.
- [31] J. R. Norris, “Markov chains“, Cambridge University Press, New-York, 1997.
- [32] Lisniansky A, Frenkel I, Khvatskin L, Ding Y (2007) « Markov reward model for multi-state system reliability assessment ». *Statistical models and methods for biomedical and technical systems*. Birkhauser, Boston, 2007 pp 153–168.
- [33] C. T. Lam et R. H. Yeh, “Optimal Maintenance Policies for Deteriorating Systems Under various Maintenance Strategies“, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 43, N°. 3, pp. 423-430, 1994.
- [34] H. Pham, A. Suprasad et R.B. Misra, “Availability and Mean Life Time Prediction of Multistage Degraded System with Partial Repairs“, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 56, N°. 2, pp. 169-173, 1997.
- [35] S. E. Barlow, et A. S. Wu, “Coherent Systems with Multi-State Components“, *Mathematics of Operations Research*, Vol. 3, N°.11, pp. 275-281, 1978.
- [36] E. El-Newehi, F. Proschan et J. Sethuraman, “Multistate Coherent Systems“, *Journal of Applied Probability*, Vol. 15, N°.12, pp. 675-688, 1978.
- [37] S. Ross, “Multivalued State Component Systems“, *Annals of Probability*, Vol. 7, pp. 379-383, 1979.
- [38] S. Wu et L. Y. Chan, “Performance Utility-Analysis of Multi-State Systems“, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 52, N°. 1, pp. 14-19, 2003.
- [39] H. Pham, A. Suprasad et R. B. Misra, “Availability and Mean Life Time Prediction of Multistage Degraded System with Partial Repairs“, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 56, N°. pp. 169-173, 1997.
- [40] E. M. Hendrix et O. Klepper, “On Uniform Covering, Adaptive Random Search and

- Raspberries“, *Journal of Global Optimization*, Vol.18, Vol. 2, pp, 143–163, 2000.
- [41] W. Tfaili, “Conception d’un Algorithme de Colonie de Fourmis pour l’Optimisation Continue Dynamique“, Thèse de Doctorat, Paris 12-Val De Marne UFR de Sciences et Technologie, 2007.

# CHAPITRE 5

## Simulation Globale du Système Electro énergétique

### 5.1. Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre une nouvelle approche pour étendre la théorie classique de la fiabilité basée sur l'hypothèse binaire au système multi-états réparable (SME). En général, certaines des méthodes traditionnelles, telles que la méthode processus stochastique, ne fournissaient pas l'évaluation de la fiabilité du système SME en raison du grand nombre d'états du système. Dans ce travail, nous avons suggéré un processus stochastique combiné à une méthode basée sur la technique de la fonction de moment génératrice universelle (UMGF), elle très efficace pour les problèmes combinatoires de grande dimension, qui traite les modèles plus sophistiqués et réalistes allant de travail parfait pour un échec complet dans lequel les composants et les systèmes peuvent prendre de nombreux États. Nous considérons le cas où les distributions de performance et les probabilités des composants indépendantes. Un exemple numérique est présenté pour illustrer et évaluer la fiabilité des systèmes multi-états réparables.

Ce chapitre est divisé en deux sections, la première section sera consacrée à la méthode de Markov combinée à une méthode basée sur la technique de la fonction de moment génératrice universelle (UMGF). Cette fonction sera utilisée pour évaluer la performance d'un système multi-états réparable. Et la deuxième section sera consacrée à l'hybridation d'algorithme méta-heuristique et la fonction génératrice moment universelle (UMGF). Pour résoudre le problème d'optimisation de la redondance d'un système multi-états parallèle-série hétérogène. Des composants non identiques peuvent être utilisés en parallèle afin d'améliorer la performance du système. Ces composants sont caractérisés par leur fiabilité, leur performance et leur coût. Notre objectif est de minimiser le coût du système parallèle-série, tout en satisfaisant la fiabilité du système ou maximiser la fiabilité sous contrainte du cout total d'investissement. La disponibilité d'un système multi-états est définie comme la capacité de satisfaire la demande, représentée par une courbe de charge cumulative par morceaux. En comparant avec d'autres algorithmes cités dans la littérature, les résultats

montrent que la méthode proposée est efficace pour résoudre le problème d'optimisation de redondance de la fiabilité.

## 5.2. Etude et Evaluation de la Fiabilité des Systèmes Multi-Etats Réparables

### 5.2.1. Exemple Illustratif d'un Système multi-Etats Parallèles - Séries Réparables

Dans l'exemple ci-dessous, on considère un système multi-état, composé de trois éléments (transformateurs) présentés dans la figure (5.1)[1,2,8].

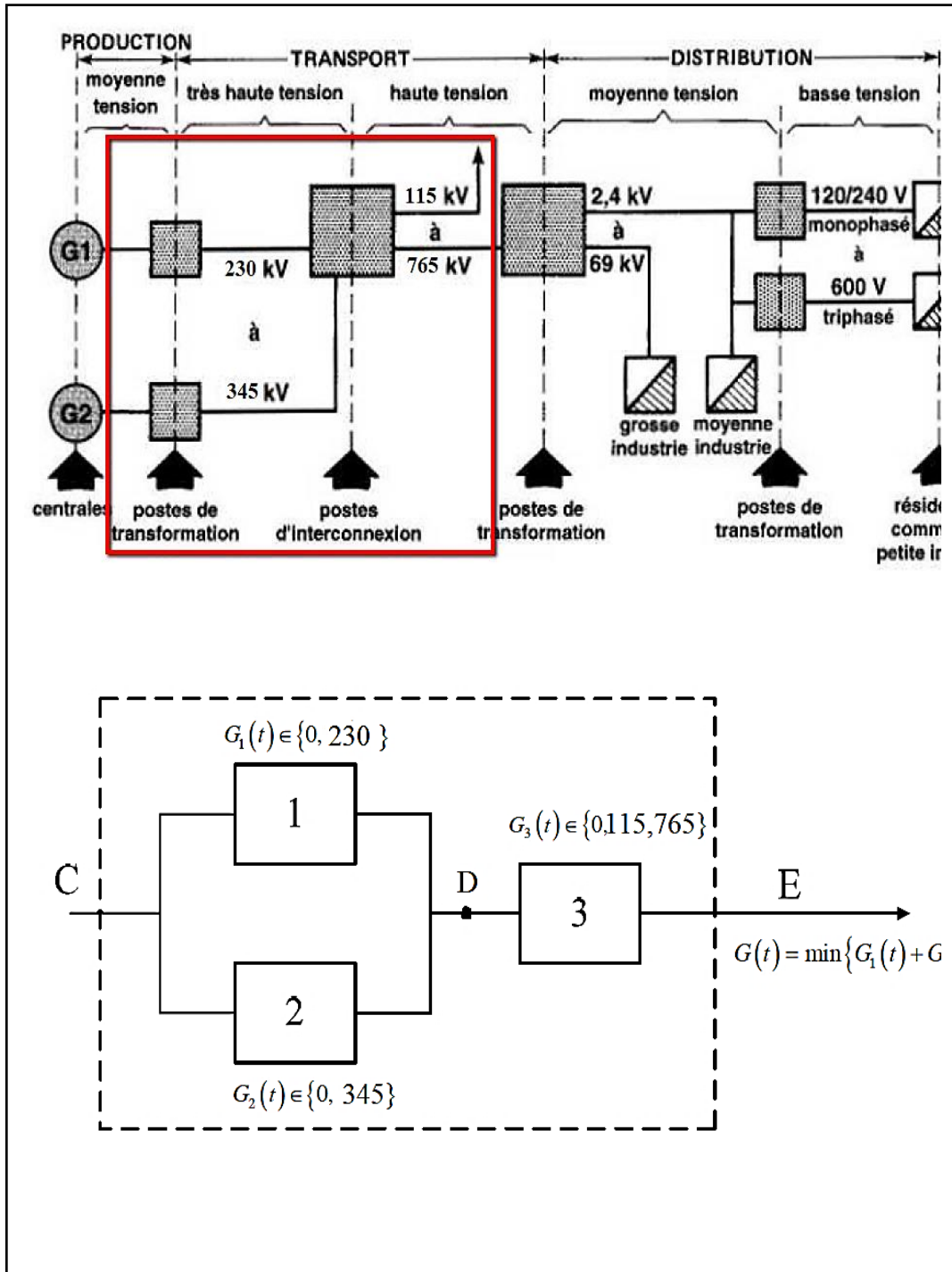


FIGURE 5.1 UN SYSTEME MULTI-ETATS AVEC 3 ELEMENTS (TRANSFORMATEURS).

### 5.2.2. Description du Système

Le flux de puissance électrique est transmis du point *C* au point *E*. La performance des transformateurs est mesurée par (*KV*). Les éléments 1 et 2 sont réparables et présentent deux états possibles.

$$G_1 \in \{g_{11}, g_{12}\} = \{0, 230\} \text{ et } G_2 \in \{g_{21}, g_{22}\} = \{0, 345\}$$

Les taux de défaillance et les taux de réparation correspondant à ces deux éléments sont :

$$\lambda_{2,1}^{(1)} = 7 \text{ ans}^{-1}, \quad \mu_{1,2}^{(1)} = 100 \text{ ans}^{-1} \text{ pour l'élément 1}$$

$$\lambda_{2,1}^{(2)} = 10 \text{ ans}^{-1}, \quad \mu_{1,2}^{(2)} = 80 \text{ ans}^{-1} \text{ pour l'élément 2}$$

L'élément 3 est un élément multi-états avec seulement des défaillances mineures et des réparations mineures.

$$G_3(t) \in \{g_{31}, g_{32}, g_{33}\} = \{0, 115, 765\}.$$

Les taux de défaillances et les taux de réparation correspondant à l'élément 3 sont :

$$\lambda_{3,2}^{(3)} = 10 \text{ ans}^{-1}, \quad \lambda_{2,1}^{(3)} = 7 \text{ ans}^{-1},$$

$$\mu_{1,2}^{(3)} = 120 \text{ ans}^{-1}, \quad \mu_{2,3}^{(3)} = 110 \text{ ans}^{-1}$$

Le flux total entre les points *C* et *D* à travers les transformateurs parallèles 1 et 2 est égal à la somme des flux de chacun de ces transformateurs. Le débit du point *D* vers *E* est limité par la performance de sortie de l'élément 3. D'autre part, ce flux ne peut pas être supérieur au flux entre les points *C* et *D*. Par conséquent, le flux entre les points *C* et *E* (la performance du système) s'écrit :

$$G(t) = f(G_1(t), G_2(t), G_3(t)) = \min\{G_1(t) + G_2(t), G_3(t)\}. \quad (5.1)$$

En appliquant la procédure décrite ci-dessus, nous procédons comme suit:

Selon la méthode de Markov, nous avons construit séparément les équations de Kolmogorov suivantes pour chaque sous-système:

Le sous-système 1 est constitué de deux composants parallèles.

$$UGF1 = G_1(t)$$

$$G_1(t) = p_{11}Z^{g_{11}} + p_{12}Z^{g_{12}} = p_{11}Z^0 + p_{11}Z^{230} \quad (5.2)$$

$$UGF2 = \mathbf{G}_2(t)$$

$$\mathbf{G}_2(t) = p_{21}Z^{g^{21}} + p_{22}Z^{g^{22}} = p_{21}Z^0 + p_{22}Z^{345} \quad (5.3)$$

$$UGF3 = \mathbf{G}_3(t)$$

$$\mathbf{G}_3(t) = p_{31}Z^{g^{31}} + p_{32}Z^{g^{32}} + p_{33}Z^{g^{33}} = p_{11}Z^0 + p_{11}Z^{115} + p_{32}Z^{765}$$

Selon la configuration des composants, l'UGF du sous-système UGF12 constitué de Composant 1 et Composant 2 connectés en parallèle peut être obtenu à l'aide de l'équation (5-5).

$$UGF12 = UGF1 \oplus UGF2 = G_{12}(t) \quad (5.4)$$

$$G_{12}(t) = p_{11}Z^0 + p_{11}Z^{230} \oplus p_{21}Z^0 + p_{22}Z^{345}$$

La fonction UGFs de l'ensemble du système sont:

$$UGFs = \mathbf{G}_s(t) = UGF12 \oplus UGF3 = \sum_1^5 P_i(t)Z^{g_i} \quad (5.5)$$

En Tenant compte que la somme des probabilités de ses états est égale à 1, on peut écrire :

$$P_{11}1(t) + P_{12}(t) = 1$$

$$P_{21}(t) + P_{22}(t) = 1 \quad (5.6)$$

$$P_{31}(t) + P_{32}(t) + P_{33}(t) = 1$$

$$\mathbf{G}_s(t) = f(\mathbf{G}_1(t), \mathbf{G}_2(t), \mathbf{G}_3(t)) = \min\{\mathbf{G}_1(t) + \mathbf{G}_2(t), \mathbf{G}_3(t)\} \quad (5.7)$$

Le diagramme espace-état du système est présenté à la figure 5.2

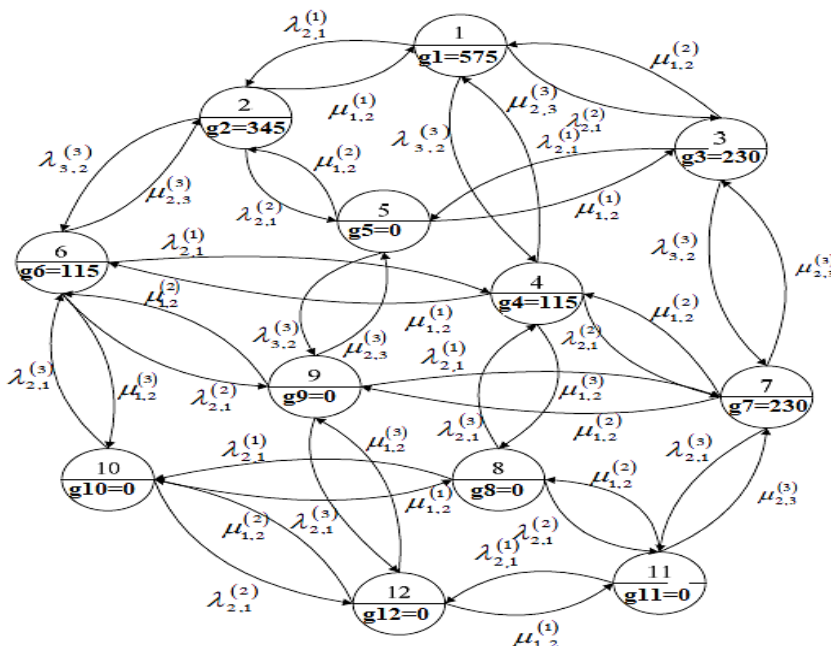


Figure 5.2 Diagramme d'état-transition pour SME

## Chapitre 5 : Simulation Globale du Système Electro énergétique

Dans différents états, un SME a les taux de performance suivants:

- Dans l'état 1 :  $g_1 = 575$ ,
- Dans l'état 2 :  $g_2 = 345$ ,
- Dans les états 4 et 6 :  $g_4 = g_6 = 115$ ,
- Dans les états 3 et 7 :  $g_3 = g_7 = 230$ ,
- Dans les états 5, 8, 9, 10, 11 et 12 :  $g_5 = g_8 = g_9 = g_{10} = g_{11} = g_{12} = 0$ . Par conséquent,

Le nombre total d'états de système différents est :  $K = k_1 k_2 k_3 = 2 \times 2 \times 3 = 12$ .

La dérivation plus poussée des probabilités d'état et des indices de fiabilité du SMS est basée sur la technique de la fonction de génératrice universelle UGF pouvant être mise en œuvre par simple calcul mathématique.

Les indices de fiabilité du SMS peuvent être calculés respectivement en utilisant les équations. (5.6), (5.8), (5.9) sur la base de l'UGF de l'ensemble du SMS.

La disponibilité instantanée du SMS  $A(t)$  à  $t > 0$ , la performance moyenne du système peut être calculée respectivement en utilisant les équations (5.1), (5.2), (5.9) (5.10) sur la base de l'UGF de l'ensemble du SMS.

La disponibilité instantanée du SMS  $A(t)$  à  $t > 0$

$$A(t, w) = \Omega(G(Z, t)) = \sum_{i=1}^5 P_i(t) \Omega(g_i > 0) = \sum_{i=1}^5 P_i(t) = 1 - P_0 \quad (5.8)$$

Le niveau de demande constante  $w = 115 \text{ KV}$ . On obtient la disponibilité instantanée du SME comme une somme de probabilités d'état où la performance de sortie SME est supérieure ou égale à 115. Les états 1, 2, 3, 4, 6 et 7 sont acceptables.

Pour une demande constante  $W1 = 575 \text{ kw}$ ,

La disponibilité du système multi états SME  $A(t)$  est:

$$A(t, w) = \sum_{i=1}^5 P_i(t) \Omega(g_i \geq 575) = P_1(t) \quad (5.9)$$

$W2 = 345 \text{ kw}$ , la disponibilité du SME  $A(t)$  à  $t > 0$

La disponibilité du système multi états SME  $A(t)$  est:

$$A(t, w) = \sum_{i=1}^5 P_i(t) \Omega(g_i \geq 345) = P_2(t) \quad (5.10)$$

$W3 = 230 \text{ kw}$ , la disponibilité du SME  $A(t)$  à  $t > 0$ :

La disponibilité du système multi états SME  $A(t)$  est:

$$A(t, w) = \sum_{i=1}^5 P_i(t) \Omega(g_i \geq 230) = P_3(t) + P_7(t) \quad (5.11)$$

$$W = 115 \text{ kw}, \text{ la disponibilité du SME } A(t) \text{ à } t > 0: \quad (5.12)$$

La disponibilité du système multi états SME  $A(t)$  est:

$$A(t, w) = \sum_{i=1}^5 P_i(t) \Omega(g_i > 115); A(t, w) = P_4(t) + P_6(t). \quad (5.13)$$

### 5.2.3. Résultats et Discussion

Ces probabilités (distribution des performances de l'ensemble du système) et la disponibilité du système sont présentées aux figures (5.3) à (5.5) pour les quatre valeurs de demande seuil (W) de 575 kW, 345 kW, 230 kW et 115 kW respectivement. On peut remarquer qu'après un certain temps, le système devient stable (probabilités monotones d'états) et la disponibilité devient asymptotiquement constante.

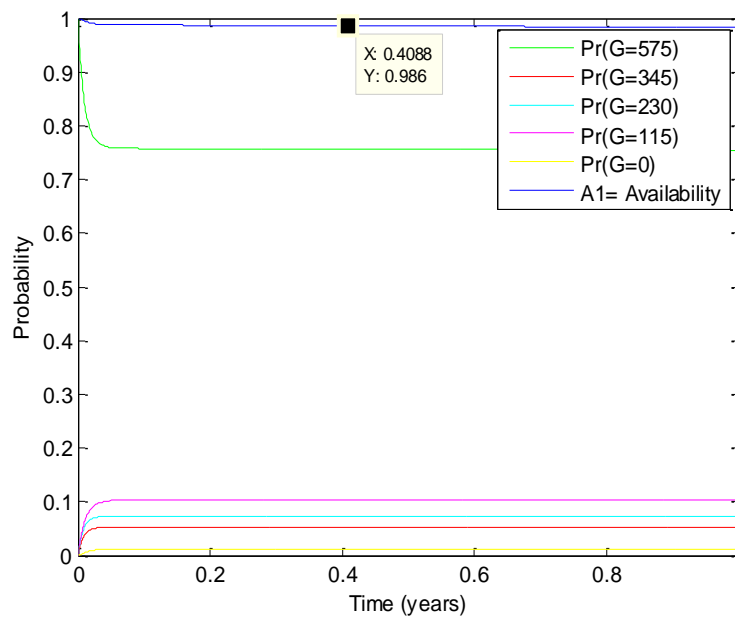


Figure 5.3 Disponibilité et probabilités de différents niveaux de performance  
Pour  $w=115$  Kv

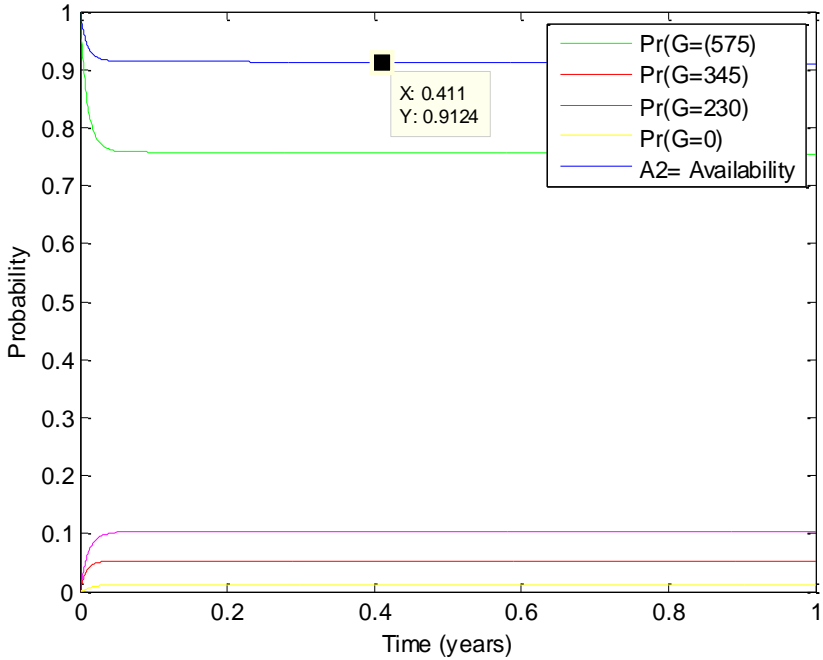


Figure 5.4 Disponibilité et probabilités de différents niveaux de performance pour  $w=230$  Kv

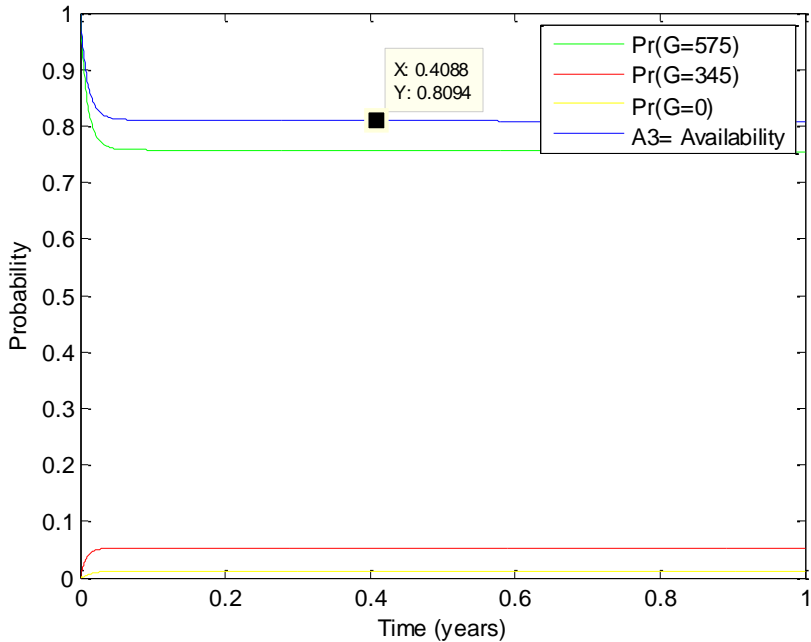


Figure 5.5 Disponibilité et probabilités de différents niveaux de performance Pour  $w=345$  Kv

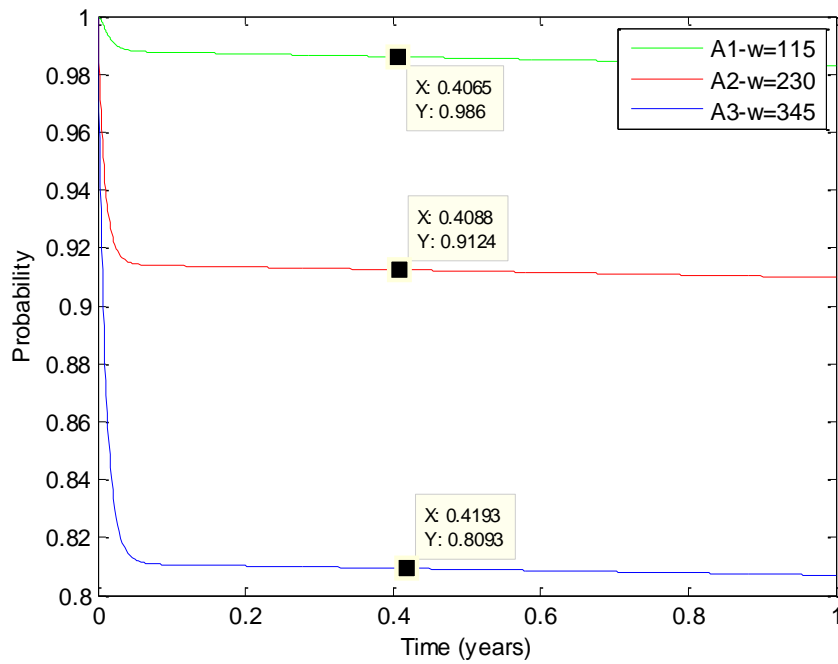


Figure 5.6 Probabilités des différentes performances

La disponibilité du système à des différents moments dans l'intervalle de [0.1: 1] ans est illustrée à la Figure 5-6.

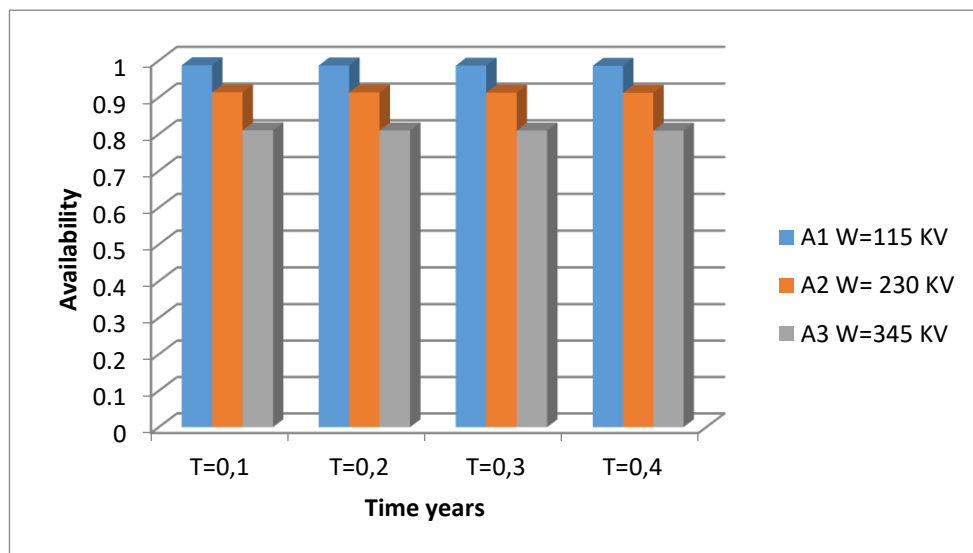


Figure 5-7. La disponibilité du système à des différentes performances

La fiabilité du système pour une période de 5 ans pour une politique de conception optimale est illustrée à la figure ( 5-8).

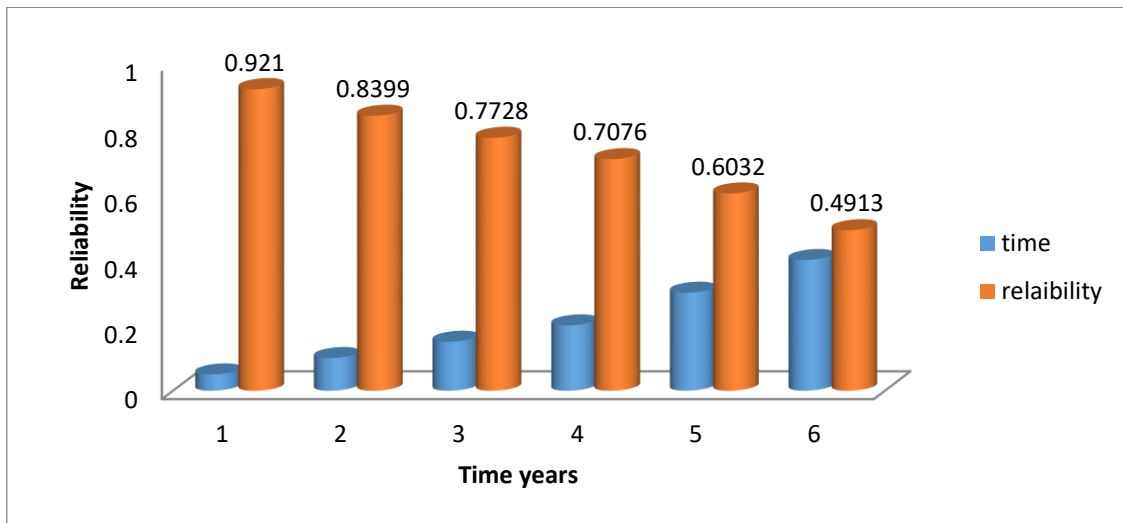


Figure 5-8. La fiabilité du système à des différentes périodes

### 5.3. Problème Primal:

Nous proposons, dans cette partie une simulation globale du système électrique décentralisé dans le but de résoudre le problème de la redondance des systèmes multi états parallèles-séries. L'objectif est de sélectionner la configuration optimale d'une structure parallèle-série afin de minimiser le cout sous contrainte fiabilité. Nous présentons dans cette partie une comparaison entre la méthode proposée (ACO) et la méthode méta-heuristique harmonie HAS décrite dans la littérature.

#### 5.3. 1. Description du système à optimiser

Le système de production, transport qui alimente les consommateurs est conçu avec cinq sous-systèmes de base décrit dans la figure (5-9). Le système d'énergie électrique peut être décrit comme suit:

L'énergie électrique est générée à partir des groupes générateurs (sous-système 1), ensuite, transformation MT/HT par les transformateurs HT (sous-système 2) pour être transportée par les lignes HT (sous-système 3), une deuxième transformation se produit par des transformateurs HT/MT (sous-système 4), afin d'alimenter une charge alimentée à travers des lignes MT (sous-système 5). Chaque dispositif du système est considéré comme une unité avec une défaillance totale. Les données des différentes versions de chaque sous-système sont présentées dans le tableau (5.1). Le tableau (5.2) illustre la demande cumulative.

#### 5.3.2 Exemple Illustratif d'un Système

##### 5.3.2.1 Description du Système à Optimiser

Dans cet exemple (5.9), nous appliquons les méthodes d'optimisation du système de production couplée à la charge pour déterminer une structure optimale au point de vue coût d'investissement, toute en satisfaisant le niveau de fiabilité prescrite [3,4,5,10,11].

Les données des différentes versions de chaque sous-système sont présentées dans le tableau 5.1. Ce tableau montre que chaque équipement est caractérisé par la fiabilité A, la performance (capacité nominale)  $\Xi$  ou G et le coût par unité C.

**Sous-Système 01 (Production)**

Ce sous- système représente le sous-système de production d'énergie électrique. Il comprend 07 générateurs éoliens.

**Sous-Système 02 (Transformateurs Elévateurs)**

Ce sous- système représente le sous-système de transformation d'énergie. Il comporte 05 transformateurs élévateurs de tension MT/HT.

**Sous-Système 03(Lignes de Transport HT)**

Ce sous- système représente les lignes de transport HT qui comporte 04 lignes HT.

**Sous-Système 04 (Transformateurs Abaisseurs HT/MT)**

Ce sous- système représente le sous-système de transformation d'énergie. Il comporte 08 transformateurs abaisseurs de tension HT/MT.

**Sous-Système 05(Lignes de Répartition MT)**

Ce sous- système représente les lignes de répartition MT qui comporte 05 lignes MT.

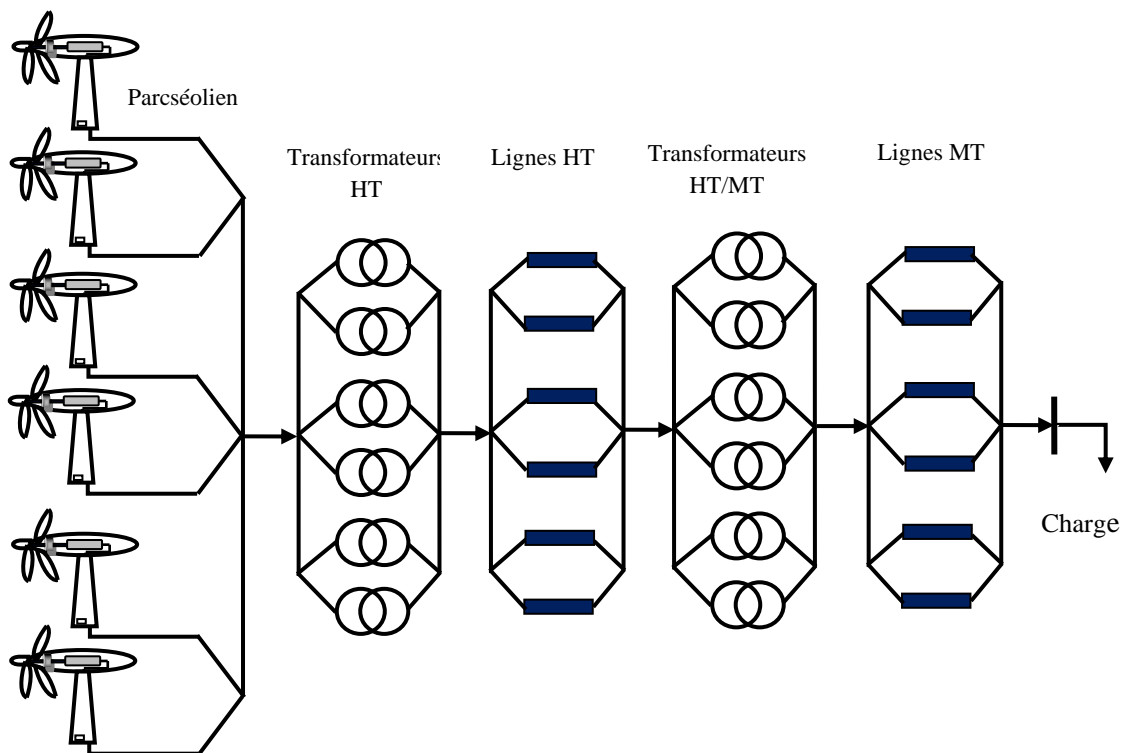


Figure 5.9 Structure parallèle- série d'un Parc éolienne

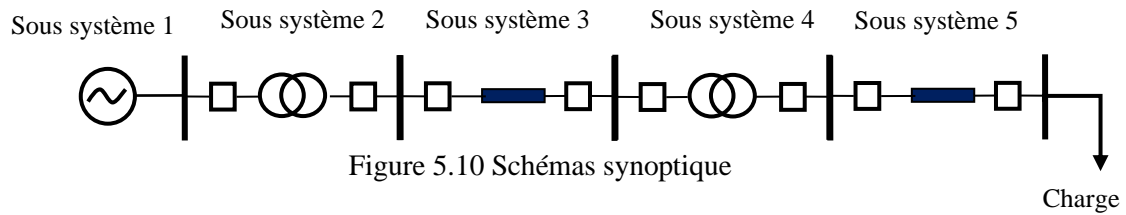


Figure 5.10 Schémas synoptique

### 5.3.2.2. Niveau de la Demande (la Charge)

La demande des consommateurs est estimée à une puissance maximale de 38 MW sur le réseau électrique. Cette demande est estimée sur la base annuelle de 8760h. Alors la répartition saisonnière et journalière moyenne représente quatre niveaux de charges allant d'une valeur maximale de 38MW vers une valeur minimale de 28MW. Les paramètres de la demande sont illustrés dans le tableau 5.2 :

Tableau 5.1. Les données des composants du système disponibles

Sous-systèmes	Version	Fiabilité A	Cout C (mln \$)	Performance (MW)
<b>Unités de production</b>	1	0.992	7.743	6
	2	0.986	6.475	5
	3	0.994	6.698	6
	4	0.988	6.290	6
	5	0.980	6.146	5
	6	0.991	4.484	4
	7	0.995	3.926	3
<b>Transformateurs HT</b>	1	0.994	2.805	18
	2	0.990	2.272	18
	3	0.997	2.594	12
	4	0.991	2.569	12

Chapitre 5 : Simulation Globale du Système Electro énergétique

Sous-systèmes	Version	Fiabilité A	Cout C (mln \$)	Performance (MW)
	5	0.998	1.857	8
<b>Lignes HT</b>	1	0.975	1.975	16
	2	0.998	1.980	14
	3	0.992	1.854	14
	4	0.968	1.325	12
<b>Transformateurs HT/MT</b>	1	0.986	0.845	16
	2	0.984	0.865	16
	3	0.987	0.752	14
	4	0.985	0.685	12
	5	0.990	0.650	12
	6	0.975	0.620	12
	7	0.980	0.495	10
	8	0.973	0.415	10
<b>Lignes MT</b>	1	0.984	0.456	14
	2	0.993	0.432	12
	3	0.989	0.364	10
	4	0.981	0.283	8
	5	0.968	0.242	8

5.3.2.3. **Modèle de la Charge à Optimise**

Tableau 5.2. Données de la demande cumulative annuelle.

MW	35	30	28	25
Tm (h)	830	1520	5680	750

5.3.2.4. **Résultats et Discussion**

Le système étudié se compose de cinq sous-systèmes connectés en série, et pour chacun des sous-systèmes, de 4 à 8 types différents d'éléments connectés en parallèle sont disponibles. L'objectif est de sélectionner la combinaison optimale d'éléments utilisés dans la structure parallèle-série. Ceci doit correspondre au coût minimal de la structure toute en satisfaisant un niveau de fiabilité désirée.

Le tableau 5.3 montre les résultats obtenus par l'algorithme colonies de fourmis. Le but est de trouver la structure optimale du système parallèle-série avec un coût minimal sous contraintes fiabilité. Trois solutions sont présentées dans le tableau 5.3, pour les différentes contraintes ( $R_0 = 0.975, 0.950, \text{ et } 0.973$ ). Le coût unitaire est donné en millions \$, le nombre d'itérations (1500) et le nombre de fourmis (500).

Tableau 5.3. Solution optimal des structures avec différentes contraintes de fiabilité.

Contraintes	Structure	Meilleurs Configurations	Coût, Fiabilité et Performance		
			C (mln \$)	R (%)	$\Xi$ (MW)
$R_0$					
0.975	Subsystem 1	1-2-2-4-5-5-6	81.734	0.998	35
	Subsystem 2	1-2-3-3-5			
	Subsystem 3	1-2-3-4			
	Subsystem 4	1-2-3-4-5-6-6-8			
	Subsystem 5	1-2-3-3-5			
0.950	Subsystem 1	1-1-2-2-5-6-7	75.835	0.964	30
	Subsystem 2	1-2-2-3			
	Subsystem 3	2-3-3-4			
	Subsystem 4	2-3-3-4-5-5-6-7			

Contraintes	Structure	Meilleurs	Cout, Fiabilité et Performance		
	Subsystem5	1-1-1-2-2			
0.973	Subsystem 1	2-2-2-3-5-5-6-7	73.26	0.998	28
	Subsystem 2	1-1-2-3-3			
	Subsystem 3	1-2-4-4			
	Subsystem 4	2-3-3-4-5-6-7-7			
	Subsystem 5	1-2-3-4-4			

Le tableau 5.4 montre la comparaison des résultats obtenus par l’algorithme de colonies de fourmis ACO et l’algorithme de recherche par harmonie HAS [11]. Le but est de trouver la structure optimale du système parallèle-série avec un cout minimal sous contraintes fiabilité. Trois solutions sont présentées dans le tableau 5.4, pour les différentes constraint ( $R_0 = 0.975, 0.950, \text{ et } 0.973$ ). Le coût unitaire est donné en millions \$, le nombre d’itérations (1500), le nombre des harmonies (10) et le nombre de fourmis (500).

Nous remarquons clairement que la fiabilité trouvée par l’algorithme de colonies de fourmis est meilleure par rapport à l’algorithme HS. Nous avons donné plus d’importance à la fiabilité du Système par rapport a son cout.

Tableau 5.4. Comparaison de l’algorithme ACO avec l’algorithme HSA cité dans la littérature.

Contrainte		Structure	Cout, Fiabilité Et Performance					
$R_0$	$C_0$ (mln \$)		ACO			HSA [11]		
			C (mln \$)	R (%)	G (MW)	C (mln\$)	R (%)	G (MW)
0.975	86	Subsystem 1	<b>81.734</b>	0.998	35	82.416	0.997	35
		Subsystem 2						

		Subsystem 3						
		Subsystem 4						
		Subsystem 5						
0.950	80	Subsystem 1	<b>75.835</b>	0.964	30	76.220	0.954	30
		Subsystem 2						
		Subsystem 3						
		Subsystem 4						
		Subsystem 5						
0.973	75	Subsystem 1	<b>73.26</b>	0.998	28	73.45	0.997	28
		Subsystem 2						
		Subsystem 3						
		Subsystem 4						
		Subsystem 5						

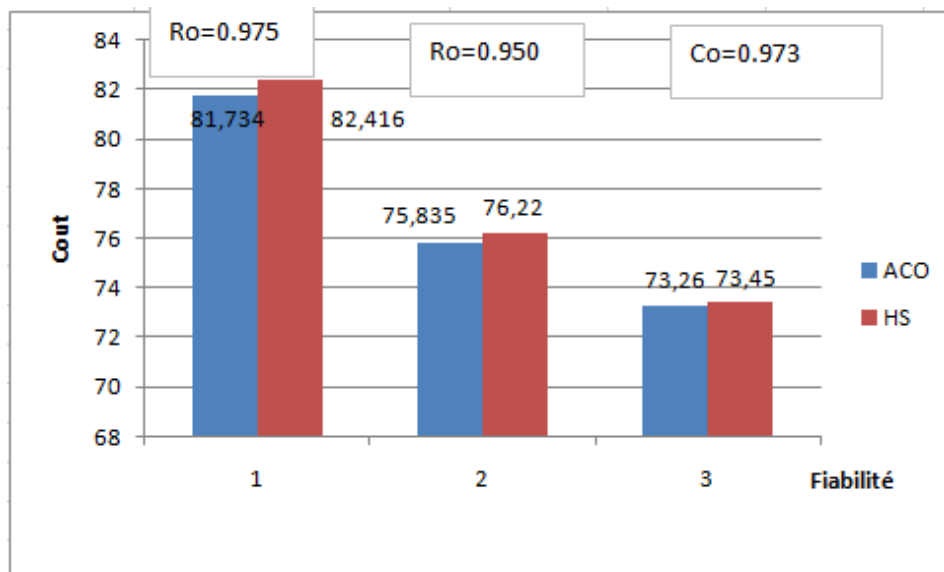


Figure. 5.11 : Minimisation de Cout sous contrainte fiabilité

D'après la figure 5.11. on remarque que pour les trois valeurs de contraintes de fiabilité (0.975, 0.950 et 0.96) l'algorithme de colonies de fourmis donne des solutions optimales par rapport à l'algorithme d'harmonie HSA. On peut constater par exemple que pour une contrainte égale à 0.975, la solution optimale trouvée par l'algorithme de colonies de

fourmis donne une fiabilité de 0.998, tandis que l'algorithme d'harmonie HSA donne une fiabilité de 0.997.

#### 5.4. Problème Dual :

##### 5.4.1. Description du système à optimiser

Le système de production transport qui alimente les consommateurs est conçu avec cinq sous-systèmes de base comme représenté sur la figure 5.12. Le système d'énergie électrique décentralisé peut être décrit comme suit:

L'énergie électrique est générée à partir des groupes générateurs à gaz et des énergies renouvelables (sous-système 1). Ensuite, transformation MT/HT est effectuée par les transformateurs HT (sous-système 2). Quant au transport, il est assuré par les lignes HT (sous-système 3). Une deuxième transformation se produit par des transformateurs HT/MV (sous-système 4). Enfin, la charge est alimentée à travers des lignes MT (sous-système 5). Chaque dispositif du système est considéré comme une unité avec une défaillance totale.

Les données des différentes versions de chaque sous-système sont présentées dans le tableau 5.5. Ce tableau montre que chaque équipement est caractérisé par la disponibilité A, le coût par unité C et la performance (capacité nominale)  $\Xi$  ou G. Le tableau 5.6 illustre la demande cumulative.

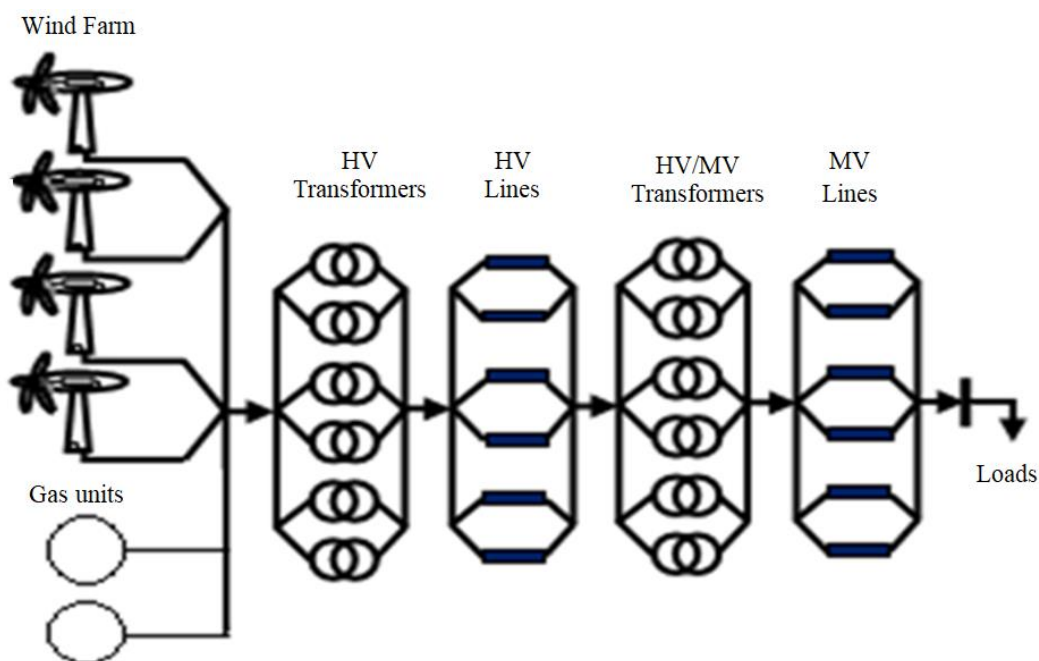


Figure 5.12 Structure parallèle- série d'un réseau électrique décentralisé

Dans cette partie, nous présentons une étude comparative entre l'algorithme de colonies de fourmis et des l'algorithme des chats (Cat Swarm) [CSA] publiée dans la littérature [ 16], afin de résoudre le problème de la redondance des systèmes multi états parallèles-séries.

L'objectif est de sélectionner la configuration optimale d'une structure parallèle-série afin de maximiser la fiabilité sous contrainte cout.

Tableau 5.5. Les données des composants du système disponibles.

Sous-systèmes	Version	Fiabilité A	Cout C(mln \$)	Performance (MW)
<b>Unités de production</b>	1	0.994	7.735	6
	2	0.988	6.475	5
	3	0.996	6.698	6
	4	0.989	6.290	6
	5	0.950	150	120
	6	0.991	150	120
<b>Transformateurs HT</b>	1	0.996	2.805	18
	2	0.992	2.272	18
	3	0.997	2.594	12
	4	0.993	2.569	12
	5	0.997	1.857	8
<b>Lignes HT</b>	1	0.975	1.985	16
	2	0.987	1.983	14
	3	0.971	1.842	14
	4	0.986	1.318	12
<b>Transformateurs HT/MT</b>	1	0.992	0.842	16
	2	0.982	0.875	16
	3	0.984	0.745	14
	4	0.983	0.654	12
	5	0.957	0.625	12
	6	0.968	0.608	12
	7	0.969	0.492	10
	8	0.997	0.415	10
<b>Lignes MT</b>	1	0.988	0.456	14
	2	0.959	0.432	12

Chapitre 5 : Simulation Globale du Système Electro énergétique

Sous-systèmes	Version	Fiabilité A	Cout C(mln \$)	Performance (MW)
	3	0.989	0.364	10
	4	0.981	0.283	8
	5	0.968	0.242	8

Tableau 5.6. Données de la demande cumulative annuelle.

<b>Load (MW)</b>	180	230	245	250
<b>Duration (h)</b>	1725	1725	3504	1752

Le tableau 5.7 montre les résultats obtenus par l’algorithme colonies de fourmis.

Tableau 5.7 Solution optimal des structures avec différentes contraintes de cout.

Contraintes	Structure	Meilleurs Configurations	Cout, Fiabilité et Performance		
			C(mln \$)	A %	Ξ MW
94	Subsystem 1	1-2-3-4-4-5-	91.445	0.998	250
	Subsystem 2	1-2-3-4-5			
	Subsystem 3	1-2-2-4			
	Subsystem 4	1-2-3-4-4-6-7-8			
	Subsystem 5	1-2-3-4-5			
88	Subsystem 1	1-2-2-3-5-5	87.120	0.967	220
	Subsystem 2	1-2-2-3-5			
	Subsystem 3	2-2-3-4			
	Subsystem 4	2-3-3-4-5-5-6-7			
	Subsystem 5	1-1-1-2-3			
	Subsystem 1	2-3-3-4-5-6-	73.385	0.997	200

Contraintes	Structure	Meilleurs Configurations	Cout, Fiabilité et Performance		
80	Subsystem 2	2-2-3-4-5			
	Subsystem 3	2-2-3-3-3			
	Subsystem 4	2-2-3-3-4-5-7-7			
	Subsystem5	2-2-3-3-4			

Le tableau 5.8 montre la comparaison des résultats obtenus par l’algorithme de colonies de fourmis et l’algorithme des chats (Cat Swarm) [CSA] [16].

Tableau 5.8. Comparaison de l’algorithme ACO avec la algorithme CSA cité dans la littérature.

Contrainte		Structure	Cout, Fiabilité Et Performance					
C <sub>0</sub> (mln \$)	G <sub>0</sub> (MW)		ACO			CSA [16]		
			C (mln \$)	R (%)	G (MW)	C (mln\$ )	R (%)	G (MW)
94	250	Subsystem 1						
		Subsystem 2						
		Subsystem 3	<b>91.445</b>	0.998	250	91.995	0.998	250
		Subsystem 4						
		Subsystem 5						
88	220	Subsystem 1						
		Subsystem 2						
		Subsystem 3	<b>87.120</b>	0.967	220	87.230	0.958	220
		Subsystem 4						
		Subsystem 5						

80	20	Subsystem 1	<b>73.385</b>	0.997	200	73.55	0.997	200
		Subsystem 2						
		Subsystem 3						
		Subsystem 4						
		Subsystem 5						

#### 5.4.1.1. Résultats et discussion

Le tableau 5.7 montre les résultats obtenus par l’algorithme colonies de fourmis. Le but est de trouver la structure optimale du système parallèle-série avec une fiabilité maximale sous contraintes cout. Trois solutions sont présentées dans le tableau 5.8, pour les différentes contraintes ( $C_0 = 94, 88$  et  $80$ ). Le coût unitaire est donné en millions \$, le nombre d’itérations (2400) et le nombre de fourmis (50).

Nous remarquons que la fiabilité trouvée par l’algorithme de colonies de fourmis ACO est meilleure par rapport à l’algorithme des chats CSA. Nous avons donné plus d’importance à la fiabilité du système par rapport à son coût.

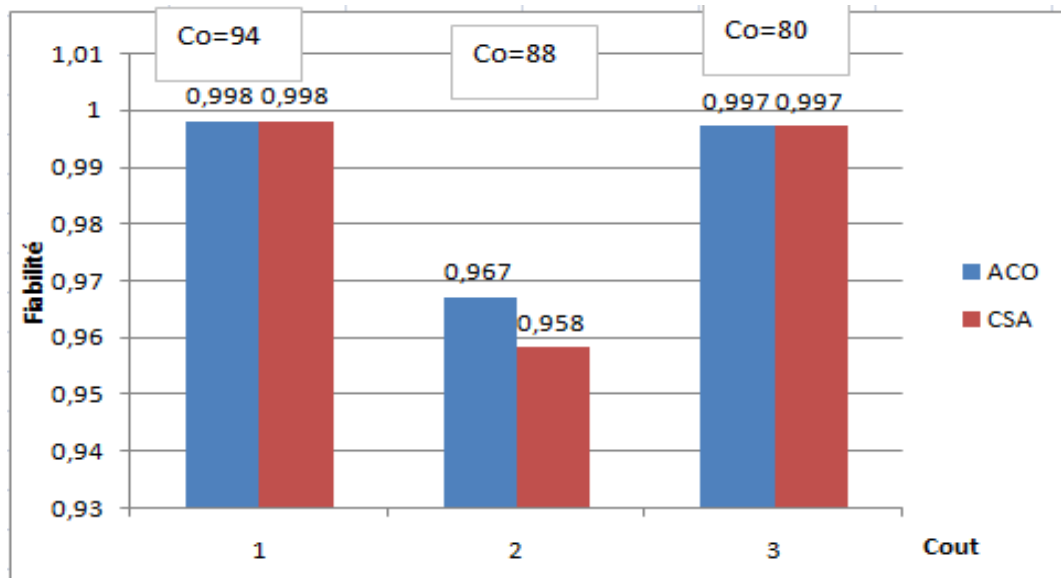


Figure. 5.13 : Maximisation fiabilité sous contrainte Cout et performance :

D’après la figure 5.13, on remarque que pour les trois valeurs de contraintes des couts (94, 88, et 80) millions de dollars, l’algorithme de colonies de fourmis donne des solutions optimales par rapport à l’algorithme des chats (cat swarm) CSA. On peut constater par exemple que pour une contrainte de cout égale à 94 millions de dollars, la solution optimale

trouvée par l'algorithme des chats (cat swarm) CSA a donné une solution optimale avec un cout total de la structure de 91.995 millions de dollars, tandis que l'algorithme de colonies de fourmis offre un cout meilleur de 91.445 millions de dollars.

### 5.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons utilisé une combinaison entre algorithmes à colonies de fourmis et l'hybridation de Markov et d'Ushakov dans le but de résoudre le problème de la conception optimale de redondance des systèmes électriques décentralisé de type parallèle-série. Le but fixé était d'évaluer la fiabilité du système multi-état parallèle-série hétérogène pour optimiser la structure au point de vue performance (fiabilité, disponibilité, et cout). Pour cela, nous avons proposé une combinaison entre algorithmes à colonies de fourmis et l'hybridation de Markov et d'Ushakov. Pour réaliser cet objectif, nous avons commencé par intégrer des composants réparables dans la modélisation des systèmes, afin de développer des méthodes pour l'évaluation de la performance des SME réparables. En utilisant une méthode d'hybridation entre la méthode de Markov et la fonction génératrice universelle (UMGF). La deuxième contribution est une comparaison entre l'algorithme de colonies de fourmis (ACA) et deux méta-heuristiques l'algorithme d'harmonie HS et l'algorithme des chats CSA (cat swarm). Les résultats obtenus montrent la pertinence et l'efficacité de cette approche pour optimiser les systèmes parallèle-série.

### 5.5. Bibliographie du Chapitre 5

- [1] **Amara Mohamed**, Zebalah Abdelkader, Mostefa Mohamed. Reliability Evaluation for Multi-State Repairable Systems with Hybridization the Markov Stochastic Process and the Universal Generating Function, Journal of PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 97 NR 1/2021.
- [2] Anatoly .Lisnianski , Ilia .Frenkel , Yi Ding , “Multi-state System Reliability Analysis and Optimization for Engineers and Industrial Managers “, springer Reliability Engineering, December 2009.
- [3] Gregory .Levitin, “The Universal Generating Function in Reliability Analysis and Optimization “,springer Reliability Engineering, August 2005.
- [4] M. Agarwal, V.K. Sharma, “Ant Colony Optimization Algorithm for Heterogeneous Redundancy Allocation in Multi-State Series–Parallel Systems”, International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 16, No. 2, pp.86-163, 2009.
- [5] M. Ouzineb, M. Nourelfath and M. Gendreau, “Availability Optimization of Series-Parallel Multi-State Systems Using a Tabu Search Meta-heuristic”, IEEE, 2006.
- [6] M. Ouzineb, M. Nourelfath, M. Gendreau, ‘‘A Heuristic Method for Non-Homogeneous Redundancy Optimization of Series–Parallel Multi-State Systems’’, Journal of Heuristics, Vol. 17, No. 1, pp. 1–22, 2011.
- [7] S. Bouri, “Optimisation de la Production et la Structure d’Energie Electrique par les Colonies de Fourmis“, Thèse de Doctorat en science, Université de Sidi Bel Abbés, 2008.
- [8] Anatoly. Lisnianski ,Ilia .Frenkel, Alex .Karagrighoriou , “ Recent Advances in Multi-state Systems Reliability Theory and Applications”, springer Reliability Engineering, May 2017.
- [9] **Mohamed. Amara**, R. Meziane and A. Zebalah, Cost Optimization for Series-Parallel Petroleum Transportation Pipe-Lines under Reliability and Constraints, International Journal of Engineering Research and Application, Vol. 4, No. 2, pp. 302-310, January 2014.
- [10] **Mohamed. Amara**, R. Meziane, S. Boufala, A. Hamzi, Wind Farm Reliability Optimization using Ant Colony Algorithm Under Performance And Cost Constraints, 3<sup>rd</sup> International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2015), Marrakech & Ouarzazete, Morocco, December 10-13, 2015.
- [11] R. Meziane, E. Chatelet, Y. Bouzidi, S. Boufala, A. Hamzi and **M. Amara**, Wind Farm Reliability Optimization using Harmony Search under Performance and Budget Constraints, 2<sup>rd</sup> International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2014), Ouarzazete, Morocco, October 17-19, 2014.
- [12] **Mohamed. Amara**, R. Meziane, S. Boufala, A. Hamzi, and A. Bouanane, Hybrid Wind Gas Reliability Optimization Using Bactériale Foraging Approach Under Performance and Cost Constraints, 3<sup>rd</sup> International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2016), Marrakech & Ouarzazete , Morocco, November 14-17, 2016.
- [13] **Mohamed. Amara**, R. Meziane, S. Boufala, A. Hamzi, and A. Bouanane, Hybrid Wind Gas Reliability Optimization Using Bactériale Foraging Approach Under Performance

and Cost Constraints, 3<sup>rd</sup> International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2016), Marrakech & Ouarzazete , Morocco, November 14-17, 2016.

- [14] R. Meziane, **M. Amara**, S. Boufala and A. Hamzi, Hybrid Solar Gas Reliability Optimization using Cat Swarm Optimization under Performance and Cost Constraints, 4<sup>th</sup> International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2015), Palermo, Italy, November 22-25, 2015.
- [15] Meziane. R, S. Boufala, Hamzi .A, **Mohamed .Amara**, Hybrid Wind Solar Gas Reliability Optimization Using Grey Wolf Algorithm Under Performance And Cost Constraints, International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2016), Marrakech & Ouarzazete , Morocco, November 14-17, 2016.
- [16] **Mohamed Amara**, Abdelkrim Bouanane,Rachid Meziane,AbdelkaderZeblah, Hybrid wind gas reliability optimization using cat swarm approach under performance and cost constraints », 3<sup>rd</sup> International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2015), Marrakech & Ouarzazete, Morocco, December 10-13, 2015.

## Conclusion Générale et Perspectives

### Conclusion et Perspectives

La rage entre chercheurs se heurte en temps réel à des problèmes technologiques très complexes qui surgissent dans des domaines très divers, comme dans les systèmes de production, l'électricité, mécanique, etc. La plupart de ces problèmes peuvent être formulés comme des problèmes d'optimisation. Les méta-heuristiques forment un ensemble d'algorithmes utilisés pour résoudre les problèmes d'optimisation. En effet, l'utilisation des méta-heuristiques a fait l'objet d'un intérêt croissant du fait de leurs applications (notamment en électrotechnique et en électronique) qui ont connu un succès particulier ces dernières années grâce à l'évolution des ordinateurs.

Le travail de recherche présenté dans cette thèse concerne le développement de nouvelles méthodes d'optimisation qui s'appuient sur les algorithmes méta-heuristiques dits stochastiques destinés à résoudre des problèmes d'optimisation difficiles NP dur. Les problèmes traités dans cette étude entrent dans le cadre de conception optimale des systèmes multi-états parallèles-séries, en tenant compte du fait que les composants sont soumis à des dégradations qui sont pris dans ce travail en considération importante comme réparation après chaque défaillance. Les systèmes étudiés utilisent la réparation comme technique d'amélioration de la performance (fiabilité, disponibilité, maintenabilité). La méthodologie poursuivie pour atteindre les objectifs de cette thèse repose sur deux principales étapes :

L'objectif principal de cette thèse a été de développer des algorithmes efficaces pour résoudre des problèmes de conception optimale des systèmes de production, en tenant compte du fait que les composantes sont assujetties à des défaillances aléatoires. Les systèmes étudiés utilisent la redondance comme technique d'amélioration de la performance. La méthodologie poursuivie pour atteindre les objectifs de cette thèse repose sur deux étapes complémentaires:

1. Étape d'évaluation : afin d'estimer la fiabilité d'un système multi-états réparable de type parallèle-série, on utilise une hybridation entre la méthode de Markov et la fonction de génératrice universelle (UGF), Nous calculons les probabilités par la méthode de Markov et nous les injectons dans la fonction de génératrice universelle (UGF). Ce choix est motivé par le fait que cette méthode est assez faible mais a la résolution de problème d'optimisation de redondance de faible taille.

Les résultats de notre étude ont montré que cette méthode est suffisamment simple et rapide. Toutefois, son principal inconvénient se manifeste dans sa restriction aux systèmes à structure simple, qui prend un temps de calcul très long, limite son utilisation aux réseaux de petite taille.

2. Deuxième étape la méthode d'optimisation : d'une manière générale, la conception optimale des systèmes de production passe par la formulation de problème d'optimisations combinatoires difficiles. Les principaux défis étaient de concevoir un algorithme robuste et efficace pour résoudre les problèmes d'optimisation des systèmes parallèles-séries multi-états hétérogènes et d'améliorer les résultats obtenus dans la littérature.

Pour résoudre le problème de la conception optimale de redondance des systèmes électriques décentralisé de type parallèle-série. Le but fixé était d'évaluer la fiabilité du système multi-état parallèle-série hétérogène pour optimiser la structure au point de vue performance (fiabilité, disponibilité, et coût). Pour cela, nous avons proposé une combinaison entre algorithmes à colonies de fourmis et l'hybridation de Markov et d'Ushakov. Les objectifs de cette thèse reposent sur deux étapes complémentaires:

Dans la première phase, nous avons présenté les méthodes d'évaluation d'optimisation d'un système multi-état de type parallèle-série. D'abord, nous avons réalisé un état de l'art des réseaux électriques et la description des différents éléments de chaque sous-système et sont fonctionnements, et les concepts généraux de la fiabilité des systèmes parallèle-série ainsi que la formulation mathématique du problème d'optimisation. Nous avons montré que les approches d'analyse des systèmes et les modèles d'évaluation de leur performance proposent des points de vue différents sur la conception des systèmes. En effet, la plupart de ces modèles visent la conception des structures des systèmes à composants non réparables alors que la prise en compte les composants réparables est nécessaire pour une bonne représentation de la modélisation des systèmes réels.

Dans une deuxième étape, les travaux de recherche ont consisté à étudier l'optimisation d'une manière générale. En effet, la conception optimale des systèmes de production passe toujours par la formulation de problème d'optimisation combinatoire souvent difficiles à réaliser. Les principaux défis étaient de concevoir un algorithme robuste et efficace pour résoudre les problèmes d'optimisation des systèmes parallèles-séries multi-états hétérogènes et d'améliorer les résultats obtenus dans la littérature. Pour réaliser cet objectif, nous avons commencé par intégrer des composants réparables dans la modélisation des systèmes, afin de développer des méthodes pour l'évaluation de la performance des SME réparables. En utilisant une méthode d'hybridation entre la méthode de Markov et la fonction génératrice universelle (UMGF). La difficulté de construire un modèle pour évaluer la performance d'un système multi-états a été ressentie particulièrement lorsque ce système est complexe et est formé des composants réparables. Cependant, on a développée une technique permettant de modéliser le comportement d'un système multi-composants et multi-états en présence des composants réparables. Comportant un premier module d'optimisation de la fonction objective et un deuxième module qui fait l'hybridation Markov- Ushakov) pour évaluer la contrainte performance. le résidu du travail nous a conduit à une publication (Amara M., Zeblah A., Mostefai M. 2020).

## **Perspectives**

Pour les futures recherches, les pistes suivantes pourraient être suivies :

1. Application directe de la dépendance des composants pour l'évaluation de la fiabilité et la disponibilité de ces systèmes de production parallèle-série multi-états réparable (SMER) avec la prise en compte de la dépendance sont assez aisée à obtenir à partir des modèles markoviens. Si la productivité est choisie comme la mesure de performance du fonctionnement d'un système de production, le problème pourrait être proposé dans un futur travail de recherche.
2. Généralisé et trouver un moyen de programmation par un outil très puissant concrétiser l'hybridation.
3. Pour étendre l'application à des systèmes industriels réels.

## Bibliographies

- [1] H, Alkhatib, “Etude de la stabilité aux Petites Perturbations dans les Grands Réseaux Electriques Optimisation de la Régulation par une Méthode Méta-heuristique“, Thèse de Doctorat, Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, France, 2008.
- [2] I. Labed, “Dispatching Economique dans un Système de Puissance Electrique Par l’Intelligence Artificielle“, Thèse de Magister, Université de Constantine 1, 2013.
- [3] K. Alcheikh-Hamoud “Modélisation des grands systèmes Electriques interconnectés : Application a l'analyse de sécurité dans Un environnement compétitif “, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France, 2010.
- [4] A. Bensalem, “Analyse et Gestion de la Production des Centrales Electriques Liées Aux Réseaux Electrique de Grande Taille“, Thèse de Doctorat d’Etat, Université de Batna, 2007.
- [5] P. Bornard, “Conduite d’un système de production transport”, Techniques de l’ingénieur, Traité Génie électrique D4080, 2009.
- [6] Rezig .Missoum « Etude d'un dispatching économique des puissances actives par les algorithmes de fourmis » Université Hassiba Ben Bouali Chlef, Algérie mémoire de magister 2008.
- [7] KETFI Nadhir « Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d’énergie dispersée » Thèse de Doctorat, Université batna, algerie, 2014.
- [8] Mémento de la sûreté du système électrique, Paris: Tiempo Editions, RTE (2004).
- [9] A. Vergnol, “Intégration dans le réseau électrique et le marché de l’électricité de production décentralisée d'origine renouvelable : gestion des congestions locales“, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2010.
- [10] D. Louardi, “Contrôle de l’écoulement de puissance active par système FACTS“, Thèse de Magister, Université de El-Hadj Lakhdar, Batna, 2009.
- [11] Guard’s Formation, “La production d’énergie - les centrales nucléaires”, 2009.
- [12] O. Gergaud, “Modélisation Énergétique et Optimisation Economique d’un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et Associe à un Accumulateur“, Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2002.
- [13] A. Mirecki, “Etude Comparative de Chaines de Conversion d’Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance“, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 200.
- [14] L. Miguel, “ Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien pour une Unité de Production Isolée“, Thèse de Doctorat, Paris Sud 11, France.
- [15] D. Minh Thang, “Approche Probabiliste pour l’Evaluation de la Fiabilité Du Système Electrique Intégrant des Energies Renouvelables peu Prévisibles“, Thèse de Doctorat, Université Lille 1, France, 2012.
- [16] Recherche ECRIN entreprise, “ l’Electronique de Puissance Vecteur d’Optimisation pour les Energies Renouvelables“, Rapport de Synthèse, Mai 2002.
- [17] P. Bornard, “ Conduite d’un Système de Production-Transport“, TI D4080.

- [18] M. Saguan, "l'Analyse Economique des Architectures de Marché Electrique Application au Market Design du Temps Réel", Thèse de Doctorat, Université Paris Sud 11, France, 2007.
- [19] M. Zellagui, "Etude des Protections des Réseaux Electriques MT (30 & 10 KV)", Thèse de Magister, Université de Constantine, 2010.
- [20] J.L. Lilien, "Transport et Distribution del'Energie Electrique", Cours Donné à l'Institut d'Electricité Montefiore, Université de Liège, 2006.
- [21] J.L. Lilien, "Transport et Distribution del'Energie Electrique", Cours Donné à l'Institut d'Electricité Montefiore, Université de Liège, 2010.
- [22] M. Saguan, "l'Analyse Economique des Architectures de Marché Electrique Application au Market Design du Temps Réel", Thèse de Doctorat, Université Paris Sud 11, France, 2007.
- [23] Electrotechnique, ThéodorWildi, 3me édition, 2000.
- [24] Union européenne Intégration progressive des marches d'électricité de l'Algérie, du Maroc et de la Tunisie dans le marché intérieure de l'électricité de l'union européenne juin 2010.
- [25] Centre National d'Exploitation du Système (CNES). RTE, Réseau de transport d'électricité. <http://www.rte-france.com/bp2017>.
- [26] Opérateur du système électrique OSE, <http://www.ose.dz/courbes.php>.
- [27] Agirr .YZN Réseau Public de Distribution d'électricité. Description physique du Réseau Public de Distribution (RPD) d'électricité novembre 2015.
- [28] <http://fr.wikipedia.org> « Réseau de transport et de distribution d'électricité ».
- [29] Groupe Sonelgaz, "Guide Technique de Distribution", Document technique de Groupe SONELGAZ.
- [30] ERDERDF, Électricité Réseau Distribution France « Description physique du réseau public » ERDF-NOI-RES\_ 07E - Version 2 - 01/04/2008.
- [31] GRTG, "Centrales à cycle combiné : une solution d'avenir pour l'électricité ", janvier 2008.
- [32] Guard's Formation, "La production d'énergie - les centrales nucléaires", 2009.
- [33] O. Gergaud, "Modélisation Énergétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et Associe à un Accumulateur", Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2002.
- [34] A. Mirecki, "Etude Comparative de Chaines de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance", Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [35] L. Miguel, " Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien pour une Unité de Production Isolée", Thèse de Doctorat, Paris Sud 11, France.
- [36] Recherche ECRIN entreprise, " l'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation pour les Energies Renouvelables", Rapport de Synthèse, Mai 2002.
- [37] R.LARONDE, (2014), « Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédié aux énergies renouvelables : Application à un système photovoltaïque», Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers thèse de doctorat 2011.

- [38] Salman. K “Reliability modeling and evaluation of distributed energy resources and smart power distribution systems”july2014.
- [39] DO .Minh Thang « Approche probabiliste pour l’évaluation de lafiabilité du système électrique intégrant desénergies renouvelables peu prévisibles » thèse de doctorat 2012.
- [40] Mohamad EL SAMROUT « Optimisation de la maintenance préventive des systèmes série-parallèle à l’aide de méta heuristiques » thèse de doctorat 2011.
- [41] Andreea Bianca .OCNASU « Evaluation de la sureté de fonctionnement des réseaux de distribution par la simulation Monte Carlo : application `a des stratégies de maintenance optimales » thèse de doctorat octobre 2008.
- [42] Nouredine .HADJSAÏD « Sûreté de fonctionnement des réseaux de distribution en présence deproduction décentralisée » thèse de doctorat octobre 2004.
- [43] S. Bouri, “Optimisation de la Production et la Structure d’Energie Electrique par les Colonies de Fourmis“, Thèse de Doctorat en science, Université de Sidi Bel Abbés, 2008.
- [44] A. Yalaoui, “Allocation de Fiabilité et de Redondance dans les Systèmes Parallèle-Série et Série-Parallèle“, Thèse de Doctorat, 2004.
- [45] WASSY ISAAC. SORO « Modalisation et optimisation des performances et de la maintenance » Université Québec thèse de doctorat octobre 2011.
- [46] D. W. Coit , A. E. Smith, “Reliability Optimization of Series-Parallel System Using a Genetic Algorithm“, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 52, pp. 254-260, 1996.
- [47] Y. Liang , A. E. Smith, “An Ant Colony Optimization Algorithm for the Redundancy Allocation Problem“, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 53, pp. 417-423, 2004.
- [48] Ahmed. BELLAOUAR, « polycopié de fiabilité, maintenabilité et disponibilité (FMD) » Polycopié de fiabilitéUniversité Constantine -1-decembre 2013.
- [49] Olivier .Gaudoin, « Fiabilité des Systèmes et des LogicielsNotes de cours »Grenoble NIP.
- [50] K. Gordon, “Optimum Component Redundancy for Maximum System Reliability“, Operations Research, Vol. 5, pp. 229-243, 1957.
- [51] R. Zhao et K. Song, “A Hybrid Intelligent Algorithm for Reliability Optimization Problems“, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol. 2, pp. 1476-1481, 2003.
- [52] H.Yu, F. Yalaoui, E. ChateletetC. Chu, “Optimal design of a Maintainable Cold-Standby System“, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 92, pp. 85-91, 2007.
- [53] J. E. Ramirez-Marquez et D. W. Coit, “A Heuristic for Solving the Redundancy Allocation Problem for Multi-State Series- Parallel Systems“, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 83, pp. 341-349, 2004.
- [54] R. Meziane, Y. Massim, A. Zeblah, A. Ghoraf et M. Rahil, “Reliability Optimization Using Ant Colony Algorithm under performance and cost constraints“, Electric Power System Research, Vol. 76, pp. 1-8, 2005.
- [55] Z. Tian, G. Levitin, M. J. Zuo, “A Joint Reliability Redundancy Optimization Approach for Multi-State Series-Parallel Systems“, Vol. 94, pp. 1568-1576, 2009.
- [56] C. Y. Li, X. Chen, X. Yi et J. Tao, “Heterogeneous Redundancy Optimization for Multi-State Series-Parallel Systems Subject to Common Cause Failures“, Vol. 95, pp. 202-207, 2010.
- [57] I. F. Mauricio, “Electricité et Sécurité de Fourniture de Long Terme La Problématique de l’Evaluation de l’Adéquation de Capacité en Environnement Concurrentiel“, Mémoire de Master Recherche, Ecole du Pétrole et des Moteurs, 2007.

- [58] R. Meziane, "Optimisation de la Structure d'un Réseau de Production d'Énergie Électrique et Amélioration de sa Performance", Thèse de Doctorat, USTO 2007.
- [59] D. Salazar, C. M. Rocco et B. J. Galvan, "Optimization of Constrained Multiple Objective Reliability Problems Using Evolutionary Algorithms", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 91, pp. 1057-1070, 2006.
- [60] D. W. Coit et A. E. Smith, "Redundancy Allocation to Maximize a Lower Percentile of the System Time to Failure Distribution", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 47, pp. 79-87, 1998.
- [61] V. R. Prasad et W. Kuo, "Reliability optimization of coherent systems", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 49, pp. 323-330, 2000.
- [62] S. A. Reza, "Ant Colony for Optimization of Imperfect Preventive Maintenance for Multi-State Systems", Thèse de Doctorat, Université de Laval Québec, 2006.
- [63] D. E. Fyffee, W. W. Hines et N. K. Lee, "System Reliability Allocation and a Computational Algorithm", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 17, pp. 64-69, 1968.
- [64] Gregory. Levitin, "The Universal Generating Function in Reliability Analysis and Optimization". Springer series in reliability engineering) .Springer-Verlag London Limited 2005.
- [65] Mohamed. Ouzineb, « Heuristiques efficaces pour l'optimisation de la performance des systèmes séries-parallèles » thèse de doctorat Juin 2009.
- [66] M. Nourelfath et N. Nahas, "Artificial Neural Networks for Reliability Maximization Under Budget and Weight Constraints", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 11, pp. 139-151, 2005.
- [67] M. Aggarwal et R. Gupta, "Genetic Search for Redundancy Optimization in Complex Systems", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 12, pp. 338-353, 2006.
- [68] D. W. Coita et A. Konak, "Multiple Weighted Objectives Heuristic for the Redundancy Allocation Problem", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 55, pp. 551-558, 2006.
- [69] C. Ha et W. Kuo, "Multi-Path Heuristic for Redundancy Allocation the Tree Heuristic", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 55, pp. 37-43, 2006.
- [70] Z. Tian et Zuo M. J, "Redundancy Allocation for Multi-State Systems Using Physical Programming and Genetic Algorithms", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 91, pp. 1049-1056, 2006.
- [71] Y. Liang et Y. Chen, "Redundancy Allocation of Series-Parallel Systems Using a Variable Neighborhood Search Algorithm", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 92, pp. 323-331, 2007.
- [72] N. Nahas, M. Nourelfath et D. AitKadi, "Computing Ant Colony and the Degraded Ceiling Algorithm for the Redundancy Allocation Problem of Series-Parallel System", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 92, pp. 211-222, 2007.
- [73] A. J. Federowicz et M. Mazumder, "Use of Geometric Programming to Maximize Reliability Achieved by Redundancy", *Operations Research*, Vol. 19, pp. 948-954, 1968.
- [74] F. A. Tillman, C. L. Hwang et W. Kuo, "Determining Component Reliability and Redundancy for Optimum System Reliability", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 26, pp. 162-165, 1977b.
- [75] T. Chen, "IA Based Approach for Reliability Redundancy Allocation Problems", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 182, pp. 1556-1567, 2006.
- [76] Guerraiche .Khaled, "Conception Optimale des Systèmes de Production d'Énergie Électrique à l'Aide de Méta-heuristiques", Thèse de Doctorat, USTO 2015.

- [77] H. Kim, C. Baet D. Park, "Reliability Redundancy Optimization Using Simulated Annealing Algorithms", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 12, pp. 354-363, 2006.
- [78] F. A. Tillman, C. L. Hwang et W. Kuo, "Optimization Technique for System Reliability with Redundancy", *A Review*, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 26, pp. 148-155, 1977a.
- [79] W. Kuo et R. Wan, "Recent advances in optimal reliability allocation", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Systems and Humans*, Vol. 37, pp. 143-156, 2007b.
- [80] R. Bellman et S. Dreyfus, "Dynamic Programming and the Reliability of Multi Component Devices", *Operations Research*, Vol. 6, pp. 200-206, 1958.
- [81] F. A. Tillman, C. L. Hwang et W. Kuo, "System Effectiveness Models", *An Annotated Bibliography*, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 29, pp. 295-304, 1980.
- [82] L. S. Coelho, "An Efficient Particle Swarm Approach for Mixed-Integer Programming in Reliability Redundancy Optimization Applications", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94, pp. 830-837, 2009.
- [83] L. Sahoo, "Studies on Reliability Optimization Problems by Genetic Algorithm", *Thèse de Doctorat*, Université de Burdwan Bengal India, 2012.
- [84] W. I. Soro, "Modélisation et Optimisation des Performances et de la Maintenance des Systèmes Multi- Etats", *Thèse de Doctorat*, Université de Laval Québec, 2011.
- [85] R. Zhao et K. Song, "A hybrid intelligent algorithm for reliability optimization problems", *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 2, pp. 1476-1481, 2003.
- [86] Y. Liang, et A. E. Smith, "An Ant Colony Optimization Algorithm for the Redundancy Allocation Problem", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 53, pp. 417-423, 2004.
- [87] M. Sakawa, "Multiobjective Optimization by the Surrogate Worth Trade-Off Method", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 27, pp. 311-314, 1978.
- [88] M. Sakawa, "An Interactive Computer Program for Multi-Objective Decision Making by the Sequential Proxy Optimization Technique", *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 14, pp. 193-213, 1981b
- [89] W. Kuo et R. Wan, "Recent Advances in Optimal Reliability Allocation", *Computational Intelligence in Reliability Engineering (SCI)*, Vol. 39, pp. 1-36, 2007.
- [90] H. Omessaad, "Contribution au Développement de Méthodes d'Optimisation Stochastiques. Application a la Conception des Dispositifs", *Thèse de Doctorat*, Université des Sciences et Technologies de Lile, 2003.
- [91] E.H.L. AARTS, J.K. LENSTRA (Eds.), "Local search in combinatorial optimization", John Wiley & Sons, 1997.
- [92] H. Hanaa, "Hybridations d'Algorithmes Méta-heuristiques en Optimisation Globale et leurs Applications", *Thèse de Doctorat*, Université Mohamed V Agdal, 2013.
- [93] Meziane. R, « Optimisation de la structure d'un réseau de production d'énergie électrique et amélioration de sa performance », thèse de doctorat, USTO 2007.
- [94] D. Corne, M. Dorigo and F. Glover, editors, "New Ideas in Optimization", McGraw-Hill, 11-32.
- [95] A. Benyamina, "Application des algorithmes de colonies de fourmis pour l'optimisation et la classification des images", *Thèse de Doctorat*, USTO, 2013.

- [96] F. Tangour et P. Borne, "Presentation of Some Méta-heuristics for the Optimization of Complex Systems", *Studies in Informatics and Control*, Vol. 17, No. 2, juin 2008.
- [97] L. Idoumghar, "Meta-heuristiques Hybrides et leurs Applications", *Mémoire d'Habilitation a Diriger des Recherches*, Université de Haute Alsace, 2012.
- [98] J. Dipama, "Optimisation Multi-Objectif Des Systèmes Energétiques", *Thèse de Doctorat*, Université de Montréal, Canada, 2010.
- [99] Jin-Kao Hao, Philippe Galinier, Michel Habib, « Méta heuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes », *Revue d'Intelligence Artificielle*, Vol : No. 1999.
- [100] J. P. Chrétien-Goni, "Heuristique", *Encyclopædia Universalis*, 2005.
- [101] E. G. Talbi, "Méta-heuristics", *From Design to Implementation*, Wiley, 2009.
- [102] J. Dipama, "Optimisation Multi-Objectif Des Systèmes Energétiques", *Thèse de Doctorat*, Université de Montréal, Canada, 2010.
- [103] C. Papadimitriou et K. Steiglitz, "Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity", Prentice-Hall, 1982.
- [104] H. Alkhatib, "Etude de la stabilité aux Petites Perturbations dans les Grands Réseaux Electriques : Optimisation de la Régulation par une Méthode Méta-heuristique", *Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III*, France, 2008.
- [105] L. Slimani, "Contribution à l'application de l'optimisation par des méthodes méta-heuristiques à l'écoulement de puissance optimal dans un environnement de l'électricité déréglé", *Thèse de Doctorat*, Université de Batna, 2009.
- [106] Méta heuristique, *Wikipédia encyclopédie*, 20 décembre 2005.
- [107] N. Monmarché, « Algorithmes de fourmis artificielles applications à la classification et à l'optimisation », *thèse de doctorat*, l'Université de Tours, le 20 décembre 2000.
- [108] L. Jourdan, "Méta-heuristiques Coopératives : du Déterministe au Stochastique", *Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université Lille I*, 2010.
- [109] J. Dreo, A. Petrowski, P. Siarry et E. Taillard, « Métaheuristiques pour l'optimisation difficile », Eyrolles, 2003.
- [110] L. Idoumghar, "Meta-heuristiques Hybrides et leurs Applications", *Mémoire d'Habilitation a Diriger des Recherches*, Université de Haute Alsace, 2012.
- [111] S., Martello S., Osman I.H., Roucairol C. (eds.) "Meta- Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization", Kluwer, Boston, 1999.
- [112] D. Meignan, "Une Approche Organisationnelle et Multi-Agent pour la Modélisation et l'Implantation de Méta-heuristiques", *Université de Technologie de Belfort-Montbéliard*, 2008.
- [113] V. Barichard, "Approches Hybrides pour les Problèmes Multi-objectifs", *Thèse de Doctorat*, Université d'Angers.
- [114] A. Assadi-Haghi, "Contribution au Développement de Méthodes d'Optimisation Structurelle pour la Conception Assistée par Ordinateur de Composants et de Circuits Hyperfréquences", *Thèse de Doctorat*, Université de Limoges, 2007.
- [115] C. Papadimitriou, "The Complexity of Combinatorial Optimization Problems", *Thèse de Doctorat*, Princeton, 1976.
- [116] S. Noël, "Méta-heuristiques Hybrides pour la Résolution du Problème d'Ordonnancement de Voitures dans une Chaîne d'Assemblage Automobile", *Thèse de*

- Doctorat, Université du Québec, 2007.
- [117] H. Hanaa, “Hybridations d’Algorithmes Méta-heuristiques en Optimisation Globale et leurs Applications“, Thèse de Doctorat, Université Mohamed V Agdal, 2013.
  - [118] A. Berkani, “Méta-heuristique Hybride Réseaux de Neurones Artificiels-PSO du Recuit Simulé pour la Commande d’un Procédé Industriel Non-linéaire“, Thèse de Magistère, Université de Batna, 2013.
  - [119] J. K. Hao, R. Dorne et P. Galinier, “Tabu Search for Frequency Assignment in Mobile Radio Networks”. *Journal of Heuristics*, Vol. 4, pp. 47-62, Juin 1998.
  - [120] M. Ouzineb, “Heuristiques Efficaces pour l’Optimisation de la Performance des Systems Séries-Parallèles“, Thèse de Doctorat, Université de Montréal, 2009.
  - [121] F. Glover et M. Laguna, “Tabu Search“, Kluwer Academic Publishers, 1997.
  - [122] J. K. Hao, R. Dorne et P. Galinier, “Tabu Search for Frequency Assignment in Mobile Radio Networks”. *Journal of Heuristics*, Vol. 4, pp. 47-62, Juin 1998.
  - [123] S. Chen, S. Smith., “Commonality and genetic algorithms. Technical Report CMU-RITR- 96-27”, The Robotic Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 1996.
  - [124] Algorithmes génétiques, Wikipedia, encyclopédie, 20 décembre 2005.
  - [125] S. Chen, S. Smith., “Commonality and genetic algorithms. Technical Report CMU-RITR- 96-27, The Robotic Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 1996.
  - [126] S., Martello S., Osman I.H., Roucairol C. (eds.) “Meta- Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization”, Kluwer, Boston, 1999.
  - [127] V. Barichard, “ Approches Hybrides pour les Problèmes Multi-objectifs“, Thèse de Doctorat, Université d'Angers.
  - [128] O. Roux, « La mémoire dans les algorithmes à colonie de fourmis : applications à l’optimisation et à la programmation automatique », thèse de doctorat de l’Université du Littoral Cote d’Opale, 2001.
  - [129] V. Maniezzo, M. Dorigo and A. Colorni, “The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, 26(1) :29-41, 1996.
  - [130] L. Bianchi, L.M. Gambardella, M.Dorigo. “An ant colony optimization approach to the probabilistic traveling salesman problem”, In *Proceedings of PPSN-VII, Seventh Inter17 national Conference on Parallel Problem Solving from Nature Science*. Springer Verlag, Berlin, Germany, 2002.
  - [131] J.Dreo, A. Pérowski, P. Siarry et T. Eric, “Méta-heuristiques pour l’Optimisation Difficile“, Editions Eyrolles, 2003.
  - [132] D. Meignan, “Une Approche Organisationnelle et Multi-Agent pour la Modélisation et l’Implantation de Méta-heuristiques“, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.
  - [133] M. Ouzineb, “Heuristiques Efficaces pour l’Optimisation de la Performance des Systems Séries-Parallèles“, Thèse de Doctorat, Université de Montréal, 2009.
  - [134] I. S. WASSY, “Modélisation et Optimisation des Performances et de la Maintenance des Systèmes Multi-Etats“, Thèse de Doctorat, Université de Laval Québec, 2006.

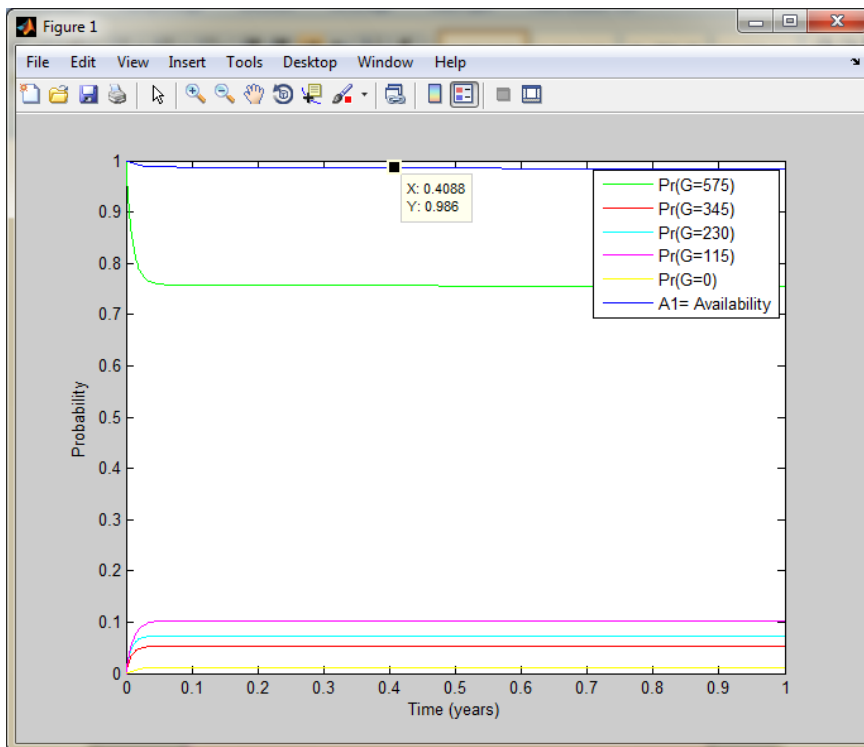
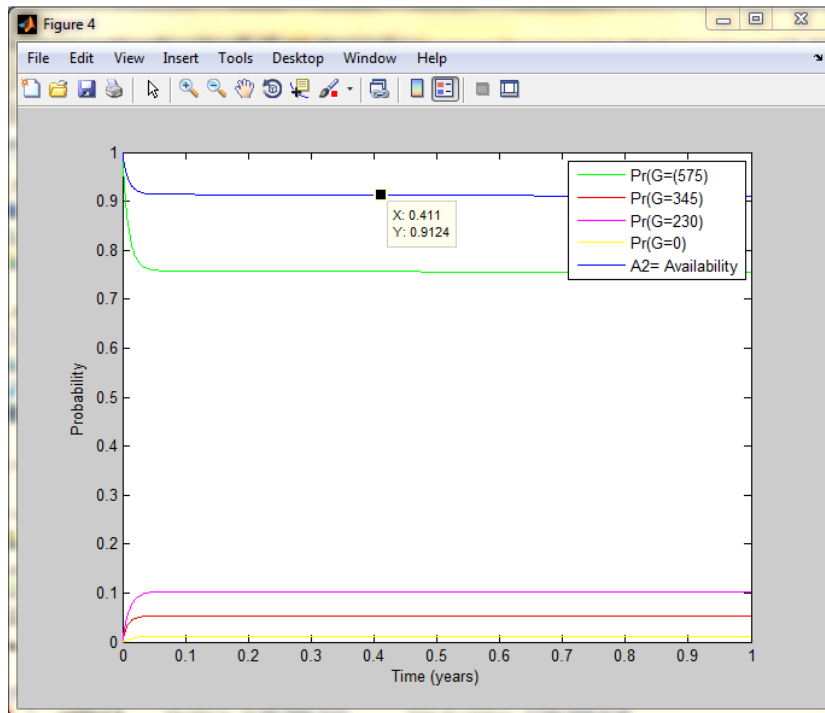
- [135] S. A. Reza, "Ant Colony for Optimization of Imperfect Preventive Maintenance for Multi-State Systems", Thèse de Doctorat, Université de Laval Québec, 2006.
- [136] A. Lisnianski and G. Levitin, "Multi-State System Reliability", World Scientific Publishing Co, 2003.
- [137] I. Ushakov, "Universal Generating Function", Soviet Journal of Computing System Science, Vol. 24, N°. 5, pp. 118-29, 1986.
- [138] J. Murchland, "Fundamental Concepts and Relations for Reliability Analysis of Multistate Systems Reliability and Fault Tree Analysis", Theoretical and Applied Aspects of System Reliability, SI AM, pp. 581-618, 1975.
- [139] I. Ushakov, "Optimal Standby Problem and a Universal Generating Function", Soviet Journal Computer Systems Science, Vol. 25, N°. 4, pp. 61-73, 1987.
- [140] R. Meziane, "Optimisation de la Structure d'un Réseau de Production d'Énergie Électrique et Amélioration de sa Performance", Thèse de Doctorat, USTO, 2007.
- [141] I. Ushakov, "Reliability Analysis of Multi-State Systems by Means of a Modified Generating Function", Journal Information Process, Cybernet, Vol. 34, pp. 24-29, 1988.
- [142] G. Levitin, A. Lisnianski, H. Ben-Haim et D. Elmakis, "Redundancy Optimization for Series-Parallel Multi-State Systems, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 47, N°. 2, pp. 165-172, 1998.
- [143] B. Gnedenko, et I. Ushakov, "Probabilistic Reliability Engineering", Wiley, New York, 1995.
- [144] G. Levitin et A. Lisnianski, "Joint Redundancy and Maintenance Optimization for Multistate Series-Parallel Systems", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 64, pp. 33-42, 1999.
- [145] Levitin G., Lisnianski A. and Benhaim H., "Structure optimization of multi-state system with time redundancy", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 67, Elsevier, pp. 103-112, 2000.
- [146] Levitin G. and Lisnianski A., "Structure optimization of multi-state system with two modes failures", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 72, Elsevier, pp. 75-89, 2001.
- [147] Lisnianski A., Levitin G., Ben-Haim H. and Elmakis D., "Power system structure optimization subject to reliability constraints," *Electric Power System research*, Vol. 39, pp. 145-152, 1996.
- [148] Levitin G., Lisnianski A. and Elmakis D. "Structure optimization of power system with different redundant elements," *Electric Power System Research*, Vol. 43, pp. 19-27, 1997.
- [149] Levitin G. and Lisnianski A., "A new approach to solving problems of multi-state system reliability optimization". *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 47, No. 2, Elsevier, pp. 93-104, 2001.
- [150] Levitin G., Lisnianski A. and Benhaim H., "Structure optimization of multi-state system with time redundancy", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 67, Elsevier, pp. 103-112, 2000.

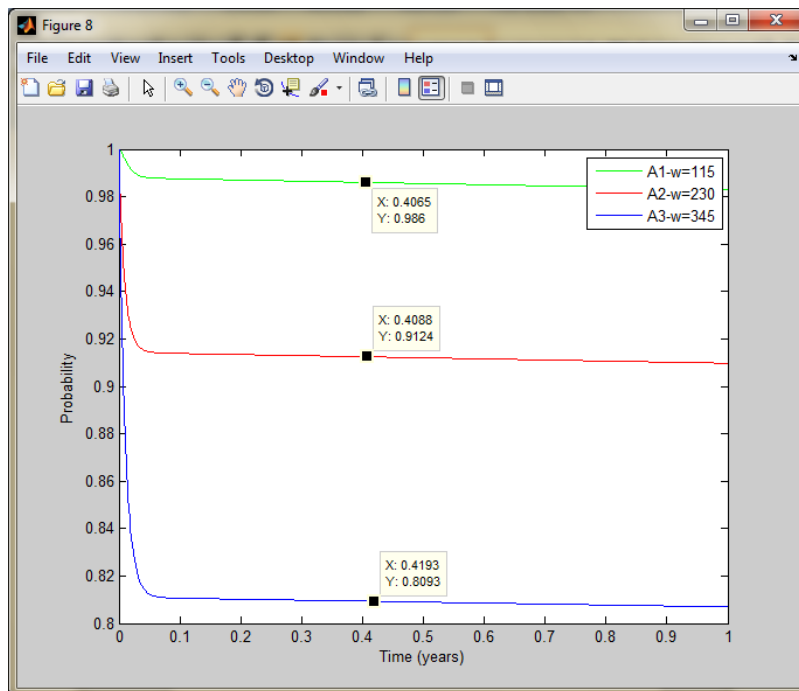
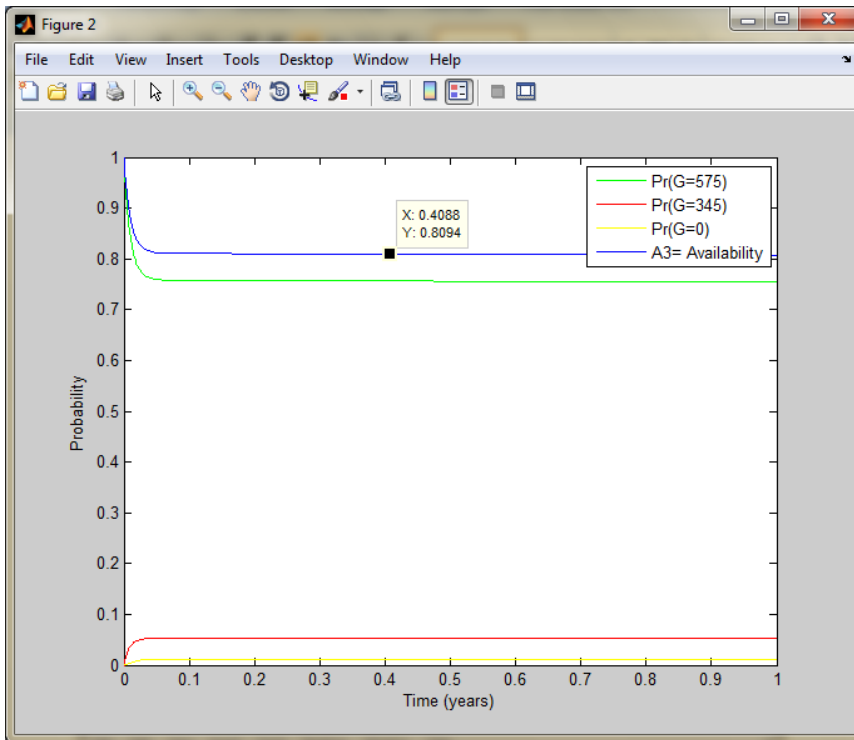
- [151] Levitin G, and Lisnianski A., “Survivability maximization for vulnerable multi-state systems with bridge topology”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 70, Elsevier, pp. 152-140, 2000.
- [152] Levitin G. and Lisnianski A., “Optimization of imperfect preventive maintenance for multi-state systems ”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 47, No. 2, pp. 93-104, 2001.
- [153] Levitin G, and Lisnianski A., “Reliability optimization for weighted voting systems”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 71, Elsevier, pp. 131-138, 2001.
- [154] Levitin G. and Lisnianski A., “Structure optimization of multi-state system with two modes failures” , *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 72, Elsevier, pp. 75-89, 2001.
- [155] Levitin G, “Optimal unit grouping in weighted voting systems”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 72, Elsevier, pp. 179-191, 2001.
- [156] Levitin, Gregory “Universal generating function in reliability analysis and optimization”. Springer series in reliability engineering, August 2005.
- [157] Alexopoulos C, Fishman. G,” Characterizing stochastic flow networks using the Monte Carlo method”, *Networks* 1991;21:775-798.
- [158] Alexopoulos C, Fishman. G. “Sensitivity analysis in stochastic flow networks using the Monte Carlo method”. *Networks* 1993;23:605-21.
- [159] Lin. Y, “A simple algorithm for reliability evaluation of a stochastic-flow network with node failure”, *Comput Oper Res* 2001;28:1277-85.
- [160] Alexopoulos. C, “A note on state-space decomposition methods for analyzing stochastic flow networks”, *IEEE Trans Reliab* 1995;44:354-7.
- [161] Frenkel. I, Khvatskin. L, Lisnianski .A, « Markov reward model for performance deficiency calculation of refrigeration system », *Reliability, risk and safety: theory and applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, London, 2009 pp 1591–1596.
- [162] Frenkel. I, Khvatskin. L, Lisnianski. A, « Management decision making based on Markov reward models for refrigeration system ». *J Pol Saf Reliab Assoc* 1, 2010:89–98.
- [163] J. R. Norris, “Markov chains“, Cambridge University Press, New-York, 1997.
- [164] Lisniansky. A, Frenkel. I, Khvatskin. L, Ding. Y, « Markov reward model for multi-state system reliability assessment ». *Statistical models and methods for biomedical and technical systems,* Birkhauser, Boston, 2007 pp 153–168.
- [165] C. T. Lam, R. H. Yeh, “Optimal Maintenance Policies for Deteriorating Systems Under various Maintenance Strategies“, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 43, N°. 3, pp. 423-430, 1994.
- [166] H. Pham, A. Suprasad et R.B. Misra, “Availability and Mean Life Time Prediction of Multistage Degraded System with Partial Repairs“, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 56, N°. 2, pp. 169-173, 1997.
- [167] S. E. Barlow, A. S. Wu, “Coherent Systems with Multi-State Components“, *Mathematics of Operations Research*, Vol. 3, N°.11, pp. 275-281, 1978.

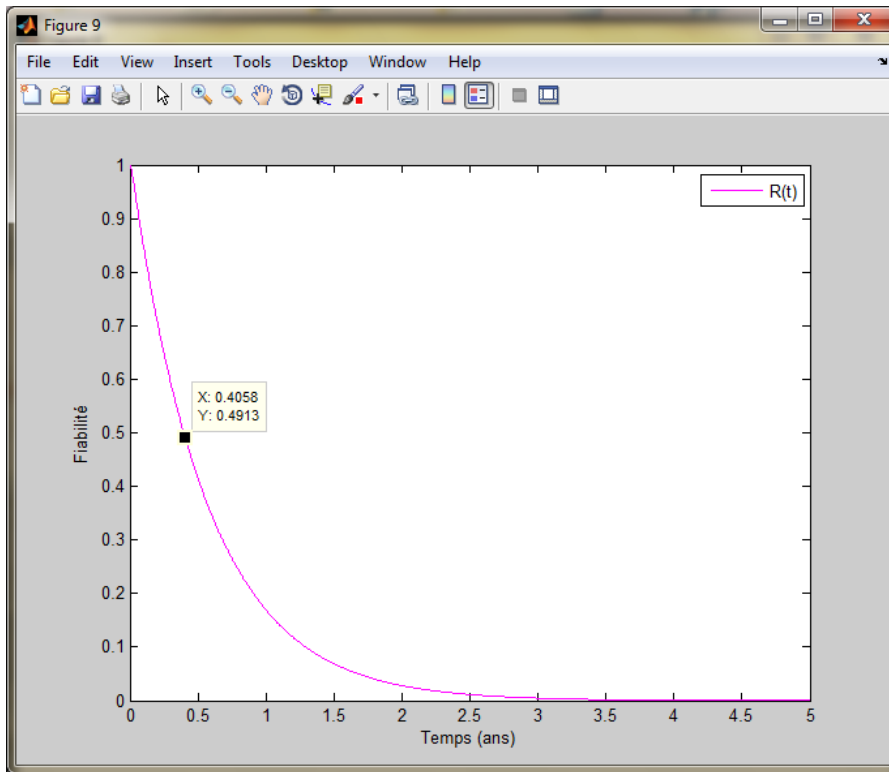
- [168] E. El-Newehi, F. Proschan, J. Sethuraman, “Multistate Coherent Systems“, Journal of Applied Probability, Vol. 15, N°.12, pp. 675-688, 1978.
- [169] S. Ross, “Multivalued State Component Systems“, Annals of Probability, Vol. 7, pp. 379-383, 1979.
- [170] S. Wu et L. Y. Chan, “Performance Utility-Analysis of Multi-Sate Systems“, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 52, N°. 1, pp. 14-19, 2003.
- [171] H. Pham, A. Suprasad, R. B. Misra, “Availability and Mean Life Time Prediction of Multistage Degraded System with Partial Repairs“, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 56, N°. pp. 169-173, 1997.
- [172] E. M. Hendrix, O. Klepper, “On Uniform Covering, Adaptive Random Search and Raspberries“, Journal of Global Optimization, Vol.18, Vol. 2, pp, 143–163, 2000.
- [173] W. Tfaili, “Conception d’un Algorithme de Colonie de Fourmis pour l’Optimisation Continue Dynamique“, Thèse de Doctorat, Paris 12-Val De Marne UFR de Sciences et Technologie, 2007.
- [174] **Amara. Mohamed**, Zebelah. Abdelkader, Mostefai. Mohamed, “ Reliability Evaluation for Multi-State Repairable Systems with Hybridization the Markov Stochastic Process and the Universal Generating Function”, Journal of PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 97 NR 1/2021.
- [175] Anatoly .Lisnianski , Ilia .Frenkel , Yi Ding , “Multi-state System Reliability Analysis and Optimization for Engineers and Industrial Managers “, springer Reliability Engineering, December 2009.
- [176] Gregory .Levitin, “The Universal Generating Function in Reliability Analysis and Optimization “,springer Reliability Engineering, August 2005.
- [177] M. Agarwal, V.K. Sharma, “Ant Colony Optimization Algorithm for Heterogeneous Redundancy Allocation in Multi-State Series–Parallel Systems”, International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 16, No. 2, pp.86-163, 2009.
- [178] M. Ouzineb, M. Nourelfat, M. Gendreau, “Availability Optimization of Series-Parallel Multi-State Systems Using a Tabu Search Meta-heuristic”, IEEE, 2006.
- [179] M. Ouzineb, M. Nourelfath, M. Gendreau, ‘‘A Heuristic Method for Non-Homogeneous Redundancy Optimization of Series–Parallel Multi-State Systems’’, Journal of Heuristics, Vol. 17, No. 1, pp. 1–22, 2011.
- [180] S. Bouri, “Optimisation de la Production et la Structure d’Energie Electrique par les Colonies de Fourmis“, Thèse de Doctorat en science, Université de Sidi Bel Abbés, 2008.
- [181] Anatoly. Lisnianski, Ilia .Frenkel, Alex .Karagrighoriou , “ Recent Advances in Multi-state Systems Reliability Theory and Applications”, springer Reliability Engineering, May 2017.
- [182] **Mohamed. Amara**, R. Meziane and A. Zebelah, “Cost Optimization for Series-Parallel Petroleum Transportation Pipe-Lines under Reliability and Constraints”, International Journal of Engineering Research and Application, Vol. 4, No. 2, pp. 302-310, January 2014.
- [183] **Mohamed. Amara**, R. Meziane, S. Boufala, A. Hamzi, “Wind Farm Reliability Optimization using Ant Colony Algorithm Under Performance And Cost

- Constraints”, 3<sup>rd</sup> International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2015), Marrakech & Ouarzazete, Morocco, December 10-13, 2015.
- [184] R. Meziane, E. Chatelet, Y. Bouzidi, S. Boufala, A. Hamzi and **M. Amara**, “Wind Farm Reliability Optimization using Harmony Search under Performance and Budget Constraints”, 2<sup>rd</sup> International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2014), Ouarzazete, Morocco, October 17-19, 2014.
- [185] **Mohamed. Amara**, R. Meziane, S. Boufala, A. Hamzi, and A. Bouanane, “Hybrid Wind Gas Reliability Optimization Using Bactériale Foraging Approach Under Performance and Cost Constraints”, 3<sup>rd</sup> International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2016), Marrakech & Ouarzazete , Morocco, November 14-17, 2016.
- [186] **Mohamed. Amara**, R. Meziane, S. Boufala, A. Hamzi, and A. Bouanane, “Hybrid Wind Gas Reliability Optimization Using Bactériale Foraging Approach Under Performance and Cost Constraints”, 3<sup>rd</sup> International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2016), Marrakech & Ouarzazete , Morocco, November 14-17, 2016.
- [187] R. Meziane, **M. Amara**, S. Boufala and A. Hamzi, “Hybrid Solar Gas Reliability Optimization using Cat Swarm Optimization under Performance and Cost Constraints”, 4<sup>th</sup> International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2015), Palermo, Italy, November 22-25, 2015.
- [188] Meziane. R, S. Boufala, Hamzi .A, **Mohamed .Amara**, “Hybrid Wind Solar Gas Reliability Optimization Using Grey Wolf Algorithm Under Performance And Cost Constraints”, International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2016), Marrakech & Ouarzazete , Morocco, November 14-17, 2016.

## 8. ANNEXE A







```

1 - Calcul de fiabilité / disponibilité de composants à dégradations réparables
2 - structures parallele-serie / serie-parallele
3
4 - clear all;
5 - p0=[1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
6 - [t,p]=ode40(@funcExmp2_dispo, [0 2], p0)
7
8 - PrG0=p(:,5)+p(:,8)+p(:,9)+p(:,10)+p(:,11)+p(:,12);
9 - PrG1_5=p(:,3)+p(:,7);
10 - PrG1_8=p(:,4)+p(:,6);
11 - PrG2_0=p(:,2);
12 - PrG3_5=p(:,1)];
13 - A1=p(:,1)+p(:,2)+p(:,3)+p(:,4)+p(:,6)+p(:,7);
14 - A2=p(:,1)+p(:,2)+p(:,3)+p(:,7);
15 - A3=p(:,1)+p(:,2);
16 - plot(t,PrG3_5,'g',t,PrG2_0,'r',t,PrG1_8,'m',t,PrG1_5,'c',t,PrG0,'y',t,A1,'b');
17 - legend('Pr (G=575)', 'Pr (G=345)', 'Pr (G=230)', 'Pr (G=115)', 'Pr (G=0)', 'A1=Disponibilité');
18 - %legend('Pr (G=3.5)', 'Pr (G=2)', 'Pr (G=1.8)', 'Pr (G=1.5)', 'Pr (G=0)', 'A1= Availability');
19 - %plot(t,PrG3_5,'g',t,PrG2_0,'r',t,PrG1_5,'m',t,PrG0,'y',t,A2,'b');
20 - legend('Pr (G=575)', 'Pr (G=345)', 'Pr (G=230)', 'Pr (G=0)', 'A2=Disponibilité');
21 - %legend('Pr (G=3.5)', 'Pr (G=2)', 'Pr (G=1.8)', 'Pr (G=0)', 'A2= Availability');
22 - %plot(t,PrG3_5,'g',t,PrG2_0,'r',t,PrG0,'y',t,A3,'b');
23 - legend('Pr (G=575)', 'Pr (G=345)', 'Pr (G=0)', 'A3=Disponibilité');
24 - %legend('Pr (G=3.5)', 'Pr (G=2)', 'Pr (G=0)', 'A3= Availability');
25 - %plot(t,A1,'g',t,A2,'r',t,A3,'b');
26 - %plot(t,A1,'g');
27 - %plot(A1(t),A2(t)),A3(t));
28 - %plot3(A1,'g',A2,'y',t,'r');
29 - %axis([0 1 0 100 2]);
30 - %scatter3(A1(:),A2(:),t(:),'filled', view(-60,60)
31
32 - %plot3(A1(:),A2(:),A3(:),t(:),'o');
33
34 - %view(90,90)

```

## ANNEXE B. Description du logiciel

Le programme ‘Conception Optimalal’ est un programme d’optimisation globale du système électro énergétique, il fonctionne sous DOS. Les données sont saisies inter activement suite à l’instruction java Coneption Optimale.

A la première exécution le programme comporte des données par défaut pour voir un exemple d'exécution.

Le logiciel a été élaboré pour le problème d'optimisation des systèmes de production parallèle-sérialé spécifiquement les réseaux électriques c-à-d trouver la structure optimale d'un réseau suivant le critère désiré et de faire une optimisation du réseau électrique en utilisant les deux fonctions objectives pour le choix optimal des composants en utilisant une combinaison entre algorithmes à colonies de fourmis et l'hybridation de Markov afin de faire une conception optimal d'un système électrique.

Les fonctions objectives considérées sont ceux :

- La minimisation du coût du système sous contrainte de fiabilité.
- La maximisation de la fiabilité sous contrainte de coût et performance.
- 

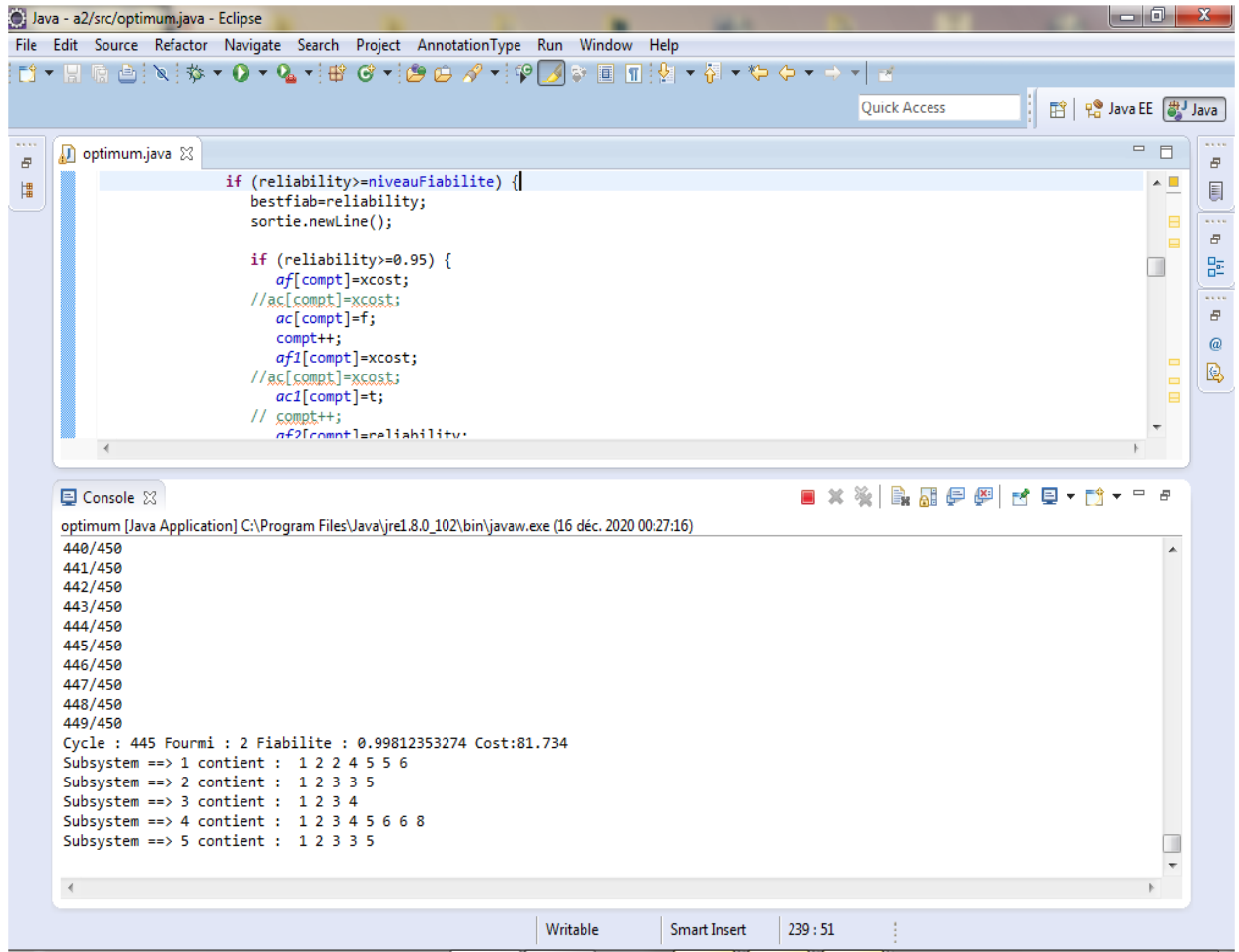
Dans notre cas, nous avons choisit les données rassemblées dans le tableau suivant:

DONNÉE POUR L'EXÉCUTION DU PROGRAMME

Nombre de fourmis $N_f$	500
Nombre de cycles $N_c$	250
Paramètre $\alpha$	5
Paramètre $\beta$	2
Dépôt de phéromone $\tau_0$	0.008
Évaporation de la phéromone $\rho_0$	0.025
Niveau de fiabilité désirée	0.90

## B.1. Résultats

La figure ci dessous illustre l'interface des résultats de l'algorithme de colonies de fourmis



The screenshot shows the Eclipse IDE interface. The top part displays the source code for 'optimum.java'. The bottom part shows the console output of the program.

```
if (reliability>=niveauFiabilite) {  
    bestfiab=reliability;  
    sortie.newLine();  
  
    if (reliability>=0.95) {  
        af[compt]=xcost;  
        //ac[compt]=xcost;  
        ac[compt]=f;  
        compt++;  
        af1[compt]=xcost;  
        //ac[compt]=xcost;  
        ac1[compt]=t;  
        //compt++;  
        af2[compt]=reliability;
```

```
optimum [Java Application] C:\Program Files\Java\jre1.8.0_102\bin\javaw.exe (16 déc. 2020 00:27:16)  
440/450  
441/450  
442/450  
443/450  
444/450  
445/450  
446/450  
447/450  
448/450  
449/450  
Cycle : 445 Fourmi : 2 Fiabilite : 0.99812353274 Cost:81.734  
Subsystem ==> 1 contient : 1 2 2 4 5 5 6  
Subsystem ==> 2 contient : 1 2 3 3 5  
Subsystem ==> 3 contient : 1 2 3 4  
Subsystem ==> 4 contient : 1 2 3 4 5 6 6 8  
Subsystem ==> 5 contient : 1 2 3 3 5
```

Figure. B.1 : interface des résultats de l'algorithme de colonies de fourmis