

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

Université des Sciences et de la Technologie
«Mohamed Boudiaf »
Oran

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER

SPECIALITE : ELECTROTECHNIQUE

OPTION : FIABILITE DES SYSTEMES ELECTRO-ENERGETIQUES

THEME

Optimisation de la réserve de puissance

Présenté et soutenu par

M^{me} : Benayed Fatima Zohra

SOUTENUE LE 17 /12 /2012 DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

Mr. Bouthiba Tahar	Professeur	USTO-MB	Président de jury
Mr. RAHLI Mostefa	Professeur	USTO-MB	Directeur de projet
Mr. Sebbani Mohamed	Professeur	U. Essenia	Examineur
Mr. Kotni Lahouari	MCA	USTO-MB	Examineur

Année universitaire : 2011-2012

Résumé

L'exploitation rationnelle de système électrique dépend de sa configuration. Une configuration optimale évite des dépenses excessives, dans le contexte d'ingénierie, le choix des équipements en fonction de leurs disponibilité, coût et performance est la variable de décision la plus importante pour optimiser un processus.

Le travail présenté ici, s'inscrit dans le cadre de la demande scientifique actuelle qui consiste à l'optimisation et à la conception des configurations des systèmes électriques avec des contraintes de fiabilité et de coût.

Dans ce contexte, l'optimisation des systèmes parallèles –séries dont la demande se distingue par des niveaux différents qui doivent être satisfaits avec une fiabilité exigée est traitée.

Lorsque le système se caractérise par une disponibilité multi –états, une nouvelle méthode d'évaluation de la fiabilité dite « UMGF (Univesal Moment GénératingFunction) » offre plusieurs avantages par rapport à la méthode classique, et comme le système comporte plusieurs variétés d'éléments, une situation combinatoire de choix d'élément fait appel aux méta – heuristiques qui permettent d'évaluer la structure ,nous nous sommesintéressés dans notre travail à l'algorithme HarmonySearch.

REMERCIEMENTS

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

*Je tiens tout d'abord à remercier, mon encadreur, Monsieur **RAHLIMostefa**, Professeur à l'université des Sciences et de la technologie D'Oran Mohamed Boudiaf « USTO », de m'avoir reçu au sein de son laboratoire d'optimisation des réseaux électriques « LORE » de la faculté de génie électrique, pour son encadrement et ces précieux conseils qu'il m'a donné et pour ces connaissances.*

*Je remercie particulièrement Monsieur **AbdelhakemKoridakElhouari**, Maître de conférences à l'Université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf « USTO », Pour ses conseils ainsi que ses qualités humaines et pour m'avoir apporté toute son énergie et son dynamisme, pour faire de la recherche. Toutes ces qualités ainsi que son savoir ont fortement contribué à la réalisation de ce travail dans des bonnes conditions.*

*J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur, **Bouthiba Tahar** Professeur à l'Université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf « USTO », d'avoir accepté de présider le Jury de cette thèse.*

*Je voudrais remercier sincèrement Messieurs, **Sebbani Mohamed** Professeur à l'Université Essenia et **KotniLahouari** Maître de conférences Aà l'Université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf « USTO », qui ont accepté de participer à ce Jury, en tant qu'examineurs et qui ont pris la peine de lire ce manuscrits avec attention.*

Mes vifs remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail. Je remercie tous particulièrement mes collègues du laboratoire d'optimisation des réseaux électriques « LORE » de la faculté de génie électrique.

Enfin, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma profonde gratitude à ma famille et à tous ceux qui m'ont permis d'en arriver là.

SOMMAIRE

<i>Chapitres</i>	<i>Pages</i>
<i>Introduction générale</i>	1

Chapitre I

Généralité sur les réseaux électriques

I.1 Introduction.....	4
I.2 Structure d'un réseau électrique.....	4
I.2.1 La production.....	6
I.2.2 Transport d'énergie électrique.....	7
I.2.3 Distribution.....	8
I.3 Constitution du réseau	8
I.3.1 Poste Electrique.....	8
I.3.2 Les lignes électriques.....	10
I.3.2.1 Composants des lignes aériennes.....	10
I.3.2.2 Les lignes souterraines.....	12
I.4 La conduite du réseau électrique	12
I.4.1 Fluctuations de la consommation.....	13
I.4.2 Difficultés de prévision de la consommation.....	13
I.5 Conclusion.....	15

Chapitre II

Fiabilité des systèmes

II.1 Introduction.....	16
II.2 Systèmes.....	16
II.2.1 Différentes configuration du système.....	17

II.2.2 Mesure de l'efficacité des systèmes.....	19
II.3 Les mesures associées à la fiabilité.....	20
II.3.1 Fonction de répartition, Densité de probabilité.....	20
II.3.2 Taux de défaillance instantané.....	22
II.4 Technique d'évaluation de la fiabilité.....	25
II.4.1. Arbre de défaillance.....	25
II.4.2 Diagramme de fiabilité.....	26
II.4.3 Modèle de Markov.....	27
II.5 Fiabilité du système électrique.....	28
II.5.1 la sécurité du système électrique.....	28
II.5.2 Adéquation du système électrique.....	28
II.6 Hiérarchisation du système électrique dans l'évaluation de la fiabilité des systèmes électriques.....	29
II.7 Services auxiliaires.....	30
II.8 Réserve d'énergie.....	31
II.8.1 Réserve opérationnelle.....	31
II.8.2 Réserve tournante.....	31
II.8.3 Réserve non tournante.....	32
II.9 Conclusion.....	32

Chapitre III

Systeme multi-états

III.1 Introduction.....	33
III.2 Généralité sur le modèle du système multi- états.....	33
III.3 Estimation de la fiabilité des systèmes multi états basée sur la méthode UMGF (Universal Moment GeneratingFunction).....	35
III. 3.1 Estimation de la fiabilité des systèmes séries.....	37
III. 3. 2Estimation de la fiabilité des systèmes parallèles.....	38

III. 3. 3 Élément avec défaillance partielle.....	39
III. 3. 4 Composant avec défaillance totale.....	40
III .4 Algorithme de la technique d’Ushakov.....	41
III.5 Exemple illustratif.....	43
III.5.1 Cas de deux états.....	43
III.5.2 Cas de multi états.....	45
III.6 Conclusion.....	47

Chapitre IV

Les méthodes d’optimisation

IV.1 Introduction.....	48
IV.2 Généralités sur les algorithmes d’optimisation.....	48
IV.2.1 Variables du problème.....	48
IV.2.2 Espace de recherche (domaine admissible).....	49
IV.2.3 Fonction d’adaptation.....	49
IV.2.4. Problème d’optimisation.....	49
IV.2.5 Algorithme d’optimisation pour la conception assistée par ordinateur.....	50
IV.3 Classification des méthodes d’optimisation.....	51
IV.3.1 Recherche d’un extremum.....	51
IV.3.2. Méthodes locales et globales.....	52
IV. 4 Quelques méthodes d’optimisation heuristiques.....	54
IV.4.1 Recuit simulé.....	54
IV.4.2 Recherche Tabou.....	54
IV.4.3 Algorithme génétique.....	54
IV.4.4 Colonie de fourmis.....	55
IV.4. 5 Algorithme d’Harmony Search.....	55
IV.4.5. 1 Description des étapes.....	57

IV.4.5.2 L'organigramme des étapes de l'harmonySearch.....60
IV.5 Conclusion.....61

Chapitre V

Application et Interprétation

V.1 Système série-parallèle.....62
 V.1.1 Approche mathématique du système.....62
V.2 Formulation du problème.....63
V.3 Description du système à optimiser.....63
 V.3.1 Sous-système 01(Production).....64
 V.3.2 Sous-système 02 (transformateurs élévateurs).....65
 V.3.3 Sous-système 03 (lignes de transport HT).....65
 V.3.4 Sous-système 04 (Transformateurs abaisseurs).....65
 V.3.5 Sous-système 05 (lignes de répartition).....66
V.4 Résultats obtenues par l'algorithme HarmonySearch.....67
V.5 Interprétations des résultats d'optimisation par l'HarmonySearch.....69
Conclusion générale.....71
Bibliographie.....73

LISTES DES FIGURES

Figure I.1	Structure générale d'un réseau électrique.....	05
Figure I.2	Poste électrique aériennes.....	09
Figure I.3	Photo d'une ligne à très haute tension (pylône en acier).....	10
Figure I.4	Photo d'une ligne à haute tension sur poteaux en bois.....	11
Figure I.5	Photo d'une ligne à moyenne tension sur poteaux en bois.....	11
Figure I.6	Photo d'une ligne à basse tension sur poteaux en bois.....	11
Figure I.7	Photo d'une fibre optique insérée dans un câble de garde.....	11
Figure I.8	Différence entre prévision et consommation (Prév. < cons.).....	14
Figure I.9	Différence entre prévision et consommation (Prév. > cons.).....	14
Figure II.1	Système série.....	17
Figure II.2	Les pylônes représentent un système série	17
Figure II.3	Système parallèle.....	17
Figure II.4	Les transformateurs représentent un système parallèle.....	17
Figure II.5	Système à structure série-parallèle.....	18
Figure II.6	Système à structure parallèle-série.....	18
Figure II.7	Courbe de survie ou de fiabilité.....	20
Figure II.8	Exemple de densité de probabilité.....	21
Figure II.9	Exemple de la fonction de répartition.....	22
Figure II.10	Taux de défaillance en fonction du temps.....	23
Figure II.11	Courbe $R(t) = e^{-\lambda t}$	24
Figure II.12	Durée moyenne.....	25
Figure II.13	Exemple d'un arbre de défaillance.....	26

Figure II.14	Calcul de fiabilité d'un système parallèle –série	27
Figure II.15	Hiérarchisation du système électrique.....	29
Figure III.1	Système Série.....	38
Figure III.2	Système parallèle.....	39
Figure IV.1	Algorithme d'optimisation.....	51
Figure IV.2	Convergence vers un extremum local.....	52
Figure IV.3	Domaine admissible comportant des extremums locaux et globaux.....	53
Figure IV.4	Méthodes déterministes locales.....	54
Figure IV.5	Principe de l'harmony search et analogie en optimisation.....	57
Figure V.1	Système parallèle-série.....	63
Figure V .2	Exemple réel d'un système parallèle-série.....	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1	Les paramètres du système électrique.....	43
Tableau III.2	Les caractéristiques de la charge.....	43
Tableau III.3	les paramètres du système électrique.....	45
Tableau III.4	les caractéristiques de la charge.....	45
Tableau V.1	Caractérisation de sous-système de production.....	64
Tableau V.2	Caractérisation de sous-système « transformateur éleveurs MT/HT ».	65
Tableau V.3	Caractérisation de sous-système «Lignes de transport HT ».....	65
Tableau V.4	Caractérisation de sous-système «Transformateurs abaisseursHT/MT»	66
Tableau V.5	Caractérisation de sous-système «Lignes de répartition MT ».....	66
Tableau V.6	Les caractéristiques de la demande.....	67
Tableau V.7	La conception optimale du système pour $R_0 = 0.92$	68
Tableau V.8	La conception optimale du système pour $R_0 = 0.95$	68
Tableau V.7	La conception optimale du système pour $R_0 = 0.98$	68

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'industrie de l'électricité est l'industrie la plus importante. Son produit, l'électricité, est essentiel à la société d'aujourd'hui. L'électricité fait partie intégrante de notre vie quotidienne. Elle alimente les appareils ménagers, soutient nos vastes réseaux de communications et d'information, éclaire nos cités et nos villes et elle est considérablement utilisée dans de nombreuses grandes entreprises. Un service d'approvisionnement en électricité fiable et économique est indispensable au bien-être de la population et des entreprises.

Le système électrique est un réseau-source alimentant un très grand nombre de clients à partir d'un petit nombre de centrales de production. L'énergie produite par les centrales transite sur les lignes de haute et très haute tensions du réseau de transport maillé sur une zone couvrant un ou plusieurs états, puis est acheminée sur des réseaux de distribution de moyennes et basses tensions dont l'arborescence permet d'atteindre les clients.

De ce fait les réseaux électriques modernes sont caractérisés par leur structure complexe, leur majeure fonction est d'assurer une continuité de service pour le consommateur et le plus économiquement possible tout en assurant une qualité de service raisonnable. Cette dernière est extraordinairement importante lorsqu'on projette la signification de facteur de fiabilité et de son implication dans une industrie de production de transport et de distribution d'énergie électrique. De cette façon, il est indispensable de garantir une certaine qualité de service une fois que le réseau dispose d'une réserve de production et d'une marge de réserve appropriée au niveau du transport et de distribution. Cela est caractérisé par la disposition d'une capacité de réserve appropriée au niveau de transport et de distribution. Le système nécessite donc la disposition d'une capacité de réserve appropriée pour faire face à différentes fluctuations dues à la charge. La détermination des marges de réserve que le système doit disposer afin de garantir une continuité de service compte parmi les objectifs de la fiabilité. Celle-ci n'est pas souvent facile à déterminer une fois que l'on connaît que la plus part des réseaux électriques sont caractérisés par leur structure complexe et la plupart d'entre eux assurent leur fonctions selon des niveaux de charge différentes.

Dans ce cas, le défaut peut entraîner l'incapacité de système à couvrir une charge donnée sans causer sa défaillance complète du système. Le système se caractérise par une disponibilité multi-états. Les méthodes de solution traditionnelles ne sont pas valides.

Dans ce mémoire, nous abordons l'optimisation des systèmes parallèles-séries dont la demande se distingue par des niveaux différents qui doivent être satisfaites par le système (production, transport, répartition) avec un seuil de fiabilité prédéterminé. La nouvelle méthode de résolution offre plusieurs avantages par rapport aux méthodes classiques pour estimer la fiabilité. Pour des systèmes fluides comme celui de la production d'énergie, reconnaître les différents niveaux de performance (dégradation du matériel) est d'importance critique afin que l'estimation de la fiabilité totale du système et la configuration correspondante de la structure modélisent plus concrètement la fiabilité de système réel.

L'objectif de notre travail repose essentiellement d'une part sur le choix optimal des composants du système au point de vue types, fiabilité et coût afin de faire une conception nouvelle d'un système réseau électrique. Ce problème se résout au point de vue coût optimal répondant à une contrainte de fiabilité.

Organisation

Le premier chapitre est une généralité sur les réseaux électriques avec une description de chaque sous-système qui forme ce réseau.

Le deuxième chapitre est conçu pour décrire les concepts généraux de la fiabilité des systèmes ainsi que les méthodes d'évaluer la fiabilité, puis une explication sur la fiabilité des systèmes électrique et leur hiérarchisation.

Le troisième chapitre décrit le principe sur les systèmes multi-états et où on abordera l'évaluation de la fiabilité des systèmes parallèle-série par une nouvelle méthode : celle d'USHAKOV connu sous le nom d'UMGF. Cette dernière sera directement implémentée par hybridation avec l'algorithme d'HarmonySearch (HS : HarmonySearch).

Le quatrième chapitre décrit le problème d'optimisation et les différentes méthodes d'optimisation déterministes, heuristique et méta-heuristique.

Le cinquième chapitre est la formulation mathématique de notre problème, ainsi une application de notre programme de l'optimisation de coût d'investissement sous contraintes de fiabilité par l'HarmonySearch. En fin une interprétation des résultats est faite. Le calcul a été fait sur PC pentium 4 (2GHz) par une programmation en langage Matlab.

Et fin nous terminons avec une conclusion générale sur le travail effectué.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉ SUR
LES RÉSEAUX
ÉLECTRIQUES

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES

I.1 Introduction [1,2]

L'électricité, produite et livrée aux clients grâce à une installation complexe assumant un objectif fonctionnel (la production, transport et distribution), constitue l'un des plus grands marchés de consommation dans le monde. Pour assurer ces objectifs fonctionnels de haut niveau, le processus fait appel à un ensemble de systèmes interconnectés. Chaque système assure une ou plusieurs fonctions bien définies.

La fiabilité des systèmes d'alimentation électrique desservant des charges est d'assurer le non interruption de la tension d'alimentation. Les centrales de production doivent produire suffisamment d'énergie pour répondre à la demande des clients. Les réseaux de transport doivent transporter toute l'énergie sur de longues distances sans échauffement ou perturbation de la stabilité du système. Les réseaux de distribution doivent fournir de l'électricité à chaque client.

I.2 Structure d'un réseau électrique [1, 3,4]

Traditionnellement, les réseaux électriques sont décomposés en trois systèmes : la production, le transport et la distribution. Dans le cadre de fiabilité, la production, le transport et la distribution sont considérés comme des blocs fonctionnels. Chaque bloc fonctionnel est composé de plusieurs sous-systèmes. La production est composée de centrales de production et des postes électriques de production. Le transport se compose de ligne de transport, les postes de transport et les réseaux de répartition. Les systèmes de distribution composés de postes de distribution, des réseaux de distribution primaires, les transformateurs des distributions et des réseaux de distribution secondaires parfois le réseau de distribution primaire est considéré comme le réseau de distribution et le réseau de distribution secondaire est nommé le réseau de livraison de l'abonné. Un schéma simplifié du réseau électrique global et ses sous-systèmes est illustré dans la figure (I.1).

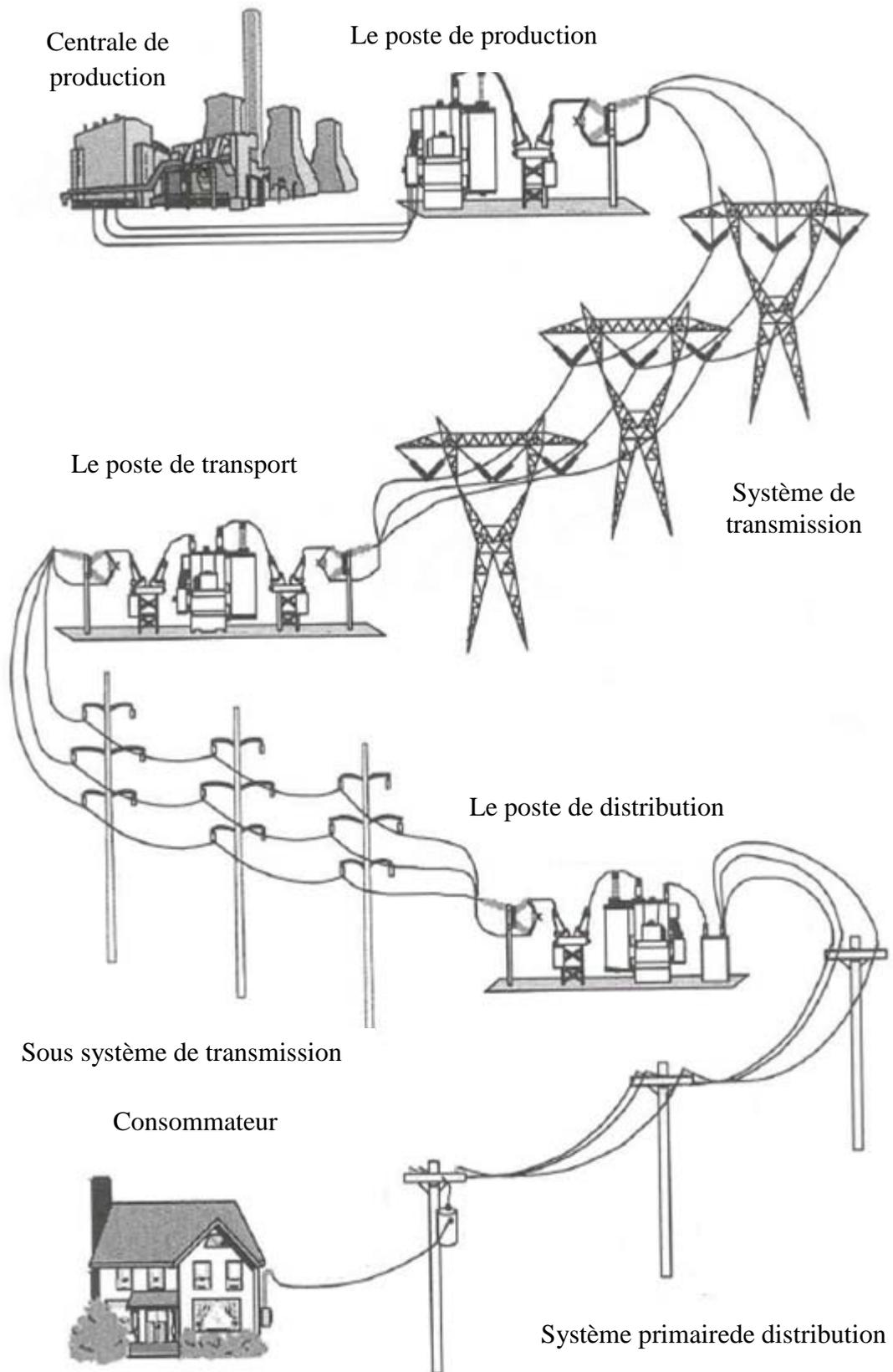


Figure. I.1 : Structure générale d'un réseau électrique [3]

I.2.1 La production [1, 5, 6]

La production est composée de *centrales de production* d'énergie électrique. La centrale de production est la composante élémentaire de l'organisation des moyens de production d'électricité. Une centrale peut regrouper sur un même site plusieurs unités de production, ou tranches, souvent de même technologie et de même puissance. Chaque unité de production est composée d'une turbine (ou en général un moteur) et d'un alternateur pour produire de l'énergie électrique à courant alternatif. La plupart des turbines sont entraînées par la vapeur produite dans une chaudière chauffée par le charbon, le gaz naturel ou de combustible nucléaire. D'autres peuvent être entraînées par des sources non thermiques telles que les barrages hydroélectriques et les éoliens. Les générateurs produisent des tensions entre phases entre 11 et 30 KV.

Nous classons les centrales de production selon leur technologie, c'est-à-dire selon leurs sources d'énergie primaire. Nous distinguons les centrales thermiques à flamme, les centrales nucléaires, les centrales hydrauliques, et les centrales éoliennes.

➤ ***Centrales thermiques à flamme***

Les *centrales thermiques à vapeur* brûlent du charbon, du pétrole ou du gaz pour vaporiser de l'eau. La vapeur ainsi produite se détend dans une turbine à vapeur, qui entraîne un alternateur produisant l'électricité. Ces centrales sont caractérisées par un rendement énergétique moyen. Leurs coûts variables dépendent notamment du prix du combustible utilisé. Elles sont réputées pour être souples à l'exploitation, une fois en fonctionnement, mais lentes à mettre en fonctionnement (une centrale à fioul ou au charbon prend environ 16h pour démarrer à froid, et 8h pour démarrer à chaud).

Les *turbines à combustion*, ou les *moteurs Diesel* à combustion interne, utilisent la détente des gaz produit par la combustion de pétrole ou de gaz. Ces centrales sont caractérisées par un rendement énergétique bas. En revanche, elles sont réputées pour être très flexibles et rapides au démarrage (entre 15 minutes et 1 h).

Les *cycles combinés* sont le fruit d'une technologie hybride. Une turbine à combustion (ou plusieurs) fonctionne en parallèle d'une turbine à vapeur. Le gaz d'échappement de la turbine à combustion est utilisé pour produire de la vapeur dans une chaudière classique. Cette chaudière alimente la turbine à vapeur. Ces centrales sont caractérisées par un très bon rendement, et donc un coût variable relativement faible (mais dépendant du prix du combustible). En termes de souplesse, ces centrales sont un peu plus souples qu'une centrale thermique classique en cycle simple. Le temps de démarrage est, également, plus court qu'une centrale classique.

➤ ***Centrales nucléaires***

On y utilise l'énergie émise lors de la fission d'un atome à base d'uranium. La chaleur qui en résulte est transmise à un fluide caloporteur qui est utilisé pour produire de la vapeur. La vapeur, comme dans le cas des centrales thermiques classiques, est utilisée dans un turboalternateur pour produire l'électricité.

Ces centrales sont caractérisées par un coût variable très faible. Leur souplesse dépend d'une programmation conçue avec anticipation. De plus, les centrales de ce type ne sont pas flexibles quand les variations sont demandées à des délais très courts. Le temps de démarrage à froid est assez long (~40 h).

➤ **Centrales hydrauliques**

L'énergie potentielle de gravité de l'eau est utilisée pour produire de l'électricité. Deux types principaux de centrales hydrauliques sont distingués : les *centrales hydrauliques au fil de l'eau* et les *centrales à réservoir*. Dans le premier type, l'eau est turbinée au fil du courant des cours d'eau. On dit que cette production est « fatale » ; si cette énergie ne sert pas à produire de l'électricité, elle est perdue. Les centrales installées au fil de l'eau fonctionnent en continu au rythme des affluents. Dans le deuxième type, l'eau est stockée dans des réservoirs (barrages), et turbinée au rythme des besoins. Certaines turbines sont conçues aussi pour fonctionner comme pompes, afin de stocker de l'eau dans les moments de la journée où il y a un excès d'électricité. La caractéristique de stockabilité de cette technologie amène à considérer non seulement le coût variable de production pour leur exploitation, qui est réputé être très faible, mais aussi le coût d'opportunité à produire à un moment où la production sera mieux valorisée. En outre, bien que les centrales à réservoir soient caractérisées par un coût variable très faible, étant donné qu'elles ont aussi des caractéristiques de souplesse extraordinaires, elles sont utilisées en grande partie pour suivre les fluctuations brusques de la consommation.

➤ **Centrales de production éolienne**

Les centrales éoliennes utilisent l'énergie mécanique contenue dans le vent pour produire de l'électricité. Elles sont caractérisées par un coût variable très faible. La production électrique des éoliennes est particulièrement intermittente, et est considérée comme fatale. Les difficultés de prévision de cette énergie (données météorologiques) renforcent la nature aléatoire de cette technologie.

I.2.2 Transport d'énergie électrique [2,7]

L'électricité est acheminée depuis les centres de production vers les zones d'utilisation à travers un réseau de lignes dont la longueur totale représente des milliers de kilomètres. La répartition et la livraison de l'électricité s'opèrent en cascade suivant des voies de plus en plus ramifiées et des tensions de plus en plus basses, afin d'être adaptées aux besoins des utilisateurs. Le réseau de transport d'énergie électrique comprend le réseau de grand transport et d'interconnexion, et les réseaux de répartition. Le réseau de grand transport et d'interconnexion relie les centres de production aux zones de consommation. Il assure également les exportations et importations d'électricité entre les pays. En permettant le secours mutuel entre pays, il améliore la sécurité de fonctionnement des systèmes électriques de toute l'Europe par exemple.

Sa structure maillée garantit la continuité de l'alimentation en cas de défaillance d'une liaison. Cette structure permet aussi de faire appel aux centrales par ordre croissant de coût (les moins coûteuses pour la production dite « de base », les plus coûteuses pour la production « de pointe »), ajustant les différents moyens de production.

Le réseau de répartition est destiné à répartir l'énergie en quantité sur des distances plus courtes. Le transport est assuré en très haute tension (225KV) et en haute tension (90KV et 63KV volts). Ce type de réseau est l'équivalent des routes nationales dans le réseau routier. La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation. Ces derniers sont : soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution HTA, soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HT.

I.2.3 Distribution [4]

Les réseaux de distribution acheminent l'énergie électrique du réseau de répartition (ou de transport) aux clients résidentiels et aux petits clients industriels. Les tensions des réseaux de distribution sont comprises entre 230V à 400V pour la basse tension et 4kV à 45 kV pour la moyenne tension. La structure des réseaux de distribution est bouclable et exploitée en radial. Néanmoins, certains pays disposent de réseaux maillés et avec la possibilité d'une exploitation en boucle fermée.

I.3 Constitution du réseau [3, 8, 9, 10]

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

I.3.1 Poste Electrique

Selon la définition de la Commission Electrotechnique internationale, un poste électrique est « *la partie d'un réseau électrique, située en un même lieu, comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, des bâtiments, et, éventuellement, des transformateurs* ».

Un poste électrique est donc un élément clé du réseau électrique servant à la fois à la transmission et à la distribution d'électricité. Il permet d'élever la tension électrique pour sa transmission, puis de la redescendre en vue de sa consommation par les utilisateurs (particuliers ou industriels). Les postes Electriques se trouvent donc aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution. Dans les autres langues, on parle généralement de sous-station.



Figure. I.2 : Poste électrique aériennes

Les postes électriques ont trois fonctions principales :

- Le raccordement d'un tiers au réseau d'électricité (aussi bien consommateur que producteur type centrale nucléaire).
- L'interconnexion entre les différentes lignes électriques (assurer la répartition de l'électricité entre les différentes lignes issues du poste).
- la transformation de l'énergie en différents niveaux de tension.

On distingue, suivant ces fonctions, plusieurs types de postes :

Postes de sortie de centrale : le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau ;

Postes d'interconnexion : le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques, ils comprennent un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs,...etc.) de même tension peuvent être aiguillés ;

Postes éleveurs : le but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur, ils comprennent au moins deux jeux de barres à des tensions différentes liés par un ou plusieurs transformateurs ;

Les postes de distribution : le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

L'aspect des postes électriques varie fortement suivant leurs fonctions. Les postes peuvent être en surface à l'intérieur d'enceinte, souterrains, dans des bâtiments qu'ils desservent.

I.3.2 Les lignes électriques

Les lignes électriques assurant la fonction de transport de l'énergie sur les longues distances. Le genre de ligne utilisée est imposé par les facteurs suivant : Puissance active à transporter, distance de transport, coût, esthétique, encombrement et facilité d'installation. Nous distinguons quatre types de lignes :

Lignes de transport très haute tension (THT) :Ce sont les lignes qui relient les centrales éloignées aux centres d'utilisation. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 kV.

Lignes de transport haute tension (HT) :Ce sont les lignes reliant les postes de transformation principaux aux centrales de génération.

Lignes de distribution moyenne tension (MT) : Ce sont les lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité.

Lignes de distribution basse tension (BT) : Ce sont les lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes, etc.

I.3.2.1 Composants des lignes aériennes

Une ligne aérienne est composée de pylônes (supports), de câbles conducteurs et des isolateurs.

Les pylônes : Le rôle des pylônes est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Le choix des pylônes se fait en fonction des lignes à réaliser, de leur environnement et des contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs.

- Pour les lignes à très haute tension, on a recours à des pylônes composés d'un treillis en acier. Plus la tension est élevée, plus l'envergure est grande et plus les poteaux sont élevés.



Figure. I.3 : photo d'une ligne à très haute tension (pylône en acier)

- Pour les lignes à haute tension, on utilise des pylônes en acier ou en béton



Figure. I.4 : photo d'une ligne à haute tension sur pylônes en béton

- Pour les lignes à moyenne tension, il s'agit de poteaux en bois ou de mâts en béton



Figure. I.5 : photo d'une ligne à moyenne tension sur poteaux en bois

- Pour les lignes aériennes basse tension, on utilise de simples poteaux en bois ou en béton.

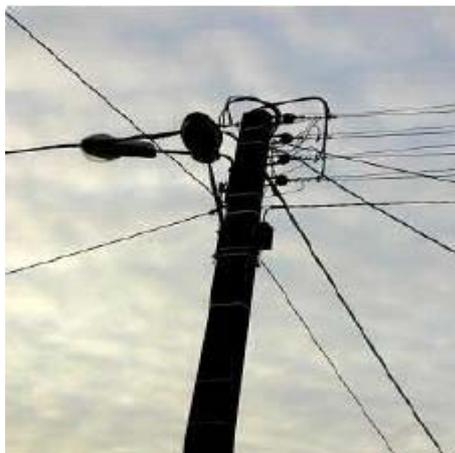


Figure. I.6 : photo d'une ligne à basse tension sur poteaux en bois

Les câbles conducteurs : Pour transporter le courant, on utilise des câbles conducteurs qui sont portés par les pylônes. Le courant utilisé étant triphasé, il y a trois câbles (ou faisceaux de câbles) conducteurs par circuit. Les lignes sont soit simples (un circuit), soit doubles (deux circuits par file de pylônes). Chacune des phases peut utiliser 1, 2, 3 ou 4 câbles conducteurs, appelés faisceaux. Les câbles conducteurs sont « nus » c'est-à-dire que leur isolation électrique est assurée par l'air. La distance des conducteurs entre eux et avec le sol garantit la bonne tenue de l'isolement. Cette distance augmente avec le niveau de tension.

Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés. On utilise en général des conducteurs en aluminium, ou en alliage aluminium-acier ; on trouve aussi des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium.

Câbles de garde : Les câbles de garde ne conduisent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitant le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier. Au centre du câble d'acier on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant.



Figure. I.7 : photo d'une fibre optique insérée dans un câble de garde

Les isolateurs : l'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs (chaînes d'isolateurs). Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs verre ou céramique ont en général la forme d'une assiette. On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important.

I.3.2.2 Les câbles souterrains

La structure des réseaux souterrains est un seul type de ligne : les dorsales. Ces réseaux de faible longueur et forte section des conducteurs sont le siège de chute de tension réduite. De ce fait, et tenant compte de l'importance des incidents, il sera prévu une réalimentation soit par les réseaux voisins soit par un câble de secours.

I.4 La conduite du réseau électrique [6, 11, 12]

Le but premier d'un réseau électrique est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs. Comme on ne peut encore stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité :

$$Production = Consommation + pertes(I.1)$$

Le principe de l'égalité (I.1) est assuré par une prévision statistique de l'évolution de la charge, seule une gestion rigoureuse et continue permet d'éviter une instabilité, c'est le rôle du dispatching national. Dans la plupart des pays, ce travail se fait la veille pour le lendemain. La préparation de l'exploitation est contractualisée entre les acteurs. C'est lors de la préparation journalière que sont définies les demandes de chacun, que l'accès au réseau de transport est accepté ou refusé, et que sont définies précisément les conditions techniques et économiques de la production électrique et des services de transport de l'énergie.

La prévision statistique est en grande partie aidée par les diagrammes de charge. À titre exemplatif, la fluctuation par rapport aux prévisions est notamment liée à une variation de la température ambiante.

I.4.1 Fluctuations de la consommation[12]

La consommation d'électricité varie en permanence : au cours des saisons, au cours d'une journée, en suivant le rythme de l'activité quotidienne et économique et en temps réel en fonction de la météo du moment. Les différentes utilisations individuelles de l'énergie électrique, à chaque moment, se traduisent par de fortes fluctuations de la consommation dans le temps. Cependant, pour un intervalle de temps d'une demi-heure, ces fluctuations ont un certain caractère cyclique au cours de la journée, de la semaine, et de l'année en créant une saisonnalité.

Il faut savoir aussi que la consommation d'électricité peut fluctuer très rapidement : elle peut changer de plus de 10% de la consommation maximale en seulement 1 heure. Il faut noter qu'il existe des fluctuations pour des échelles de temps inférieures plus fines qu'une demi-heure. Ces fluctuations ont un caractère aléatoire minute par minute. On ne peut pas assigner une quelconque périodicité à ces fluctuations.

I.4.2 Difficultés de prévision de la consommation[6]

Connaître la consommation de l'électricité d'une période future est important pour l'exploitation du système électrique. Pour ce faire, une multitude de variables sont traditionnellement 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), le prix, etc.

L'impact de la plupart de ces variables est lié aux conditions climatiques, aux habitudes de consommation, aux rythmes de vie et au pays considéré. Naturellement, plus la prévision est réalisée en avance par rapport au moment de la consommation, moins elle est précise. En effet, les valeurs de ces variables, notamment celles liées aux conditions météorologiques, peuvent se modifier dans ce laps de temps. Une prévision éloignée du temps réel génère des erreurs de prévision, plus ou moins conséquentes. Les prévisions de consommation effectuées plusieurs jours à l'avance se basent principalement sur la combinaison des consommations réelles des jours précédents et la prévision des conditions climatiques.

Bien que la prévision de la consommation s'affine lorsque l'on s'approche de la période prévue, il existe encore des écarts entre les prévisions faites la veille et la consommation réelle.

Ces écarts, ou erreurs de prévision, peuvent provenir des erreurs de prévision des variables explicatives (Température, nébulosité) ou/et des simplifications du modèle de prévision. Les figures (I.8) et (I.9) montrent des exemples d'écarts entre les valeurs de la consommation prévue et de la consommation réelle pour le cas de la France.

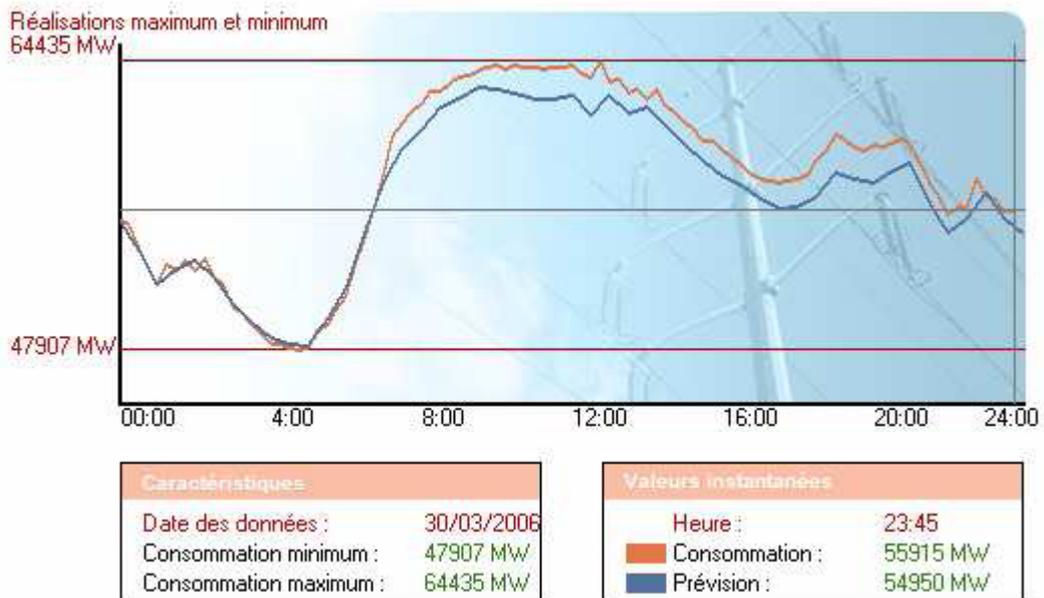


Figure .I.8 : Différence entre prévision et consommation (prév.<conso. ;
Max écart = - 2485 MW à 12h45)

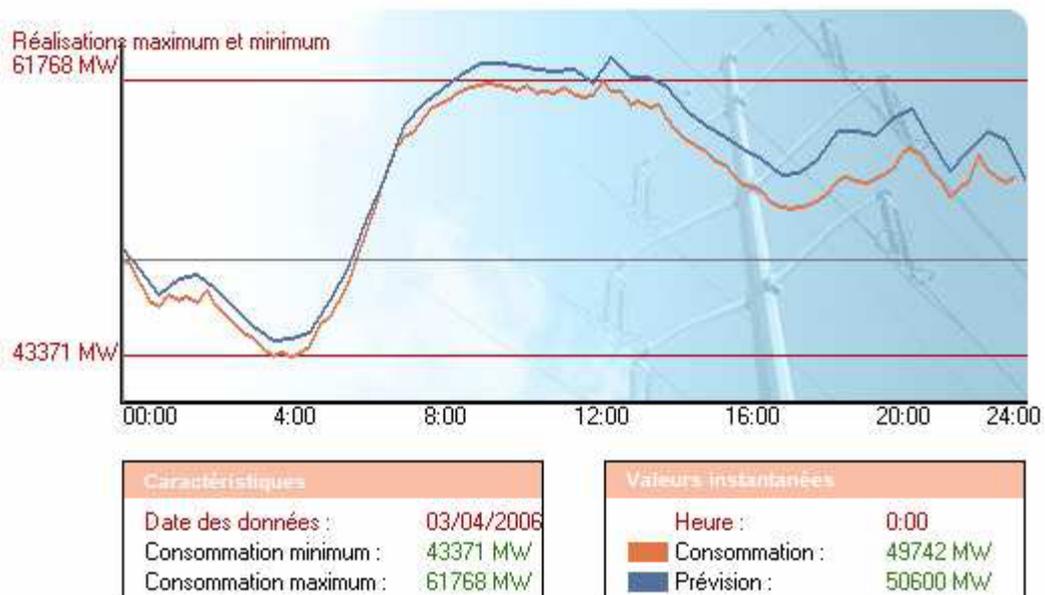


Figure .I.9 : Différence entre prévision et consommation (prév. >conso. ;
Max écart = 2758 MW à 14h)

I.5 Conclusion

La fonction principale des compagnies de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique est d'assurer une couverture du consommateur le plus économiquement possible avec une qualité de service raisonnable. Ce service est importance majeur lorsqu'on se fixe pour le but d'analyser la fiabilité du système de production et son implication sur le réseau de transport et de distribution. De cette façon il est indispensable de garantir une certaine qualité de service une fois que le système de production dispose d'une réserve suffisante. Celle-ci se traduit par une marge de réserve appropriée au niveau du réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique. Avant d'aborder ces bases fondamentales, on présentera dans ce chapitre les concepts de base nous permettant d'avoir les contextes des arguments développés dans le chapitre suivants.

On a fait dans ce chapitre une étude générale du réseau électrique, avec l'étude de ses différents composants nécessaire à la production, au transport, à la distribution et à la livraison de l'énergie électrique.

CHAPITRE II
FIABILITÉ DES
SYSTÈMES

CHAPITRE II

FIABILITE DES SYSTEMES

II.1 Introduction[3 ,13]

Un système est constitué de plusieurs composants assurant divers fonctions. Une des plus importantes mesures de sa performance est sa fiabilité. La fiabilité d'un système est définie comme étant la probabilité que le système fonctionne durant une période de temps sous des conditions spécifiées. Un objectif de la théorie de la fiabilité est de trouver le moyen d'évaluer la fiabilité d'un système complexe à partir de la connaissance des fiabilités des composants le constituant. D'où l'évaluation de la fiabilité d'un système est une caractéristique importante.

Evaluer la fiabilité c'est le calcul(ou l'approximer) par des techniques probabilistes ou algorithmiques ou bien trouver un encadrement de celle-ci lorsque la configuration du système est trop compliquée. La théorie des systèmes cohérents binaires a servi comme base pour la construction d'une théorie mathématique et statistique de la fiabilité pour le cas dichotomique. Cette théorie ne conçoit pour les composants ou pour le système lui-même que deux états possible : en fonction ou en panne. Cependant, dans beaucoup de situations réelles, les systèmes et leurs composants peuvent être dans des états intermédiaires. Ni complètement défaillant, ni fonctionnant parfaitement, mais étant plutôt capables d'occuper un certain nombre de niveaux de performance allant du fonctionnement parfait à la panne totale. Ce type de système est appelé un système multi états. Les modèles binaires, constituent, dans ce genre de cas , une sur-simplification de la situation, et les modèles représentant des systèmes et des composants à plusieurs états plus aptes à décrire la relation liant la performance du système en termes de performance de ces composants.

Le problème de résolution d'un système multi états auquel se sont confrontés beaucoup de chercheurs n'est pas aussi simple à résoudre. Levitin et Lisnianski ont utilisé la méthode de la fonction génératrice universelle (appelé aussi la méthode d'Ushakov) qui est utilisée pour une estimation rapide de la fiabilité des systèmes à multi états et donne la disponibilité des systèmes parallèle-série et les systèmes ayant une structure de bridge qui s'appliquent bien à des systèmes physiques.

On représentera dans ce chapitre les concepts généraux de la fiabilité des systèmes du point de vue générale et les méthodes classiques pour évaluer leur fiabilité, en suite on expliquera la fiabilité des réseaux électrique et leur hiérarchisation. Puis on considérera les services auxiliaires et leurs rôles joués dans les réseaux électriques. Finalement, on finira ce chapitre en discutant les réserves de puissance. La fiabilité des réseaux électriques considère la performance de l'ensemble du système, on considérant les groupes de production, les réseaux de transport et de distribution. Dans le cadre de cette thèse seulement la fiabilité de production et de réseaux de transport est analysée.

II.2 Systèmes[1 ,2]

Un système est un ensemble d'éléments indépendants orientés vers la réalisation d'un objectif. Tout système fait appel à des composants qui doivent être organisés de façon à former un ensemble cohérent. Chaque composant exécute une fonction différente.

Dans la réalité, les systèmes rencontrés peuvent avoir des configurations différentes à savoir des systèmes en série, en parallèle, une composition entre des composants en série et en parallèle, c'est à dire., des systèmes série-parallèle, parallèle-série.

II.2.1 Différentes configuration du système[1,2]

➤ Système série

Considérons un système de n éléments. Celui-ci est dit de type série si la défaillance de l'un des n composants entraîne la défaillance du système.



Figure II.1 : Système série

Exemple : les pylônes

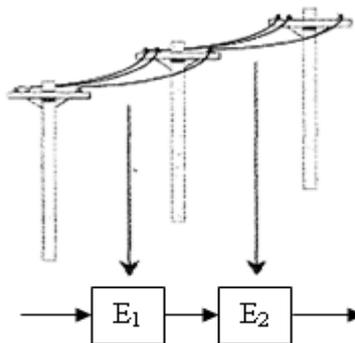


Figure II.2 : les pylônes représentent un système série

➤ Système parallèle

Considérons un système de n éléments. Celui-ci est dit de type parallèle si la défaillance de l'ensemble des éléments entraînera la défaillance du système.

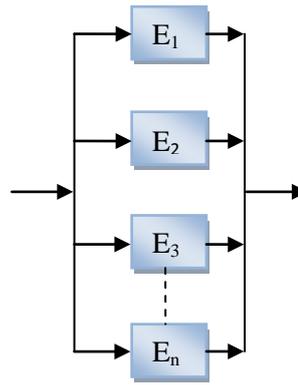


Figure II.3 système parallèle

Exemple : les transformateurs

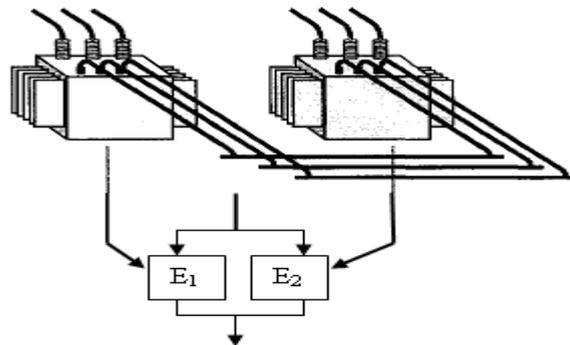


Figure II.4 : les transformateurs représentent un système parallèle

➤ **Système série - parallèle**

Le système série-parallèle est constitué de n sous- systèmes connectés en parallèle. Chaque sous- système est composé de i éléments placés en série figure (II.5).

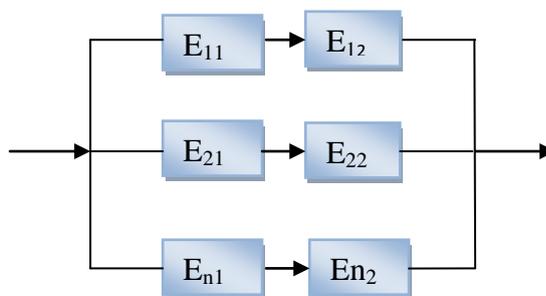


Figure II.5 : système à structure série- parallèle

➤ **Système parallèle - série**

Le système parallèle-série est constitué de n sous-systèmes connectés en série. Chaque sous-système est composé de i éléments placés en parallèle figure. (II.6).

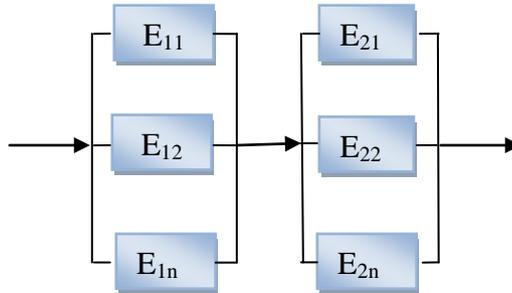


Figure II.6 : système à structure parallèle - série

II.2.2 Mesure de l'efficacité des systèmes[1,2,15,16,17,18]

Afin d'évaluer l'efficacité d'un système et d'apprécier la manière dont il remplit l'objectif pour lequel il a été conçu, nous disposons de différents outils d'analyse. Le plus connu est la fiabilité, mais nous avons également la disponibilité ou encore la maintenabilité.

➤ **Fiabilité**

Le terme « *fiabilité* » est un néologisme dans les années 60 pour traduire le terme anglo-saxon « *reliability* » et, si l'on accepte de considérer comme une science, la fiabilité est la science des défaillances. La Commission Electrotechnique Internationale donne la fiabilité la définition suivante :

Aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée. Le terme fiabilité caractérise une probabilité de succès ou un pourcentage de succès.

La fiabilité $R(t)$ d'un système S est la probabilité que le système soit non défaillant sur l'intervalle de temps $[0, t]$. C'est une fonction décroissante de 1 à 0 sur $[0, +\infty]$.

$$R(t) = \text{Probabilité}(S \text{ non défaillante sur } [0, t])$$

➤ **La disponibilité**

La disponibilité « *Aviability* en anglais » est l'aptitude d'un système à être d'accomplir les fonctions requises dans les conditions données et à un instant donné.

Les éléments constituant le système sont susceptibles d'avoir des défaillances. Ces éléments peuvent être réparables ou non réparables. Dans le cas de système non réparable la disponibilité est égale à la fiabilité du système.

La disponibilité $A(t)$ d'un système S est la probabilité que le système soit non défaillant à l'instant t .

$$A(t) = \text{Probabilité}(S \text{ non défaillante à l'instant } t)$$

➤ **Maintenabilité**

La maintenabilité « Maintainability en anglais » est l'aptitude d'un système 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.

La maintenabilité $A(t)$ d'un système S est la probabilité que le système soit en état, à l'instant t , à d'accomplir ses fonctions, sachant que le système était en panne à l'instant 0.

$$M(t) = \text{Probabilité}(S \text{ est réparée sur } [0, t])$$

II.3 Les mesures associées à la fiabilité [19,20]

La qualité d'un composant élémentaire, du point de vue de la fiabilité, est donnée par certain nombre d'indicateurs ou mesures de la performance qui sont présentés dans ce paragraphe.

II.3.1 Fonction de répartition, Densité de probabilité

Soit T une variable aléatoire mesurant la durée de fonctionnement du composant avant défaillance (représente le temps écoulé entre la mise en service et la première défaillance observée), ou également mesurant la durée de vie pour les composants non réparables.

La fiabilité à l'instant t est la probabilité qu'un composant soit non défaillant sur la durée $[0, t]$. On appelle également fiabilité, la probabilité associée $R(t)$ définie par :

$$R(t) = P[t < T] \quad (\text{II.1})$$

La figure (II.7) ci-dessous présente une allure de la fonction $R(t)$ en fonction du temps.

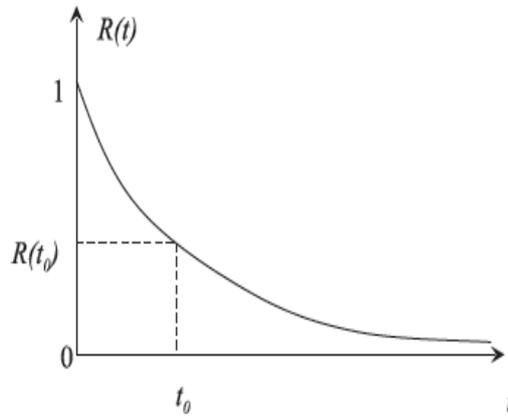


Figure II.7 : Courbe de survie ou de la fiabilité

Pour compléter l'approche théorique de la notion de fiabilité, il est nécessaire de définir aussi les notions suivantes, qui sont issues de la théorie des probabilités.

La fonction $F(t)$ représente la fonction de répartition de la variable aléatoire T . C'est la défiabilité $\overline{R(t)}$ (la probabilité qu'un composant soit défailant entre $[0-t]$ ou la probabilité complémentaire à 1 de la fiabilité $R(t)$) définie par :

$$F(t) = P[t \geq T] = 1 - R(t) \quad (\text{II.2})$$

Elle possède les propriétés suivantes :

$$\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 0 \quad \text{et} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$$

$$F(t) \text{ est non décroissante } 0 \leq F(t) \leq 1$$

Sachant qu'une variable aléatoire est définie par sa fonction de répartition et par sa densité de probabilité.

$f(t)$ désigne la densité de probabilité de T (ou fonction de distribution) et elle est donnée

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{II.3})$$

$$F(t) = \int_0^t f(u) du \quad (\text{II.4})$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u) du = \int_t^\infty f(u) du \quad (\text{II.5})$$

Les figures (II.8) et (II.9) illustrant des exemples de fonctions de répartition et la densité de probabilité.

$F(t_1)$ est la surface délimité par la courbe $f(t)$ et la droite qui coupe l'axe de t à l'instant t_1 , pour cette raison la fonction de répartition est appelée également la probabilité cumulée.

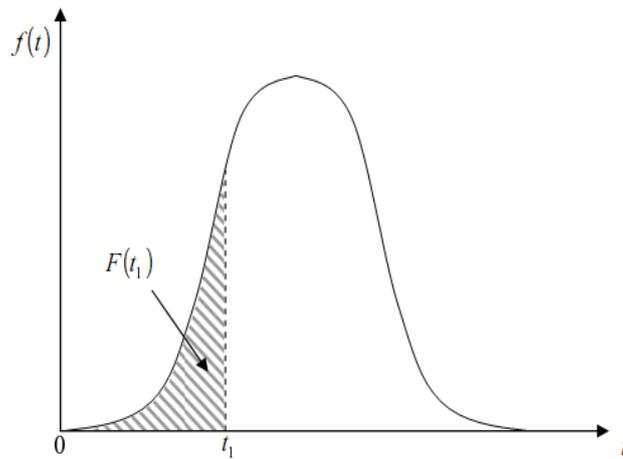


Figure II.8 Exemple de densité de probabilité

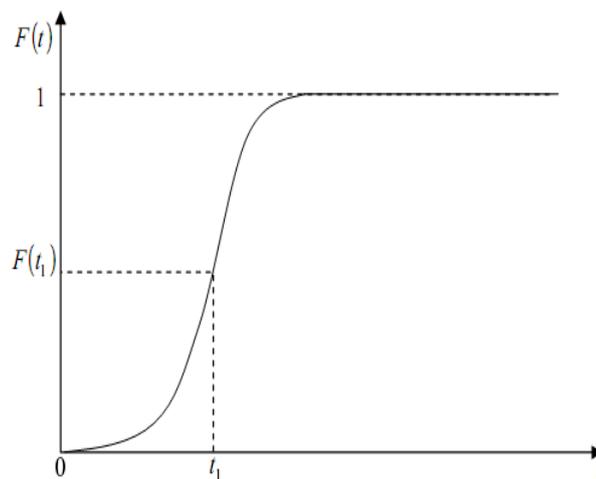


Figure II.9 Exemple de la fonction de répartition

II.3.2 Taux de défaillance instantané

Le taux de défaillance $\lambda(t)$, est un des mesures caractéristiques de la fiabilité. Il permet d'estimer la probabilité conditionnelle qu'une défaillance se produise sur le composant élémentaire pendant un temps $\delta(t)$ à l'instant t , en sachant que le composant n'a pas eu de défaillance sur $[t_0, t]$.

D'après la définition précédente, nous pouvons écrire le taux de défaillance $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\delta t} P[t < T \leq t + \delta t | T > t] \quad (\text{II.6})$$

Nous pouvons l'écrire également :

$$\lambda(t)dt = P[t < T \leq t + dt | T > t] \quad (\text{II.7})$$

D'après le théorème des probabilités conditionnelles, l'équation devient :

$$\lambda(t)dt = \frac{P[t < T < t + dt \cap T > t]}{P[T > t]} \quad (\text{II.8})$$

Sachant que $T > t$ est inclus dans l'événement $t < T \leq t + \delta t$ donc :

$$P[t < T \leq t + dt \cap T > t] = P[t < T \leq t + dt] = f(t)dt = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{II.9})$$

Notons que $R(t) = P[t > T]$. Nous pouvons en déduire une relation entre le taux de défaillance et la fiabilité :

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)/dt}{R(t)} \Big|_{t_0 = 0} \quad (\text{II.10})$$

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

$$R(t) = \exp \left\{ -\int_0^t \lambda(t)dt \right\} \quad (\text{II.11})$$

Comme l'indique la courbe en baignoire de la figure (II.11), le taux de défaillance est dépendant du temps sur toute la durée de vie d'un composant élémentaire.

Durant la période de jeunesse, les pannes nombreuses du début diminuent avec le temps contrairement à la période de vieillissement où le nombre de pannes s'accroît sans cesse.

La période la plus importante est la période de vie utile durant laquelle le nombre de panne est plus faible. Pour simplifier les calculs, il est communément admis pendant la période de vie utile que le taux de défaillance soit approximé une constante appelée λ .

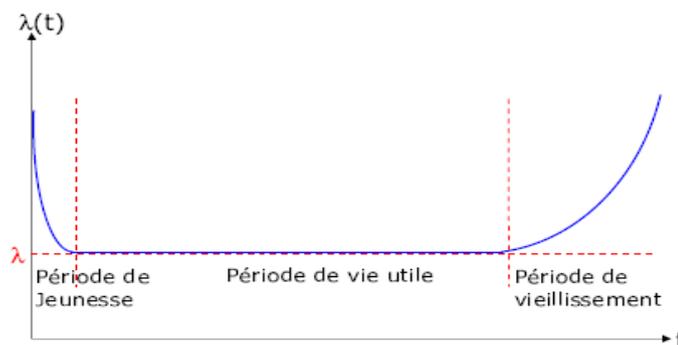


Figure II.10 : Taux de défaillance en fonction du temps

Sinon, le problème posé est de modéliser ces grandeurs par les lois de probabilité connues. En effet, il existe plusieurs lois, à titre d'exemple la loi exponentielle, la loi Normale, la loi log-Normale, la loi de Weibell et la loi Gamma.

Sous l'hypothèse que la distribution des durées de vie est représentée par une loi exponentielle, la fiabilité peut être exprimée comme suit :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \text{ (II.12)}$$

La figure (II.11) présente la courbe $R(t)$ en fonction du temps t avec λ constant. Notons que la loi exponentielle représente correctement la fonction de distribution lorsque :

- Les défaillances sont indépendantes.
- Le taux de défaillance est constant.

Elle est caractérisée par les relations suivantes :

$$\lambda(t) = \lambda = \text{constant}$$

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

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

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

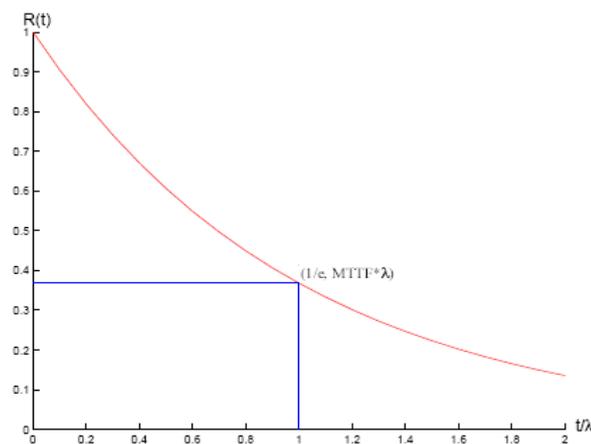


Figure II.11 : courbe $R(t) = e^{-\lambda t}$

Il existe plusieurs représentation du taux de défaillance telles que :

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

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad \text{(II.13)}$$

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

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt \quad (\text{II.14})$$

- MUT (Mean Up Time) : durée moyenne de fonctionnement après réparation.
- MDT (Mean Down Time) : durée moyenne d'indisponibilité après défaillance.
- MTBF(Mean Time BetweenTwofailure) :durée moyenne entre deux défaillances.

$$MTBF = MDT + MUT \quad (\text{II.15})$$

Ces durées sont représentées dans la figure (II.12) :

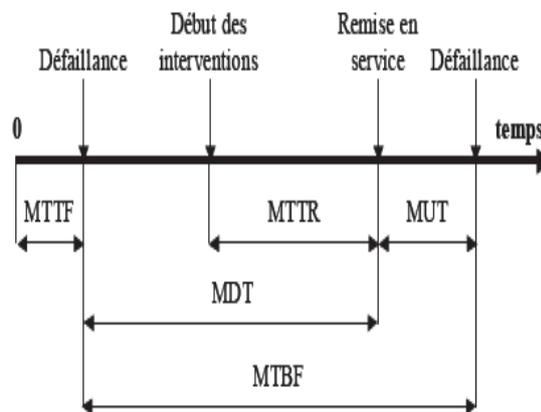


Figure II.12 : Durée moyenne

II.4 Technique d'évaluation de la fiabilité[1,15,18,20]

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

II.4.1. Arbre de défaillance:

Les arbres de défaillances modélisent l'ensemble des combinaisons d'événements qui conduisent à un événement redouté. Par définition, L'arbre de défaillance est une représentation graphique de type arbre généalogique. Il représente une démarche d'analyse d'événement.

L'arbre de défaillance est construit en recherchant l'ensemble des événements élémentaires ou les combinaisons d'événements, qui conduisent à un Evénement Redouté (ER) ».

L'objectif est de suivre une logique déductive en partant d'un Evénement Redouté pour déterminer de manière exhaustive l'ensemble de ses causes jusqu'aux plus élémentaires.

Exemple :

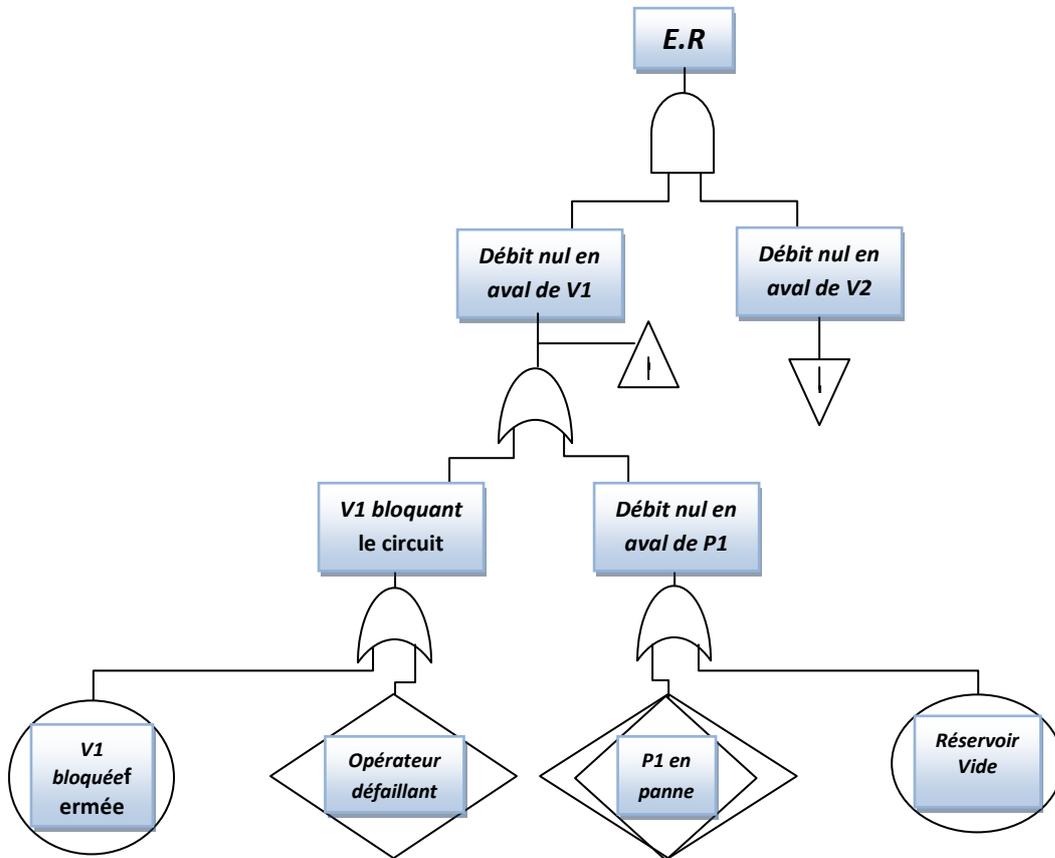


Figure II.13 : Exemple d'un arbre de défaillance

II.4.2 Diagramme de fiabilité

Le diagramme de fiabilité est une représentation graphique du système sous forme de boites ou de blocs. C'est une modélisation naturelle car elle est proche du schéma fonctionnel de celui-ci. Le diagramme de fiabilité est un graphe orienté sans boucle, comprenant une entrée et une sortie. Dans les cas les plus simples : les nœuds du graphe représentent des composants. Un nœud est passant si le composant correspondant est en marche. Le système fonctionne si et seulement s'il existe un chemin dans le graphe entre l'entrée et la sortie. Les systèmes ayant une structure élémentaire indépendants en série ou en parallèle ou toutes combinaisons possibles de ces deux cas.

Un système peut être décomposé en plusieurs modules à structure élémentaire, est considéré comme système simple ou compliqué si sa taille est très importante. A l'inverse nous parlons de systèmes complexes quand le système n'est pas constitué de structure élémentaire et si les composants ne sont pas indépendants.

Le diagramme de fiabilité représente une démarche d'analyse par décomposition fonctionnelle du système en sous-fonction ou mission. Le diagramme de fiabilité est construit en recherchant la mission de chaque sous-ensemble qui permet d'atteindre la mission globale du système. Les boîtes peuvent représenter des fonctions ou des composants. Cette modélisation ne permet pas de prendre en compte les réparations des composants. Cette modélisation est donc utilisée uniquement pour l'analyse de la fiabilité des systèmes.

Exemple

Un système parallèle-série se compose de cinq modules dont le schéma fonctionnel de fiabilité est montré sur la figure ci-dessous.

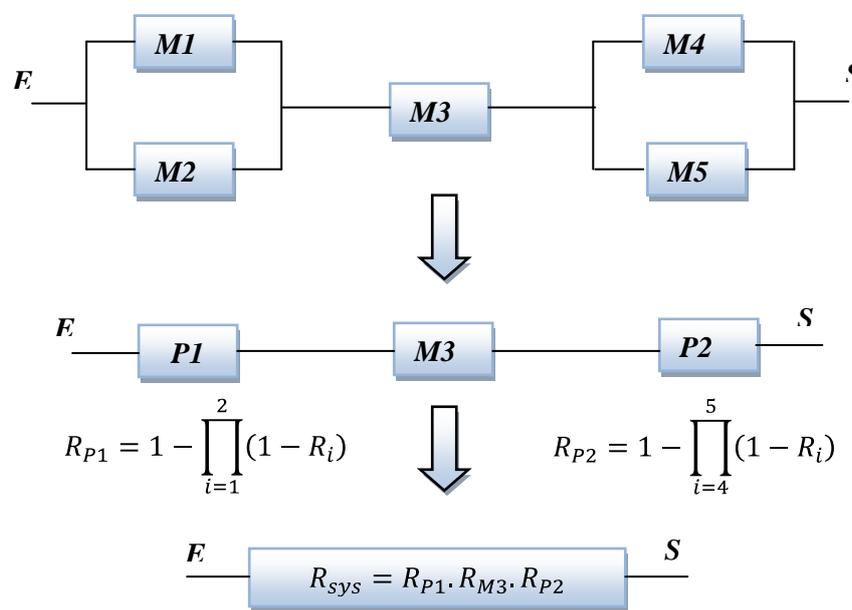


Figure. II. 14 : Calcul de fiabilité d'un système parallèle-série

II.4.3 Modèle de MARKOV

Le modèle de Markov est une méthode puissante basée sur des états et la transition du système entre ces états. Bien qu'elles soient purement informatiques (calculs intenses), les techniques de Markov sont bien adaptées à une variété de modèle des problèmes et ont été avec succès appliquées à de nombreux domaines liés à l'analyse de la fiabilité. Les modèles de Markov font deux hypothèses de base concernant le comportement du système.

La première hypothèse est que le système est sans mémoire. Ceci signifie que la probabilité des futures événements est seulement une fonction de l'état actuel du système et non pas de ce qui s'est produit avant que le système entre dans l'état actuel. La deuxième hypothèse est que le système est stationnaire, ce qui signifie que les probabilités de transition entre les états sont constantes et ne changent pas avec le temps.

Les modèles de Markov peuvent être discrets ou continus. Les modèles discrets ont des transitions d'états qui se produisent à des intervalles spécifiques, alors que les modèles continus ont des transitions d'états constantes. Bien que la plupart des applications de modélisation de la fiabilité utilisent les modèles continus de Markov, les modèles discrets sont plus faciles à comprendre.

II.5 Fiabilité du système électrique[21,22,23]

La fiabilité du système électrique constitue la préoccupation majeure des régulateurs des marchés électriques après la restructuration et l'ouverture à la concurrence de l'industrie. Assurer la fiabilité implique un mixte de règles ayant diverses implications économiques et techniques. Le *National Electric Reliability Council* (NERC) définit la fiabilité par la performance du système électrique à satisfaire la demande d'électricité des consommateurs dans les montants désirés et les standards acceptables. La fiabilité couvre deux attributs : la **sécurité** et l'**adéquation**. La sécurité décrit la capacité du système à faire face aux perturbations. L'adéquation représente la capacité du système à satisfaire la demande d'énergie à chaque instant.

II.5.1 la sécurité du système électrique

La sécurité du système électrique est une problématique de court terme. Elle concerne les opérations visant à assurer la stabilité du système. Ces opérations sont appelées les services auxiliaires qui incluent la prise en compte des pertes en ligne, les besoins de réserves tournantes, les réserves non tournantes, etc. Assurer la sécurité ne permet pas d'éviter quelques externalités.

II.5.2 Adéquation du système électrique

L'adéquation du système électrique signifie l'existence d'une capacité disponible et installée capable de satisfaire, en temps réel, la demande d'électricité anticipée. Dans une perspective technique, la sécurité et l'adéquation visent le même objectif : améliorer la qualité du service de production en temps réel. Sauf que l'adéquation touche plutôt des questions de long terme. Cela concerne les investissements en capacités de production d'électricité, les décisions de retrait ou d'extension des capacités existantes ainsi que les décisions d'exploitation de long terme affectant la disponibilité d'une unité de production pour répondre aux besoins du système à un moment donné.

II.6 Hiérarchisation du système électrique dans l'évaluation de la fiabilité des systèmes électriques[22,23]

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) à la production et au réseau de transport (y compris les interconnexions) et le troisième (HL-III) au système global intégrant le réseau de distribution.

La figure (II.15) présente les différents niveaux de hiérarchisation du système électrique.

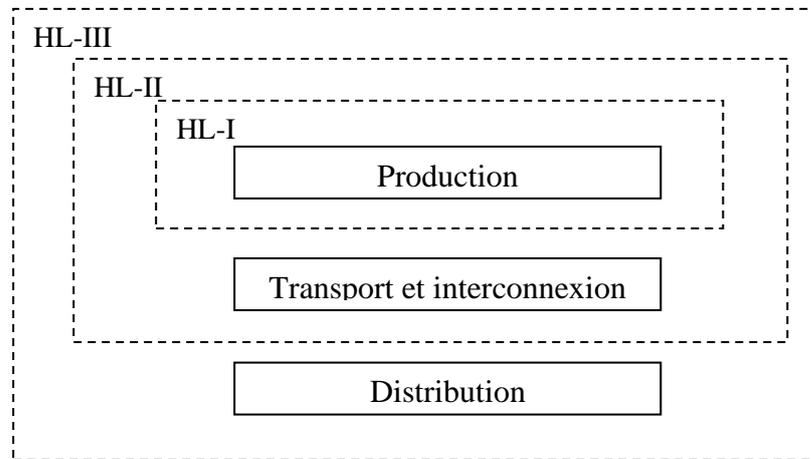


Figure. II.15: Hiérarchisation du système électrique

Niveau HL-I : l'adéquation de la capacité de production

Dans l'analyse de fiabilité au niveau HL-I, on vise à déterminer les besoins en capacité installée pour satisfaire la demande future et pour fournir une marge suffisante permettant une maintenance préventive, ainsi que de garantir des situations aléatoires de la production et de la demande. A ce niveau, on ne tient pas compte de la capacité du système pour transporter l'énergie depuis les unités de production jusqu'aux consommateurs finaux. Historiquement, la marge de capacité est déterminée en fonction d'un pourcentage de la demande ou de la production, ou d'une combinaison de ces derniers critères déterministes. Ceux-ci peuvent être remplacés par des critères probabilistes qui sont plus adaptés pour représenter les facteurs stochastiques dans l'analyse de fiabilité.

Niveau HL-II : l'adéquation et la sécurité du système intégré (production et transport)

L'analyse de fiabilité au niveau HL-II évalue la capacité du système pour transporter l'énergie provenant des unités de production. A la différence de l'évaluation au niveau HL-I, on prend en compte (en plus de déterminer les besoins en capacité installée) le réseau de transport et les interconnexions. L'analyse de fiabilité du système intégré est plus complexe, car elle doit tenir compte des effets de chaque sous-système (production et transport) sur la fiabilité de fourniture et du phénomène des foisonnements des aléas entre systèmes interconnectés.

Niveau HL-III : la fiabilité du système global (production, transport et distribution)

A ce niveau, on tient compte de la production, du transport (y compris les interconnexions) et de la distribution pour évaluer le niveau de fiabilité du système. Les méthodes basées sur des analyses par découpage de zones permettant une analyse simplifiée du système global, sont souvent les plus utilisées pour évaluer la fiabilité de fourniture dans ce niveau hiérarchique.

II.7 Services auxiliaires[24,25,26,27,28]

Le terme service auxiliaire a été utilisé pour la première fois durant le premier processus de restructuration et de libéralisation du marché de l'énergie électrique aux Etats Unis. Il désigne la gamme entière des services nécessaires pour la réussite des différentes tâches de bases à savoir la production et la distribution de l'énergie électrique. Les services auxiliaires assurent les fonctions de bases de livraison de l'énergie électrique qui sont essentielles pour la fiabilité du système. En effet, le problème d'estimation de la fiabilité du système devrait obligatoirement passer par l'évaluation de disponibilité des services auxiliaires. On peut d'ailleurs définir les services auxiliaires comme étant ceux nécessaires pour supporter le transport de l'énergie électrique depuis les centrales de production jusqu'aux abonnés avec l'obligation de maintenir un fonctionnement fiable du réseau électrique interconnecté. On reconnaît les services auxiliaires suivants :

- Service de programme (prévision).
- Service de contrôle et de dispatching.
- Service de la régulation et du contrôle de tension.
- Service de la régulation de la fréquence.
- Service d'équilibre d'énergie.
- Gestion de la réserve d'énergie.

II .8 Reserve d'énergie [25,29,30,31,32,33,34,35]

Une amélioration de la fiabilité du système peut être obtenue par l'utilisation des meilleurs composants ou par l'introduction des éléments à redondances. Ces unités permettent la poursuite de la couverture de la charge en cas de pannes d'unités déjà en service. Les unités redondantes sont contraintes à desservir une énergie dépassant l'ensemble de l'énergie demandée par la charge et des pertes encourues durant le transport. Cette énergie qui devrait être disponible à n'importe quel moment représente la réserve de production nécessaire afin d'éviter tout risque de manque de puissance marquée par la chute de production au-delà d'un certain niveau.

Dans ces conditions, la détermination de la réserve exigée devient un aspect important pour le bon fonctionnement du réseau électrique. De plus le problème peut en premier lieu être posé par les exigences de la puissance maximale installée, en second lieu posé par les exigences de la puissance maximale opérationnelle. Sachant que la puissance de réserve installée se traduit par la capacité à couvrir à long terme les charges prévisionnelles, la réserve quant à elle ne couvre ces charges qu'à court terme.

En outre, elle est obligatoirement planifiée pour couvrir les incertitudes résultantes des prévisions de la croissance de la demande, des révisions des équipements de production suivant une politique de maintenance planifiée ou tout simplement des pannes de production. A ce stade, une coordination est plus que nécessaire afin de programmer les entretiens durant la saison de basse demande, ou des périodes creuses pour lesquelles le prix de l'énergie descend au-dessous d'une certaine moyenne.

II.8.1 Reserve opérationnelle

Bien que la puissance maximale installée est suffisante, le réseau doit disposer de moyen de réserve afin qu'il soit prêt à couvrir tout manque de puissance provoqué par une panne de ses unités. Dans ce cas, l'attribution de la réserve n'est autre qu'une décision concernant les unités de production destinée à commuter afin de remplacer les unités en panne. Cette pratique vise à minimiser le risque de délestage suite à tout défaut de l'unité de production, tout maintenant une partie de la réserve fonctionnelle par le maintien d'unités synchronisées et reliées au réseau. Pour cela, on doit maintenir disponible un groupe d'unités rapidement mises en ligne afin de couvrir la charge. Issus de cette considération, deux types de réserves sont à dénombrer, les réserves à maintenir en service continu ou réserve tournante et les réserves normalement à l'arrêt ou réserve non tournante.

II.8.2 Reserve tournante

Plusieurs auteurs utilisent le terme de réserve tournante mais peu d'entre eux donnent une définition plus ou moins précise. Soit parce qu'ils considèrent que sa signification physique est évidente ou qu'elle est parfaitement claire. De plus, en consultant plusieurs ouvrages on constate les définitions suivantes :

- ✓ L'ensemble des unités opérationnelles synchronisées au réseau pouvant répondre à une grande panne de puissance dans un délai de 10 minutes.
- ✓ La puissance totale résultante de l'opération de soustraction suivante : puissance produite- (puissance de la charge + les pertes).
- ✓ Composée de l'ensemble des groupes tournant à vide capable de répondre de façon immédiate afin de satisfaire la charge dans un délai de 5 minutes.
- ✓ C'est l'ensemble des centrales thermiques et à gaz fonctionnant à charge partielle.
- ✓ Composée des groupes synchronisés tournant à vide prêts à couvrir une charge supplémentaire.

II.8.3 Reserve non tournante

La réserve non tournante est une réserve moins rapide obtenue à partir des turbines hydrauliques ou à gaz, ces derniers ont un temps très lents.

Elle correspond à la puissance susceptible d'être rajoutée après un intervalle de temps nécessaire à la mise en service des centrales qui sont à l'arrêt. Comparée à la puissance totale, la puissance de réserve peut présenter des pourcentages différents au sein de chaque réseau alors qu'elle peut varier d'une région à une autre (cas des Etats Unis d'Amérique). Actuellement il n'existe aucune norme fixant ce taux de réserve. Cela dépend de la région de la charge et de l'expérience professionnelle acquise à partir de la gestion des réserves de puissances électriques.

II.9 Conclusion

Nous nous sommes intéressés à l'évaluation de la fiabilité des systèmes. En règle générale, la fiabilité est considérée comme un critère pertinent quant à l'évaluation de l'efficacité des systèmes. Dans ce chapitre, nous avons parlé sur la fiabilité des systèmes de point de vue générale, ainsi que les grandeurs qui caractérisent et prévoient la fiabilité d'un système à partir de la connaissance de la fiabilité de ses composants, et aussi nous avons cité quelques méthodes classiques pour évaluer la fiabilité des systèmes.

Les méthodes classiques présentent l'inconvénient de ne mesurer la fiabilité que pour des modèles binaires simples, alors la réalité du comportement des composants d'un système peut être en dégradation, ce type de système est appelé système multi-états.

On considérera plus tard l'évaluation de fiabilité d'un système multi états en utilisant la méthode de la fonction universellement appelée technique d'Ushakov.

CHAPITRE III
SYSTÈMES MULTI-
ÉTATS

CHAPITRE III

SYSTEME MULTI-ETATS

III.1 Introduction [2, 36]

Tous les systèmes sont conçus pour effectuer leurs tâches destinées dans un environnement donné. Certains systèmes ne peuvent accomplir leur tâche avec différents niveaux distinctifs de l'efficacité habituellement appelé le taux de rendement. Un système qui peut avoir un nombre fini de taux de rendement est appelé un système Multi-états « MSS » (Multi-states system).

En réalité, les éléments du système peuvent fonctionner à des performances multi-niveaux dus à la dégradation des éléments du système. Cette dégradation est maintenue entre les états binaires du bon fonctionnement et l'échec total de l'élément.

En général, le taux de rendement d'un élément peut varier de parfait fonctionnement jusqu'à rupture. Les échecs qui conduisent à une diminution de la performance des éléments sont appelés des échecs partiels. Après un échec partiel les éléments continuent de fonctionner à des taux de rendement réduits, et après l'échec complet les éléments sont totalement incapables d'accomplir leurs tâches.

Prenons un exemple d'un système multi-états : dans un système électrique constituant à générer et transporter de l'électricité, chaque unité de production peut fonctionner à différents niveaux de capacité. Les unités de production sont des assemblages complexes de plusieurs parties. Les échecs des différentes parties peuvent conduire à des situations dans lesquelles l'unité de production continue de fonctionner, mais à un taux de capacité réduit. Cela peut se produire en cas de panne de plusieurs auxiliaires tels que les pulvérisateurs, pompes à eau, ventilateurs, ... etc.

III.2 Généralité sur le modèle du système multi-états [1, 36, 37]

Afin d'analyser un comportement d'un MSS doit connaître les caractéristiques de ses éléments. Tous les éléments j du système peuvent avoir K_j différents états, correspondant à un taux de performance représentés par l'ensemble

$$g_j = \{g_{j1}, \dots, g_{jK_j}\} \quad (\text{III.1})$$

Où g_{ji} : la performance de l'élément j dans l'état i avec $i \in \{1, \dots, K\}$

Le taux de rendement $G_j(t)$ de l'élément j à tout instant $t \geq 0$ est une variable aléatoire qui prend ses valeurs dans g_j , avec $G_j(t) \in g_j$.

Par conséquent, pour l'intervalle de temps $[0, T]$, où T est la période d'exploitation du système multi-états (Multi State system : MSS), le taux de rendement de l'élément j est définie comme un processus stochastique.

Les probabilités associées aux différents états d'élément du système j à tout instant t peuvent être représenté par l'ensemble :

$$p_j(t) = \{p_{j1}(t), p_{j2}(t), \dots, p_{jK_j}(t)\} \quad (\text{III.2})$$

Où

$$p_{ji}(t) = \Pr\{G_j(t) = g_{ji}\} \quad (\text{III.3})$$

A noter que depuis les états d'élément compose le groupe complet des événements s'excluant mutuellement (ce qui signifie que l'élément j peut toujours être dans l'un et un seul des états K_j),

$$\sum_{i=1}^{K_j} p_{ji}(t) = 1, \text{ pour } t : 0 \leq t \leq T \quad (\text{III.4})$$

Lorsque le MSS est formé de n éléments, son taux de rendement est clairement déterminé par les taux de rendement de ces éléments. A chaque instant, les éléments du système ont des taux de rendement correspondant à certains de leurs états. L'état de l'ensemble du système est déterminé par les états de ses éléments.

Supposons que l'ensemble du système a K états différents et que g_i est la performance d'ensemble du système dans l'état $i \in \{1, \dots, K\}$. Le taux de rendement de tout l'ensemble du MSS au moment t est une variable aléatoire qui prend des valeurs dans l'ensemble $\{g_1, \dots, g_K\}$.

Soit $L_n = \{g_{11}, \dots, g_{1K_1}\} \times \{g_{21}, \dots, g_{2K_2}\} \times \dots \times \{g_{n1}, \dots, g_{nK_n}\}$, l'espace des combinaisons possibles des taux de rendement pour tous les éléments du MSS et $M = \{g_1, \dots, g_K\}$, l'espace des valeurs possibles du taux de rendement pour l'ensemble du système.

La transformation $f(G_1(t), \dots, G_n(t))$, $L^n \rightarrow M$, qui mappe l'espace de taux de rendement des éléments dans l'espace des taux de rendement du système est appelée la fonction de structure d'un système multi-états (MSS).

Notez que la fonction de structure MSS est une extension d'une fonction de structure binaire. La seule différence est dans la définition de l'espace d'état: la fonction de structure binaire est mappée comme $\{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}$, tandis que dans le MSS, on a affaire à beaucoup plus d'espaces complexes.

Maintenant, nous pouvons définir un modèle générale du MSS. Ce modèle devrait inclure des modèles de processus stochastiques $G_j(t), j = 1, \dots, n$.

Pour chaque élément j du système, la fonction de structure du système qui produit le processus stochastique correspondant à la performance de sortie de l'ensemble du MSS :

$$G(t) = f(G_1(t), \dots, G_n(t)) \quad (\text{III.5})$$

Dans la pratique, les performances des processus stochastiques $G_j(t)$ peuvent être présentées dans certaines formes différentes. Par exemple, les distributions de probabilité de rendement pour tous les éléments du système peut être donné à tout instant t au cours de la période d'exploitation $[0, T]$. Ensuite, le MSS est présenté par ces distributions de probabilité

$$g_j, p_j(t), 1 \leq j \leq n \quad (\text{III.6})$$

Beaucoup d'efforts sont intensifiés afin de développer une méthode pour analyser la disponibilité ou bien la fiabilité d'un système multi-états (MSS). Ces méthodes reposent sur la technique d'Ushakov. Généralement, la méthode d'évaluation de la disponibilité et la fiabilité des systèmes multi-états (MSS) est basée sur quatre approches :

- ✓ Stochastique (Chaîne de Markov),
- ✓ Monté- Carlo,
- ✓ UMGF

Dans plusieurs problèmes d'application de nature combinatoire ou la taille de l'espace de recherche est exhaustive, l'application de l'UMGF devient l'outil impératif aux calculs des différentes probabilités des évènements qui caractérisent l'élément du système. UMGF est analogue à la transformée de Laplace.

L'extension d'UGF en UMGF est l'outil efficace dans la résolution des problèmes du type combinatoire. Cette modification nous permet un algorithme.

III.3 Estimation de la fiabilité des systèmes multi états basée sur la méthode UMGF (Universal Moment Generating Function) [38, 39, 40]

Les méthodes d'évaluation de la disponibilité sont des méthodes nouvelles développées afin de résoudre le problème d'estimation de la disponibilité. Certaines de ces méthodes se sont basées sur des méthodes déjà existantes, les autres sont nouvelles comme UMGF. Vu l'estimation qualitative et quantitative de cette méthode, elle est devenue plus moderne par rapport à celle de Monté- Carlo, Markovienne et logique représentative des systèmes (coupe minimale et arbre de défaillance), cette méthode permet une analyse spécifique des cas dégradables d'un système. Cette dégradation conduit le système à se présenter sous forme d'un système à plusieurs niveaux de performances ou capacité. Les systèmes dégradables se présentent généralement dans le cas des générateurs de production en électrotechnique, capacité d'un conduit en hydraulique, ...etc.

La technique UMGF permet l'estimation des de la disponibilité des systèmes de grandes dimensions ou les méthodes itératives (stochastiques, markoviennes, monté- Carlo) restent inapplicables à ces systèmes.

Pour un système de grandes dimensions séries-parallèles, la numérotation des états est trop fastidieuse alors avec l'introduction d'une nouvelle méthode d'évaluation a prouvé que son efficacité dans les systèmes combinatoires complexe est assez puissante. Généralement dans la littérature moderne (*Fiabilité Moderne*) cette méthode n'est que l'extension de la transformé de LAPLACE, la raison qu'elle peut prendre une variable de la transformé variable (Z). Elle a pris les noms : Z transformé, et a fait naître L'UMGF (*Universal Moment Generating Function*) ou simplement u-transform. D'UMGF est largement connu à partir de l'extension de « UGF » (Ordinary Générationg Function).

Par définition pour un élément L'UMGF est un polynôme d'Ushakov de la forme suivante :

$$u(Z) = \sum_{j=1}^J P_j Z^{G_j} \quad (\text{III.7})$$

Ou la variable (Z) présente J possible valeur et P est la probabilité que G soit égal à G_j. la probabilité caractéristique de la variable aléatoire G peut se calculer par l'utilisation de la fonction d'Ushakov (u(Z)).

En pratique, si la variable discrète aléatoire G d'un système Multi-Niveaux ou Multi-States (MSS) est définit pour une performance de sortie stationnaire (Output Stationary Performance), dans ce cas la disponibilité est noté par (A) est donnée par la probabilité suivante :

$$A = \text{proba}(G \geq W) \quad (\text{III.8})$$

Qui peut être donnée à son tour par :

$$\text{proba}(G \geq W) = \Phi(u(Z)Z^{-W}) \quad (\text{III.9})$$

Ou

W : Représente les niveaux de charges

Et

Φ : Représente un opérateur disruptif définit par :

$$\Phi(PZ^{\sigma-W}) = \begin{cases} P, & \text{si } \sigma \geq W \\ 0, & \text{si } \sigma < W \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

$$\Phi \sum_{j=1}^J P_j Z^{E-W} = \sum_{j=1}^J \Phi(P_j Z^{E-W}) \tag{III.11}$$

On remarque facilement les équations (III.7) et (III.8) rencontrent les conditions :

$$probabilite(G \geq W) = \sum_{G \geq W} P_j \tag{III.12}$$

Par l'utilisation de l'opérateur Φ . Finalement les coefficients du polynôme $u(Z)$ sont sommés pour tous les termes avec $(G_j \geq W)$. Considérons le cas d'une machine simple avec en seul mode de défaillance (Tous- Rien) et chaque élément i à une performance G_i et une disponibilité A_i .

L'UMGF avec deux états peut être défini par :

$$u_i(Z) = (1 - A_i)Z^0 + A_iZ^{G_i} \tag{III.13}$$

$$u_i(Z) = (1 - A_i) + A_iZ^{G_i} \tag{III.14}$$

III. 3.1 Estimation de la fiabilité des systèmes séries [36, 41]

Soit la configuration d'un système de production qui représente par la figure (III. 1).

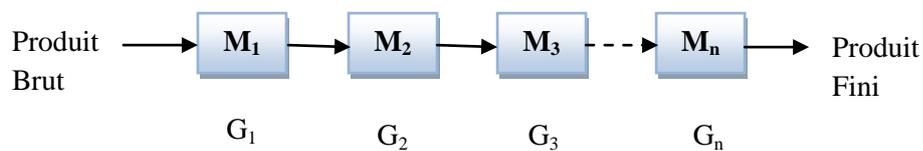


Figure III.1 : Système Série

G_1, G_2, \dots, G_n : Représentent la performance ou bien la capacité des éléments M_1, M_2, \dots, M_n .

Avec $\{(G_1 > G_2 > \dots > G_n) < G_{n-1}\}$.

Alors G_{n-1} : représente la performance la plus faible dans le système de l'élément M_{n-1} .

Alors la performance du système équivalent peut être donnée par la performance de cet élément du système de plus faible performance.

Quand les composants ou les éléments d'un système sont placés en série, l'élément de plus faible performance détermine l'étranglement de la ligne à son tour le système équivalent aura sa performance.

Pour le calcul de L'UMGF du système contenant n éléments en série on fait introduire un opérateur δ qui peut être utilisé dans les expressions suivantes :

$$u_s(Z) = \delta(u_1(Z), u_2(Z), \dots, u_n(Z)) \tag{III.15}$$

$$\delta(G_1, G_2, \dots, G_n) = \min \{G_1, G_2, \dots, G_n\} \tag{III.16}$$

$$\delta(u_1(Z), u_2(Z), \dots, u_n(Z)) = \delta(\sum_{i=1}^n P_i Z^{a_i}, \sum_{j=1}^m Q_j Z^{b_j}) \tag{III.17}$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i Q_j Z^{\min\{a_i, b_j\}} \tag{III.18}$$

III. 3. 2 Estimation de la fiabilité des systèmes parallèles [36, 40, 42]

Maintenant on suppose que le système est représenté par une configuration parallèle. Le système comporte des éléments placés en parallèle figure (III. 2). La performance du système est déterminée par la somme de toutes les performances individuelles de chaque composant.

La performance totale est donnée par la fonction $u(Z)$ du système multi states de l'élément m composant J_m éléments en parallèle peut être calculé en utilisant l'opérateur \mathfrak{S} :

$$u_p(Z) = \mathfrak{S}(u_1(Z), u_2(Z), \dots, u_n(Z)) \tag{III.19}$$

$$\mathfrak{S}(G_1, G_2, \dots, G_n) = \sum_{i=1}^n G_i \tag{III.20}$$

Cependant pour une paire d'élément connecté en parallèle l'UMGF est donné par :

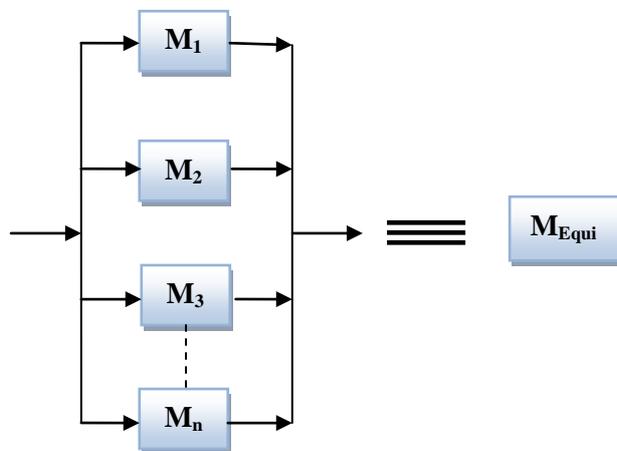


Figure III.2: Système parallèle

$$\mathfrak{S}(u_1(Z), u_2(Z)) = \mathfrak{S}(\sum_{i=1}^n P_i Z^{a_i}, \sum_{j=1}^m Q_j Z^{b_j}) \quad (\text{III.21})$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i Q_j Z^{a_i+b_j} \quad (\text{III.22})$$

a_i, b_j , Physiquement sont interpréter comme performances des éléments n et m .

P_i, Q_j : Représente les probabilités stationnaires pour ces deux performances.

\mathfrak{S} : est un opérateur qui permet de faire un produit simple entre les fonctions individuelles $u(Z)$.

Dans ce cas L'UMGF est :

$$u_p(Z) = \sum_{j=1}^m u_j(Z) \quad (\text{III.23})$$

Et l'UMGF d'un élément individuel est :

$$u_p(Z) = \prod_{j=1}^m (1 - A_j + A_j Z^{G_j}) \quad (\text{III.24})$$

Appliquant la composition de ses deux opérateurs \mathfrak{S} et δ consécutive nous obtenons l'UMGF du système total série-parallèle, pour faire ça en premier il faut déterminer individuellement l'UMGF pour chaque composant.

III. 3. 3 Élément avec défaillance partielle

C'est le cas le plus général ou les défaillances peuvent causer des réductions sur la performance des éléments du composants et cependant différentes performances appeler dégradation peuvent être pris n considérations dans ce cas ou il y a une dégradation L'UMGF d'un élément est :

$$u_i^*(Z) = \sum_{j=1}^k P_{ij} Z^{G_{ij}} \quad (\text{III.25})$$

Avec les notions suivantes :

K : nombre possible d'états (ou bien le niveau de performance de $K^{\text{ième}}$ élément i .

j : index des niveaux de performance ($j=1,2, \dots, k$).

G_{ij} : la performance de l'élément i dans état j .

P_{ij} : Probabilité de transition avec la performance qui correspond à G_{ij} .

La première étape (j=1) peut être considérée comme une défaillance totale ($G_{ij}=0$) et la $k^{ième}$ état est comme élément à performance nominale. Utilisant l'opérateur \mathfrak{S} ; nous obtenons l'UMGF du $i^{ième}$ composant du système contenant K_i éléments en parallèle comme :

$$u_i(Z) = (u_i^*(Z))^{k_i} \tag{III.26}$$

L'UMGF du système entier contenant n composants connectés en série est :

$$u_s(Z) = \mathfrak{S}((u_1^*(Z))^{k_1}, (u_2^*(Z))^{k_2}, \dots, (u_n^*(Z))^{k_n}) \tag{III.27}$$

III. 3. 4 Composant avec défaillance totale [41, 43]

Considérons le cas le plus général quand la défaillance est totale et chaque sub-système de type i et de version V_i a des performances nominales G_{iv} et disponibilité A_{iv} . Dans ce cas nous aurons la $\text{proba}(G=G_{iv}) = A_{iv}$ et $\text{proba}(G=W) = 1 - A_{iv}$. L'UMGF des éléments à défaillance totales se procure par deux états q_i peuvent être formulé comme suite :

$$u_i^*(Z) = (1 - A_{iv})Z^0 + A_{iv}Z^{G_{iv}} = 1 - A_{iv} + A_{iv}Z^{G_{iv}} \tag{III.28}$$

L'utilisons l'opérateur \mathfrak{S} , nous obtenons L'UMGF du $i^{ième}$ élément su système contenant K_i éléments en parallèle par :

$$u_s(Z) = (u_i^*(Z))^{k_i} = (A_{iv}Z^{G_{iv}} + (1 - A_{iv}))^{k_i} \tag{III.29}$$

L'UMGF du système entier contenant n éléments connectés en série est :

$$u_s(Z) = \delta \left(\begin{array}{c} (A_{1v}Z^{G_{1v}} + (1 - A_{1v}))^{k_1}, \\ (A_{2v}Z^{G_{2v}} + (1 - A_{2v}))^{k_2}, \dots, \\ \vdots \\ (A_{nv}Z^{G_{nv}} + (1 - A_{nv}))^{k_n}, \end{array} \right) \tag{III.30}$$

III .4 Algorithmes de la technique d'Ushakov [1, 2]

Étape 1. Lecture des données à partir du fichier de données : $\begin{cases} \text{Disponibilité } A \\ \text{cout } C \\ \text{Performance } G \end{cases}$

Étape 2. Set $i=0$

$j := 0$

for $i := 1$ to n /* n : Nombre maximal des éléments en série*/

for $j := 1$ to J /* J : Nombre maximal des éléments en parallèle*/

Do Begin

$q = 1 - A$ /* q : Indisponibilité de l'élément*/

Étape 3. Polynôme d'Ushakov /* système parallèle*/

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

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

$u(Z)$ /*Polynôme d'Ushakov de la colonne*/

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

$= (q_i Z^0 + A Z^{G_i}), \dots, (q_j Z^0 + A Z^{G_j})$

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

Étape 4. Si /* les éléments sont identiques*/

Alors : $u_p(Z) = ((1 - A_j) Z^0 + A_j Z^{G_i})^{k_j}$

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

Si non allez à **Étape 3**

Étape 5. Polynôme d'Ushakov /*Système Série*/

For $i := 1$ to n /* n : Nombre maximal des éléments en série*/

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

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

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

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

Avec : $Min_{i=1}^n \{G_1, G_2, \dots, G_i\}$

Étape 6. Si /* les éléments sont identiques*/

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

Sinon allez à **Étape 5**

Étape 7. Polynôme d'Ushakov /* Système Série Parallèle*/

For i :=1 to n /* n : Nombre maximal des éléments en série*/

For j :=1 to J /* J : Nombre maximal des éléments en parallèle*/

$$u_{s-p}(Z) = \prod_{j=1}^{J_m} (q_j Z^0 + A_j Z^{G_j})_{Max_{j=1}^J = \sum_{j=1}^J G_j} * \prod_{i=1}^n (q_i Z^0 + A_i Z^{G_i})_{Min_{i=1}^n = \min(G_i)}$$

Stop

Étape 8. Polynôme d'Ushakov /*Système de charge + Production*/

La Charge

Étape 9. Lecture des données de la charge à partir du fichier de données :

{ Niveau [%]

{ Temps de charge [%]

For m :=1 to M /* M : nombre de niveaux de charges*/

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

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

$$A = \frac{1}{\sum_{j=1}^M T_j} \sum_{j=1}^M proba(G_T \geq W_j) T_j \quad /*A : Disponibilité des niveaux de charges*/$$

$$u_{charge}(Z) = q_D(Z)^{-W} \quad /* W : Niveaux de charges* /$$

La Production

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

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

STOP

III.5 Exemple illustratif [1, 2, 36]

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

Sous-système 1 : deux alternateurs connectés en parallèle.

Sous-système 2 : un transformateur

III.5.1 Cas de deux états

	Sous système1				Sous système2	
	Unité1		Unité2		Unité3	
Etat	1	2	1	2	1	2
Capacité G (%)	0	60	0	80	0	150
Probabilité	0.1	0.90	0.05	0.95	0.05	0.95

Tableau III.1 : les paramètres du système électrique

Charge en MW	100	70
Durée en (h)	6570	2190
(%)	75	25

Tableau III.2 : les caractéristiques de la charge

L'UMGF du système complet est obtenue par l'application des opérateurs \mathfrak{S} , δ

\mathfrak{S} : Pour les éléments en parallèle ;

δ : Pour les éléments en série.

$$\begin{aligned}
 U_{sys} &= \delta[\pi(U_1^1(Z), U_2^1(Z), U_1^2(Z))] \\
 &= \delta[(0.1 Z^0 + 0.9 Z^{60}). (0.05 Z^0 + 0.95 Z^{80}), (0.05 Z^0 + 0.95 Z^{150})] \\
 &= \delta[(0.005 Z^0 + 0.045Z^{60} + 0.095 Z^{80} + 0.855 Z^{140}), (0.05 Z^0 + 0.95 Z^{150})]
 \end{aligned}$$

$$U_{sys} = \delta[(0.05475 Z^0 + 0.04275Z^{60} + 0.09025 Z^{80} + 0.81225 Z^{140})]$$

Pour évaluer la probabilité $proba (G_m \geq W_s)$ 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 \emptyset défini par : $proba(G_m \geq W_s) = \emptyset(U_{sys}(Z)Z^{-W_s})$.

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

$$A(W_1) = \text{proba} (G_m \geq W_1)$$

$$A(W_1) = \emptyset(0.05475 Z^{(0-70)} + 0.04275Z^{(60-70)} + 0.09025 Z^{(80-70)} + 0.81225 Z^{(140-70)})$$

$$A(W_1) = \text{proba} (G_m \geq W_1) = \text{proba}(G_m \geq 70)$$

$$A(W_1) = \sum_{G_m - W_1 \geq 0} \text{proba} = 0.09025 + 0.81225$$

$$A(W_1) = 0.9025$$

$$A(W_2) = \text{proba} (G_m \geq W_2)$$

$$A(W_2) = \emptyset(0.05475 Z^{(0-100)} + 0.04275Z^{(60-100)} + 0.09025 Z^{(80-100)} + 0.81225 Z^{(140-100)})$$

$$A(W_2) = \text{proba} (G_m \geq W_2) = \text{proba}(G_m \geq 100)$$

$$A(W_2) = \sum_{G_m - W_2 \geq 0} \text{proba} = 0.81225$$

La disponibilité totale du système est calculée par :

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

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

Ou :

S : Représente les différents niveaux de demande

M : Les différents états du système

p_m : La probabilité que la production du système satisfait chaque niveau de demande W_s

q_s : étant la probabilité de cette demande

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

$$A = 0.25 * (0.9025) + 0.75 * (0.81225) = 0.83481$$

On constate que le système considéré dans cet exemple satisfait la demande de 70Mw avec une probabilité de 90.25% et la demande de 100Mw avec une probabilité de 81.22%. La disponibilité moyenne du système est de 83.48%.

III.5.2 Cas de multi états

	Sous-système 1							Sous-système 2		
	Unité 1			Unité 2				Unité 3		
Etat	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3
Capacité G(%)	0	30	60	0	30	50	80	0	100	150
Probabilité	0.10	0.30	0.6	0.05	0.25	0.30	0.40	0.05	0.30	0.65

Tableau III.3 : les paramètres du système électrique

Charge en MW	100	70
Durée en (h)	6570	2190
(%)	75	25

Tableau III.4 : les caractéristiques de la charge

L'UMGF de chacun des trois unités est par définition :

$$U(Z) = \sum_{j=1}^J P_j Z^{G_j}, \text{ nous avons donc :}$$

Pour l'unité 1 du sous-système 1 :

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

Pour l'unité 2 du sous-système 1 :

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

Pour l'unité du sous-système 2 :

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

L'UMGF du système est obtenue par l'application des opérateurs \mathfrak{S} et δ , \mathfrak{S} pour les éléments en parallèles et δ pour les éléments en séries

$$\begin{aligned}
 U_{sys} &= \delta[\pi(U_1^1(Z), U_2^1(Z), U_1^2(Z))] \\
 &= \delta[(0.1 Z^0 + 0.3 Z^{30} + 0.6 Z^{60}) \cdot (0.05 Z^0 + 0.25 Z^{30} + 0.3 Z^{50} + 0.4 Z^{80}), (0.05 Z^0 \\
 &\quad + 0.3 Z^{100} + 0.65 Z^{150})]
 \end{aligned}$$

$$= \delta[(0.005Z^0 + 0.04 Z^{30} + 0.3 Z^{50} + 0.105 Z^{60} + 0.13 Z^{80} + 0.15 Z^{90} + 0.3 Z^{110} + 0.24 Z^{140}), (0.05 Z^0 + 0.3 Z^{100} + 0.65 Z^{150})]$$

$$U_{sys} = 0.05475 Z^0 + 0.38 Z^{30} + 0.0285 Z^{50} + 0.0949 Z^{60} + 0.123 Z^{80} + 0.1425 Z^{90} + 0.162 Z^{100} + 0.195 Z^{110} + 0.156 Z^{140}$$

Pour évaluer la probabilité $proba(G_m \geq W_s)$ 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 \emptyset défini par les équations (4) et (5).

$$proba(G_m \geq W_s) = \emptyset(U_{sys}(Z)Z^{-W_s})$$

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

$$\begin{aligned} A(W_1) &= proba(G_m \geq W_1) \\ &= \emptyset[0.05475Z^{(0-70)} + 0.38 Z^{(30-70)} + 0.0285Z^{(50-70)} + 0.0949Z^{(60-70)} \\ &\quad + 0.123 Z^{(80-70)} + 0.1425 Z^{(90-70)} + 0.162 Z^{(100-70)} + 0.195Z^{(110-70)} \\ &\quad + 0.156 Z^{(140-70)}] \end{aligned}$$

$$A(W_1) = proba(G_m \geq W_1) = proba(G_m \geq 70)$$

$$A(W_1) = \sum_{(G_m-70) \geq 0} proba = 0.123 + 0.1425 + 0.162 + 0.195 + 0.156 = 0.779$$

$$\begin{aligned} A(W_2) &= proba(G_m \geq W_2) \\ &= \emptyset[0.05475Z^{(0-100)} + 0.38 Z^{(30-100)} + 0.0285Z^{(50-100)} \\ &\quad + 0.0949Z^{(60-100)} + 0.123 Z^{(80-100)} + 0.1425 Z^{(90-100)} + 0.162 Z^{(100-100)} \\ &\quad + 0.195Z^{(110-100)} + 0.156 Z^{(140-)}] \end{aligned}$$

$$A(W_2) = proba(G_m \geq W_2) = proba(G_m \geq 100)$$

$$A(W_2) = \sum_{(G_m-100) \geq 0} proba = 0.162 + 0.195 + 0.156 = 0.5131$$

La disponibilité totale du système est calculée par :

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

Ou 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 de demande W_s , q_s étant la probabilité de cette demande.

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

$$A=0.25 *(0.779) + 0.75*(0.5131) = 0.5795$$

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%.

III.6 Conclusion

Le nombre important d'états pris en compte constitue à la fois comme une force, car elle permet d'envisager tous les situations possibles, et une faiblesse car le nombre important de ces états est très difficiles à résoudre. Deux inconvénients majeurs, et inhérents à l'utilisation des systèmes multi-états : la capacité de charge ainsi que la taille des états pris en considération rend la modélisation du système très difficile, d'autre part, les techniques actuelles de résolution et de simulation ne permettent pas d'obtenir rapidement des résultats.

L'évaluation de la fiabilité d'un système multi-états par la nouvelle méthode de la fonction universellement appelée technique d'Ushakov, adapte de manière très bien à notre cas « évaluation de la fiabilité d'un réseau, électrique ». Elle permet de tenir compte des différents niveaux de performances. Une fois l'algorithme mis en œuvre, il nous restera plus qu'à choisir la méthode d'optimisation relative au problème choisi. Celles-ci sont nombreuses. On s'intéressera alors au chapitre suivant à l'exposé les différentes méthodes d'optimisation et la nouvelle méthode d'optimisation s'appelée Harmony Search utilisé dans notre travail.

CHAPITRE IV
LES MÉTHODES
D'OPTIMISATION

CHAPITRE IV

LES METHODES D'OPTIMISATION

IV.1 Introduction[45-46]

La fonction d'optimisation consiste à rechercher l'ensemble des paramètres permettant d'obtenir le meilleur résultat. Parmi les problèmes rencontrés par le chercheur et l'ingénieur, les problèmes d'optimisation occupent à notre époque une place de choix.

La méthode de base pour optimiser un dispositif est la méthode d'essai et erreur : il s'agit de tester un certain nombre de solutions jusqu'à l'obtention d'une solution adéquate. Les solutions inadéquates sont éliminées, jusqu'à ce qu'un essai se révèle satisfaisant. Ce schéma est très général, c'est ce que nous faisons quand nous donnons à un paramètre plusieurs valeurs successives, de façon continue ou aléatoire et que nous observons le résultat. La méthode d'essai et erreur nécessite un grand nombre d'essais ce qui n'est pas toujours compatible avec la modélisation numérique même de manière automatique. 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.

IV.2 Généralités sur les algorithmes d'optimisation[45-46-47]

La résolution d'un problème d'optimisation s'appuie généralement sur un algorithme d'optimisation. L'algorithme d'optimisation cherche le jeu de paramètres de l'objet à optimiser donnant à une fonction relative au problème, la valeur maximale ou minimale. L'algorithme d'optimisation doit permettre de converger vers l'objet optimal en minimisant ou maximisant cette fonction par rapport aux paramètres variables. Généralement, pour toute méthode d'optimisation, l'ingénieur définit les variables du problème, l'espace de recherche et la fonction d'adaptation relative au problème.

IV.2.1 Variables du problème

C'est à l'utilisateur de définir les variables du problème. Il peut avoir intérêt à faire varier un grand nombre de paramètres pour augmenter les degrés de liberté de l'algorithme afin de découvrir des solutions nouvelles, ou bien, s'il a une vue suffisamment précise de ce qu'il veut obtenir, il peut limiter le nombre de variables.

Les variables peuvent être de natures diverses. Nous désignerons par x_1, \dots, x_n les n variables du problème. Celles-ci peuvent être continues (réelles ou complexes) ou discrètes (entières ou booléennes).

IV.2.2 Espace de recherche (domaine admissible)

Cette limitation de l'espace de recherche est liée à des contraintes de conception de l'objet et les intervalles de définition des variables sont en général naturellement limités. De plus, on a souvent une idée des ordres de grandeur des variables du problème.

Nous désignerons par $x_{i \min}$ et $x_{i \max}$ les bornes de chaque variable x_i :

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, \forall i \in [1; n] \quad (\text{IV.1})$$

IV.2.3 Fonction d'adaptation

Les grandeurs à optimiser peuvent être par exemple un comportement électrique, un coût de combustible, les pertes de transmission, une durée de développement, etc. Un algorithme d'optimisation nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions, à partir des grandeurs à optimiser. Nous la nommerons fonction d'adaptation f . On parle généralement de fonction de coût pour un problème de minimisation et de fonction objectif pour un problème de maximisation.

L'algorithme convergera vers un optimum de cette fonction d'adaptation, quelle que soit sa définition. La pertinence de la solution dépendra donc de la pertinence de la « question » posée. La fonction f doit donc exprimer le plus fidèlement possible le désir de l'utilisateur sous forme mathématique.

La fonction d'adaptation est donc une fonction des variables x_1, \dots, x_n et sa définition peut être analytique ou peut éventuellement faire appel au jugement de l'utilisateur.

IV.2.4. Problème d'optimisation

Un problème d'optimisation peut s'écrire sous la forme générale suivante :

$$\text{Optimiser } f(x_1, \dots, x_n) \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{avec } \sum_{i=1}^n g(x_i) \Delta_i d_i \quad (\text{IV.3})$$

x_1, \dots, x_n Sont les n variables du problème, f la fonction d'adaptation, g la fonction des contraintes et d les bornes.

Δ_i est un opérateur $\leq, =$ ou \geq . Optimiser peut signifier minimiser ou maximiser selon le problème traité.

Si le vecteur x satisfait toutes les contraintes, x est une solution admissible. L'ensemble de toutes les solutions admissibles est l'ensemble admissible ou la région admissible.

Une solution admissible x^* qui minimise la fonction d'adaptation pour tout x admissible est appelée solution admissible optimale.

IV.2.5 Algorithme d'optimisation pour la conception assistée par ordinateur

La figure IV.1 montre la structure d'un algorithme d'optimisation itératif pour la conception assistée par ordinateur (CAO).

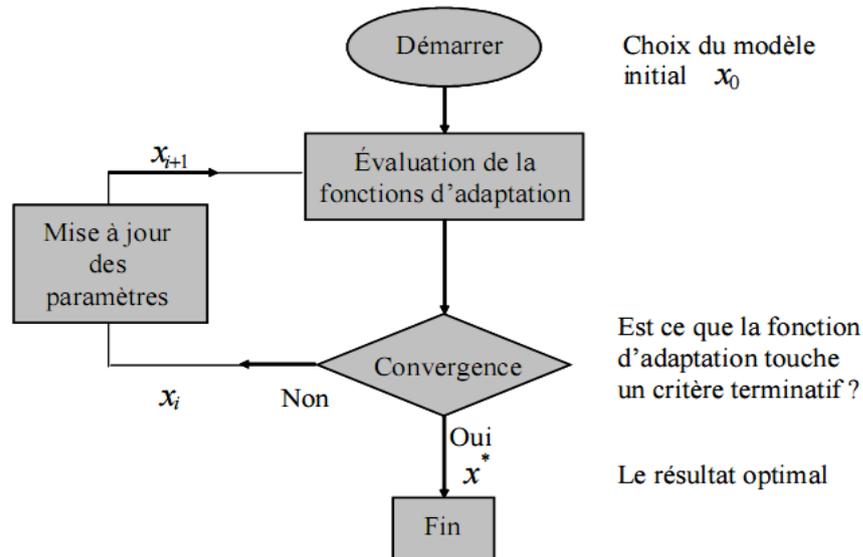


Figure IV.1 : Algorithme d'optimisation

L'algorithme d'optimisation évalue la fonction d'adaptation au moyen d'une analyse de l'objet pour un jeu de valeurs de ses paramètres.

Le bloc de convergence comporte un critère d'arrêt et une méthode de génération des nouveaux paramètres qui est en quelque sorte la méthode d'optimisation utilisée au cœur de l'algorithme.

Les nouveaux points (un point équivalent à un jeu de paramètres) sont acceptés et conservés pour l'étape suivante selon que :

- Ils minimisent ou maximisent la fonction d'adaptation,
- Ils permettent de constituer une base d'expériences.

Suivant la méthode d'optimisation choisie, un nouveau jeu de paramètres est généré pour effectuer une nouvelle itération.

Le critère d'arrêt peut être par exemple :

- Un certain seuil atteint par la fonction d'adaptation
- Un nombre de maximal d'évaluations de la fonction d'adaptation,
- Un temps de calcul fixé.

IV.3 Classification des méthodes d'optimisation [45-47]

IV.3.1 Recherche d'un extremum

La recherche d'un extremum pour une fonction f revient à résoudre un système de n équations à n inconnues, linéaires ou non :

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1; \dots; x_n) = 0, i = 1 \text{ à } n \quad (\text{IV.4})$$

➤ Recherche locale

La figure IV.2 montre le comportement d'une méthode de recherche locale d'un extremum. Une méthode de recherche locale, de type gradient, permet de minimiser la fonction de coût avec une convergence relativement rapide. Néanmoins les méthodes d'optimisation locales dépendent fortement du point de départ en cas de non-convexité et ont tendance à être fortement couplées au domaine de solution.

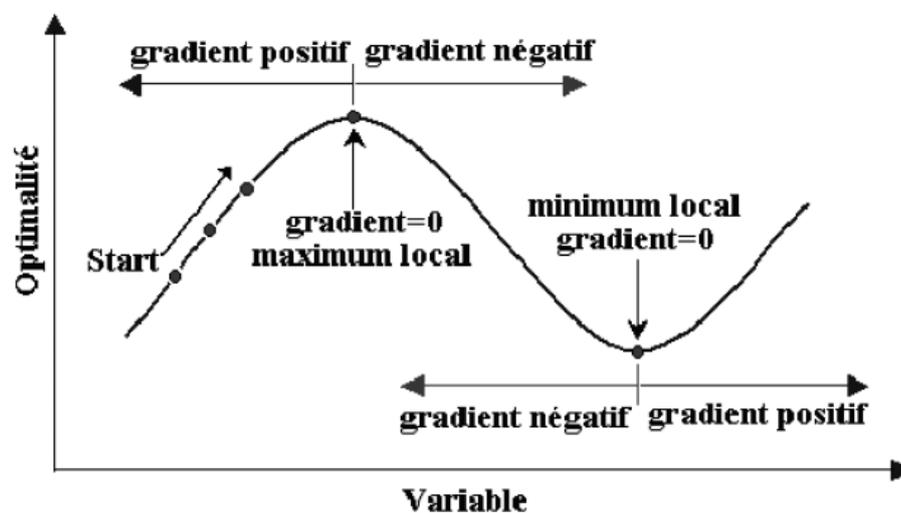


Figure IV.2 : Convergence vers un extremum local

➤ Recherche globale

Les méthodes de recherche globales d'un extremum sont typiquement employées pour résoudre les problèmes non-convexes complexes d'optimisation en explorant très largement le domaine pour éviter les optimums locaux et ainsi localiser l'optimum global. Les méthodes globales sont moins dépendantes des conditions initiales mais ces techniques ne peuvent pas profiter des caractéristiques locales de l'espace de solution comme les méthodes de type gradient, et leur convergence sera plus lente. La figure IV.3 illustre un espace avec des optimums locaux et un optimum global.

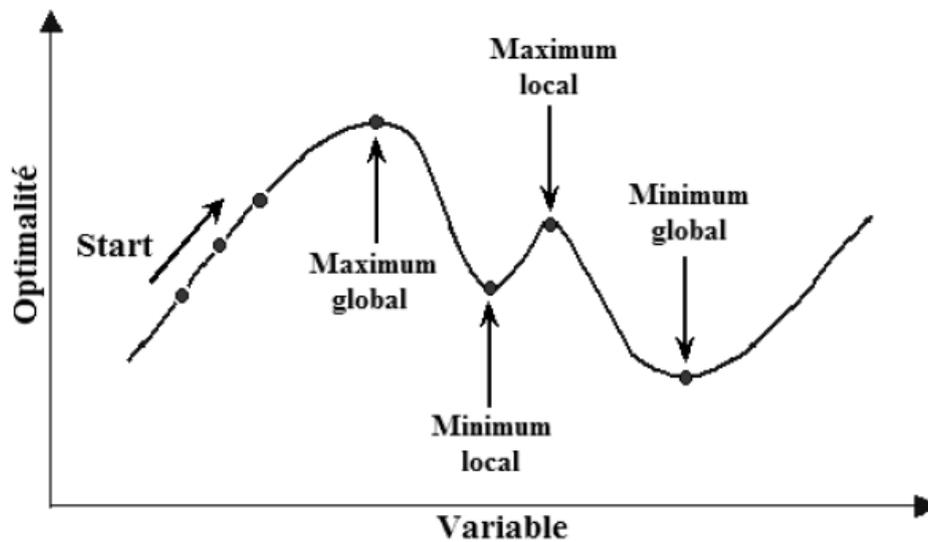


Figure IV.3 : Domaine admissible comportant des extremums locaux et globaux

IV.3.2. Méthodes locales et globales

➤ *Méthodes locales déterministes (basées sur un gradient)*

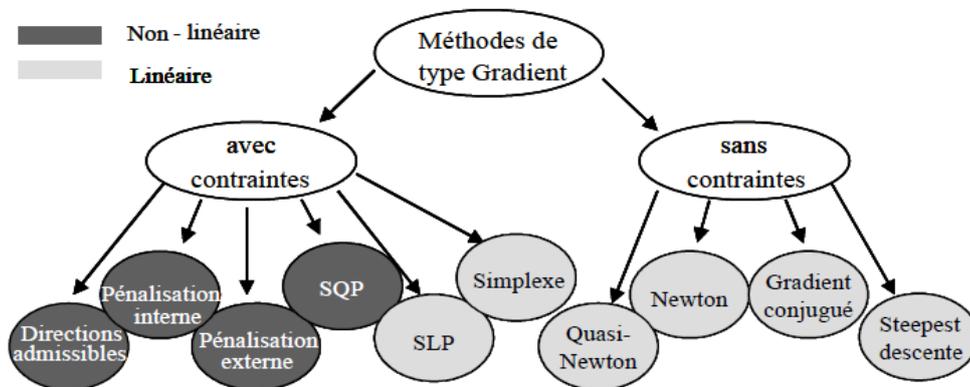
Les méthodes déterministes sont les plus appropriées en cas de convexité. Toutefois, elles ne sont pas indiquées pour les problèmes non convexes, c'est à dire quand on a une forte probabilité de rester bloqué dans un optimum local.

Il y a plusieurs méthodes pour réaliser la recherche d'un optimum. Ces méthodes se caractérisent par le fait qu'elles permettent d'obtenir une ou plusieurs solutions dont l'optimalité est garantie. Elles permettent d'obtenir la solution optimale d'un problème en parcourant la fermeture convexe de l'ensemble de recherche (ensemble des solutions admissibles).

Malgré une certaine complexité mathématique, les méthodes déterministes permettent de résoudre la plupart des problèmes rapidement. Elles ne peuvent généralement s'appliquer qu'aux problèmes en variables continues ou à des problèmes en variables entières ayant une matrice de la contrainte uni-modulaire (car dans ce cas, tous les sommets de l'ensemble de recherche sont entiers).

Pour améliorer l'efficacité de la recherche ou en cas de doute sur la convexité du problème d'optimisation, on peut faire une énumération implicite en séparant le problème en sous problèmes et en évaluant ceux-ci à l'aide d'une relaxation (continue ou lagrangienne principalement) jusqu'à ne plus avoir que des problèmes faciles à résoudre ou dont on sait avec certitude qu'ils ne peuvent pas contenir de solution optimale.

La figure IV.4 présente une liste de méthodes déterministes en deux groupes, avec et sans contraintes.



SQP : programmation quadratique séquentielle (SQP)
 SLP : programmation linéaire séquentielle

Figure IV.4 : Méthodes déterministes locales

➤ **Méthodes globales (non-déterministes) heuristiques**

Les méthodes non-déterministes (ou stochastiques), sont des méthodes d'optimisation permettant de résoudre préférentiellement les problèmes non convexes. Pour les méthodes dites heuristiques, la stratégie de recherche est élaborée par l'usage d'une ou plusieurs règles empiriques (heuristiques), souvent spécifiques à un type de problème, qui produit une solution non nécessairement optimale.

Le nombre d'évaluations de la fonction d'adaptation pour ce type de méthode peut être considérable. Dans un contexte de ressources (temps de calcul et/ou mémoire) limitées, l'optimalité de la solution ne sera pas garantie, ni même l'écart avec la valeur optimale.

Les méthodes dites méta-heuristiques constituent une partie importante de ces méthodes. Une méthode méta-heuristique est définie de manière similaire à d'une méthode heuristique, mais avec un niveau d'abstraction plus élevé. C'est à dire que les méta-heuristiques sont une forme d'algorithme d'optimisation stochastique, hybridé avec une recherche locale. Les méta-heuristiques concernent les algorithmes évolutionnaires tels que les algorithmes génétiques. Les méthodes glouton, tabou, du recuit simulé, des essais particuliers et de type algorithme génétique sont les méthodes d'optimisation globales les plus connues.

IV. 4 Quelques méthodes d'optimisation heuristiques

IV.4.1 Recuit simulé [1-24-47]

Le recuit simulé trouve ses origines dans la thermodynamique. Cette méthode est issue d'une analogie entre le phénomène physique de refroidissement lent d'un corps en fusion, qui le conduit à un état solide, de basse énergie. Il faut abaisser lentement la température, en marquant des paliers suffisamment longs pour que le corps atteigne l'"équilibre thermodynamique" à chaque palier de température. Pour les matériaux, cette basse énergie se manifeste par l'obtention d'une structure régulière, comme dans les cristaux et l'acier.

L'analogie exploitée par le recuit simulé consiste à considérer une fonction f à minimiser comme fonction d'énergie, et une solution x peut être considérée comme un état donné de la matière dont $f(x)$ est l'énergie. Le recuit simulé exploite généralement le critère défini par l'algorithme de **Metropolis** pour l'acceptation d'une solution obtenue par perturbation de la solution courante.

IV.4.2 Recherche Tabou [2-45-47]

La recherche taboue **RT** est un métaheuristique originalement développée par **Glover** et indépendamment par **Hansen**. Elle est basée sur des idées simples, mais elle est néanmoins très efficace. Cette méthode combine une procédure de recherche locale avec un certain nombre de règles et de mécanismes permettant à celle-ci de surmonter l'obstacle des optima locaux, tout en évitant de cycliser.

Dans une première phase, la méthode de recherche Tabou peut être vue comme une généralisation des méthodes d'amélioration locales. En effet, en partant d'une solution quelconque x appartenant à l'ensemble de solutions X , on se déplace vers une solution $s(x)$ située dans le voisinage $[S(x)]$ de x . Donc l'algorithme explore itérativement l'espace de solutions X .

Afin de choisir le meilleur voisin $s(x)$ dans $S(x)$, l'algorithme évalue la fonction objectif f en chaque point $s(x)$, et retient le voisin qui améliore la valeur de la fonction objectif, ou au pire celui qui la dégrade le moins.

IV.4.3 Algorithme génétique [49-50]

Un algorithme génétique est une méthode méta-heuristique qui simule des évolutions biologiques, en parcourant l'espace des paramètres. Le changement des paramètres de conception suit un processus d'évolution basé les règles de la génétique qui modifient les chromosomes. Dans un problème d'optimisation, les variables définissent chacune un gène du chromosome. Ces chromosomes évoluent grâce à différentes opérations (reproduction, croisement, mutation) et calquées sur les lois de la génétique vers un chromosome optimal.

Premièrement cet algorithme génère aléatoirement une population initiale (comme solution possible). Il opère, ensuite à un croisement des meilleurs chromosomes (les meilleurs sont choisis par une fonction d'évaluation propre au problème à résoudre). Ce croisement consiste en l'échange d'un certain nombre de bits (gène) entre les deux parents. Les meilleurs seront croisés, à leur tour, pour obtenir encore une meilleure génération.

L'algorithme crée des mutations (change la valeur de quelques bits aléatoirement) pour bien imiter le processus naturel. Selon la théorie évolutionniste, la nouvelle génération sera globalement plus adaptée au problème que précédente. On répète ces étapes jusqu'à ce qu'un enfant soit estimé proche de la solution recherchée.

IV.4.4 Colonie de fourmis[1-2-24]

Les colonies de fourmis se situent au carrefour de nombreuses disciplines de la méta-heuristique. Les algorithmes de fourmi ont été proposés par Dorigo dans les années 90 en tant qu'approche multi-agent pour résoudre des problèmes combinatoires comme PVC (TSP en anglais).

Cette technique s'inspire de la manière qu'ont les fourmis, malgré leurs limitations importantes, d'avoir un comportement de groupe cohérent. Les fourmis déposent un chemin d'une manière stochastique dépendante de ces phéromones. Elles prennent donc plus facilement un chemin qui a plus de phéromones qu'un autre.

Les fourmis artificielles sont des entités qui construisent une solution en choisissant la prochaine étape de la solution par une fonction du taux de phéromone, et en déposant des phéromones sur leurs points de passage. Cette phéromone va aller en s'évaporant, au bout d'un certain nombre de cycles sans ajout, elle peut être annulée.

Ces fourmis possèdent, en règle générale, une mémoire des états récents ou elles se sont trouvées qui leur permet de ne pas faire de retour et de donner la solution qu'elles ont trouvée. Pour définir un problème et le comportement des fourmis sur ce problème, il faut un graphe sur lequel les fourmis vont pouvoir « circuler » des points de départ, des conditions de terminaison, des règles de construction du chemin et de mise à jour du taux de phéromone par évaporation. Ce taux d'évaporation va servir à privilégier les chemins les plus courts.

Le temps mis par une fourmi pour passer d'un point A à un point B laisse le temps à la phéromone de s'évaporer. Le but de cette technique est donc qu'au bout d'un certain nombre de tours, la majorité des fourmis empruntent le même chemin, la solution.

IV.4.5 Algorithme d'HarmonySearch[51-52-53]

Récemment le Dr ZongWooGeem a développé une nouvelle méthode d'optimisation méta-heuristique issue de l'étude de musicien, appelé "algorithme de recherche d'harmonie" (HS :HarmonySearch en anglais). L'algorithme HS imite processus d'improvisation musicale où les musiciens tentent de trouver une meilleure harmonie. Un musicien désire toujours d'atteindre la meilleure harmonie, qui peut être obtenue par de nombreuses pratiques. Les emplacements des instruments sont ajustés après chaque pratique.

Dans le processus, chaque musicien joue une note pour trouver une meilleure harmonie tous 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.

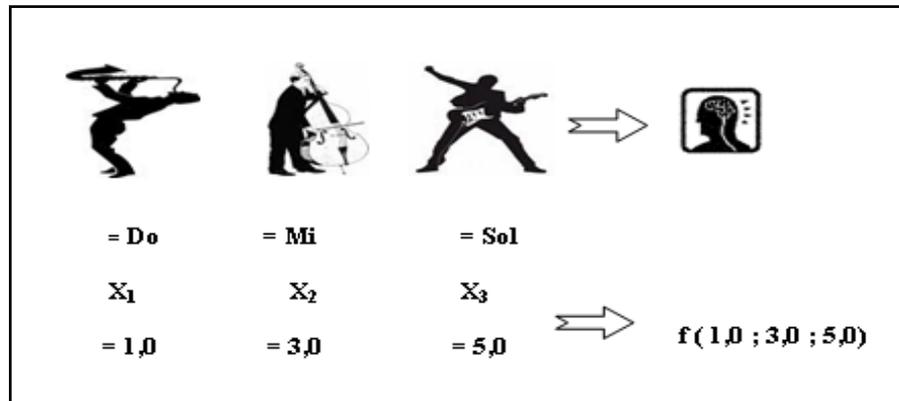


Figure IV. 5 : Principe de l'harmonysearch et analogie en optimisation

Prenons un exemple d'un trio de jazz composé d'un saxophone, contrebasse et guitare. Supposons qu'il existe un certain nombre de notes préférables dans la mémoire de chacun des musiciens : le saxophoniste (Do, Mi, Sol), le contrebassiste (Ti, Sol, Re) et guitariste (La, Fa, Do). Si le saxophoniste joue la note Sol, le contrebassiste joue Ti, et le guitariste joue Do, ensemble leurs notes produit une nouvelle harmonie (Sol, Ti, Do). Si cette nouvelle harmonie est meilleure que la mauvaise harmonie dans leurs mémoires, la nouvelle harmonie est incluse dans leurs mémoires et la mauvaise harmonie est exclue. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'une harmonie sensationnelle soit trouvée. De même dans les techniques d'optimisation, chaque variable de décision choisit au commencement n'importe quelle valeur dans un intervalle possible, faisant l'ensemble d'un vecteur de solution. Si toutes les valeurs des variables de décision font une bonne solution, cette expérience est stockée dans la mémoire de chaque variable, et la possibilité pour faire une bonne solution est également augmentée la fois prochaine.

Selon le concept ci- dessus, l'algorithme de HS comprend les cinq étapes suivantes :

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

IV.4.5. 1Description des étapes [54-55-56]

➤ **Initialiser le problème et les paramètres d'algorithme**

D'abord, le problème d'optimisation est spécifié comme suit :

$$\text{Minimise } f(x_i) \quad (\text{IV.5})$$

$$\text{Avec } x_i \in X_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{IV.6})$$

$f(x_i)$: est la fonction objective ;

x_i : est l'ensemble de chaque variable de conception de (x_i) ;

X_i : est l'ensemble des valeurs de la gamme possible pour chaque variable de conception,

$X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k)\}$ pour des variables de décision discrète,

$[x_i(1) < x_i(2) < \dots < x_i(k)]$ ou $L_{X_i} \leq X_i \leq U_{X_i}$ pour les variables continues.

N : le nombre de variable de conception, k : le nombre des valeurs possibles pour les variables discrètes.

Les paramètres d'algorithme HS qui sont exigés pour résoudre les problèmes d'optimisation de l'équation (V.5) sont également spécifiés dans cette étape :

- La capacité de la mémoire d'harmonie HMS (vecteur de solution dans la mémoire) ;
- Considérant la mémoire d'harmonie par le taux HMCR ;
- Ajustant le lancement par le taux PAR ;
- Critère d'arrêt (nombre maximum des recherches) ;

HMCR et PAR sont des paramètres qui sont employés pour améliorer le vecteur de solution. Tous les deux sont définis dans l'étape 3.

➤ **Initialiser la mémoire d'harmonie [56-57]**

Dans l'étape 2, la matrice (HM) de la mémoire d'harmonie, montrée dans l'équation (7), est remplie aléatoirement par des vecteurs de solution et assortie par les valeurs de la fonction objective $f(x)$.

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} f(x^1) \\ f(x^2) \\ \dots \\ f(x^{HMS-1}) \\ f(x^{HMS}) \end{matrix} \quad (\text{IV.7})$$

➤ **Improvisation d'une nouvelle harmonie** [58-59]

Dans l'étape (3), un nouveau vecteur d'harmonie $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$, est produit et basé sur trois règles :

- Considération de mémoire ;
- Ajustement de première variable de décision (x'_1) pour le nouveau vecteur est choisie de n'importe quelle valeur dans la gamme spécifique de HM ($x'_1 \sim x_1^{HMS}$). Des autres variables de décision (x'_1, \dots, x'_N) sont choisies de la même manière. lancement,
- Choix aléatoire.

Production d'une nouvelle harmonie qui s'appelle « l'improvisation ».

Dans la considération de mémoire, la valeur de la Le HMCR, qui varie entre 0 et 1, est le taux de choisir une valeur des valeurs historiques stockées dans HM., alors que (1-HMCR) est le taux de choisir aléatoirement une valeur à partir de la gamme possible des valeurs.

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} x'_i \in \{x_i^1; x_i^2; \dots; x_i^{HMS}\} w.p.HMCR \\ x'_i \in X_i \dots \dots \dots w.p.(1 - HMCR). \end{cases} \quad (IV.8)$$

Dans le nouveau vecteur d'harmonie $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$, n'importe quel composant obtenu par la considération de mémoire est examiné pour déterminer s'il devrait être ajusté pour le lancer. Cette opération emploie le paramètre de PAR qui est le taux d'ajustement de lancement.

$$\text{Taux d'ajustement pour } x'_i \leftarrow \begin{cases} \text{oui} \rightarrow PAR \\ \text{Non} \rightarrow (1 - PAR) \end{cases} \quad (IV.9)$$

Le lancement ajustant le processus est exécuté seulement après qu'une valeur soit choisie de HM. La valeur (1-PAR) place le taux de rien faire. Si la décision d'ajustement de lancement pour x'_i est oui, et on assume que x'_i est $x_i(K)$, c-à-d, l'élément de K^{eme} dans X_i , la valeur est lancée à partir du $x_i(K)$:

$$x'_i \leftarrow x_i(K + m) \text{ pour des variables de décision discrète}$$

$$x'_i \leftarrow x'_i + \alpha \text{ avec } \alpha = bw \times u(0,1) \quad \text{pour des variables de décision continues}$$

m : Index voisin, $m \in \{0,1,2, \dots\}$;

bw : Largeur de bande arbitraire de distance pour la variable continue ;

$u(0,1)$: Distribution uniforme entre 0 et 1 ;

Les paramètres d'algorithme HMCR et PAR présentés dans cette étape aident à constater que les solutions globalement et localement sont améliorées.

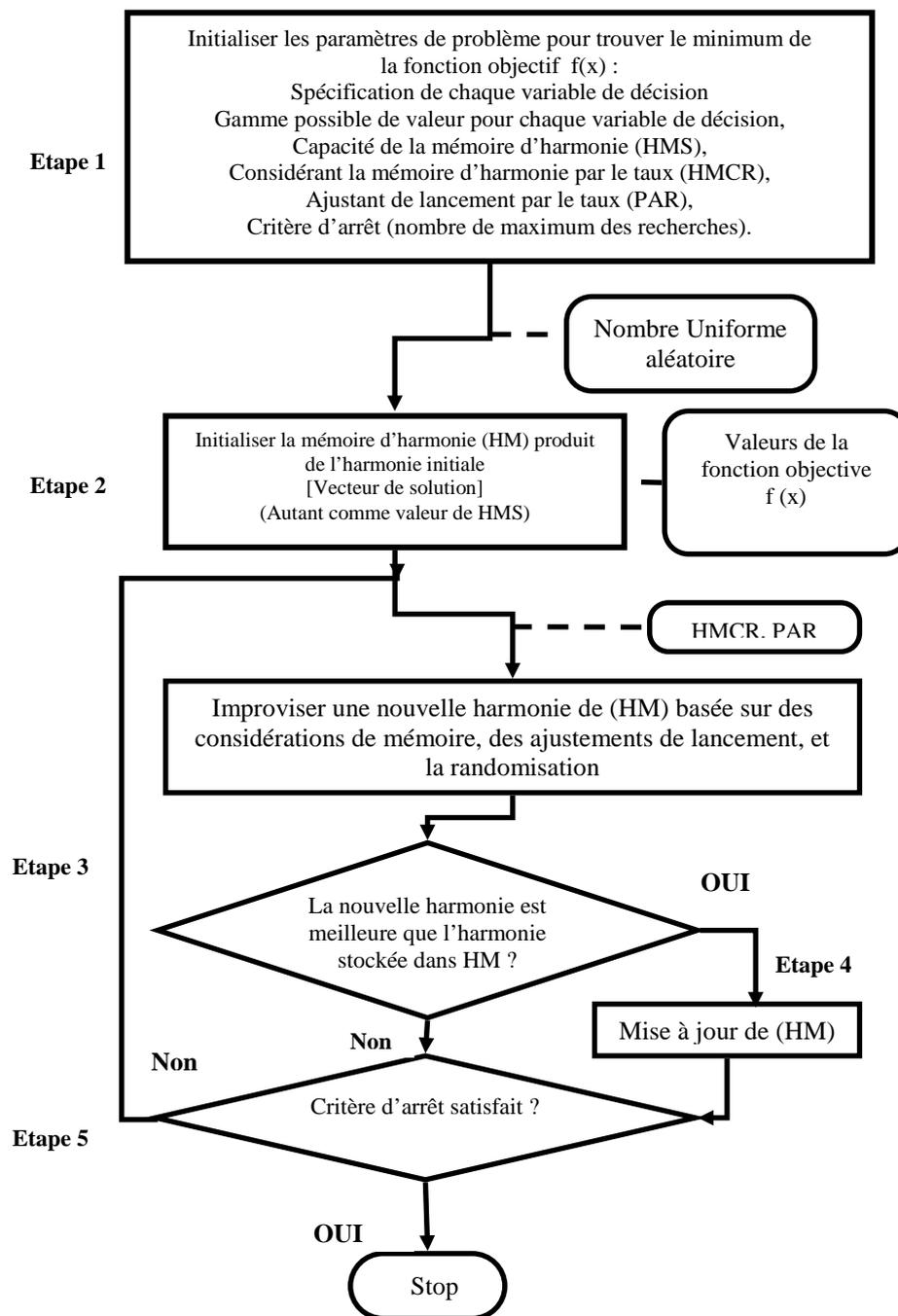
➤ **Mise à jour de mémoire d'harmonie** [60-61]

Si le nouveau vecteur d'harmonie $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$ est meilleur que le plus mauvais vecteur d'harmonie dans le H.M, en termes de valeur de fonction objective, la nouvelle harmonie est incluse dans HM et la plus mauvaise harmonie existante est exclue de HM.

➤ **Vérification de critère d'arrêt** [62-63]

Les calculs sont terminés quand le critère d'arrêt est satisfaisant. Sinon, les étapes 3 et 4 sont répétées.

IV.4.5.2 L'organigramme des étapes de l'harmonySearch :



IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait un aperçu sur les problèmes d'optimisation et leur résolution par les méthodes d'optimisation, nous avons cité quelques méthodes méta-heuristiques. Pour notre travail, nous avons opté pour une nouvelle méthode méta-heuristique pour la recherche d'une conception optimale de réseaux électriques. Cette méthode est appelée « HarmonySearch ».

CHAPITRE V

APPLICATION ET INTERPRETATION

CHAPITRE V

APPLICATION ET INTERPRETATION

L'objectif de notre travail est de déterminer **la structure optimale** d'un réseau suivant le critère désiré et de faire une optimisation du réseau électrique en utilisant une fonction objectif pour le choix minimal des composants en utilisant la méthode d'optimisation « HarmonySearch » afin de faire une conception nouvelle d'un réseau électrique.

La fonction objective considérée est :

➤ *la minimisation du coût du système sous contraintes de fiabilité*

V. Système parallèle -série

V.1 Approche mathématique du système

Considérons un système parallèle-série contenant n sous-système C_i dans un arrangement série comme est illustré dans la figure (V.1). Chaque sous-système C_i contient un certain nombre d'éléments ou composants connectés en parallèle. Pour chaque sous-système i , il existe différentes versions 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 leur coût (C_{iv}), fiabilité (R_{iv}), et leur performance (G_{iv}) accordés à leur version.

La structure du système d'éléments i peut être défini 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 défini par les vecteurs K_i , $k_i = \{k_{iv}\}$ avec $1 \leq i \leq n$ et $1 \leq v \leq v_i$.

Pour un ensemble de vecteurs $\{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ le coût total du système est donné par l'expression suivante :

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{v_i} k_{iv} C_{iv} \quad (\text{V.1})$$

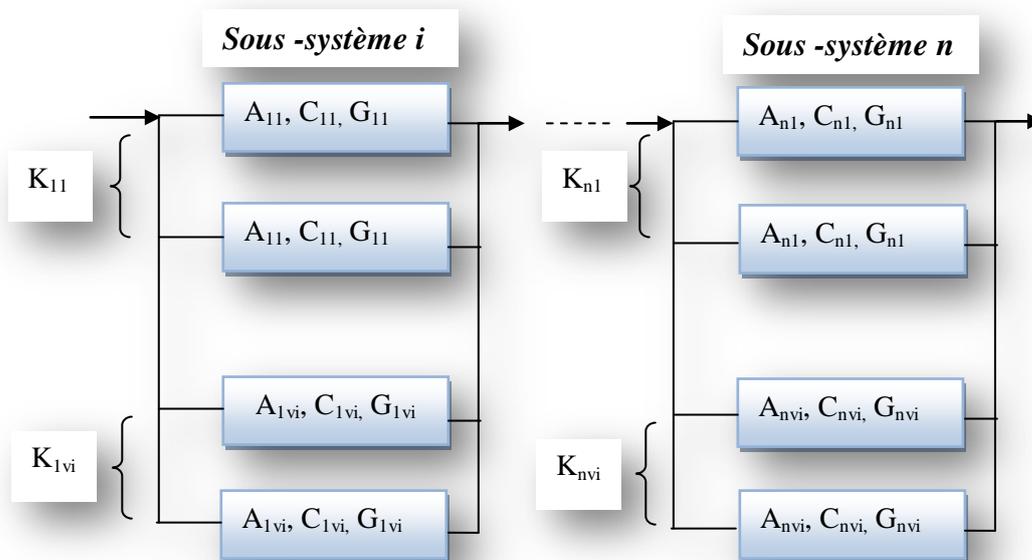


Figure V.1 : système parallèle-série

V.2 Formulation du problème

Le problème d'optimisation d'un système multi-états redondant peut être formulé comme suite :

Trouver la configuration / ou la structure du système à coût minimal $\{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ qui est à un niveau de fiabilité supérieur ou égal au seuil donné R_0 .

$$\text{Minimiser } C = \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{vi} k_{iv} C_{iv} \quad (\text{V.2})$$

$$\text{sous contraintes } \prod_{i=1}^n [\prod_{j=1}^J p, q(Z) \min_{i=1}^n \sum_{j=1}^J G_{ij}] \geq R_0 \quad (\text{V.3})$$

V.3 Description du système à optimiser

Dans cet exemple, nous appliquons la méthode d'optimisation du système électrique couplée à la charge pour déterminer une structure optimale au point de vue coût d'investissement, tout en satisfaisant le niveau de fiabilité prescrite. La structure du système électrique est un réseau électrique (production transport et répartition), fait intervenir cinq (05) grands sous-systèmes.

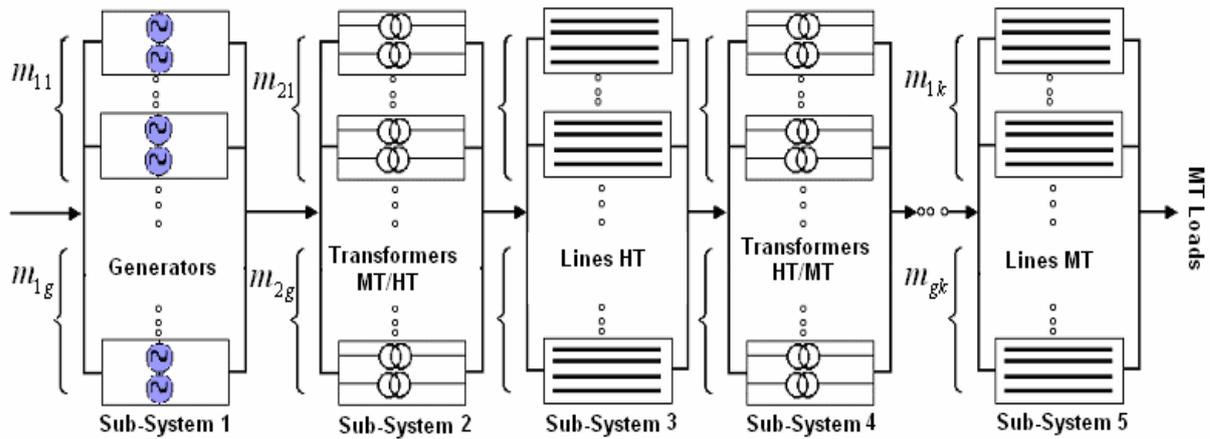


Figure V.2 : exemple réel d'un système parallèle-série

Chaque composant du sous-système est caractérisé par les paramètres suivants :

G_i : représente la performance ou bien la capacité en MW ;

p_i : représente la fiabilité de l'élément considéré en % ;

C_i : représente le coût en % de l'investissement du chaque élément.

Les tableaux suivants donnent les caractéristiques des composants disponibles sur le marché utilisées dans la construction du réseau électrique.

V.3.1 Sous-système 01 (Production)

Ce sous- système représente le sous-système de production d'énergie électrique. Il comprend 07 générateurs.

<i>Sous système (production)</i>	<i>Version</i>	<i>Capacité (%)</i>	<i>Fiabilité (%)</i>	<i>Coût (%)</i>
	01	120	0.890	0.590
	02	100	0.977	0.535
	03	85	0.982	0.470
	04	85	0.978	0.420
	05	48	0.983	0.400
	06	31	0.920	0.180
	07	20	0.984	0.220

Tableau V.1 : Caractérisation de sous-système de production

V.3.2 Sous-système 02(transformateurs éleveurs)

Ce sous- système représente le sous-système de transformation d'énergie. Il comporte 05 transformateurs éleveurs de tension MT/HT.

<i>Sous système (postes éleveurs)</i>	<i>Version</i>	<i>Capacité (%)</i>	<i>Fiabilité (%)</i>	<i>Coût (%)</i>
	01	100	0.995	0.205
	02	92	0.996	0.189
	03	53	0.997	0.091
	04	28	0.997	0.056
	05	21	0.998	0.042

Tableau V.2 : Caractérisation de sous-système « transformateur éleveurs (MT/HT) »

V.3. 3 Sous-système 03(lignes de transport HT)

Ce sous- système représente les lignes de transport HT qui comporte 04 lignes HT.

<i>Sous système (lignes de transport HT)</i>	<i>Version</i>	<i>Capacité (%)</i>	<i>Fiabilité (%)</i>	<i>Coût (%)</i>
	01	100	0.971	7.525
	02	60	0.973	4.720
	03	40	0.971	3.590
	04	20	0.976	2.420

Tableau V.3 : Caractérisation de sous-système «Lignes de transport HT »

V.3. 4 Sous-système 04(transformateurs abaisseurs HT/MT)

Ce sous- système représente le sous-système de transformation d'énergie. Il comporte 09 transformateurs abaisseurs de tension HT/MT.

<i>Sous système (postes abaisseurs)</i>	<i>Version</i>	<i>Capacité (%)</i>	<i>Fiabilité (%)</i>	<i>Coût (%)</i>
	01	115	0.977	0.180
	02	100	0.978	0.160
	03	91	0.978	0.150
	04	72	0.983	0.121
	05	72	0.981	0.102
	06	72	0.971	0.096
	07	55	0.983	0.071
	08	25	0.982	0.049
	09	25	0.977	0.044

Tableau V.4 : Caractérisation de sous-système «Transformateurs abaisseurs HT/MT »

V.3. 5 Sous-système 05(lignes de répartition MT)

Ce sous- système représente les lignes de répartition MT qui comporte 04 lignes MT.

<i>Sous système (lignes de transport HT)</i>	<i>Version</i>	<i>Capacité (%)</i>	<i>Fiabilité (%)</i>	<i>Coût (%)</i>
	01	128	0.984	0.986
	02	100	0.983	0.825
	03	60	0.987	0.490
	04	51	0.981	0.475

Tableau V.5: Caractérisation de sous-système «Lignes de répartition MT »

➤ *La demande (la charge)*

La demande des consommateurs est estimée à une puissance maximale de 90 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 charge d'une valeur maximale de 90MW vers une valeur minimale de 18MW. Les paramètres de la demande est illustré dans le tableau suivant :

<i>La demande (%)</i>	<i>100</i>	<i>80</i>	<i>50</i>	<i>20</i>
<i>Duration(h)</i>	<i>4203</i>	<i>788</i>	<i>1228</i>	<i>2536</i>
<i>Probabilité</i>	<i>0.480</i>	<i>0.090</i>	<i>0.140</i>	<i>0.290</i>

Tableau V.6 les caractéristiques de la demande

V.4 Résultat obtenues par l'algorithme HarmonySearch

Nous avons fait une application de l'algorithme d'HarmonySearch pour optimiser la structure du système électro-énergétique (figure V.1).

Nous avons testé notre programme pour trois niveau de fiabilité 0.92, 0.95, 0.98, nous avons choisi ces niveaux sur la base des causes et des indices pratiques, le tableau qui suivre indique les résultats obtenus par une hybridation entre la méthode UMGF et l'algorithme HarmonySearch.

Les paramètres de l'algorithme HarmonySearch ont été ajustés comme suit dans notre programme :

HMS = 5

HMCR= 0.7

PAR= 0.5

NI=75

Les données dans notre systèmes sont rassemblées dans les tableaux(V.1) jusqu'à (V.5), ainsi que les données de la charge sont présentées dans le tableau (V.6).

Après l'exécution de notre programme en obtient les résultats suivants :

Test N° 1

Contraintes de fiabilité R_0	La structure optimale	Le coût d'investissement (%) Min DA	Fiabilité calculé R (%)
0.92	Sous-système 1 : 1-2 Sous-système 2 : 2-3-3 Sous-système 3 : 2-3-3 Sous-système 4 : 5-6-7 Sous-système 5 : 3-3-3	10.98	0.9501

Tableau V. 7 : la conception optimale du système pour $R_0 = 0.92$

Test N° 2

Contraintes de fiabilité R_0	La structure optimale	Le coût d'investissement (%) Min DA	Fiabilité calculé R (%)
0.95	Sous-système 1 : 1 -2-2 Sous-système 2 : 1-2-3 Sous-système 3 : 2-2 Sous-système 4 : 4-4-7-7 Sous-système 5 : 3-3-3	13.43	0.9708

Tableau V. 8 : la conception optimale du système pour $R_0 = 0.95$

Test N°3

Contraintes de fiabilité R_0	La structure optimale	Le coût d'investissement (%) Min DA	Fiabilité calculé R (%)
0.98	Sous-système 1 : 3-4-4-6 Sous-système 2 : 2-3-3 Sous-système 3 : 2-2-2 Sous-système 4 : 6-6-6-8-9 Sous-système 5 : 3-3-3	17.872	0.99835

Tableau V. 9 : la conception optimale du système pour $R_0 = 0.98$

V.5 Interprétations des résultats d'optimisation par L'algorithme HS

Dans notre travail, nous appliquons la méthode d'optimisation HarmonySearch sur un système électro-énergétique qui comporte 05 sous système couplée avec une charge, pour déterminée avec un coût d'investissement minimum une configuration du système qui satisfaire la fiabilité désirée.

Dans le premier test en ajustée le contrainte la fiabilité à la valeur 0.92 donc en obtient la conception optimale suivante :

<i>Sous-système 01</i>	<i>Sous-système 02</i>	<i>Sous-système 03</i>	<i>Sous-système 04</i>	<i>Sous-système 05</i>
1*180 MW 1*160 MW	1*120 MW 2*100 MW	1*225 MW 2*60 MW	2*30 MW 1*20 MW	3*14 MW

Dans le deuxième test en ajustée le contrainte la fiabilité à la valeur 0.95 donc en obtient la conception optimale suivante :

<i>Sous-système 01</i>	<i>Sous-système 02</i>	<i>Sous-système 03</i>	<i>Sous-système 04</i>	<i>Sous-système 05</i>
1*180 MW 2*160 MW	1*160 MW 1*120 MW 1*100 MW	2*225 MW	2*30 MW 2*20 MW	3*14 MW

Dans le troisième test en ajustée le contrainte la fiabilité à la valeur 0.98 donc en obtient la conception optimale suivante :

<i>Sous-système 01</i>	<i>Sous-système 02</i>	<i>Sous-système 03</i>	<i>Sous-système 04</i>	<i>Sous-système 05</i>
1*110 MW 2* 90 MW 1* 54 MW	1*120 MW 2*100 MW	3*225 MW	3*30 MW 2*1 0,4 MW	3*14 MW

Les tableaux (V.7, V.8, et V.9), récapitule les résultats donnés par notre programme pour un problème de référence.

On constate pour un niveau de fiabilité important le choix de la structure devinent important concernant le coût. Alors ces valeurs sont :

92% —————> 10,98%

95% —————> 13,43%

98% —————> 17,832

Alors l'investisseur le choix qu'il répond à une structure plus fiable, elle se répercute par une structure trop chère (point de vue investissement) et vice versa une structure moins chère oblige la perte du niveau de fiabilité non important.

Donc nous avons proposé dans notre travail, des structures avec différents niveaux de fiabilité qui donnent à l'investisseur du choix et lui facilitent la prise en décision concernant tel ou tel investissement.

Selon la stratégie adoptée nous permettent de valider notre configuration la plus optimale selon le cas :

La formulation de minimiser le coût sous contraintes de fiabilité, donne aux investisseurs la possibilité de limiter les coûts investissements d'un projet d'alimentation.

CONCLUSION
GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Habituellement, les ingénieurs essayent de réaliser un niveau optimal avec un coût minimal. Le problème de la minimisation du coût avec des contraintes de fiabilité est bien connu comme problème d'optimisation de redondances RPT (Problème combinatoire d'allocation de redondances).

Pour résoudre les problèmes pratiques dans lesquels une variété de produits existe sur le marché et les dépendances analytiques sont indisponibles pour le coût de composants du système, l'ingénieur de fiabilité devrait avoir une méthodologie d'optimisation dans laquelle chaque produit est caractérisé par sa productivité (capacité), fiabilité, prix et /ou d'autres paramètres. Pour distinguer parmi des produits avec différentes caractéristiques, la notion de la version d'élément ou composant est présentée.

Pour trouver la structure optimale du système, on devrait choisir les versions appropriées d'une liste de produits disponibles pour chaque type d'équipement, aussi bien que le nombre d'éléments parallèles de ces versions. L'objectif est réduire au minimum le coût avec la condition de satisfaire la demande avec le niveau désiré de la fiabilité. Lors le système est caractérisé par une disponibilité multi états, une nouvelle méthode UMGF (Universal Generating Moment Function) d'évaluation de la fiabilité offre plusieurs avantages par rapport à la méthode classique.

La formulation la plus générale de la structure d'un système électrique de nature parallèle-série est comme suit :

- Une décomposition hiérarchique en cinq sous-systèmes.
- Chaque sous-système contient un certain nombre des composants différents reliés en parallèles. Différents versions et nombres des composantes peuvent être choisis pour n'importe quel sous-système. Chaque composant est caractérisé par son taux disponibilité, capacité et son coût.

Le problème d'optimisation des systèmes parallèle-série a été largement étudié en utilisant des méthodes traditionnelles telle que la programmation dynamique et récemment les algorithmes génétiques et les algorithmes de fourmis. Peu de travaux ont utilisé l'algorithme HarmonySearch.

Dans ce mémoire, nous avons présenté une problématique relative aux buts des investisseurs qui résident dans le choix d'avoir une conception à moindre coût de point de vue production et structure tout en garantissant un niveau de fiabilité acceptable.

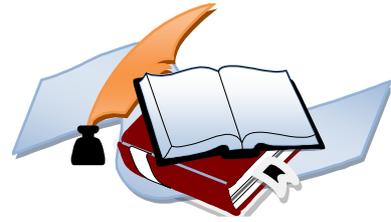
Nous avons développé, dans ce mémoire une programme sous langage Matlab basé sur la méthode méta-heuristique « HarmonySearch » qui optimise la structure du système électro-énergétique sous contraintes de fiabilité.

Les résultats dans ce mémoire nous ont conduit à proposer des structures avec différents niveaux de fiabilité ($R_{01}=0.92$, $R_{02}=0.95$, $R_{03}=0.98$) qui donnent à l'investisseur le choix et lui facilitent la prise en décision concernant tel investissement.

Alors l'investisseur a le choix qu'il répond à une structure plus fiable, il se répercute par une structure trop chère (point de vue investissement) et vice versa une structure moins cher oblige la perte du niveau de fiabilité.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE



- [1] **A. Rami**, « *Conception et optimisation d'un système électro-énergétique par les méthodes méta heuristiques* », thèse de doctorat en science, université Djilali Liabesde sidi bel abbés 2010
- [2] **S. Bouri**, « *Optimisation de la production et la structure d'énergie électrique par les colonies de fourmis* », thèse de doctorat en science, Université sidi bel abbés 2007-2008
- [3] **Richard E. Brown**, « *Electric Power distribution reliability* », second Edition, 2009, Taylor & Francis Group, LLC, P.18
- [4] **M. Fontela Garci**, « *Interaction des réseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisé* », thèse de doctorat, l'institut polytechnique de Grenoble 2008
- [5] **M. Haikelkhalfallah**, « *Etude quantitative et expérimentale de mécanismes d'incitation aux investissements dans les marchés d'électricité : Analyse à court terme et à long terme des stratégies des acteurs* », thèse de doctorat en science économique, Université Lumière Lyon 2 Décembre 2009
- [6] **M. Saguan**, « *Architectures de marché électrique. Application au market design dur temps réel* », thèse de doctorat en science économique, Université paris- sud 11- Avril 2007
- [7] **J.Pierlot**, « *électricité, de la production à la distribution* », organisation européenne pour la recherche nucléaire, France 15 janvier 2002
- [8] [http://fr.wikipedia.org/wiki/poste électrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/poste_électrique)
- [9] [http://fr.wikipedia.org/wiki/lignes électriques](http://fr.wikipedia.org/wiki/lignes_électriques)
- [10] <http://www.scrib.com/doc/4597291/Generalites-sur-les-reseaux-electriques>
- [11] **J. Lilien**, cours donné à l'institut d'énergie Montefiore, « *transport et distribution de l'énergie électrique* », Université de Liège 2009
- [12] **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 dérégulé* », thèse de doctorat en science, Université de Batna 2008-2009
- [13] **S.Belaloui**, « *Evaluation de systèmes de fiabilité à configuration complexe* », thèse de doctorat d'état mathématique, Université Mentouri-Constatine
- [14] **B. Jacques**. « *Fiabilité du réseau électrique* ». In cahier/ groupe réseaux n°9,1987.33-42

- [15] **A. Pagés & M. Gondran**, « *Fiabilité des systèmes* », Edition EYROLLES 1980
- [16] cour « *fiabilité des systèmes* »
- [17] **A. Mihalache**, « *Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques* », thèse de doctorat en sciences d'ingénieur, Université D'Angers 2007
- [18] **Y. Berrou**, « *Evaluation de la fiabilité des systèmes temps réel distribués embarqués* », Mémoire de Magister, Université hadj Lakhedar Batna
- [19] <http://fr.Fiabilité.Mathématique.free>
- [20] **A. Zeblah**, « *réalisation d'un logiciel pour la reconstruction d'un réseau électrique fiable et sa reconfiguration optimale* », thèse de doctorat d'état, université des sciences et de la technologie d'Oran, 2000/2001
- [21] **I. Mauricio Forero**, « *Electricité et sécurité de fourniture de long terme. La problématique de l'évaluation de l'adéquation de capacité en environnement concurrentiel* », mémoire de master recherche, Ecole du pétrole et des moteurs 2006-2007
- [22] **P. Lamy**, « *Probabilité de défaillance dangereuse d'un système : explication et exemple de calcul* », Note scientifique et technique n° 225, septembre 2002
- [23] **E.U. Landeck, H.J. Haubrich, B. Siemes, W.L. Kling** « *Evaluation de la fiabilité des transits d'énergie dans les réseaux interconnectés* », CIGRE 1996 :38-108
- [24] **R. Meziane**, « *optimisation de la structure d'un réseau de production* », Université des sciences et de la technologie d'Oran 'MOHAMED BOUDIAF'
- [25] **J. Fernando Parada**, « *The value of reliability in power- Pricing operating reserves* », Massachusetts institute of technology, June 1999.
- [26] **BILLINTO R**, « *Power system reliability evaluation engineering systems-concepts and techniques* », plemuim press, new york, 1986.
- [27] **BILLINTO R. and allan R .N**, « *power system reliability evaluation engineering systemes-conceptes and techniques* », plemuim press, new york, 1994
- [28] **HIESTE. and KIRBEY B**, « *services: the neglected features of bulk* », electricity journal, vol11, No3, Elsevier science, pp50-57, 1998.
- [29] **HIEST E. and KIRBEY B**, « *technical and market issue for operating reserve* », electricity journal, vol11, No3, Elsevier science, pp36-48, 1999.
- [30] **KIRSH L. and RAJARAMAN R.** « *profiting from operating reserves* », electricity journal, vol11, No2, Elsevier science, pp40-49, 1998.
- [31] **Lisnianski A. Levitin G. ben-haim H. elmakis D** « *power system structure optimization subject to reliability constraints* », electric power system research, vol39 pp145-152, 1996.

- [32] Lisnianski A, Levitin G, Elmakis D « *structure optimization of power system with defferent redundant elements* », electric power system research, vol43 pp19-27, 1997.
- [33] Sahinoglu M, Longnecker M.T, Ringer L.J, Singh C, Andayoub K.H « *probability distribution functions for generation reliability indices* », IEEE trans. on power apparatus and system, pas-102, pp1486-1493, 1983.
- [34] Allan R.N, and D.GOMEZ, « *operational parameters in generation reliability evaluation* », power system computation conf, pschelseinkipp, 174-178, 1984.
- [35] Billinton R, « *power system reliability evaluation* », Gordon and science breach science publisher new york, 1770.
- [36] Lisnianski, Anatoly, Frenkel, Ilia, Ding, Yi, « *Multi-State system reliability analysis and optimization for engineers and industrial Managers* », Edition, 2010, XVI, 393p114, springerlink
- [37] k. Mendez, N. skonni, « *Optimisation de la structure des réseaux de répartition en utilisant les algorithmes de fourmis* », mémoire d'ingénieur, Université Djilali Liabess, Sidi bel Abbes, 2006
- [38] Y. Massim, « *Aviability and performance optimization of série-parallèle industrial process* », thèse d'octorat, Université Djilali Liabess, Sidibel Abbes, 2005
- [39] Y. Massim, A. Zeblah, R. Meziane and M. Rahli « *Ant colony optimization for multi-states série-parallèle système expansion sheduling* », electrical engineering journal, springer verlags 2005
- [40] R. Meziane, Y. Massim, A. Zeblah, A. Ghoraf and M. Rahli, « *Reliability computation for algerian power network considering MSS* », international journal of nonlinear dynamics and chaos in engineering system, Kluwer Academic publisher vol 40 number 4 June 2005 pp 309-321
- [41] A. Zeblah, A. Ghoraf, S. Hadjeri and H. Hamdaoui, « *optimization for série-parallèle continuous power systems with buffers under reliability constraints using Ant colony* » accepted paper in International journal of industrial and management optimization (JIMO), vol N° 2, number 4 pp 467-479, 2006
- [42] Y. Massim, A. Zeblah, A. Ghoraf and R. Meziane, « *Reliability evaluation of multi-states serie-parallele power system under multi-states constraints* », Electrical engineering journal, springer verlags, vol N°87, pp327-336, 2005
- [43] A. Zeblah, E. Chatelet, M. Elsamrout, F. Yalaoui, Y. Massim, « *Série-parallèle power system optimization using a harmony search algorithm* », Journal power and energy conversion vol1 N°1, 2009
- [44] Y. Massim, A. Zeblah, M. Benguediad, A. Ghouraf, « *Reliability evaluation of electrical power systems including multi-state considerations* », Journal electrical engineering (2006).88: 109-116
- [45] A. Assadi Haghi, « *contribution au développement de méthodes d'optimisation structurelles pour la conception assistée par ordinateur de composants et de circuits hyperfréquences* », thèse de doctorat, Université de LIMOGES, 27 mars 2007

- [46] **L.AbdelhakemKoridak**, « *Etude d'un dispatching économique par l'algorithme génétique* », Mémoire de Magister, Université des sciences et de technologie d'Oran,
- [47] **L.AbdelhakemKoridak**, « *contribution à l'étude des coûts optimaux de la production d'énergie électrique et des émissions de gaz par les algorithmes génétiques* », thèse de doctorat en science, Université des sciences et de technologie d'Oran, 2010
- [48]**L.AbdelhakemKoridak, M.Rahli et R.Ouidir**, « *application des algorithmes génétiques à la répartition optimale des puissances dans un réseau d'énergie électrique* », 4^{ème} Conférence Internationale sur les Mathématique Appliquées et les Sciences de l'Ingénieur (CIMASI'2002), du 23 au 25 octobre 2002 Casablanca, Maroc.
- [49] **R.Ouidir, M.Rahli, L.AbdelhakemKoridak et M.Tamali**, « *Minimisation du coût de combustible et des pertes de transmission dans un réseau électrique par les algorithmes génétiques* », 6^{ème} Séminaire Internationale sur la Physique Energétique du (SIPE'6), du 21 au 23 Octobre 2002 Béchar, Algérie.
- [50]**M.Younes, M.Rahli, M.Kandouci**, « *Répartition économique des puissances par un algorithme Génétique en code réel (Application a un réseau 118 nœuds)* », 6^e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation - MOSIM'06 - du 3 au 5 avril 2006 – Rabat- Maroc.
- [51] **L. A-Koridak, M. Rahli, D. Lefebvre, F-Z. Benayed**, « *optimisation d'un dispatching économique et environnemental d'énergie électrique par l'algorithme HarmonySearch* », Évaluation des Performances et Maîtrise des Risques Technologiques pour les Systèmes Industriels et Energétiques' EPMRT'28-29 mai 2009, GREAH, Université du Havre
- [52]**A.Belmadani, L.Benasla, M.Rahli**, « *Etude de Dispatching Economique : Comparaison entre HARMONY SEARCH (HS) et Réseau de Neurones* », 4^{ème} Conférence Internationale sur l'Electrotechnique, Oran le 10-11 novembre 2009
- [53]**Seok Lee and Zong Woo Geem** « *A new structural optimization method based on the harmony search algorithm* », Materials and Construction Research Division, National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, MD208998611, USA, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, College Park, MD20742, USA Received 14 April 2003; accepted 6 January 2004.
- [54]**Zong Woo Geem and Jeong-Yoon Choi** « *Music composition Using Harmony Search Algorithm* », Johns Hopkins University, Environment planning and management Program, 729 Fallsgrave Drive #6133, Rockville, Maryland 20850, USA.
- [55] **Zong Woo Geem, Kang Seok Lee and Yongjin Park** « *Application of Harmony Search to Vehicle Routing* », Environmental Planning and Management Program, Johns Hopkins University 729 Fallsgrave Drive #6133, Rockville, Maryland 20850, USA, Advanced Structure Research Station, Hanyang University, Seoul, South Korea, Department of Transportation Engineering, Keimyung University, Daegu, South Korea.
- [56]**Zong Woo Geem**, « *Optimal cost design of water distribution networks using harmony search* », Environmental Planning and Management Program, Johns Hopkins University, 729 Fallsgrave Drive #6133, Rock ville, MD20850, USA (Received 1 February 2005; in final form 12 April 2005).

- [57] **Zong Woo Geem, Chung-Li Tseng, and Yongjin Park** « *Harmony Search for Generalized Orienteering Problem: Best Touring in China*», Johns Hopkins University, Environmental Planning and Management Program, 729 Falls Grove Drive #6133, Rockville, Maryland 20850, USA; University of Missouri, Department of Engineering Management, 215 Engineering Management, Rolla, Missouri 65409, USA; Keimyung University, Department of Transportation Engineering, 1000 Sindang, Dalseo, Daegu, 704-701, South Korea.
- [58] **A.Vasebia and M.Fesangharyb and S.M.T.Bathae** «*Combined heat and power economic dispatch by harmony search algorithm*», Power System Research Laboratory, Department of Electrical and Electronic Engineering, K.N. Toosi University of Technology, 322-Mirdamad Avenue West, 19697 Tehran, Iran; Department of Mechanical Engineering, Amir kabir University of Technology, 424-Hafez Avenue, Tehran, Iran Received 19 September 2006; received in revised form 30 May 2007; accepted 9 June 2007.
- [59] **Kang Seok Lee and Zong Woo Geem**, « *A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice*», Materials and Construction Research Division, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899-8611, USA; Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA Received 4 August 2003; received in revised form 31 August 2004; accepted 30 September 2004.
- [60] **M.Mahdavi and M.Fesanghary and E.Damangir**, «*An improved harmony search algorithm for solving optimization problems*», Department of Computer Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran; Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran 15875-4413, Iran.
- [61] **Zong Woo Geem**, « *Improved Harmony Search from Ensemble of Music Players*», Johns Hopkins University, Environmental Planning and Management Program, 729 Falls Grove Drive #6133, Rockville, Maryland 20850, USA
- [62] **S. M. T. Bathae, M. Fesanghary, A. Vasebi, M. Hassani Keleshtery**, «*A New Stochastic Algorithm for Various Types of Economic Dispatch Problems: Harmony Search*», The 8th International Power Engineering Conference – IPEC 2007 3-6 December 2007, Singapore.
- [63] **Zong Woo Geem and JoongHoon Kim and G. V. Loganathan**, « *A New Heuristic Optimization Algorithm Harmony Search*», SIMULATION 76:2, 60-68 ©2001, Simulation Councils Inc. ISSN 0037-5497/01 Printed in the United States of America.