

N°d'ordre :

Université de Saida– Dr. Moulay Tahar
Faculté des Sciences

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat 3ème Cycle

Spécialité : Gestion et conversion de l'énergie électrique

Filière : Electrotechnique

Par :

Hamzi Amar

Thème :

Modernisation des systèmes de production classiques et renouvelables



Thèse soutenue le date de soutenance devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	HARTANI Kada	Prof.	Université de Saida – Dr. Moulay Tahar	Président
02	MEZIANE Rachid	Prof.	Université de Saida – Dr. Moulay Tahar	Rapporteur
03	LAKDJA Fatiha	Prof.	Université de Saida – Dr. Moulay Tahar	Examineur
04	BOUMADIENE larbi	Prof.	Université de Saida – Dr. Moulay Tahar	Examineur
05	HAMID Azzedine	Prof.	Centre Universitaire - N.Bachir El Bayadh	Examineur
06	MAHI Djillali	Prof.	Université Laghouat -Amar Telidji	Examineur

Avant propos

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du laboratoire de Génie Electrotechnique (LGE) de département d'Electrotechnique.

Notre remerciement s'adresse en premier lieu à Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Je suis très honoré de remercier monsieur Meziane Rachid Professeur de l'université Saida Dr. Moulay Tahar, pour l'encadrement de ce modeste travail. Je vous remercie profondément pour m'avoir accordé votre temps, votre patience, votre assistance, votre expérience et vos conseils fructueux et pertinents dans toutes les étapes de ce travail. J'ai l'honneur d'exprimer mes très profondes reconnaissances et mes sentiments les plus sincères et mon admiration.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à monsieur Hartani Kada professeur de l'université Saida Dr. Moulay Tahar, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence du jury de cette thèse.

Mes vifs remerciements vont aussi à monsieur Boumadiene Larbi, professeur de l'université Saida Dr. Moulay Tahar, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur de participer à ce jury.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à monsieur Hamid Azzedine professeur Centre Universitaire N. Bachir El Bayadh, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur de participer à ce jury.

Je suis très reconnaissant également à monsieur Mahi Djillali, professeur de l'université Laghouat Amar Telidji, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de siéger dans ce jury.

Je suis également très reconnaissant à Mme Lakdja Fatiha, Professeur de l'université Saida Dr. Moulay Tahar, pour son intérêt pour ce travail en acceptant de siéger à ce jury.

A toutes les personnes (dont le nombre est très élevé pour les citer toutes ici), qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement à ce travail, je les remercie tous, particulièrement ma famille et tous mes amis.

Enfin, je ne pourrais terminer ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants qui sont à l'origine de tout mon savoir.

SOMMAIRE

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

CHAPITRE I

I-1 Introduction :	3
- Avantages du courant continu	3
- L'inconvénient majeur de la liaison en (CC)	4
- Avantages du courant alternatif	4
I.1.1 Fonction des postes électriques.....	4
I.1.2 Schéma d'un réseau électrique.....	5
I.2 Description du réseau électrique	5
I.3 Définition et organisation	5
I.3.1. Les sous-systèmes de transformation.....	7
I.3.2. Les moyens de transport de l'énergie électrique.....	7
I.3.2.1. Le réseau transport et d'interconnexion	7
I.3.2.2. Les réseaux de répartition régionale ou locale.....	7
I.4 Les composantes d'un réseau électrique	8
I.4.1. L'industrie de la production d'énergie électrique	9
I.4.2 Distribution de l'énergie.....	10
I.4.3.1. Réseau radial (simple dérivation)	11
I.4.3.2. Réseau boucle ouverte	11
- Avantage	12
- Inconvénient	12
I.4.3.3. Schéma double dérivation.....	12
- Avantage	12
- Inconvénient.....	13
I.5.1 Les sources d'énergies renouvelables	13
I.5.1.1 La production de chaleur à partir des sources renouvelables	13
- Biomasse - le bois énergie	13
- Les avantages	14
- Les inconvénients	14
- Biogaz - la méthanisation.....	14

Sommaire

- Les avantages :	15
- Les inconvénients	15
- Le solaire thermique	16
- La géothermie	17
I-5-1-2 La production d'électricité par les énergies renouvelables	17
-Les centrales hydrauliques	17
- L'éolien	18
- Les avantages	19
- Les inconvénients :	20
- Le solaire photovoltaïque	21
- Les avantages	22
- Les inconvénients	23
- Aperçu de la technologie	23
- Historique de système photovoltaïque	24
- Applications	25
- Domaine spatial	25
- Habitation isolée	25
- Industrie isolée	25
- Centrale de puissance	26
- Résidence urbaine	26
- Biens de consommation	27
I-5-1-3 Les systèmes à concentration :	27
-Les centrales à tour (Héliosta)	27
-Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques :	29
-Les systèmes parabole-moteurs	32
-Stockage de l'énergie solaire	33
-Système à un seul réservoir	34
-Système à deux réservoirs	34
I.5.1.3. Centrale hybride	35
I.5.2 Les sources d'énergies fossiles	35
- Pétrole, Gaz naturel et charbon	35
- Les inconvénients	36

Sommaire

- L'énergie nucléaire	37
I-6 Conclusion	38

CHAPITRE II

II.1 Introduction :	39
II.2 Qualité de la tension :	39
II.3 Dégradation de la qualité de la tension:	40
II.3.1 Variation ou fluctuation de la fréquence	40
II.3.2 Composante lente des variations de tension	40
II.3.3 Fluctuation de tension (flicker).....	41
II.3.4 Creux de tension	41
II.3.5 Interruption courte ou coupure brève	41
II.3.6 Bosses de tension.....	42
II.3.7 Tension et/ou courant transitoire	42
II.3.8 Déséquilibre de tension	42
II.3.9 Perturbations harmonique et interharmoniques	42
II.4 lignes de transport électrique en régime permanent	43
II.4.1 Généralités sur les réseaux d'énergie électrique	43
II.4.2 Stabilité des réseaux électrique.....	43
II.4.2.1 Limite de stabilité en régime permanent:	44
II.4.2.2 Stabilité dynamique.....	44
II.4.2.3 Stabilité transitoire.....	45
II.4.3 Instabilité de la tension	45
II.4.3.1 Causes de l'instabilité de la tension	45
II.4.3.2 Incidents et réglages	46
II.4.3.3 Caractéristiques et analyse de la stabilité de la tension	46
II.4.3.4 Facteurs d'influence reliée à la stabilité de la tension	47
II.5 Conclusion :	48

CHAPITRE III

III-1 Introduction :	49
III-2 Différentes structures du Système :	49
III-2-1 Système série :	49
III-2-2 Système parallèle :	50

Sommaire

III-2-3 Système série- parallèle :	51
III-2-4 Système parallèle- série :	51
III-3 Notions de base de la fiabilité du système binaire :	52
III-3-1 La fonction de structure du système :	52
III-3-2 Fonction de fiabilité :	53
III-3-3 Fonction de disponibilité :	55
III-3-4 Fonction universelle d'élément (Système) :	57
III-4 Introduction aux systèmes multi états :	61
III-4-1 Concept de base des systèmes Multi états :	61
III-4-2 Performances d'un SME :	62
III-4-3 Fonction d'acceptabilité :	65
III-4-4 Indices de performances des SME et leurs évaluations en utilisant l'UGF	66
III-5 Conclusion :	68

CHAPITRE IV

IV-1- Introduction :	69
IV-2- La sûreté de fonctionnement des systèmes :	69
IV-3 Eléments constitutifs de la sûreté de fonctionnement des systèmes :	70
IV-3-1 Fiabilité :	70
IV-3-2 Disponibilité :	71
IV-3-3 Maintenabilité :	71
IV-3-4 Sécurité :	72
IV-3-5 Autres éléments :	72
IV-4 Défaillance :	72
IV-4-1 Taux de défaillance et de réparation instantanés :	73
IV-4-1-1 Taux de défaillance instantané :	73
IV-4-1-2 Taux de réparation instantané :	73
IV-4-2 Les mécanismes de défaillance :	73
IV-4-2-1 Défaillance précoces :	74
IV-4-2-2 Défaillances à taux constant :	74
IV-4-2-3 Défaillances d'usure (systématiques) :	74
IV-5 Métrique de la sureté de fonctionnement :	74
IV-5-1 Temps moyen de fiabilité :	74
IV-5-2 Théorie de fiabilité :	75
IV-6 Méthodologies dynamiques pour l'étude de la fiabilité d'un système :	76

Sommaire

IV-6-1 Chaines de Markov :	76
IV-6-2 Réseaux Bayésiens :	76
IV-6-3 Réseaux de Petri :	77
IV-7 Conclusion.....	77

CHAPITRE V

V. Introduction :	78
V.1 Les problèmes d'optimisation.....	78
V.2 Les éléments d'optimisation	78
- Une fonction objective.....	79
- Un modèle	79
- Un algorithme d'optimisation	79
- Un algorithme d'optimisation :	79
V.3 L'optimisation combinatoire.....	79
V.4 La démarche heuristique	80
V.4.5 Les méta- heuristiques.....	81
V.5.1 Organisation générale.....	82
- Diversification /exploration :	82
- L'intensification/exploitation :	82
- La mémoire :	83
V.5.2 Applications.....	83
V.5.2.1 Méta- heuristique à recuit simulé	83
V.5.2.2 Les méta-heuristiques évolutionnaires/génétiques.....	84
V.5.2.2.1 Origines.....	84
V.5.2.2.2 Principe.....	85
- Les sélections.....	85
- Les crossing over ou recombinaison.....	85
- Les mutations.....	86
- Codage.....	86
- Codage binaire.....	86
- Codage à caractère multiple.....	86
- Codage sous forme d'arbre.....	86
V.5.2.3 Les méta- heuristiques éthologiques/colonies de fourmis.....	87
V. 6 Conclusion.....	87

CHAPITRE VI

VI. Introduction	88
VI.1 Méthode inspiré du comportement des chats (CSO).....	88
VI.2 Présentation de l’algorithme (CSO)	89
-Algorithme inspiré des comportements des chats.....	89
-Organigramme inspiré des comportements des chats.....	90
VI.3 Caractéristiques globales du réseau à optimiser	91
VI.4 Discussion	94
VI.5 Optimisation par la méthode de GWO (L'optimisation du loup gris).....	95
VI.5.1 Définition L'optimisation du loup gris (Grey Wolf Optimisation GWO).....	95
VI.5. 2 Opérateurs.....	96
1) Hiérarchie sociale.....	96
2) Encerclement des proies	97
3) Chasse	97
4) Attaquer de la proie.....	98
VI.6 Les étapes générales de l’algorithme (GWO)	99
VI.7 Organigramme de l’algorithme (GWO).....	100
- L’algorithme (GWO).....	101
VI.8 Système éolien solaire considéré	101
VI.9 Caractéristiques globales du réseau à optimiser.....	102
VI.10 Solutions obtenues par l'algorithme de(GWO).....	103
VI.11 Interprétation des résultats.....	103
VI.12 Conclusion	104
Conclusion générale.....	105

Liste des figures

Fig. (I-1) : Structure générale d'un réseau électrique:.....	6
Fig. (I-2) : Réseau électrique structure parallèle- série.....	9
Fig. (I-3) : Exemple de réseau simple dérivation.....	11
Fig. (I-4) : Représentation d'un réseau HTA en boucle.....	12
Fig. (I-5) : Exemple de réseau HTA en double dérivation.....	12
Fig. (I-6) : Principe de fonctionnement d'une centrale Biomasse.....	13
Fig. (I-7) : Principe de fonctionnement d'une centrale Biogaz.	15
Fig. (I-8) : Principe de conversion solaire thermique - électricité.....	16
Fig. (I-9) : Centrale solaire thermique de type cylindro-parabolique.....	16
Fig. (I-10) : Principe de conversion géothermie - électricité.....	17
Fig. (I-11) : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique	18
Fig. (I-12) : Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique.....	18
Fig. (I-13) : Principe de conversion éolienne - électricité	19
Fig. (I-14) : Un Parc d'éoliennes	19
Fig. (I-15) : Principe de fonctionnement des panneaux photovoltaïques	21
Fig. (I-16) : Les différents composants d'un système photovoltaïque	22
Fig. (I-17) : Irradiation solaire moyenne	23
Fig. (I-18) : Les principaux types des centrales solaires.....	24
Fig. (I-19) : Centrale photovoltaïque d'Abou Dhabi d'une puissance de 100 MW.....	26
Fig. (I-20) : Principe de réception des rayonnements par une centrale à tour	28
Fig. (I-21) : Principe de fonctionnement d'un panneau cylindro-parabolique	30
Fig. (I-22): Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à capteurs cylindro-paraboliques à huile.....	31
Fig. (I-23): Centrale CHAMS d'Abu Dhabi	31
Fig. (I-24): Moteur Stirling de l'an 1816.....	32
Fig. (I-25): Prototype préindustriel Eurodish, 10 kW _e , construit par SBP-SOLO	33
Fig. (I-26): Fonctionnement d'une centrale thermique	36
Fig. (I-27) : Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire	37
Fig. (II-1): Exemple d'un réseau radial.....	46
Fig. (II-2) Caractéristiques P-V du réseau radial.....	47
Fig. (III-1) : Système à structure série.....	49
Fig. (III-2) : Système à structure parallèle	50

Liste des figures

Fig. (III-3) : Système à Structure Série-Parallèle	51
Fig. (III-4) : Système à Structure Parallèle-Série	51
Fig. (III-5) : Système électrique constitué de deux moteurs et une source.....	52
Fig. (III-6) : Exemple d'un système série-parallèle.....	59
Fig. (III-7) : Comparaison entre un système binaire et un système multi états	63
Fig. (IV-1): Hiérarchie de la sureté de fonctionnement des systèmes	70
Fig. (IV-2) : Hiérarchie de défaillance	72
Fig. (IV-3) : Taux de défaillance en fonction du temps (courbe en baignoire)	73
Fig. (IV-4) : Durées moyennes associées à la Sureté de Fonctionnement.....	75
Fig. (IV-5) : Modèle de Markov.....	76
Fig. (V-1) : Eléments indispensable d'optimisation.....	79
Fig. (VI-1): Organigramme de la méthode CSO.....	90
Fig. (VI-2): Mode recherche (sommeil et recherche).....	91
Fig. (VI-3): Mode de traçage (pour suite).....	91
Fig. (VI-4): Système électro- énergétique..	91
Fig. (VI-5): Puissance optimale à générée en fonction de la fiabilité des unités de production.....	93
Fig. (VI-6): Puissance optimale à générée en fonction de la fiabilité des transformateurs HT.	93
Fig. (VI-7): Puissance optimale à générée en fonction de la fiabilité des lignes HT/MT.	93
Fig. (VI-8): Puissance optimale à générée en fonction de la fiabilité des transformateurs MT.	94
Fig. (VI-9): Puissance optimale à générée en fonction de la fiabilité des lignes MT.....	94
Fig. (VI-10): Mécanisme de positionnement de l'agent de recherche et de l'effet de ce qui le présent....	99
Fig. (VI-11): Organigramme de la méthode (GWO).....	100
Fig. (VI-12) : Système électro- énergétique.....	102

Liste des tableaux

Tableau (III-1) : Probabilité de fonctionnement et de défaillance du système	55
Tableau (III-2) : Distribution de puissance d'un générateur de 50MW.....	62
Tableau (VI-1) : Enumère les caractéristiques de CSO.....	89
Tableau (VI-2) : Exemples de données.....	92
Tableau (VI-3) : Niveaux de la charge cumulée.....	92
Tableau (VI-4) : Données de la demande cumulative annuelle.....	103
Tableau (VI-5) : Solution optimale des structures avec différentes contraintes de fiabilité.....	103

Abréviations

CEI	Comité Électrotechnique Internationale
DBN	Dynamique Bayésiens Networks
MDT	Mean Down Time
MEE	Méthode de l'Espace des Etats
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTF	Mean Time To Failure
MTTR	Mean Time To Repair
MUT	Mean Up Time
pmf	Probability Mass Function
SdF	Sureté de fonctionnement
SME	Système Multi Etats
UGF	Universal Fenerating Function
G_i	Représente la performance ou bien la capacité en % de la puissance totale.
p_i	Représente la fiabilité de l'élément considéré en %.
C_i	Représente le coût en % de l'investissement sur chaque colonne (sou système).
GWO	Méthode inspiré du comportement le loup gris
CSO	Méthode inspiré du comportement des chats
GRT	Gestionnaire du Réseau de Transport
CC	Courant continu
CA	Courant alternative
MT	Moyenne tension
BT	Basse tension
THT	Très haute tension
M_N	Composants des systèmes
R(s)	La fiabilité de système
ϕ_{ser}	La fonction de structure du sous-système série
ϕ_{par}	La fonction de structure du sous-système parallèle
P_n	Les fiabilités des éléments du système
A	La disponibilité en régime permanent

Abréviations

a_j	Fonction de fiabilité de l'élément en tâches durant un temps
A_j	La disponibilité des éléments
$U(z)$	Fonction universelle d'élément du système
E	La probabilité
$\lambda(t)$	Taux de défaillance
alpha (α), bêta (β), delta (δ) et oméga (ω)	Les loups alpha, beta, delta, oméga
K_{iv}	Versions d'appareils disponibles
j	Elément du système
p_j	Fiabilité élément j du système

Introduction générale

Introduction générale

Dans le monde actuel, les producteurs subissent davantage des contraintes qui se manifestent dans une compétition de plus en plus féroce et globalisée. En effet, grâce aux zones de libre échange, à la globalisation, à la libération du marché et bien d'autres facteurs, la production à des coûts compétitifs qui constituent à la fois un net avantage pour les investisseurs et en même temps un danger qui risque de freiner la croissance des entreprises déjà présentes sur le marché. Parmi les secteurs importants, on note le secteur de l'énergie électrique dont son absence peut affecter largement notre vie quotidienne, nos activités personnelles et commerciales. Cette dépendance a fait surgir un consommateur de plus en plus exigeant, des qualités de service de moins en moins tolérables aux pannes d'énergie électrique. Face à une telle demande croissante pour un système très fiable, plus sécuritaire et afin de garantir une continuité de service en cas de défaillance. Les entreprises d'aujourd'hui doivent se démarquer par le maintien d'un haut niveau de satisfaction de leur clientèle par la définition des critères de valeurs sur lesquels ils doivent miser afin de demeurer concurrentes. Parmi ces critères, on note la modernisation des éléments d'un système en fonctionnement continu suivant plusieurs années. Une continuité de service suivant des conditions de fonctionnements régulières mais, parfois extrêmes engendrent une accélération d'usure de ses composants. Un tel régime n'est pas sans conséquences graves sur l'ensemble pour lequel le système choisi doit assurer une disponibilité sans relâche. Le système de production d'énergie électrique est un exemple de ce système sur lequel repose tout le processus de fourniture que le réseau transport distribution doit assurer. En effet, le système de production constitue le maillon essentiel de cette chaîne. Par ailleurs, les éléments des systèmes de production dont les caractéristiques se dégradent avec l'âge et avec l'usage nécessitent un remplacement dicté par la nécessité d'assurer une continuité de service à des composantes assujetties à des défaillances accidentelles. Toute interruption prolongée peut, en effet, se révéler coûteuse. L'objectif est donc de proposer une démarche globale de remplacement suivant une politique de remplacement bien orientée.

Dans cette thèse s'intéressera à l'évaluation de la fiabilité d'un système d'énergie, ce travail est divisé en six chapitres :

- Le premier chapitre traite les différents types de production d'énergie électrique où plusieurs types de centrales seront cités. Les avantages et les inconvénients permettent de distinguer les meilleures solutions.

Introduction générale

- Dans deuxième chapitre cité Le Profils de la tension sur les réseaux de transport d'énergie électriques.
- Le troisième chapitre s'attache à une technique nouvelle appelée technique d'Ushakov. Elle sera présentée dans un premier temps au système binaire puis elle sera étendue aux systèmes multi-états. Elle est essentiellement basée sur la fonction générée universelle (UGF).
- La fiabilité, théorie essentielle pour la sécurité et la bonne continuité des systèmes électro énergétique dans notre cas constituera l'objet du quatrième chapitre.
- le cinquième chapitre cite les méthodes d'optimisation.
- les solutions obtenues par l'algorithme de GWO et CSO seront discutés dans le sixième chapitre.

Enfin nous achevons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

I.1 Introduction :

Un « système électrique » est un ensemble constitué d'unités de production, d'unités de consommation, de réseaux électriques et de centres de contrôle. Sa taille peut être faible pour les réseaux simples, elle peut s'étendre à l'échelle d'un pays pour les plus grands réseaux. L'exploitation d'un système électrique est assurée par un GRT (Gestionnaire du Réseau de Transport). L'objectif est de garantir la sûreté de son exploitation, favoriser les performances économiques et satisfaire les engagements contractualisés [1].

Dans ce chapitre, les caractéristiques générales des éléments constituant un système de production d'énergie électrique seront présentées où les avantages et les inconvénients permettent de les distinguer.

Benjamin Franklin est connu pour sa découverte de l'électricité. Né en 1706, il a commencé à étudier l'électricité dans le début des années 1750. Entre 1750 et 1850, il y avait beaucoup de grandes découvertes dans les principes de l'électricité et du magnétisme par Volta, Coulomb, Gauss, Henry, Faraday, et d'autres. Il a été constaté que le courant électrique produit un champ magnétique fixe et un champ magnétique mobile. L'interaction des deux champs produit une énergie électrique. En 1879, Thomas Edison a inventé une ampoule plus efficace. En 1882, il a placé en service le premier système de distribution de courant continu (CC) à New York (centrale à vapeur-électrique). Le problème de ce mode de génération d'énergie électrique ne permet pas de transmettre cette énergie sur des grandes distances. En effet, on ne peut générer et utiliser le courant continu qu'à des tensions basses pour des raisons de sécurité et d'isolation. Pour satisfaire la demande, des stations de générations ont été construites près des centres de consommations. Pour résoudre le problème du transport de l'énergie électrique sur de longues distances, William Stanley Edison a inventé le transformateur en 1885. Celui-ci a permis le transport de l'énergie électrique sur de longues distances de manière efficace. Cela a permis de fournir de l'énergie électrique aux foyers et aux entreprises situées bien loin des centrales électriques.

Avantages du courant continu :

Grace au développement de l'électronique de puissance, le courant continu a repris du relais vis-à-vis des avantages suivants :

- il est plus économique de convertir la très haute tension et l'ultra haute tension de l'alternateur au continu cela permet d'utiliser deux lignes au lieu de trois.
- Les lignes à (CC) n'ayant pas de réactance (X), sont donc capables de faire transiter plus de puissance que des lignes à (CA) avec des conducteurs de même section.

- Le transport en courant continu est la seule option lorsqu'il s'agit d'effectuer un transport sous-marin.
- La liaison en (CC), agit comme zone de tampon, éliminant ainsi les problèmes d'instabilité inhérents aux interconnexions en (CA)

 L'inconvénient majeur de la liaison en (CC) :

Les harmoniques qui nécessitent un filtrage robuste, et un système de compensation d'énergie réactive aux deux extrémités de la ligne.

 Avantages du courant alternatif :

- La suppression des collecteurs dans les alternateurs, permet de construire des alternateurs à moyenne tension.
- La transformation de l'énergie électrique (élévation, abaissement).
- Transporter l'énergie électrique sur de grandes distances.

Les réseaux électriques étaient d'abord monophasés, puis triphasés (2.3kV en 1893) et à différentes fréquences (28Hz à 133Hz). La nécessité de mise en fonctionnement en parallèle et d'interconnexion des différents réseaux a conduit à la standardisation de la fréquence :

- 50 Hz pour des pays en Afrique, Asie et Europe
- 60 Hz aux Etats Unis et Canada

Les systèmes électriques sont des systèmes de livraison d'énergie en temps réel. C'est à dire que l'électricité est produite, transportée et consommée au même moment. Les systèmes électro-énergétiques ne sont pas des systèmes de stockage tels que les systèmes d'eau et les systèmes de gaz. Au lieu de cela, les générateurs ne produisent que l'énergie demandée.

Un réseau électrique est un système maillé mettant en œuvre :

- Des nœuds (ou postes) où sont raccordés : les centrales (centre de production), les charges (consommation) et les lignes électrique (élément du réseau).
- Des branches (ou lignes électrique) : qui interconnectent les nœuds.

Le maillage du réseau améliore la disponibilité et la stabilité de l'énergie électrique.

I.1.1 Fonction des postes électriques

Dans les réseaux, les postes ont pour fonction en particulier :

- D'organiser (configurer) : la topologie des réseaux c'est à dire l'affectation des lignes avec les jeux barres (bus) et donc ouvrir, fermer les disjoncteurs /sectionneurs associés.
- De surveiller : c'est la fonction qui consiste à mesurer le courant, la tension, les puissances, enregistrer et traiter les aléas etc....

- De protéger : c'est la fonction de protection des ouvrages (lignes, postes...)

Le réseau électrique est composé de centrales de production, des postes de transformation, de postes d'interconnexion et, enfin, de charges commerciales, résidentielles et industrielles.

I.1.2 Schéma d'un réseau électrique

L'énergie est transportée sur des lignes électriques (conducteurs de phase, câble de garde, pylônes, isolateurs) à très haute tension (THT ou HTB), à haute tension (HT ou HTA), à moyenne tension (MT ou BTB) et à basse tension (BT ou BTA) selon une échelle de tension recommandée par divers organismes de normalisation.

Les niveaux de tension et les types de réseau électrique

Les compagnies d'électricité divisent leur réseau en quatre grandes catégories :

- a) Un réseau de transport 300...800KV.
- b) Un réseau de répartition 60...300KV.
- c) Un réseau de distribution MT 1...60KV.
- d) Un réseau de livraison BT 220...1kV

I.2 Description du réseau électrique

Les réseaux électriques présentent des caractéristiques spécifiques de fonctionnement, différentes des autres types d'industries. Ces caractéristiques sont propres à la technologie actuelle de l'industrie électrique, et indépendante des formes institutionnelles d'organisation (le monopole ou la concurrence). Or, le choix et la conception des formes organisationnelles, et les performances inhérentes, dépendront de la manière dont ces caractéristiques spécifiques sont prises en compte.

I.3 Définition et organisation

On entend par le réseau électrique la production, le transport, la distribution et la consommation de l'électricité. L'électricité est tantôt un bien de consommation intermédiaire (les KWh utilisés dans les processus industriels par exemple) et tantôt un bien de consommation finale (électricité utilisée pour l'éclairage ou le chauffage domestique). Cependant, le cadre de réflexion dans lequel où nous devons agir se restreint aux systèmes électriques parallèle- série, c'est à dire pour lesquels nous aurons besoin d'une configuration spéciale pour obtenir des performances d'alimentation.

L'organisation entre chacun de ces blocs est décrite sur la figure ci-dessous :

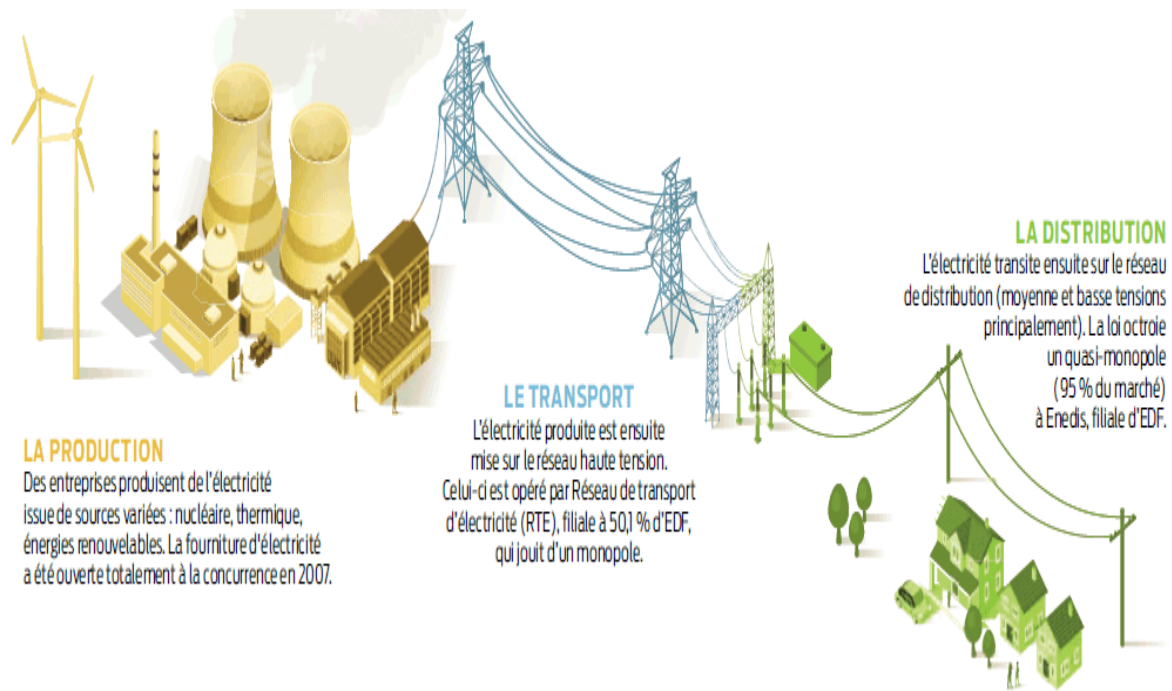


Fig. (I-1) : Structure générale d'un réseau électrique

- Le bloc production électrique, regroupant l'ensemble des éléments des unités de production. Par exemple, les alternateurs, les turbines etc.
- Les blocs poste élévateur, abaisseur, regroupant l'ensemble des éléments pouvant transformer l'énergie par changement de niveau.
- Les blocs transport et distribution, regroupant l'ensemble des éléments d'acheminement d'énergie.

Les consommateurs suggèrent qu'il soit nécessaire d'investir dans un système électrique pour minimiser les défaillances ou interruptions, c'est-à-dire pour assurer la fiabilité du système. Dans une perspective à plus long terme, il est important que les investissements soient choisis afin de minimiser les coûts tout en gardant une fiabilité meilleure.

Les systèmes d'électricité ont été conçus dans le but de veiller à :

- ✚ La fiabilité de la fourniture de l'énergie électrique impliquent toutes les unités de production et visent à assurer une fonction de secours en cas de pannes et/ou de défaillances.
- ✚ L'optimisation de la disponibilité de l'énergie électrique aux consommateurs.
- ✚ Permettent d'acheminer l'énergie produite par des sources délocalisées vers les points de consommation.
- ✚ La continuité de service où le maintien en fonctionnement l'outil de production offre une productivité et confort d'exploitation.

L'objectif principal d'un réseau électrique est de pouvoir satisfaire une charge caractérisée par des consommateurs. Comme on ne peut pas stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique, il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité :

$\text{Production} = \text{Consommation} + \text{pertes}$

De plus la qualité du service est un souci majeur de l'exploitant : le maintien de la tension et de la fréquence dans les plages contractuelles.

I.3.1. Les sous-systèmes de transformation

Pour transporter une énergie électrique à grande distance, il est essentiel, sur le plan économique, de minimiser l'énergie gaspillée par effet Joule le long de la ligne de transport. La solution la plus rentable consiste à élever le niveau de tension au départ et de le ramener à une tension plus basse à l'utilisation. Les deux opérations de changement de tension sont effectuées par des transformateurs. Ces sous-systèmes sont formés d'un ensemble de transformateurs (élevateurs ou abaisseurs) placés en parallèle dont la capacité ou bien la performance totale est la somme des différentes versions et type de transformateurs.

I.3.2. Les moyens de transport de l'énergie électrique

Comme l'énergie électrique ne se stocke pas en grande quantité, la production doit s'adapter sans cesse à la consommation. C'est pourquoi l'énergie produite doit être acheminée en temps réel jusqu'aux consommateurs. On appelle réseau électrique l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique à partir des centrales électriques, vers les consommateurs.

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

I.3.2.1. Le réseau transport et d'interconnexion

Il est destiné à transporter des quantités importantes d'énergie sur de longues distances (vu la dispersion géographique entre les lieux de production et les centres de consommation). Il constitue l'ossature principale pour l'interconnexion des grands centres de production. Ce réseau peut être assimilé au réseau autoroutier. Ces lignes peuvent atteindre des centaines de kilomètres.

I.3.2.2. Les réseaux de répartition régionale ou locale

Ils sont destinés à répartir l'énergie sur des distances plus courtes. Le transport est assuré en très haute tension (225000 volts) et en haute tension (90000 et 63000 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'énergie électrique 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 [2].

Faite à base d'une configuration arborescente de même niveau de tension, alors ces lignes sont placées en parallèle et servent à transiter l'énergie d'un point A vers un point B. Ces lignes se caractérisent par leurs capacités de transport, fiabilité ainsi que leurs coûts. De plus les puissances transportées sont telles, que l'utilisation d'une tension basse entraînerait des sections de câble tout à fait inadmissibles. L'usage des tensions élevées se trouve donc imposé malgré les contraintes d'isolement qui se traduisent par des coûts de matériel plus importants, la solution la plus facile étant l'utilisation de lignes aériennes.

Dans tous les cas, le choix d'une tension de transport est avant tout un compromis technico-économique en fonction des puissances à transporter et des distances à parcourir. La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Dans ce domaine, les politiques de respect de l'environnement et de protection des sites doivent être appliqués.

I.4 Les composantes d'un réseau électrique

Le système électro-énergétique est une installation complexe destinée à réaliser un objectif fonctionnel de haut niveau (production, transport et distribution). Pour assurer ces objectifs, le processus fait appel à un ensemble de systèmes interconnectés.

Le réseau est constitué de sous-systèmes. Ceux-ci sont décomposés en composants bien déterminés. En règle générale et en pratique ce sont sur ces composants que l'on effectuera de la maintenance et non sur le système. Chaque composant peut être ensuite décomposé en pièce élémentaire qui en général constitue l'élément qui fera l'objet de l'étude [3].

Pour satisfaire les besoins décrits précédemment, la chaîne énergétique doit avoir une description (modèle) qui représente précisément son fonctionnement, ses associations, ses priorités, etc.

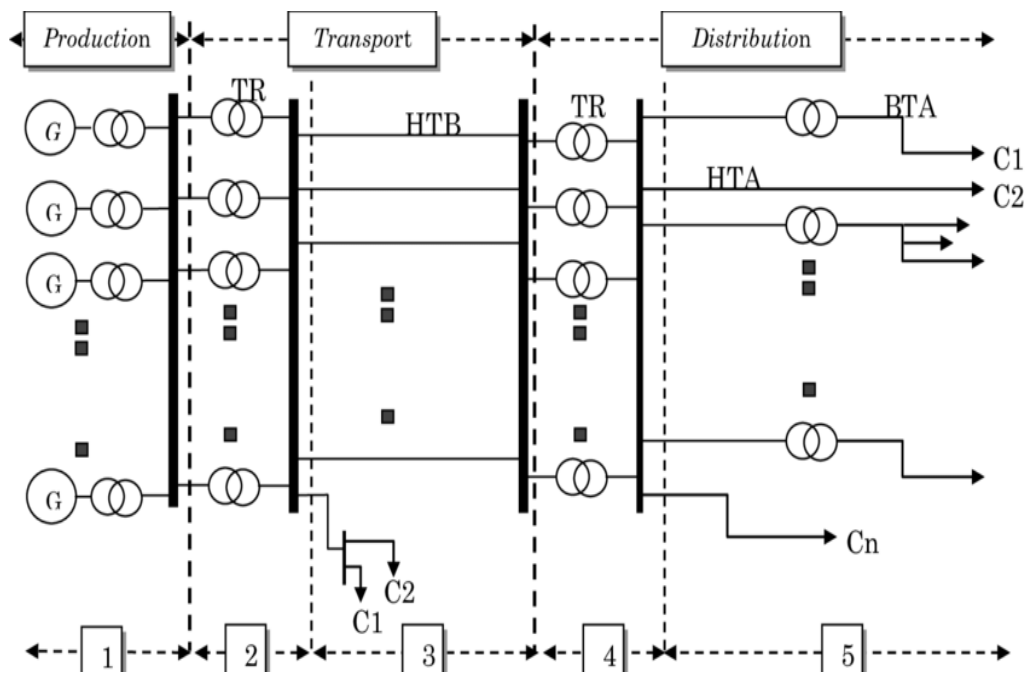


Fig. (I-2) : Réseau électrique structure parallèle- série

I.4.1. L'industrie de la production d'énergie électrique

Actuellement, l'absence de l'énergie électrique dans la vie quotidienne serait difficilement envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. La production doit en tout instant être capable de satisfaire la demande (consommation+ pertes). Elle doit donc prévoir des moyens de production les différents pics de charge, même si elles sont brèves.

La centrale électrique est la composante élémentaire du système électro-énergétique. Une centrale peut regrouper sur un même site plusieurs unités de production, souvent de même technologie et de même puissance. Elle est formée d'un ensemble d'éléments en interaction entre eux faisant intervenir les groupes (alternateurs) et les éléments de commandes [2].

Ce sous-système est destiné à produire de l'énergie électrique par l'intermédiaire des alternateurs à une tension comprise entre 5000 et 24 000 V. Pour assurer un transport économique, un niveau de tension compris entre 63 et 400 Kv est assuré par des transformateurs situés dans un poste de départ placé au voisinage immédiat de la centrale.

Pour répondre à une consommation croissante, il a fallu inventer et construire des centrales capables de produire de grandes puissances. Les trois principaux modes de production sont les centrales nucléaires, les centrales à combustibles fossiles et les centrales hydroélectriques. Les centres de production sont répartis uniformément dans l'ensemble du

réseau interconnecté. Evidemment, ils dépendent de la source de l'eau pour les centrales thermiques, de localisation adéquate pour les sources hydrauliques et plus récemment éoliennes dans des zones les plus ventées, ou solaires dans pratiquement toutes les zones, marémotrice dans les côtes, géothermale dans les zones à sources d'eau chaude naturelle.....

La turbine et l'alternateur sont les deux pièces maîtresses des centrales électriques. Dans le cas des centrales thermiques, la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les chaudières où l'on brûle les combustibles. Alors que dans le cas des centrales hydroélectriques, la turbine est animée par la force de l'eau. L'alternateur couplé à une turbine produit en tournant une énergie sous forme de courant alternatif. Une fois le courant produit, il doit être acheminé vers le consommateur.

Les moyens mis en œuvre sont diversifiés, et dépendent de plusieurs facteurs :

- Les technologies disponibles et leurs fiabilités ;
- La production nécessaire ;
- Le rendement possible ;
- Le coût éventuel de matières premières.

Les unités de production présentent différents degrés de fiabilité et d'incertitude. Ce degré de fiabilité peut être interprété comme le degré de précision dans la prévision de la capacité de production d'une centrale. Les erreurs de prévision de capacité peuvent venir du manque de prévision sur la force motrice (par exemple, courant d'eau ou vitesse du vent). L'exemple le plus typique est ici la production éolienne, dont le niveau de production dépend de la vitesse du vent. Cette vitesse est le résultat d'un phénomène climatique qui dépend de plusieurs variables, et qui est très difficile à prévoir avec exactitude. Les erreurs de prévision peuvent venir aussi de la défaillance forcée d'une unité de production ou d'autres facteurs qui l'empêchent d'atteindre leur niveau normal de production. Le cas le plus extrême est quand l'unité n'arrive pas à démarrer comme prévu, ou qu'elle doit être arrêtée complètement pour des problèmes techniques [2, 3,4].

1.4.2 Distribution de l'énergie

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'énergie électrique du réseau de répartition aux points de consommation. Les réseaux de distribution sont destinés à acheminer l'énergie électrique à l'échelle locale, c'est-à-dire directement vers les consommateurs de plus faible puissance. La distribution est assurée en moyenne tension (MT) et en basse tension (BTA). C'est l'équivalent des routes départementales et des voies communales dans le réseau routier [2].

La majeure partie des consommateurs d'énergie électrique sont alimentés par le réseau basse tension (230 et 400 volts) : pavillons, immeubles d'habitation, écoles, artisans, commerçants, professions libérales, exploitations agricoles... D'autres sont alimentés en moyenne tension : grands hôtels, hôpitaux et cliniques, petites et moyennes entreprises... De gros industriels sont alimentés directement par le réseau de transport, avec un niveau de tension adapté à la puissance électrique dont ils ont besoin.

Le choix d'une topologie fixe dépend des principaux éléments de conception d'un système de distribution. Plusieurs topologies peuvent être rencontrées :

I.4.3.1. Réseau radial (simple dérivation)

Ce schéma est aussi appelé en antenne. Son principe de fonctionnement est à une seule voie d'alimentation. Ce schéma est particulièrement utilisé pour la distribution de la HTA en milieu rural. En effet, il permet facilement et à un moindre coût d'accéder à des points de consommation de faible densité de charge. Très souvent un schéma radial est lié à une distribution de type aérien ; de plus, un incident ou une coupure pour une réparation entraîne la mise hors tension d'une partie du réseau sans possibilité de réalimentation de secours.

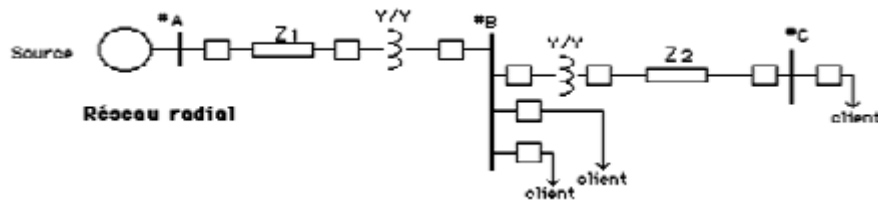


Fig. (I-3) : Exemple de réseau simple dérivation.

- **Avantage :** Coût minimal
- **Inconvénient :** Disponibilité faible

I.4.3.2. Réseau boucle ouverte

Il est aussi appelé coupure d'artère. Son principe de fonctionnement est à deux voies d'alimentation. En temps normal, les boucles sont ouvertes. Ce qui rend la protection et l'exploitation plus faciles. Ce réseau est un peu compliqué que le précédent, un peu plus coûteux et un peu plus difficile à exploiter, mais il assure une meilleure continuité du service. Très souvent ce schéma est associé à une distribution de type souterrain.

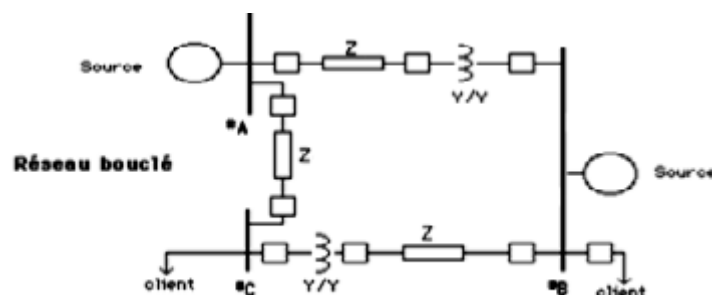


Fig. (I-4) : Représentation d'un réseau HTA en boucle fermée

- **Avantage :**

- Bonne disponibilité, dans la mesure où chaque source peut alimenter la totalité du réseau
- Maintenance possible du jeu de barres, avec un fonctionnement partiel de celui-ci

- **Inconvénients :**

- Solution plus coûteuse que l'alimentation simple en tension.
- Ne permet qu'un fonctionnement partiel du jeu de barres en cas de maintenance.

I.4.3.3. Schéma double dérivation

Chaque poste est alimenté par deux câbles avec permutation automatique en cas de manque de tension sur l'une des deux arrivées.

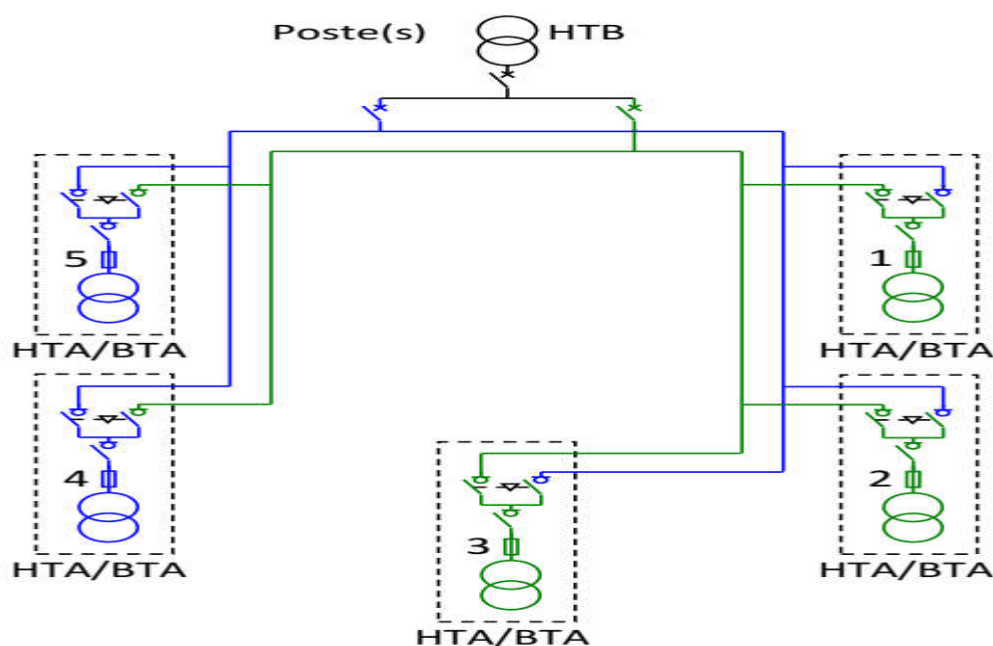


Fig. (1-5) : Exemple de réseau HTA en double dérivation.

- Avantage :

- Bonne disponibilité d'alimentation
- Très grande souplesse d'utilisation pour l'affectation des sources et des charges, et pour la maintenance des jeux de barres
- Possibilité de transfert de jeu de barres sans coupure (lorsque les jeux de barres sont couplés, il est possible de manœuvrer un sectionneur si son sectionneur adjacent est fermé).

- Inconvénient :

- Surcoût important par rapport à la solution simple jeu de barres

Les trois types peuvent être utilisés aussi bien pour la HTA que pour la BTA; le choix ne peut se faire qu'après une étude tenant compte du prix de revient du réseau et de la qualité du service qui doit être assuré.

I.5.1 Les sources d'énergies renouvelables :

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

I.5.1.1 La production de chaleur à partir des sources renouvelables :

Les sources d'énergies renouvelables permettent d'abord de produire de l'énergie thermique, ainsi le bois, le biogaz, le soleil et la géothermie sont largement exploités. Le soleil, ressource majeure, reste encore peu exploitée mais son potentiel de développement est énorme (chauffe-eau solaires...).

✚ Biomasse - le bois énergie :

Avec le développement de l'exploitation du charbon, du pétrole et du gaz naturel, le bois a progressivement été relégué à la seule fonction de chauffage (individuel et parfois collectif), en milieu rural. Le bois-énergie représente 14 % de la consommation énergétique primaire mondiale.



Fig. (I-6) : Principe de fonctionnement d'une centrale Biomasse

✚ Les avantages :

- Une matière première qui est renouvelable. Elle peut être produite indéfiniment en l'utilisant raisonnablement et de façon durable.
- Biodégradable rapidement.
- Produits issus de la biomasse sont souvent non-toxiques.
- Elle dégage autant de CO₂ qu'elle n'en absorbe (les plantes absorbent du CO₂ lors de la photosynthèse).
- La biomasse est l'une des énergies renouvelables les plus rentables.
- La biomasse est disponible partout [75].
- La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie.

✚ Les inconvénients :

- Leur rendement énergétique est assez faible.
- Pour produire de l'énergie biomasse, il faut occuper des terres et donc baisser la production agricole.
- Dégage du CO₂.
- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.
- Provoque la pollution des eaux et des sols.
- Les coûts et les impacts du transport pour acheminer le bois des lieux de source vers l'utilisation [76].

✚ Biogaz - la méthanisation :

La méthanisation est un phénomène biologique par lequel la matière organique est transformée en biogaz par des bactéries vivantes en l'absence d'oxygène (fermentation anaérobie). Elle se produit naturellement au fond d'une mare envasée ou dans une décharge. Elle sert à détruire la fraction biodégradable susceptible de polluer des déchets organiques de toute nature.

Le biogaz est composé principalement de méthane, de gaz carbonique et de traces d'autres gaz. Il peut être employé à l'état brut sur des chaudières, groupes électrogènes, générateurs d'air chaud. Le biogaz est aussi utilisable, après épuration aux normes du gaz naturel, comme carburant automobile (E85).



Fig. (I-7) : Principe de fonctionnement d'une centrale Biogaz

 Les avantages :

- La source d'énergie de la méthanisation est la fermentation de la matière organique, qui est gratuite (une grande partie de nos déchets sont d'origine organique), existante en grande quantité et renouvelable.
- La méthanisation permet de respecter le cycle du carbone (car le bilan carbone est neutre).
- En plus du rejet du méthane, les déchets sont utilisables comme fertilisant.
- L'énergie peut être valorisée sous plusieurs formes : électricité, chaleur, combustible ou carburant.

 Les inconvénients :

- Le gaz créé par la méthanisation est dangereux : c'est un gaz explosif, corrosif et toxique.
- Le biogaz prend beaucoup de place : il faut 1000m³ pour stocker l'équivalent de 700 litres de fioul (soit 0.7m³).
- Le stockage sous pression permet de réduire ce volume, malheureusement, cette compression est coûteuse et consomme de l'énergie.

Cette option ne concerne donc que les installations très importantes.

- Le gaz produit doit être consommé au fur et à mesure de sa production, il est très difficile de le stocker, à cause de la place qu'il prend.
- Le digesteur doit être maintenu à une température avoisinant les 37° (les bactéries travaillent à la même température que le corps humain) : dans le cas contraire, la méthanisation est grandement ralentie (elle peut passer d'une durée avoisinant de 1 mois, à 6 mois), Une partie du biogaz (environ 20 à 30%) est utilisée pour maintenir cette température. En général, le chauffage s'effectue par un échangeur de chaleur.
- Le biogaz est difficilement transformable en électricité [77].

Le solaire thermique :

La solaire thermique basse température permet essentiellement le chauffage de l'eau sanitaire et, dans une moindre mesure, la production combinée de chauffage par plancher chauffant (plancher solaire direct). Cette application de l'énergie solaire, utilisée depuis plus de 25 ans, est actuellement en phase de croissance accélérée aux Etats-Unis, au Japon et en Europe, en Algérie (écoles).

En Europe, plus de 600 000 familles ont équipé leur habitation d'un chauffe-eau solaire. L'Allemagne, la Grèce et l'Autriche ont beaucoup développé cette application et possèdent l'essentiel de la surface de capteurs solaires installée dans l'Union Européenne (plus de 75 %).



Fig. (I-8) : Principe de conversion solaire thermique – électricité



Fig. (I-9) : Centrale solaire thermique de type cylindro-parabolique

La géothermie :

La géothermie est l'extraction d'énergie contenue dans le sol. Les principales opérations entreprises en géothermie profonde (environ 2000 m), concernent le chauffage de logements collectifs par les réseaux de chaleur. Cette filière est relativement peu développée dans certains pays. Une autre technique est présentée sous le nom de géothermie de surface. Il s'agit d'une extraction par pompe à chaleur. Son principe est le suivant : Un capteur prélève de la chaleur dans le sol à l'extérieur par exemple sous une pelouse, son origine se trouve d'ailleurs dans le rayonnement solaire. Cette chaleur est transmise dans la maison le plus souvent via un plancher chauffant. Dans tous les cas le transfert de chaleur nécessite un fluide frigorigène et un appoint électrique de compression (à peu près 1/3 des besoins d'énergie thermique).

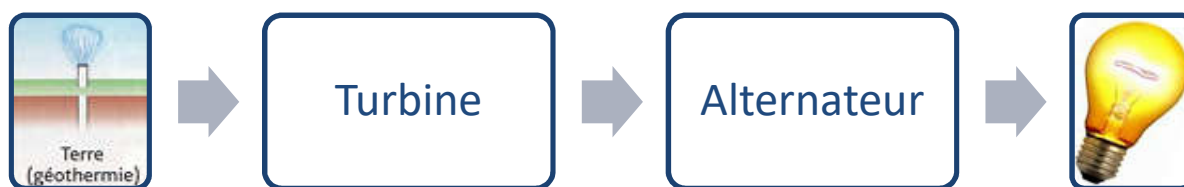


Fig. (I-10) : Principe de conversion géothermie – électricité

I-5-1-2 La production d'électricité par les énergies renouvelables :

Les sources d'énergie disponibles dans notre environnement proche permettant de produire de l'électricité sont : l'eau, le soleil et le vent.

Directement compétitives pour les sites isolés (les coûts de raccordement au réseau électrique sont très élevés), les centrales électriques à sources renouvelables peuvent aussi, sous certaines conditions, être directement raccordées au réseau.

Les centrales hydrauliques :

L'hydroélectricité, c'est-à-dire la production d'électricité à partir de la force de l'eau, est apparue au milieu du XIXe siècle dans la continuité des moulins qui exploitaient directement la force motrice de l'eau. Appelée la "houille blanche", elle a été synonyme d'un développement économique très important.

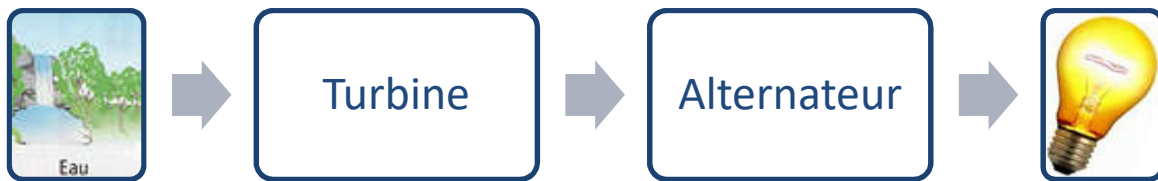


Fig. (I-11) : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

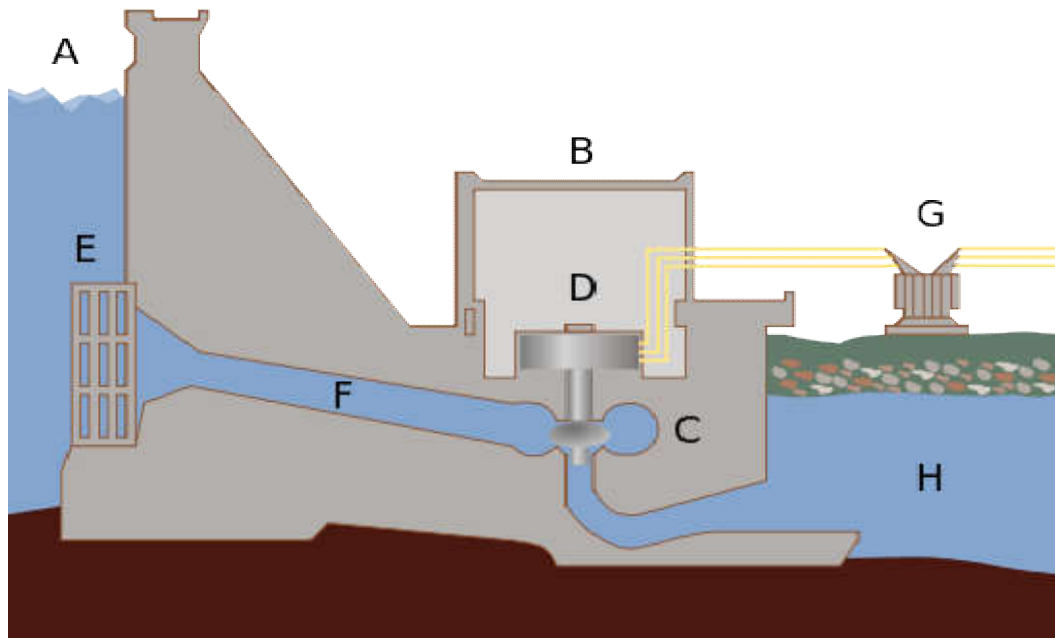


Fig. (I-12) : Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| A – réservoir | B - centrale électrique |
| C – turbine | D – générateur |
| E – vanne | F - conduite forcée |
| G - lignes haute tension | H – rivière |

L'éolien :

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables, l'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne [6].

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses. Son potentiel est énorme, il est estimé à 30.10^{15} kWh pour l'ensemble du globe et entre 5 et

50.10^{12} kWh/an pour la part de la surface exploitable. Ces ressources dépendantes de la vitesse moyenne du vent permettent de contribuer partiellement à satisfaire la demande. Bien sûr les fluctuations naturelles difficilement prévisibles de la production éolienne, des problèmes difficiles de maintien de stabilité et du niveau de tension dans les réseaux se posent. Ainsi, le stockage d'énergie risque de se révéler indispensable.



Fig. (I-13) : Principe de conversion éolienne – électricité



Fig. (I-14) : Ferme d'éolienne

Les avantages :

- ❖ L'énergie éolienne est propre, fiable, économique, et écologique. C'est une énergie qui respecte l'environnement.
- ❖ Bien qu'on ne peut pas envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂.
- ❖ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable.
- ❖ Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- ❖ Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.

- ❖ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- ❖ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent être facilement ralenties ou arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- ❖ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes dans les lignes dues aux transports à long distance sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- ❖ La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.
- ❖ C'est l'énergie la moins chère parmi les énergies renouvelables, selon les dernières estimations. Le coût de l'énergie éolienne continue à diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.
- ❖ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà opérationnel.
- ❖ L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple.

Les inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien présente quelques inconvénients :

- ❖ L'impact visuel : Reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines du site éolien.
- ❖ Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance

d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer le bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne.

- ❖ Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou de nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger.

Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux.

- ❖ La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- ❖ Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien, il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses [5].

Le solaire photovoltaïque :

Le rayonnement solaire représente une ressource renouvelable d'énergie énorme, de loin la plus importante. L'énergie reçue à la surface de la terre varie, par m^2 , de 1100 kWh à 2400 kWh. L'effet photovoltaïque permet de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique. La production d'électricité par générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, à la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil.



Fig. (I-15) : Principe de fonctionnement des panneaux photovoltaïques

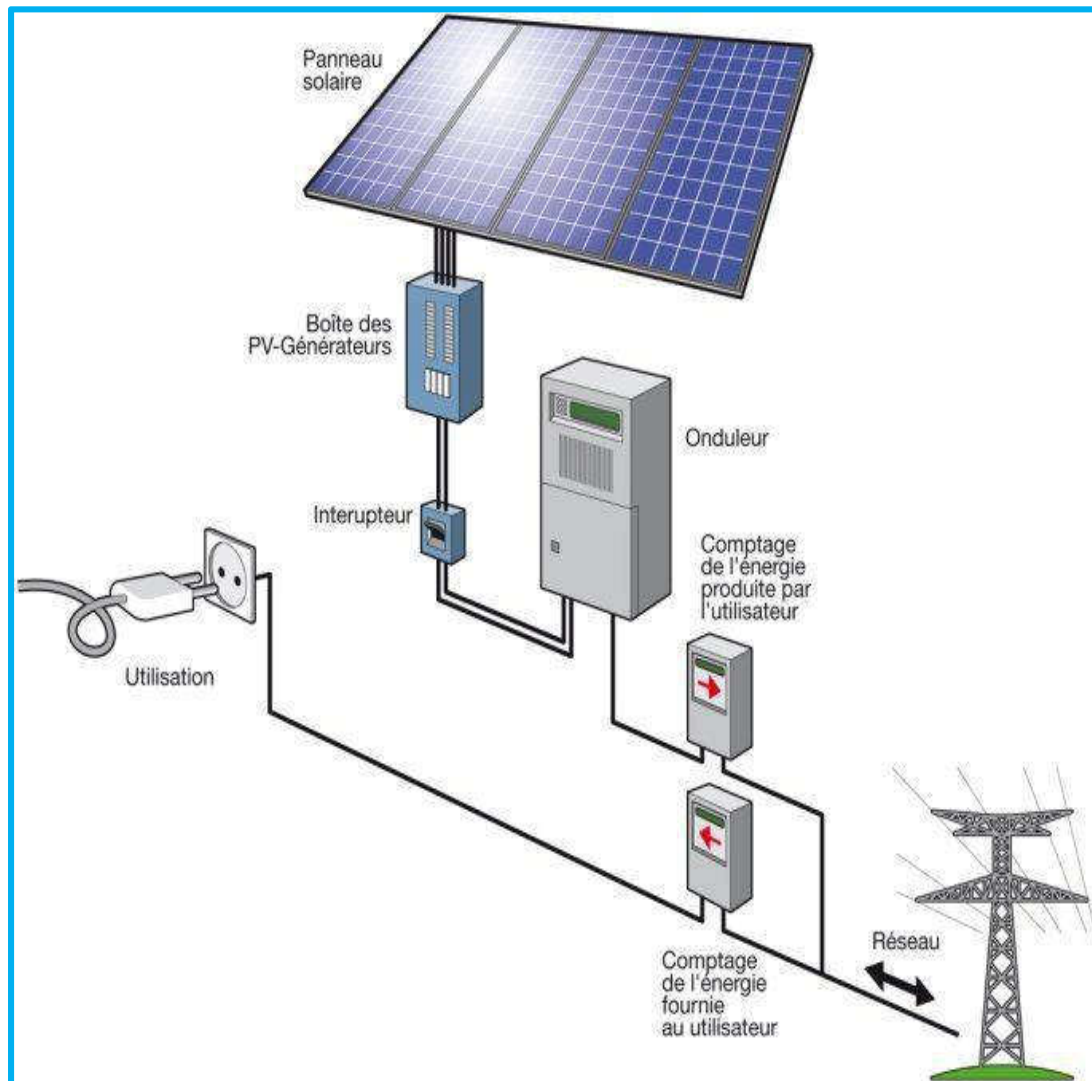


Fig. (I-16) : Les différents composants d'un système photovoltaïque

Les avantages :

- D'abord une bonne fiabilité sachant que l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu que les entretiens sont réduits et qu'il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni de personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

✚ Les inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 à 15 MW/km² par an pour certains pays d'Europe) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur se voit augmenté.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV seront dissipés sous forme de chaleur.

✚ Aperçu de la technologie :

Les centrales solaires ont une technologie relativement récente, possédant un important potentiel de développement. Elles offrent une opportunité aux pays ensoleillés comparable à celle des fermes éoliennes pour les pays côtiers. Les endroits les plus prometteurs pour l'implantation de ces technologies sont ceux du sud-ouest des États Unis, l'Amérique du Sud, une grande partie de l'Afrique, les pays méditerranéens et du Moyen Orient, les plaines désertiques d'Inde et du Pakistan, la Chine, l'Australie, etc. [9].

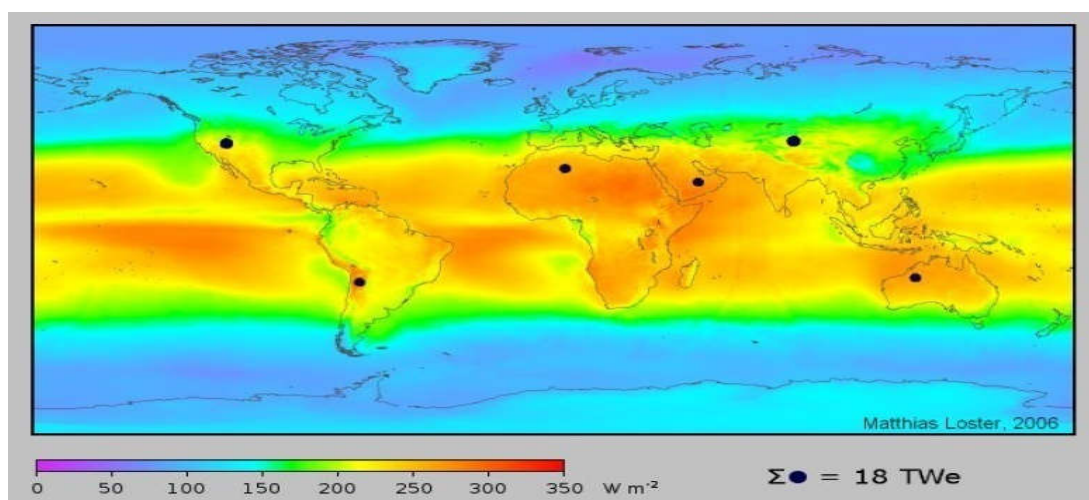


Fig. (I-17) : Irradiation solaire moyenne

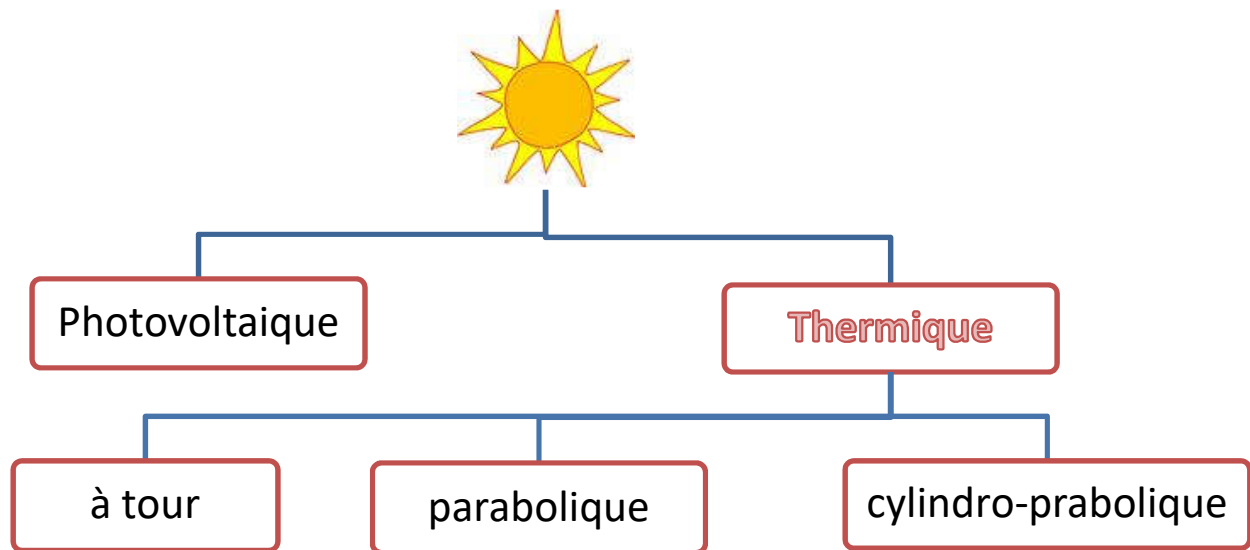


Fig. (I-18) : Les principaux types des centrales solaires

❖ Historique de système photovoltaïque :

La technologie de conversion de l'énergie photovoltaïque (PV) avait débuté en 1839, lorsque Becquerel avait découvert pour la première fois l'effet photovoltaïque. Il s'agissait de convertir directement l'énergie solaire en énergie électrique. Becquerel avait réalisé des expériences en utilisant des électrodes en acide soluté et en métal noble.

L'étude des dispositifs photovoltaïques à semi-conducteurs a débutée en 1954. Le matériau utilisé était le sélénium avec une efficacité de conversion d'énergie qui avoisinait les 2%.

En 1954, les laboratoires de téléphone Bell ont produit le premier type pratique de la cellule solaire, une cellule de silicium de type monocristalline avec une efficacité de conversion d'énergie jusqu'à 6%.

Des grandes améliorations ont permis l'augmentation de l'efficacité de la conversion d'énergie, réduisant ainsi les coûts des cellules, par l'utilisation de différents matériaux semi-conducteurs. Un rendement maximum de conversion de l'énergie photovoltaïque pour les cellules solaires monocristallines à base de silicium, a été atteint en 1988 avec une valeur de 22.8%, sans qu'il y ait utilisation de concentrateur solaire, et ceci en laboratoire. Le rendement le plus élevé a été obtenu pour une cellule cristalline de l'arséniure de gallium avec une efficacité de 31% et avec un éclairement solaire équivalent à 350 W/m² (1988).

D'autres types des cellules solaires sont celles appelées couches minces qui se composent de CuInSe, et cellules amorphes de silicium. Ces deux types ont permis une efficacité de plus de

14%. Les nouvelles technologies de production ont réduit le prix de vente des cellules photovoltaïques, ce qui a permis à l'industrie PV de se développer.

L'avantage de l'énergie produite par les cellules photovoltaïques est la production d'énergie propre et durable et son avenir est prometteur.

❖ Applications :

Domaine spatial

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante.

Depuis lors, des recherches et de nombreux développements ont été réalisés dans le domaine militaire (NASA aux Etats-Unis) et public (ESA en Europe) pour accroître les performances électriques tout en réduisant le poids des modules.

Habitation isolée

L'approvisionnement en électricité dans les régions rurales isolées est un problème d'actualité, en particulier dans les pays en voie de développement. L'extension du réseau pour des demandes relativement faibles et isolées n'est pas rentable.

De nombreuses organisations internationales d'aide aux pays en voie de développement ont choisi la technologie photovoltaïque comme outil de développement social et économique pour fournir des services de base à la population, tels que :

- Le pompage de l'eau pour la consommation d'un village ou pour l'irrigation, la réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles,...,
- l'éclairage (lampe portative, éclairage public, électrification villageoise, ...)

Industrie isolée

Beaucoup d'applications professionnelles exigent une source d'électricité hautement fiable, autonome, sans entretien et sans combustible. Le générateur photovoltaïque est de loin l'option la plus séduisante ; on l'utilise avec succès dans les télécommunications (stations relais pour TV, radio, téléphonie, émetteur-récepteur,...), mais aussi pour d'autres applications telles que :

- La protection cathodique,
- Les systèmes silencieux ou sans vibration,
- L'éclairage, balises et signaux pour la navigation,
- L'équipement de monitoring,

- La télémétrie, etc.

Centrale de puissance

Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, une nouvelle tendance se dégage ; elle est caractérisée par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. La plupart des projets utilisent des champs de capteurs plans, mais on expérimente aussi les systèmes à concentration dans les régions riches en rayonnement direct. Lorsque la pointe de la demande est en phase avec l'ensoleillement, la centrale photovoltaïque connectée au réseau permet de fournir les pointes. C'est le cas du sud Algérien où la demande est maximum aux heures les plus ensoleillées à cause du conditionnement d'air omniprésent.



Fig. (I-19): Centrale photovoltaïque d'Abou Dhabi d'une puissance de 100 MW

Résidence urbaine

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est aussi envisagé en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et façades de bâtiments.

La façade photovoltaïque suscite beaucoup d'enthousiasme en Europe et aux Etats-Unis ; le recouvrement des façades de bâtiments commerciaux où la consommation est essentiellement diurne ce qui correspond mieux aux heures d'ensoleillement. L'orientation verticale (ou quasi verticale) peut être avantageuse dans nos régions de haute latitude pour rehausser la production au creux de l'hiver. Cependant, l'apport énergétique d'une façade recouverte de modules photovoltaïques risque d'être assez négligeable par rapport aux consommations de bâtiments commerciaux. En réalité, l'enthousiasme découle du fait que le revêtement à l'aide

de panneaux solaires photovoltaïques reviendrait pratiquement au même prix qu'un recouvrement à l'aide de matériaux classiques.

Biens de consommation

L'électronique moderne requiert de très petites puissances. Ceux-ci s'échelonnent du milliwatt à une dizaine de Watt de sorte que beaucoup de petits appareils peuvent être alimentés par une petite surface de cellules photovoltaïques. Les calculatrices et les montres sont de loin les applications les plus connues. Les chargeurs de batteries, radios, lampes de poche, luminaires de jardin, systèmes d'alarme, jouets, fontaines, tondeuses à gazon, etc., sont d'autres exemples.

La plupart de ces mini-générateurs photovoltaïques utilisent des cellules au silicium amorphe, bon marché et mieux appropriées aux faibles illuminations et petites puissances. Ils constituent une alternative très intéressante aux piles qui comportent des risques divers de contamination de l'environnement principalement par les métaux lourds. Le Japon est le principal producteur et consommateur de ces articles

I.5.1.3 Les systèmes à concentration :

La concentration du rayonnement solaire permet d'élever la température de l'absorbeur de plusieurs centaines de degrés par rapport à la température d'équilibre obtenue sans concentration.

I.5.1.3.1 Les types des concentrateurs :

Parmi les très nombreux dispositifs optiques permettant de dévier les rayons du soleil pour les concentrer, nous ne considérons ici que ceux qui se prêtent à une mise en œuvre industrielle pour des puissances moyennes ou fortes et qui conduisent à la production de chaleur à une température supérieure à 250 °C. Ces dispositifs optiques mettent en œuvre des surfaces réfléchissantes constituées de miroirs. La nature géométrique des surfaces mise en œuvre et la complexité des structures supportant les miroirs définissent les systèmes concentrateurs. On distingue trois familles de centrales solaires à concentration :

- Les centrales à tour ;
- Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques ;
- Les systèmes parabole-moteurs.

Les centrales à tour (Héliostats):

Ce type de centrales est constitué de nombreux miroirs plats concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. La tour solaire offre l'avantage de ne

pas avoir à faire à circuler de fluide dans l'ensemble du champ de miroirs (la surface exposée est limitée), les pertes thermiques sont donc significativement réduites.

Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement (motorisation sur 2 axes) et réfléchit le rayonnement solaire sur la chaudière (récepteur). Le facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 800 °C à 1000°C.

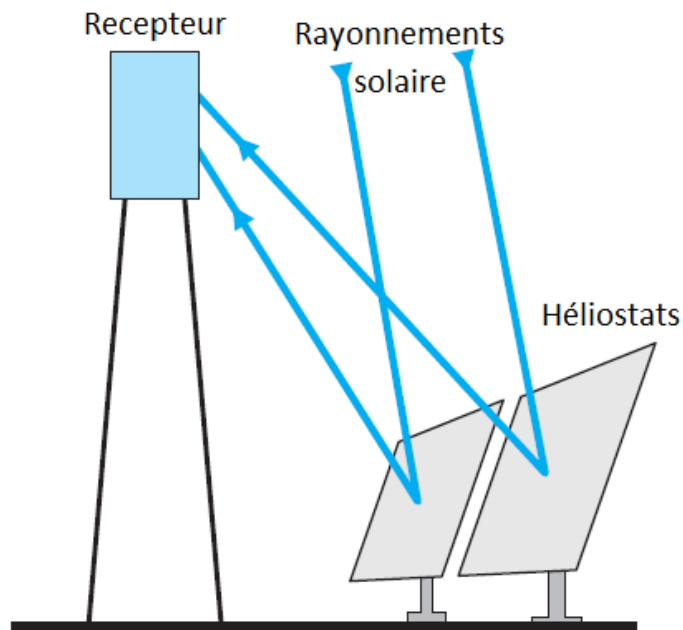


Fig. (I-20) : Principe de reception des rayonnements par une centrale à tour

C'est à partir des années 80 que plusieurs prototypes de centrales électro-solaires de type centrales à tours d'une puissance de quelques kilowatts à une dizaine de mégawatts ont été lancés dans le monde tel que :

- CRS à Almeria en Espagne est une centrale à sodium liquide construite par l'AIE (1981, 3700m² de miroirs).
- SUNSHINE à NioTown. C'est une centrale à eau-vapeur, (Japon, 1981, 12900m² de miroirs)
- SOLAR ONE à Barstow est une centrale à eau-vapeur, (Californie, USA, 1982, 71500m² de miroirs),
- THEMIS à Targassonne est une centrale à sel fondu, (France, 1982, 11800m² de miroirs),
- CESA 1 à Almería est une centrale à eau-vapeur, (Espagne, 1983, 11900m² de miroirs),
- SPP-5 à Shchelkino, c'est une centrale à eau-vapeur, (Crimée, Ukraine, URSS à l'époque, 1985, 40000m² de miroirs).

Une centrale de 17 MW appelée Gemasolar, est en construction. Située dans la province de Séville, elle dispose d'un champ circulaire équipé d'un récepteur à sels fondus et

bénéficie d'une capacité de stockage de 15h. La taille de ces centrales peut être limitée par la distance maximale des dernières rangées d'héliostats par rapport à la tour.

Le projet le plus ambitieux est celui d'une tour solaire dans le désert d'Australie de New South Wells : le soleil chauffe par effet de serre une plateforme de 7 km de diamètre au centre de laquelle s'élève une tour de 1000 m de haut ; l'air chauffé monte ainsi dans la tour où il active 32 turbines pour produire de l'énergie électrique. Ainsi cette centrale peut produire 200 MW (soit de couvrir une demande de 200.000 personnes). L'avantage de cette réalisation est que son fonctionnement est continu car la nuit il utilise la chaleur restituée par le sel.

Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques :

C'est le procédé solaire qui a produit le plus d'électricité sur Terre (plus de 500 MW_e) et c'est la solution commerciale actuelle la plus sûre. En effet, Les centrales solaires cylindro-paraboliques représentent 94 % des centrales actuellement en activité.

Leur utilisation et leur exploitation commerciale remonte aux années 1980 aux Etats-Unis où la compagnie américano israélienne Luz International a commencé à construire 9 centrales cylindro-parabolique en série dans le désert Californien. Mais c'est vers la fin 2009 qu'environ 800 MW_e de puissance électrique sont produite par ce groupe de centrales SEGS et raccordée au réseau californien.

Ce système SEGS utilise de nombreuses rangées de capteurs cylindro-paraboliques réfléchissants posés en rangées est-ouest, d'une centaine de mètres de long. Ils forment des champs de miroirs parmi les plus importants (de 106000 à 480000m²). Chaque capteur (miroir face au sud) suit le mouvement apparent du soleil sur un seul axe en hauteur et concentre le soleil, de 30 à 100 fois, au foyer. L'énergie thermique reçue au récepteur (point focal de la parabole) est absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide. Le fluide (huile synthétique) qui circule à l'intérieur du tuyau, est chauffé à environ 400°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs conventionnels afin de produire une vapeur surchauffée à 371°C – 100 bars qui font fonctionner une turbine/générateur électrique (le rendement nominal est de 37,5%).

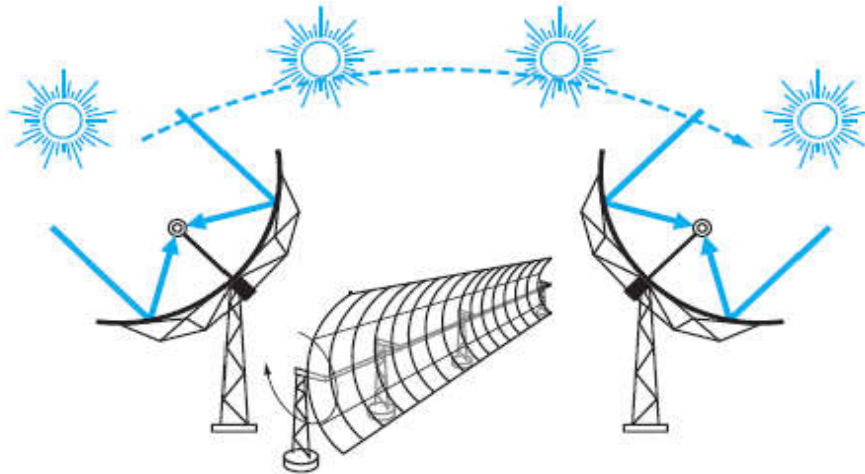


Fig. (I-21) : Principe de fonctionnement d'un panneau cylindro-parabolique

Le cycle recommence quand le fluide refroidi dans les échangeurs et retourne au circuit des capteurs. La centrale est conçue pour fonctionner avec l'énergie solaire uniquement. Cependant, un appoint de gaz est utilisé pendant les périodes nuageuses ou en fin de journée afin d'assurer une production électrique continue de 0,8 TWh par an (80 % solaire, 20 % gaz).

Une entreprise allemande SolarMillenniuma entrepris en 2006 la construction de grandes centrales solaires telles que ANDASOL au pied de la Sierra en Espagne, et BOULDER CITY (Solar One) de 65 MW implantée dans le Nevada (19.300 capteurs cylindro-paraboliques, Inaugurée en 2007) raccordé au réseau électrique pour satisfaire les besoins d'environ 40.000 foyers.

Mais c'est en 2008 que démarre la centrale cylindro-parabolique ANDASOL Guadix Espagne, capable de produire de l'électricité en continu (5 x 50 MWe) jour et nuit, grâce à un système de stockage de la chaleur (sels fondus, 60% NaNO_3 40% KNO_3). Cette centrale ANDASOL 1 a une autonomie de 7 heures mais des projets en cours ont comme objectif d'étaler cette autonomie vers 20 heures. Le champ de capteurs solaires à concentration chauffe un fluide caloporteur à environ 400°C , la chaleur est stockée dans une masse de sel fondu contenu dans des réservoirs. La chaleur est ensuite récupérée pour une production thermoélectrique conventionnelle, suivant les besoins.

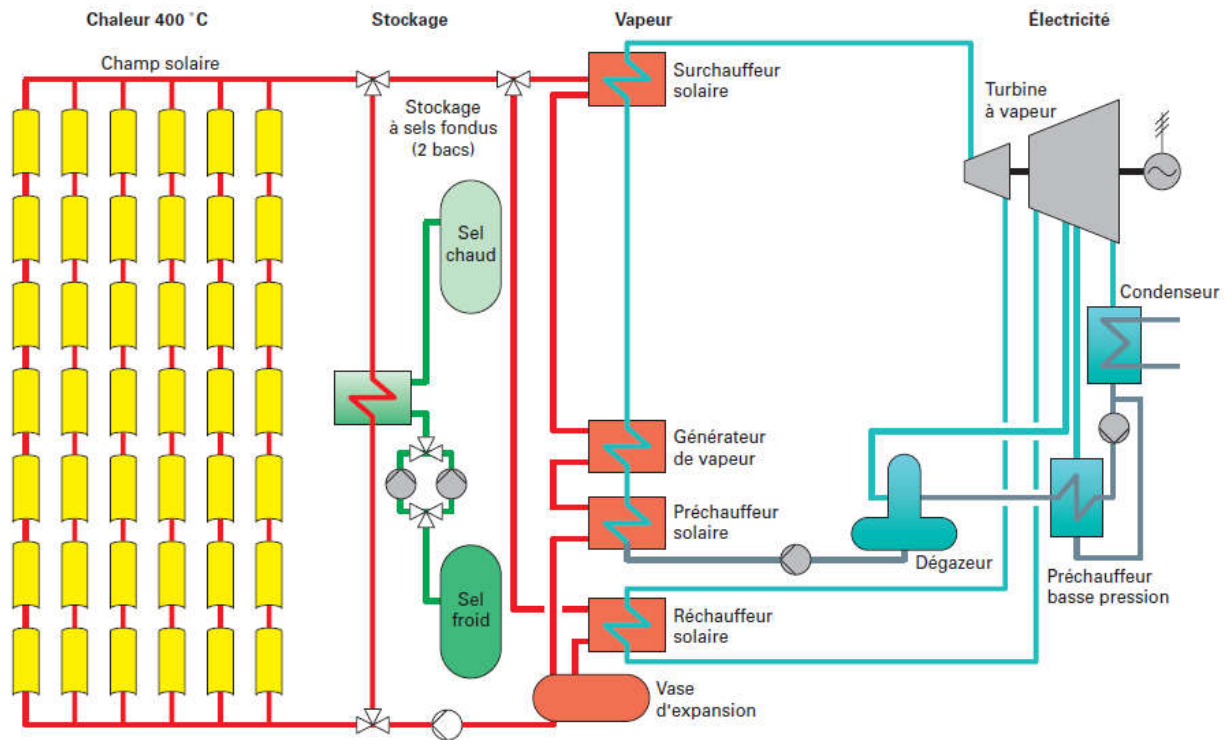


Fig. (I-22): Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à capteurs cylindro-paraboliques à huile

Deux centrales, l'une en Algérie (HassiR'mel, ISCC, 30MWe) et l'autre au Maroc, comportant un cycle intégré solaire de 20MW ont été attribuées à des sociétés européennes suite à des appels d'offres. La centrale électrique hybride gaz/solaire, dans la région de Hassi R'mel (Laghouat combine 224 miroirs cylindro-paraboliques concentrant la puissance solaire de 34,3 MW, sur une surface de 183.120m², en conjonction avec une centrale à turbines à gaz de 130 MW. Une autre centrale de 100 MW sur une surface de 2 160 000 m² est actuellement opérationnelle à Abu Dhabi.



Fig. (I-23): Centrale CHAMS d'Abu Dhabi

Les systèmes parabole-moteurs :

La filière parabolique est un peu la filière de référence car elle met en œuvre la meilleure surface de réflexion possible : une parabole de révolution (tous les rayons solaires incidents convergent après réflexion en un seul point (foyer).

Les Dish Stirling sont des systèmes paraboles Stirling. La production d'électricité a lieu directement au foyer de la parabole par un moteur Stirling.

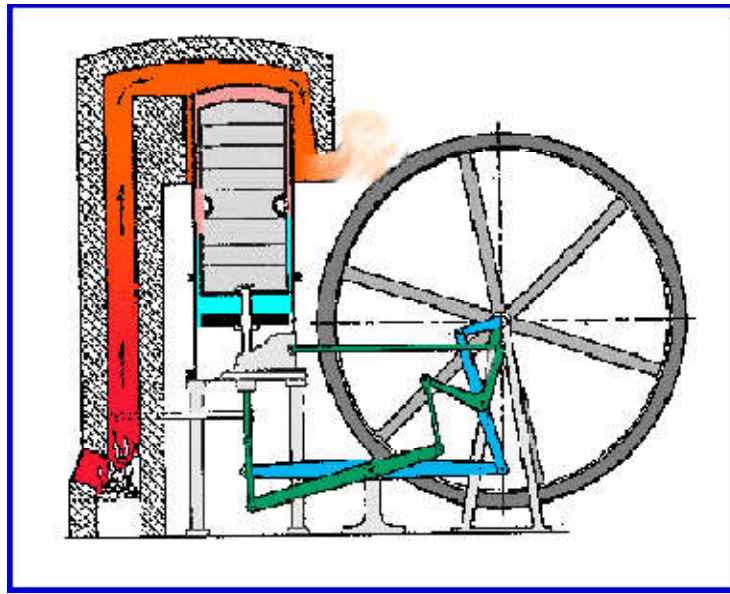


Fig. (I-24): Moteur Stirling de l'an 1816

Ce sont des concentrateurs en exploitation depuis plusieurs décennies (on peut considérer qu'un concentrateur de 10 m de diamètre peut fournir jusqu'à 25 KW d'électricité sous une insolation de 1000 W/m^2).

En raison de leur caractère modulaire, ces paraboles peuvent répondre à des besoins isolés de production électrique, mais également à des projets de grande échelle pour la distribution d'électricité via le réseau lorsque des milliers de paraboles sont regroupées sur un même terrain. Plusieurs installations de petite taille sont déjà opérationnelles. Ces systèmes sont flexibles en termes de capacité et de déploiement.

Des capteurs parabolique "Euro-dish" développé sur la Plate-forme solaire d'Almeria en Espagne sont en cours d'essais sur plusieurs sites en Europe. Un capteur parabolique "Dish-Stirling" est développé par Stirling Energy Systems (SES) en Phoenix, Arizona. Six prototypes Dish Stirling de SES sont testés (25 000 heures) au SNLab d 'Albuquerque : 29,4 % d'efficacité nominale, 95 % de disponibilité. Cette unité solaire avec une puissance de 25 kW est l'aboutissement d'une vingtaine années de recherche et de développement. Le modèle a été commercialisé en 2004.



Fig. (I-25): Prototypé préindustriel Eurodish, 10 kW_e, construit par SBP-SOLO

En 2005, la société SES a signé un contrat avec l'entreprise "San Diego Gas& Electric (SDG&E)" dans le sud de la Californie pour la construction d'une centrale de 300 à 900 MW de puissance, soit de 12.000 à 36.000 capteurs paraboliques de ce type. Un autre contrat avec "SouthernCalifornia Edison" prévoit la construction d'une centrale solaire de 500 MW (avec une option d'extension vers 850 MW) sur un terrain de 1850 hectares.

Il faut noter que du côté industriel, la société Américaine Stirling EnergySystems (SES) a battu le record mondial d'efficacité en conversion solaire électricité le 31 janvier 2008 par l'atteinte de 31,25% (rendement énergétique à partir d'un moteur Stirling alimenté avec l'énergie solaire). Le précédent record, datant de 1984 était de 29,4%.

En 2010, 60 capteurs paraboliques sont installés près de Phoenix Arizona forment une centrale solaire avec une puissance nominale de 1,5 MW. A l'échelle industrielle deux centrales solaires regroupant 32000 paraboles Stirling, pour une puissance totale de 1,4 GW sont actuellement fonctionnelle aux Etats-Unis (Californie, réalisation Stirling Energy System). Cette puissance est comparable à celles des centrales nucléaires.

Stockage de l'énergie solaire :

Le stockage constitue un aspect important puisqu'il permet de rendre la production d'électricité constante et indépendante de la disponibilité du rayonnement solaire.

En effet, les installations électriques solaires sont confrontées au caractère intermittent et fluctuant de la disponibilité de l'énergie solaire. Le stockage de l'énergie thermique permet ainsi d'obtenir un bon taux d'utilisation du bloc de puissance.

L'avantage avec le solaire à concentration thermodynamique est que la chaleur peut être stockée dans des sels fondus (il est plus facile de stocker de la chaleur que de l'électricité).

D'où la nécessité d'intégrer dans le système de génération de puissance un dispositif lui permettant de fonctionner pendant la nuit et pendant les heures d'ensoleillement insuffisant.

Dans le cas d'une centrale purement solaire, une production de l'énergie thermique par anticipation obtenue par un procédé de stockage thermique des sels fondus est susceptible d'assurer une meilleure exploitation de la centrale et cela en l'alimentant en chaleur même durant les périodes d'absence du soleil. Le système de stockage à sel fondu peut être configuré de deux manières :

- **Système à un seul réservoir :**

Le stockage thermique peut se faire par l'intermédiaire d'un seul bac vertical de grande hauteur dans lequel se trouve une huile thermique (liquide dense) où la température est stratifiée. On parle, dans ce cas, de stockage à stratification où le sel chaud flotte sur le sel froid.

- **Système à deux réservoirs :**

Ce type de stockage est le plus classiquement utilisé ; le système emploie deux bacs ayant chacun la pleine capacité de rétention du sel en circulation. Dans ce cas, l'un des bacs contient le sel « froid » (aux alentours tout de même de 250°C) et l'autre le sel chaud. L'échangeur solaire est toujours fourni en chaleur par le réservoir chaud. Les sels fondus sont transférés du réservoir froid au réservoir chaud afin d'accumuler l'énergie excédentaire.

La présence d'un système de stockage améliore ainsi les performances du champ solaire, pendant les périodes de faible ensoleillement, car il se comporte comme un amortisseur thermique et évite ainsi le retour des perturbations qui affectent la température à la sortie du champ.

Le principe du stockage thermique est l'utilisation d'un accumulateur de chaleur. Il peut stocker, sous forme de chaleur latente, une partie de l'énergie solaire produite par la centrale.

Par exemple l'accumulateur installé sur la plateforme solaire d'Almeria en Espagne est un accumulateur à sel de nitrate constitué de plusieurs couches de graphite et de matériaux caractérisés par un changement de phase qui permet un stockage thermique par chaleur

latente. Il délivre une puissance de 100 kW avec des températures de vapeur d'eau dépassant les 200 °C. Sa capacité de stockage est de 10 heures.

Le champ solaire de la centrale doit donc non seulement alimenter le système de génération électrique (turbine) mais aussi le système de stockage thermique.

Par conséquent, une centrale fonctionnant exclusivement en mode solaire nécessite un champ solaire plus important qui va se traduire par un surcoût de production. Alors, une technique qui a fait ses preuves dans le secteur de la production électrique par voie solaire est celle consistant à intégrer dans une centrale solaire classique un système d'appoint en combustible fossile. On parle, dans ce cas, de système solaire hybride.

I.5.1.3. Centrale hybride :

L'hybridation est une solution pour obtenir un bon taux d'utilisation du bloc de puissance, elle consiste à hybrider deux types de production d'énergie. Le système comporte plus de l'unité solaire, une unité auxiliaire au gaz ou au pétrole utilisé pendant les périodes nuageuses ou en fin de journée afin d'assurer une production continue.

Une centrale solaire hybride peut comporter une centrale solaire thermique convertissant en électricité la chaleur provenant soit de concentrateurs solaires soit d'un brûleur d'appoint à carburant fossile (gaz, pétrole...). L'appoint permet de satisfaire la demande électrique lorsque le rayonnement solaire est trop faible (passage nuageux, léger voile, etc.) ou inexistant (la nuit). Ce concept permet donc de produire en permanence l'énergie électrique en période de nuit ou lorsque les conditions météo ne sont pas optimales.

I.5.2 Les sources d'énergies fossiles :

Les énergies fossiles sont produites à partir de roches issues de la fossilisation des êtres vivants qui ont vécu depuis des milliers d'années : *exemple* : le pétrole, le gaz naturel ou encore le charbon.

Ces énergies ne sont pas renouvelables et leur quantité est limitée. Leur combustion entraîne la formation de gaz à effet de serre.

Pétrole, Gaz naturel et charbon :

Le pétrole est un liquide d'origine naturelle, une huile minérale composée d'une multitude de composés organiques, essentiellement des hydrocarbures, piégé dans des formations géologiques particulières. L'exploitation de cette source d'énergie fossile et d'hydrocarbures est l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine, car le pétrole fournit la quasi-totalité des carburants liquides (fioul, gazole, kérosène, essence, GPL) tandis que le naphta produit par le raffinage est à la base de la pétrochimie, dont sont issus un très

grand nombre de matériaux usuels (plastiques, textiles synthétiques, caoutchoucs synthétiques (élastomères), détergents, adhésifs, engrais, cosmétiques, etc.) et que les fractions les plus lourdes conduisent aux bitumes, paraffines et lubrifiants. Le pétrole dans son gisement est fréquemment associé à des fractions légères qui se séparent spontanément du liquide à la pression atmosphérique, ainsi que diverses impuretés comme le dioxyde de carbone, sulfure d'hydrogène, l'eau de formation et des traces métalliques.

Environ 42% de l'énergie primaire (pétrole, gaz naturel et charbon) est utilisée pour produire de l'électricité ; et si le pétrole représente le sang de la société, l'électricité en représente l'oxygène. Bien que d'autres moyens de production de l'énergie électrique existent, ils ne représentent actuellement qu'un faible pourcentage des sources, les trois quarts provenant du pétrole, du gaz naturel et du charbon [10].

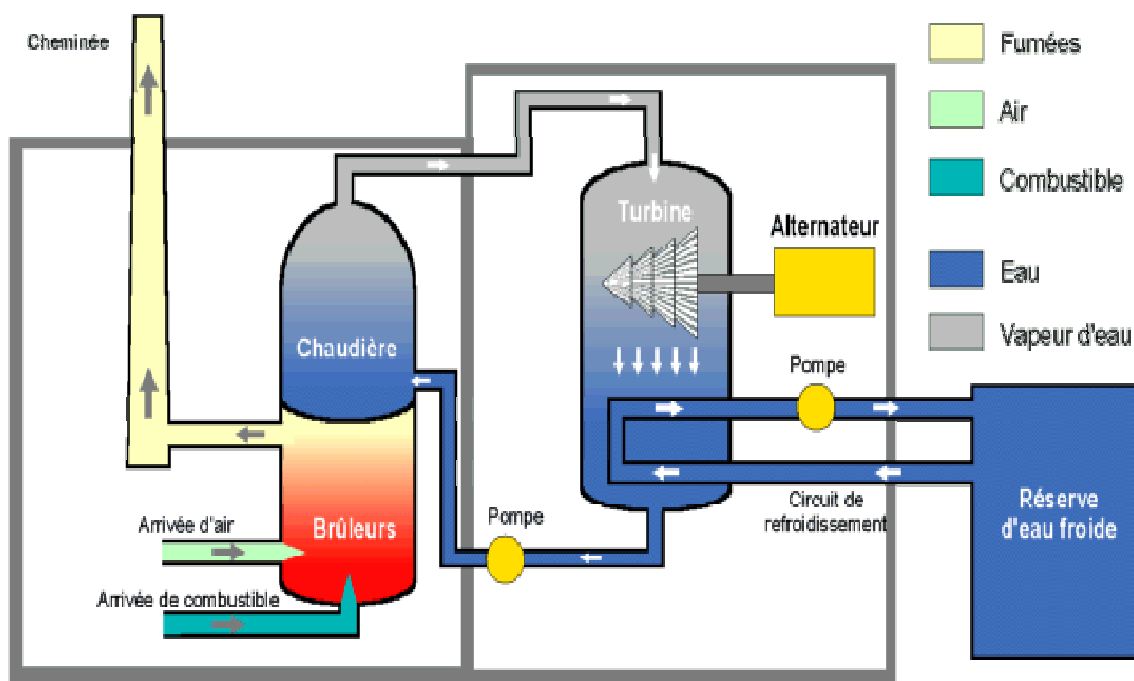


Fig. (I-26):Fonctionnement d'une centrale thermique

✓ **Les inconvénients :**

Les inconvénients de ces énergies sont nombreux :

- Les énergies fossiles existent en quantité limitée de plus ces réserves sont inégalement réparties dans le monde ce qui provoque souvent des conflits entre certains pays.
- L'extraction et le transport de celles-ci présente un impact catastrophique sur l'environnement.

- Ces énergies génèrent des gaz à effet de serre qui s'accumulent et provoquent le réchauffement climatique de la planète : c'est la principale cause du changement climatique.

L'énergie nucléaire :

Une centrale nucléaire est une centrale thermique qui utilise l'énergie nucléaire pour produire de la chaleur, permettant de vaporiser de l'eau. En passant dans la turbine, la vapeur entraîne en rotation un alternateur produisant à son tour de l'électricité. C'est la principale application de l'énergie nucléaire dans le domaine civil.

Une centrale nucléaire est constituée d'un ou plusieurs réacteurs nucléaires dont la puissance électrique varie de quelques mégawatts à environ 1500 mégawatts (pour les réacteurs actuellement en service).

En 2011, 429 réacteurs fonctionnent dans 31 pays différents dans le monde, soit un total de 364 gigawatts produisant environ 11 % de l'électricité mondiale.

À la suite de l'accident nucléaire de Fukushima en 2011, un certain nombre de pays ont revu leur politique de développement de l'énergie nucléaire. Par exemple : l'Allemagne a annoncé sa décision de fermer toutes ses centrales nucléaires avant la fin 2022 (en continuant d'acheter de l'énergie d'origine nucléaire à ses voisins européens). L'Italie a stoppé ses projets nucléaires. La Suisse ne renouvellera pas ses centrales. Le Québec a fermé sa centrale nucléaire de Gentilly fin 2012. Le précédent gouvernement du Japon a annoncé une sortie du nucléaire d'ici 2030 [11].

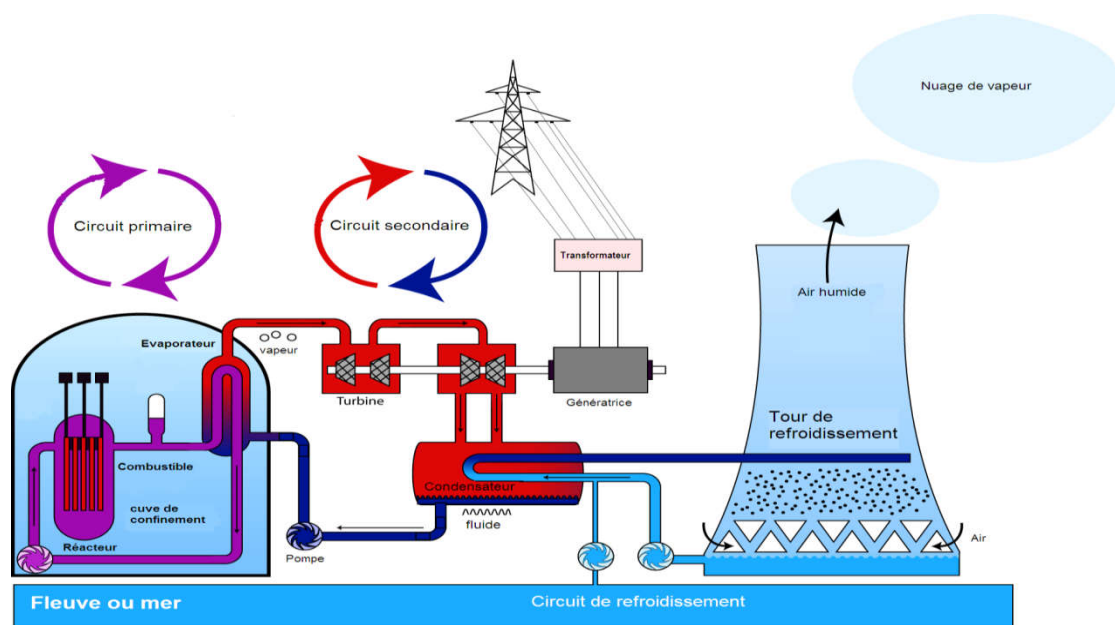


Fig. (I-27) : Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire

I.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, une présentation des systèmes électriques a fait l'objet d'une première section. Cette section a présenté brièvement les caractéristiques des éléments constituant le système électrique et précisément la production d'électricité. Des avantages et des inconvénients, ont été évoqués.

Les différentes sources d'énergies non renouvelables et les énergies renouvelables ont été évoquées

Le prochain chapitre se focalisera sur les réseaux de transport d'énergie électriques.

Chapitre II

II.1 Introduction :

Aujourd'hui, l'exploitation des grands réseaux électriques est de plus en plus complexe du fait de l'augmentation de leur taille, de la présence de lignes d'interconnexion très longues, de l'adoption de nouvelles techniques, de contraintes économiques, politiques et écologiques. Ces facteurs obligent les opérateurs à exploiter ces réseaux près de la limite de stabilité et de sécurité. Les situations des pays à forte consommation augmentent encore les risques d'apparition du phénomène d'instabilité. Pour éviter ce phénomène, l'étude de stabilité de tension est proposée dans ce chapitre [43]. Cette étude est un outil très important pour déterminer la possibilité de transfert de puissance électrique le long de ligne sans problème [7].

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits de puissance soient inférieurs aux capacités de transport du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont le niveau de tension (la tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau) quelque soit les situations de production et de consommation prévisionnelles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation, dans ce cas, les transits à travers les lignes du réseau sont importants, ce qui provoque une chute de tension dans ces lignes.

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'ils maintiennent à leurs bornes. Il est évident que la qualité et la continuité de la tension est devenue un sujet stratégique pour plusieurs raisons qui concernent l'exploitation des réseaux électriques [8].

II.2 Qualité de la tension :

Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales : fréquence, amplitude, forme d'onde et symétrie [8].

Pour le réseau synchrone algérien, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale mesurée, doit se trouver dans l'intervalle de 50 Hz.

Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires de réseaux concernés (zones de réglage), qui doivent participer aux réglages primaire et secondaire de la fréquence.

Le gestionnaire de réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre de 10 % autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite, plusieurs types de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension :

- Les creux de tension et coupures brèves.

- Les variations rapides de tension (flicker).
- Les surtensions temporaires ou transitoires.

Les deux premières catégories sont classées parmi les problèmes les plus fréquents [76] [77].

II.3 Dégradation de la qualité de la tension:

- les Phénomènes perturbateurs

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de [8] :

- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients : court-circuit dans un poste, dans une ligne aérienne, dans un câble souterrain, etc. Ces défauts pouvant résulter de causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...), matérielles (vieillessement d'isolants...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...) [10].
- Installations perturbatrices : fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc....

Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de la tension lorsque celle-ci est présente sont brièvement décrits ci-après.

II.3.1 Variation ou fluctuation de la fréquence

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou dans la tension générée par un groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz.

II.3.2 Composante lente des variations de tension

La valeur efficace de la tension varie continuellement, en raison de modifications des charges alimentées par le réseau, les gestionnaires de réseau conçoivent et exploitent le système de manière telle que l'enveloppe des variations reste confinée dans les limites contractuelles. On parle de "variations lentes" bien qu'il s'agisse en réalité d'une succession de variations rapides dont les amplitudes sont très petites.

Les appareils usuels peuvent supporter sans inconvénient des variations lentes de tension dans une plage d'au moins 10 % de la tension nominale

II.3.3 Fluctuation de tension (flicker)

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc. [8] [11].

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent, les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à environs 10 %.

II.3.4 Creux de tension

Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle. Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des « fluctuations de tension »). Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés après 0.1- 0.2 s en HT et après 0.2 s à quelques secondes en MT) [11].

Ils sont caractérisés par leurs : amplitude et durée et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concerné.

Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...).

II.3.5 Interruption courte ou coupure brève

L'interruption courte est la perte complète ou la disparition de la tension d'alimentation pendant une période de temps de 10 ms jusqu'à 3 s. Elle se produit quand la tension d'alimentation ou le courant de charge diminue à moins de 0.1 pu [9]. Le dégagement du défaut de tension et les coupures brèves sont principalement produites par les courts-circuits imputables aux incidents naturels du réseau et aux manœuvres d'organes de protection éliminant ces défauts. Ils sont également la conséquence d'appel de puissances importantes lors de la mise en service de certaines charges du réseau.

II.3.6 Bosses de tension

La bosse de tension est une augmentation de la tension au-dessus de la tension nominale 1.1 pu pour une durée de 0.1s à 60 s. Elle est caractérisée par son amplitude et sa durée. Elle peut causer l'échauffement et la destruction des composants.

II.3.7 Tension et/ou courant transitoire

Les surtensions transitoires sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz ou 60Hz pendant une durée inférieure à une seconde [8] [12].

Quelques équipements tels que les dispositifs électroniques sont sensibles aux courants/tensions transitoires.

II.3.8 Déséquilibre de tension

Un récepteur électrique triphasé, déséquilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les réceptrices basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [12]. Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° .

II.3.9 Perturbations harmonique et inter-harmoniques

On entend par harmonique, toute perturbation non transitoire affectant la forme d'onde de tension du réseau électrique [8].

Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale (figure I.9), qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale [13]. Ils sont principalement dus à des installations non linéaires telles que les convertisseurs ou les gradateurs électroniques, les fours à arc, etc.

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer un échauffement excessif de certains équipements, par exemple dans les condensateurs ou dans les machines tournantes, et peuvent perturber le fonctionnement des systèmes électroniques [13] [14].

II.4 lignes de transport électrique en régime permanent

II.4.1 Généralités sur les réseaux d'énergie électrique

Un réseau d'énergie électrique est un système d'éléments interconnectés qui est conçu [7] :

1. Pour convertir d'une façon continue de l'énergie qui n'est pas sous forme électrique en énergie électrique.
2. Pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances.
3. Pour transformer l'énergie électrique sous des formes spécifiques soumises à des contraintes bien déterminées.

Pour un consommateur, la source d'énergie est relative à l'endroit où il prend son énergie électrique. Elle doit être une source de tension alternative parfaite : c'est-à-dire une source dont l'amplitude et la fréquence sont constantes quelle que soit la charge. Pour satisfaire leur clientèle, les compagnies d'électricité doivent donc s'efforcer de maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension le plus près possibles de leur valeur nominale sur tout le réseau d'énergie électrique [15].

Il est important de maintenir le niveau de tension près de la valeur nominale aux différents nœuds du réseau [15] [16]. Dans les réseaux triphasés on parle souvent de barres plutôt que de nœuds. Une barre est l'équivalent d'un nœud sur les trois phases du système. Des niveaux de tension largement inférieurs à la tension nominale provoquent une dégradation considérable de la performance des charges. Ils provoquent aussi des surintensités de courant dans les moteurs d'induction utilisés dans de nombreuses usines; alors que des surtensions occasionnent des pannes d'équipements et des surintensités de courant dans les dispositifs constitués de matériaux ferromagnétiques saturables, en particuliers les transformateurs, et provoquent aussi une dégradation de la performance des charges. Pour la majorité des réseaux et en particulier pour le réseau Algérien, la génération de l'énergie électrique est assurée par plusieurs alternateurs synchrones situés dans différentes centrales de production. En régime permanent, ces machines tournent à vitesse constante définie comme la vitesse synchrone. Cette vitesse impose la fréquence de la tension sur le réseau. Pour maintenir constante en régime permanent la fréquence de la tension, il est donc essentiel que les alternateurs tournent tous à cette même vitesse. Le synchronisme des alternateurs est associé au concept de la stabilité du réseau.

II.4.2 Stabilité des réseaux électrique

Un système est stable s'il a tendance à continuer à fonctionner dans son mode normal (celui pour lequel il a été conçu) en régime permanent et s'il a tendance à revenir à son mode

de fonctionnent à la suite d'une perturbation [17]. Une perturbation sur un réseau peut être une manœuvre prévue, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou non prévue comme un court-circuit causé par la foudre entre une phase et la terre par exemple. Lors de la perturbation, l'amplitude de la tension aux différentes barres du réseau peut varier ainsi que la fréquence. La variation de la fréquence est due aux variations de la vitesse des rotors des alternateurs. Un réseau d'énergie électrique est stable s'il est capable, en régime permanent à la suite d'une perturbation, de fournir la puissance qu'exigent les consommateurs tout en maintenant constantes et près des valeurs nominales la fréquence, donc la vitesse de rotation des alternateurs.

On définit trois types de stabilité [17] [18] :

- 1- La limite de stabilité en régime permanent.
- 2- La stabilité dynamique.
- 3- La stabilité transitoire.

II.4.2.1 Limite de stabilité en régime permanent [19] :

Soit un alternateur connecté sur un réseau qui alimente une charge par l'intermédiaire des lignes de transport. Si la charge augmente graduellement, suffisamment lentement pour maintenir le système en régime permanent, l'alternateur fournit la puissance requise par charge tout en maintenant sa vitesse de rotation constante. Toutefois, il existe une limite de puissance active qui peut être fournie à la charge de façon stable, c'est-à-dire en maintenant constante la vitesse de rotation de l'alternateur. Si à partir de cette limite, on veut fournir encore plus de puissance à la charge, en ouvrant les vannes d'amenée d'eau d'une turbine par exemple, l'impédance de la machine et celle des lignes limitent le transfert de puissance à la charge. L'excès de puissance est absorbé par l'alternateur ce qui provoque l'accélération de son rotor. Il y a donc rupture de la stabilité en régime permanent. Dans le cas où plusieurs alternateurs sont en service sur le réseau, il y a une perte de synchronisme entre eux.

La puissance maximale que le groupe d'alternateurs peut fournir à la charge tout en maintenant le synchronisme est appelé la limite de stabilité en régime permanent. Dans le but d'avoir une bonne marge de manœuvre en cas de perturbations, les alternateurs et les lignes sont conçus de façon à opérer, en régime permanent nominal, à un niveau de puissance inférieur à cette limite de stabilité en régime permanent.

II.4.2.2 Stabilité dynamique

Si une perturbation mineure affecte le réseau, à partir d'un régime permanent stable, et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal en régime permanent, le réseau est

dit dynamiquement stable [17]. Pour un réseau d'énergie électrique, on entend par perturbation mineure des manœuvres ou des opérations normales sur le réseau, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou des variations mineures de la charge.

II.4.2.3 Stabilité transitoire

Lorsqu'il y a une perturbation majeure sur le réseau et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal après la perturbation, alors le réseau est dit transitoirement stable. Les perturbations majeures sont les courts-circuits, les pertes de lignes, les défaillances d'équipements majeurs comme les transformateurs de puissance et les alternateurs [17] [18]. Si on prend en compte ces diverses définitions et les différentes perturbations sur le réseau, on comprend que la stabilité dynamique et la stabilité transitoire sont très reliées au niveau de stabilité en régime permanent. En effet, le niveau de stabilité en régime permanent doit être le plus élevée possible ; lors d'une perturbation sur le réseau, un court-circuit de quelques cycles par exemple, l'appel de puissance durant la perturbation et lors des instants qui suivent l'élimination du défaut ne doit pas atteindre la limite de stabilité en régime permanent. Dans le cas contraire synchronisme risque d'être perdu. Dans ce cas, le réseau sera transitoirement instable. Plus la l'intervalle de stabilité en régime permanent est élevée, plus la stabilité dynamique et la stabilité transitoire est accrue. Une limite de stabilité en régime permanent la plus élevée possible permet également de continuer à alimenter la charge lorsqu'un équipement majeur, comme alternateur [19], devient hors service.

II.4.3 Instabilité de la tension

On définit la stabilité de la tension comme la capacité à maintenir une tension constamment acceptable dans les jeux de barres des nœuds du réseau, dans des conditions de fonctionnement normales, après avoir subi une perturbation [20] [21]. L'état du réseau est dit instable en tension lorsqu'une perturbation, par exemple un accroissement de la charge ou une modification des conditions du réseau entraîne une chute de tension progressive et incontrôlable de la tension. Ceci peut entraîner un effondrement généralisé de la tension.

II.4.3.1 Causes de l'instabilité de la tension

Le phénomène de l'instabilité de la tension est attribuable à l'exploitation du réseau à sa limite de puissance transmissible maximale ou à l'insuffisance de dispositifs de compensation de la puissance réactive. Les principaux facteurs qui contribuent à un effondrement de la tension sont la limite de puissance réactive des génératrices, les limites de réglage de la tension, les caractéristiques de la charge ainsi que les caractéristiques et les actions des dispositifs de compensation de la puissance réactive [16] [20] [21].

II.4.3.2 Incidents et réglages

Bien que les problèmes associés à la stabilité de la tension ne soient pas nouveaux pour le fournisseur d'électricité, ils suscitent actuellement beaucoup d'intérêt et une attention spéciale dans les grands réseaux. Au début, le problème de la stabilité de la tension était associé à un réseau faible et isolé, mais cette question est actuellement devenue source de problèmes dans les grands réseaux en raison de l'accroissement de la charge. Des instabilités et effondrements de la tension sont survenus à plusieurs reprises dans des réseaux importants à travers le monde au cours des dernières années. Certains des incidents mentionnés sont complexes et mettent en cause d'autres phénomènes qui créent l'instabilité de la tension, par exemple la perte d'une génératrice, la limitation du courant inducteur, le déclenchement d'un transformateur, la perte d'un transformateur, la perte de circuits ou un accroissement excessif de la demande.

Compte tenu de l'ampleur croissante du problème, plusieurs entreprises de service public ont mis au point des méthodes spéciales de réglage de la tension et de la puissance réactive. Électricité de France a mis en place un dispositif automatique centralisé de réglage secondaire de la tension (RST). L'ENEL (Italie) a, fait de même pour développer un dispositif régulateur automatique de la tension et de la puissance réactive utile des génératrices. Au Japon, la puissance réactive est régulée de manière par l'installation de nouveau système de surveillance en ligne pour assurer la sécurité de la tension.

II.4.3.3 Caractéristiques et analyse de la stabilité de la tension

L'une des caractéristiques importantes d'un réseau est la relation entre la puissance reçue P_R et la tension à l'extrémité réceptrice V_R [16] [20] [21]. Le schéma ci-dessous présente un exemple de cette caractéristique associée à un réseau radial simple, soit celui de la figure (II-1).

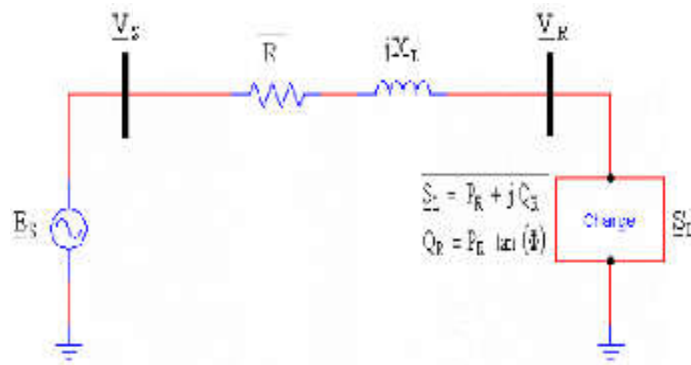


Fig. (II-1): Exemple d'un réseau radial

Les réseaux réels comportant un grand nombre de génératrices et de charges montrent également une relation semblable entre le transfert de puissance active et la tension de la barre de charge.

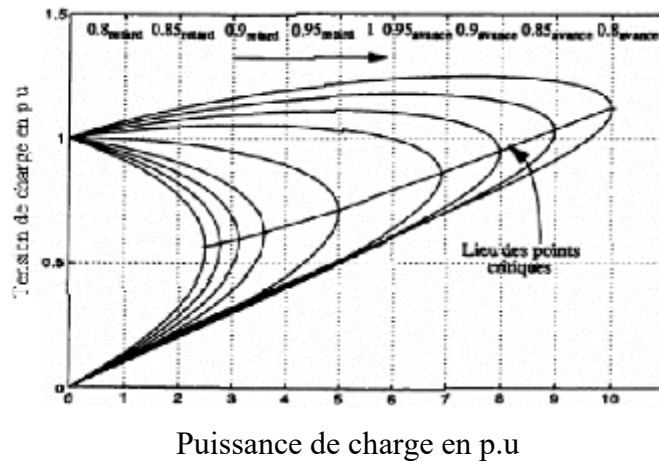


Fig. (II-2) : Caractéristiques P-V du réseau radial [21]

Le réseau est instable en tension pour une demande de puissance de consommation supérieure à la puissance maximale indiquée à la figure (II-2) par lieu des points critiques. Le facteur de puissance de consommation exerce un effet important sur la puissance maximale transmissible et affecte donc la stabilité de la tension dans le réseau. Le maintien de la tension serait certainement facilité par l'instauration d'un soutien réactif au niveau de la barre de consommation. La tension critique résultante est élevée, ce qui constitue un aspect très important pour la stabilité de la tension [12] [21] [20].

II.4.3.4 Facteurs d'influence reliée à la stabilité de la tension

L'instabilité de la tension d'un grand réseau est un problème de nature complexe. Plusieurs éléments d'un réseau contribuent à la création d'un scénario propice à une instabilité de tension. Les éléments suivants ont un impact important sur la stabilité de la tension du réseau [21]:

- Les génératrices et le comportement de leurs dispositifs de réglages et de protection.
- Les dispositifs à compensation shunt réglable et fixe.
- Les changeurs de prises en charge (ULTC) et les transformateurs fixes.
- Les relais de protection.
- Les caractéristiques de la charge.

Parmi ces éléments qui influent sur la stabilité de la tension, on retrouve les lignes de transport d'énergie [29]. Les lignes de transport affectent considérablement les niveaux de tension en fonction de la charge. Si la charge est importante, la tension sur le réseau a tendance à être faible, par contre si la charge est faible, le niveau de tension peut en différents

endroits sur le réseau, s'élever au-dessus de la tension nominale. Sur les lignes de transport non compensées, le taux de régulation de tension a donc tendance à être mauvais.

La stabilité en régime permanent est aussi influencée par la longueur des lignes de transport (plus la ligne est longue plus la limite de stabilité en régime permanent est faible). Ces deux effets néfastes des lignes longues de transport, sur le taux de régulation de la tension et sur la stabilité du réseau, peuvent être diminués ou même théoriquement éliminés en utilisant des techniques de réglage de la tension incluant des mesures comme la commutation par compensation shunt et le réglage de la tension des génératrices.

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les différents phénomènes perturbateurs qui influents sur la qualité de la tension.

Pour stabilité des réseaux électriques il faut surveiller plusieurs paramètres techniques.

Le prochain chapitre se focalisera sur systèmes multi états.

Chapitre III

III.1 Introduction :

Les phénomènes de dégradation qui affectent les systèmes sont souvent dus à des conditions environnementales (corrosion, érosion, etc.), à des phénomènes physiques (vibrations, usures, fatigue, chocs, etc.) ou à des phénomènes électriques (court-circuit, surtensions, ... etc). Ces dégradations ont plus ou moins un impact sur les performances. Ainsi, certains systèmes et leurs composants peuvent occuper différents stades de dégradation durant leur durée de vie utile. Pour l'étude et la modélisation du fonctionnement de tels systèmes et de leurs composants, on associe, généralement, des états à ces stades de dégradation. Chaque état reflétant le niveau de dégradation du système ou de ses composants. Les états extrêmes correspondent respectivement à l'état de fonctionnement correct et à la défaillance complète. Dans le sens de la fiabilité [44, 45,46], l'évaluation des performances des SME est sujette à la prise en compte des performances associées à l'ensemble de leurs états opérationnels (nominal et dégradés). Cette nouvelle technique sera explorée dans ce chapitre.

III.2 Différentes structures du Système :

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 bien précise.

III.2.1 Système série :

Considérons un système de « n » éléments. Chaque élément est monté en série avec l'autre selon la figure suivante [47].



Fig. (III-1) : Système à structure série

$R(s)$ représente la fiabilité d'un ensemble de "n" composants montés en série.

La fiabilité $R(s)$ d'un ensemble de "n" composants : $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ montés ou connectés en série est égale au produit des fiabilités respectives $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ de chacun des composants.

$$R(s) = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n \quad (\text{III.1})$$

Si les "n" composants sont identiques avec une même fiabilité R la formule sera la suivante :

$$R(s) = R^n \quad (\text{III.2})$$

III.2.2 Système parallèle :

On parle de système parallèle si la défaillance de l'ensemble des éléments entraînera la défaillance du système.

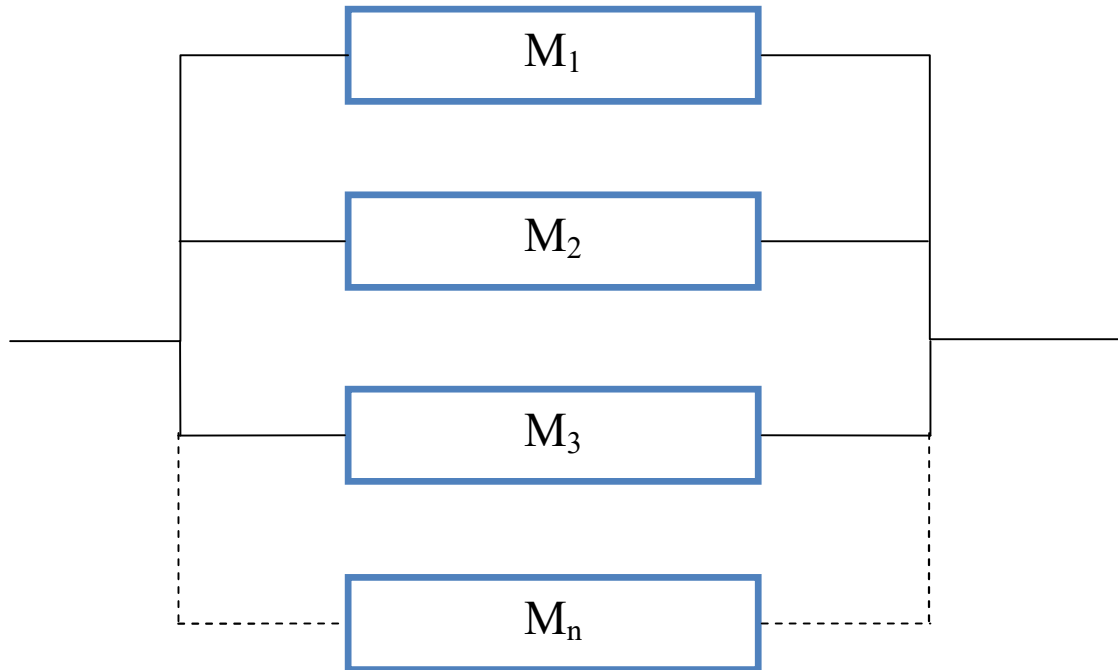


Fig. (III-2) : Système à structure parallèle

La fiabilité d'un système peut être augmentée en plaçant des composants (identiques ou non identiques) en parallèle. Un dispositif, constitué de " n " composants en parallèle, ne peut tomber en panne que si les " n " composants tombent tous en panne au même moment.

Soit les " n " composants de la figure ci-dessus montés en parallèle. Si la probabilité de panne pour chaque composant repéré « i » est notée F_i , alors :

$$F_i = 1 - R_i \quad (\text{III-3})$$

La probabilité de pannes $F(s)$ de l'ensemble des " n " composants en parallèle est égal au produit des F_i entre eux :

$$F(s) = F_1 \times F_2 \times F_3 \times \dots \times F_n = (1 - R_1) \times (1 - R_2) \times (1 - R_3) \times \dots \times (1 - R_n) \quad (\text{III-4})$$

La fiabilité $R(s)$ de l'ensemble est donnée par la relation ;

$$R(s) = 1 - (1 - R_1) \times (1 - R_2) \times (1 - R_3) \times \dots \times (1 - R_n) \quad (\text{III-5})$$

Si les " n " composants sont identiques ($R = R_1 = R_2 = \dots = R_n$) et ont tous la même fiabilité R , l'expression devient :

$$R(s) = 1 - (1 - R)^n \quad (\text{III-6})$$

III.2.3 Système séries- 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 [48].

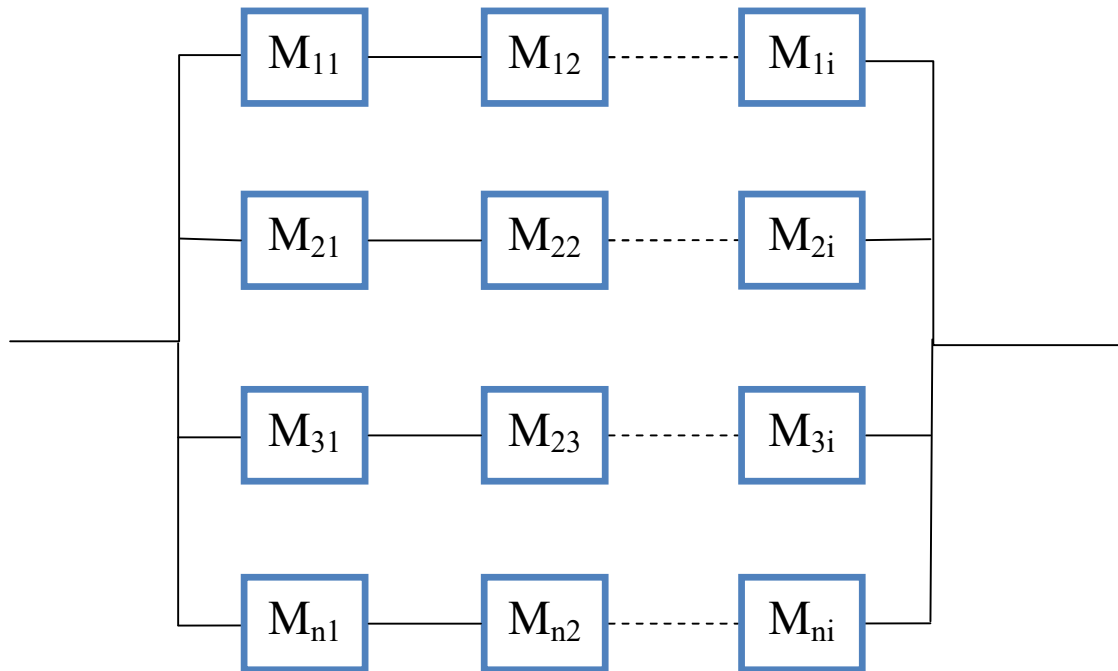


Fig. (III-3) : Système à Structure Série-Parallèle

III-2-4 Système parallèles-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.

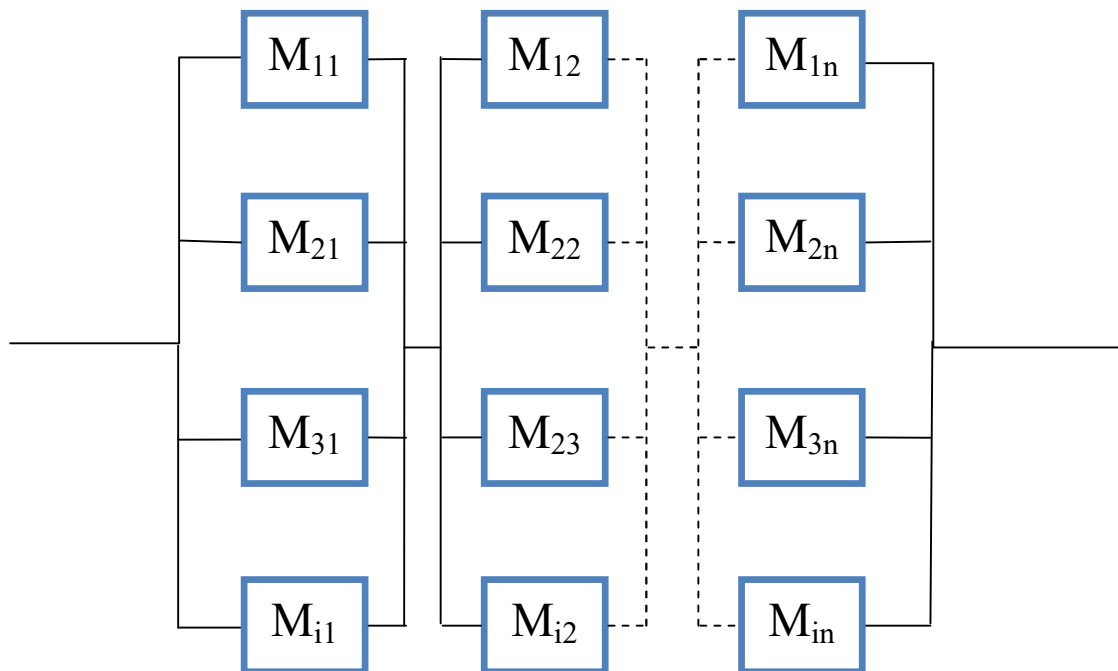


Fig. (III-4) : Système à Structure Série-Parallèle

III.3 Notions de base de la fiabilité du système binaire :

L'analyse de la fiabilité du système considère les relations entre le fonctionnement des éléments du système et le fonctionnement du système dans son ensemble. Un élément est une entité d'un système qui ne peut être subdivisée. Cela ne signifie pas qu'un élément ne peut être subdivisé, mais plutôt, cela signifie que dans une étude de fiabilité donnée, il est considéré comme une unité autonome sans affecter l'analyse de ses constituants.

Dans l'analyse de la fiabilité du système binaire, on suppose que chaque élément puisse être dans l'un des deux états possibles, soit fonctionnel soit en panne.

Alors l'état de chaque élément ou le système peut être représenté par une variable binaire aléatoire telle que X_j indique l'état de l'élément j :

- $X_j=1$ si l'élément j est fonctionnel.
- $X_j=0$ si l'élément j est en panne.

Si X désigne l'état du système entier, alors :

- $X = 1$ si le système fonctionne.
- $X = 0$ si le système est en panne.

Les états de tous les « n » éléments composant le système sont représentée par ce qu'on appelle vecteur d'état $(X_1, \dots, X_n)$. On considère que les états des éléments du système (réalisation des états des éléments du vecteur) déterminent l'état du système.

Alors, la relation entre l'état d'élément du vecteur et la variable d'état du système peut s'exprimer par une fonction déterministe : $X = \phi(X_1, \dots, X_n)$ (III-7)

Cette fonction est appelée fonction de structure du système.

III.3.1 La fonction de structure du système :

Exemple III.1 :

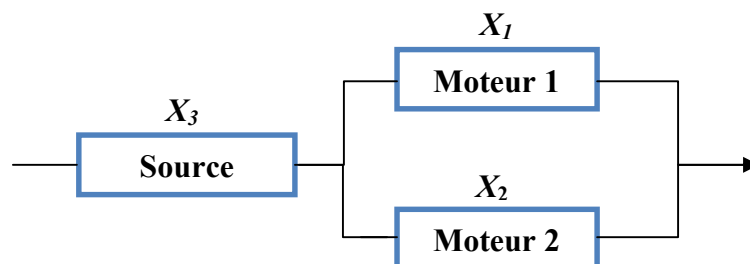


Fig. (III-5) : Système électrique constitué de deux moteurs et une source

Considérons un système électrique constitué de deux Moteurs montés en parallèle qui sont alimentée à partir d'une seule source de tension. Le système tombe en panne si aucun moteur n'est opérationnel.

Les deux moteurs constituent un sous-système qui tombe en panne si et seulement si tous ses éléments sont en panne. Les deux forment un système parallèle.

Considérons que les variables aléatoires X_1 et X_2 représentent les états des moteurs et la variable aléatoire X_c représente l'état du sous-système. La fonction de structure du sous-système peut s'exprimer par :

$$X_c = \phi_{par}(X_1, X_2) = \max(X_1, X_2) = 1 - (1 - X_1)(1 - X_2) \quad (III-8)$$

Le système entier tombe en panne si l'alimentation tombe en panne ou que le sous-système des moteurs tombe en panne. Un système qui ne fonctionne que si l'ensemble de tous les éléments fonctionnent est appelé système série.

Considérons que la variable binaire X_3 représente l'état de la source de tension. La fonction de structure du système entier prend la forme :

$$X = \phi_{ser}(X_3, X_c) = \min(X_3, X_c) = X_3 X_c \quad (III-9)$$

En combinant les deux expressions, on peut obtenir la fonction de structure du système entier :

$$X = \phi_{ser}(X_3, X_c) = \phi_{ser}(X_3, \phi_{par}(X_1, X_2)) = \min(X_3, \max(X_1, X_2)) \quad (III-10)$$

$$X = X_3(1 - (1 - X_1)(1 - X_2)) \quad (III-11)$$

III.3.2 Fonction de fiabilité :

La fiabilité est une propriété de tout élément ou du système entier capable d'assurer sa tâche prévue. On représente l'état du système par une variable aléatoire binaire $X=0$ où $X=1$ qui correspond à l'état du système. Les indices de fiabilité doivent exprimer la capacité d'être à l'état $X=1$. Différents indices de fiabilité peuvent être définie en concordance avec les conditions de fonctionnement du système [49, 50, 51, 52,53].

Lorsque le système possède un temps de mission fixe (par exemple, un satellite assurant l'émission d'information durant un temps déterminé de sa mission), la fiabilité d'un tel système (et de ses éléments) est définie comme la probabilité d'assurer sa tâche durant un temps de

mission sous des condition de fonctionnement spécifiées. Pour tout élément du système j sa fiabilité p_j est définie par :

$$p_j = \text{Prob}\{X_j = 1\} \quad (\text{III-12})$$

La fiabilité du système est donnée par :

$$R = \text{Prob}\{X_j = 1\} \quad (\text{III-13})$$

Observons que la fiabilité peut s'exprimer comme une valeur espérée de la variable d'état :

$$p_j = E(X_j), R = E(x) \quad (\text{III-14})$$

Les fiabilités des éléments composant le vecteur de fiabilité sont données par :

$$p = (p_1, \dots, p_n). \quad (\text{III-15})$$

Généralement ce vecteur est connu, on s'intéresse à l'obtention de la fiabilité du système comme une fonction de p :

$$R = R(p) = R(p_1, \dots, p_n) \quad (\text{III-16})$$

Considérons toujours l'exemple de la figure (III-5) et considérons que les fiabilités des éléments du système p_1, p_2 et p_3 sont connues. Une fois que les éléments sont indépendants, on peut obtenir la probabilité de réalisation de chaque état de l'élément du vecteur $(X_1, X_2, X_3) = (x_1, x_2, x_3)$ par :

$$\text{Prob}\{X_1 = x_1 \cap X_2 = x_2 \cap X_3 = x_3\} = p_1^{x_1}(1 - p_1)^{1-x_1} p_2^{x_2}(1 - p_2)^{1-x_2} p_3^{x_3}(1 - p_3)^{1-x_3} \quad (\text{III-17})$$

La fonction de structure de ce système est :

$$X = \min(X_3, \max(X_1, X_2)) \quad (\text{III-18})$$

A partir de la probabilité d'occurrence de chaque élément du vecteur d'état, on peut obtenir les probabilités de chaque état du système définie par la fonction probabilité de masse de la variable d'état X du système. Cette fonction est définie par Tableau (III-1) :

Tableau (III-1) : Probabilité de fonctionnement et de défaillance du système

<i>Probabilité des éléments (X_1, X_2, X_3)</i>	<i>Probabilité Attachées</i>	<i>Probabilité du système total</i>
$0, 0, 0$	$(1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)$	0
$0, 0, 1$	$(1-p_1)(1-p_2)p_3$	0
$0, 1, 0$	$(1-p_1)p_2(1-p_3)$	0
$0, 1, 1$	$(1-p_1)p_2p_3$	1
$1, 0, 0$	$p_1(1-p_2)(1-p_3)$	0
$1, 0, 1$	$p_1(1-p_2)p_3$	1
$1, 1, 0$	$p_1p_2(1-p_3)$	0
$1, 1, 1$	$p_1p_2p_3$	1

La fiabilité du système peut être maintenant définie comme la valeur espérée de la variable aléatoire X (qui est égale à la somme des probabilités des états correspondant à $X = 1$):

$$R = E(X) = (1 - p_1)p_2p_3 + p_1(1 - p_2)(p_3) + (p_1)(p_2)(p_3)$$

$$R = [(1 - p_1)p_2 + (p_1)(1 - p_2) + (p_1)(p_2)](p_3) = (p_1 + p_2 - p_1p_2)(p_3) \quad (\text{III-19})$$

Lorsque le système fonctionne assez longtemps et qu'aucun temps de mission n'est spécifié, on a besoin de connaître la capacité du système à assurer les variations de tâches suivant le temps. Dans ce cas, une mesure dynamique appelée fonction de fiabilité est utilisée. La fonction de fiabilité de l'élément j donnée par $p_j(t)$ ou du système entier donnée par $R(t)$ est définie comme la probabilité que l'élément (système) est apte à assurer ses tâches suivant le temps t , en supposant qu'au début de la mission l'élément (système) est fonctionnel :

$$p_j(0) = R(0) = 1 \quad (\text{III-20})$$

Ayant les fonctions de fiabilité des éléments indépendants du système $p_j(t)$ ($1 \leq j \leq n$), on peut obtenir la fonction de fiabilité du système $R(t)$ en utilisant la même relation $R(p)$ qui est définie pour un temps de mission fixé et par la substitution p_j et $p_j(t)$.

III.3.3 Fonction de disponibilité :

Considérons le système de la figure (III-5) et considérons que les fonctions de fiabilité des éléments du système sont :

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t}, P_2(t) = e^{-\lambda_2 t}, P_3(t) = e^{-\lambda_3 t} \quad (\text{III-21})$$

La fonction de fiabilité du système prend la forme :

$$R(t) = E(X(t)) = (p_1(t) + p_2(t) - p_1(t)p_2(t))p_3(t) \quad (\text{III-22})$$

$$R(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} e^{-\lambda_3 t} \quad (\text{III-23})$$

Dans la plupart des cas pratique les éléments en panne du système peuvent être réparés. Une fois que les pannes font passer les éléments vers un état d'arrêt, les réparations effectuées les font passer une nouvelle fois vers un état opérationnel. Alors, l'état de chaque élément et l'état du système entier peut varier entre 0 et 1 plusieurs fois durant la durée de vie du système. La probabilité que l'élément (système) est capable d'assurer ses tâches durant un temps t est appelée fonction de fiabilité de l'élément (système) :

$$a_j(t) = \text{Prob}\{X_j = 1\} \quad (\text{III-24})$$

$$A(t) = \text{Prob}\{X = 1\} \quad (\text{III-25})$$

Pour un système réparable, $X_j = 1$ ($X = 1$) indique que l'élément (système) peut assurer sa tâche suivant un temps quel que soit ses états avant le temps t .

Alors que la fiabilité reflète les propriétés internes de l'élément (système), la disponibilité reflète l'ensemble de la capacité de l'élément (système) à fonctionner sans défaillance et la capacité de l'environnement de la remise en état fonctionnel d'un élément (système). Le même système fonctionnant suivant différents environnements de maintenance possède différentes disponibilités [54,55].

En règle, la fonction disponibilité transitoire est difficile à obtenir. Par contre, la disponibilité en régime permanent est souvent utilisée. On considère un temps considérable après la remise en service de sorte que l'état initial du système n'a pratiquement aucune influence sur sa disponibilité, les disponibilités des éléments deviennent constantes :

$$A_j = \lim_{t \rightarrow \infty} a_j(t) \quad (\text{III-26})$$

Ayant les disponibilités moyenne de fonctionnement à long terme (régime permanent) des éléments du système, on peut obtenir la disponibilité en régime permanent A du système en remplaçant R par A et p_j par a_j .

On peut obtenir les indices de fiabilité du système à partir des indices de fiabilités de ses éléments et peuvent être utilisées dans tous les cas. Cette procédure présume [56, 57, 58] :

- L'obtention des probabilités de chaque combinaison des états des éléments à partir des éléments du vecteur de fiabilité.
- L'obtention de l'état du système (la valeur des variables d'état du système) pour chaque combinaison des éléments d'états (réalisation des éléments du vecteur d'état) en utilisant la fonction structure du système.
- Le calcul de la valeur d'espérance de la variable d'état du système à partir de ses fonctions probabilité de masse définie par la combinaison des probabilités de l'état de l'élément et les valeurs correspondantes de la fonction structure.

III.3.4 Fonction universelle d'élément (Système) :

En fait, la fiabilité de l'élément du vecteur $(p_1, ..., p_n)$ détermine la fonction probabilité de masse de chaque élément binaire qui peut être représenté sous forme de fonctions-u :

$$u_j = (1 - p_j)z^0 + p_jz^1 \quad (III-27)$$

Ayant les fonctions-u des éléments du système qui représentent la fonction discrète des variables aléatoires $(X_1, ..., X_n)$, on peut obtenir les fonctions-u représentant la fonction de la variable d'état du système X en utilisant l'opérateur de composition suivant les fonctions-u des éléments individuelles du système [59,60,61,62]:

$$U(z) = \bigotimes_{\phi} (u_1(z), ..., u_n(z)) \quad (III-28)$$

Notons que la même procédure peut être appliquée pour tout indice de fiabilité considérée. L'indice de fiabilité du système (la fiabilité fixe du temps de mission) correspond aux indices de fiabilité utilisés pour exprimer les états de probabilités des éléments. Par suite, on utilise le terme de fiabilité et on présume que les indices de fiabilités peuvent être considérés à leur place (si quelques indices spécifiques ne sont pas explicitement spécifiés).

Les fonctions-u des éléments du système à partir de la figure (III-1) sont :

$$u_1(z) = (1 - p_1)z^0 + p_1z^1, u_2(z) = (1 - p_2)z^0 + p_2z^1, u_3(z) = (1 - p_3)z^0 + p_3z^1 \quad (III-29)$$

La fonction structure du système est :

$$X = \phi(X_1, X_2, X_3) = \min(X_3, \max(X_1, X_2)) \quad (\text{III-30})$$

En utilisant l'opérateur de composition, on peut obtenir les fonctions-u du système représentant la fonction de la variable aléatoire X :

$$U(z) = \bigotimes_{\phi} (u_1(z), u_2(z), u_3(z)) \quad (\text{III-31})$$

$$U(z) = \bigotimes_{\phi} (\sum_{i=0}^1 p_1^i (1-p_1)^{1-i} z^i, \sum_{k=0}^1 p_2^k (1-p_2)^{1-k} z^k, \sum_{m=0}^1 p_3^m (1-p_3)^{1-m} z^m) \quad (\text{III-32})$$

$$U(z) = \bigotimes_{\phi} \sum_{i=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{m=0}^1 p_1^i (1-p_1)^{1-i} p_2^k (1-p_2)^{1-k} p_3^m (1-p_3)^{1-m} z^{\min(\max(i,k),m)} \quad (\text{III-33})$$

Les fonctions U résultantes prennent la forme :

$$\begin{aligned} U(z) = & (1-p_1)(1-p_2)(1-p_3) + (1-p_1)(1-p_2)(p_3)z^{\min(\max(0,0),1)} + (1-p_1)(p_2)(1-p_3)z^{\min(\max(0,1),0)} \\ & + (1-p_1)(p_2)(p_3)z^{\min(\max(0,1),1)} + (p_1)(1-p_2)(1-p_3)z^{\min(\max(1,0),0)} \\ & + (p_1)(1-p_2)(p_3)z^{\min(\max(1,0),1)} + (p_1)(p_2)(1-p_3)z^{\min(\max(1,1),0)} \\ & + (p_1)(p_2)(p_3)z^{\min(\max(1,1),1)} \end{aligned} \quad (\text{III-34})$$

$$\begin{aligned} U(z) = & (1-p_1)(1-p_2)(1-p_3)z^0 + (1-p_1)(1-p_2)(p_3)z^0 + (1-p_1)(p_2)(1-p_3)z^0 \\ & + (1-p_1)(p_2)(p_3)z^1 + (p_1)(1-p_2)(1-p_3)z^0 + (p_1)(1-p_2)(p_3)z^1 \\ & + (p_1)(p_2)(1-p_3)z^0 + (p_1)(p_2)(p_3)z^1 \end{aligned} \quad (\text{III-35})$$

Après la mise en commun des mêmes termes, on obtient :

$$\begin{aligned} U(z) = & [(1-p_1)(1-p_2)(1-p_3) + (1-p_1)(1-p_2)(p_3) + (1-p_1)(p_2)(1-p_3) + \\ & (p_1)(1-p_2)(1-p_3) + (p_1)(p_2)(1-p_3)]z^0 + [(p_1)(1-p_2)(p_3) + (1-p_1)(p_2)(p_3) \\ & + (p_1)(p_2)(p_3)]z^1 \end{aligned} \quad (\text{III-36})$$

La fiabilité du système est égale à la valeur espérée de la variable X qui a la fonction représentée par la fonction-u $U(z)$. Sachant que cette valeur espérée peut s'obtenir par la dérivée de $U(z)$ pour $z = 1$:

$$R = E(X) = U'(1) = (p_1)(1-p_2)(p_3) + (1-p_1)(p_2)(p_3) + (p_1)(p_2)(p_3) \quad (\text{III-37})$$

$$R = (p_1 + p_2 - p_1 p_2)(p_3) \quad (\text{III-38})$$

On peut facilement remarquer que le nombre total de combinaisons des états des éléments dans le système avec « n » éléments est égal à « 2^n ». Pour des systèmes avec un grand nombre

d'éléments, la technique présentée est associée avec un grand nombre d'évaluations de la valeur de la fonction de structure (la fonction- u de la variable d'état X du système avant que les mêmes collections contiennent « 2^n » termes). Heureusement, la fonction structure peut généralement être définie de manière récursive et la fonction des variables intermédiaires correspondant à des sous-systèmes peut être obtenue. Cette fonction probabilité de masse est toujours constituée de deux termes. En substituant toutes les combinaisons des éléments composant le sous-système avec ses deux termes la fonction (obtenue par la collection des mêmes termes dans la fonction- u correspondant au sous-système) nous permet d'obtenir une réduction considérable des calculs.

Exemple III.2 :

Dans cet exemple, on obtient la fiabilité du système séries-parallèle :

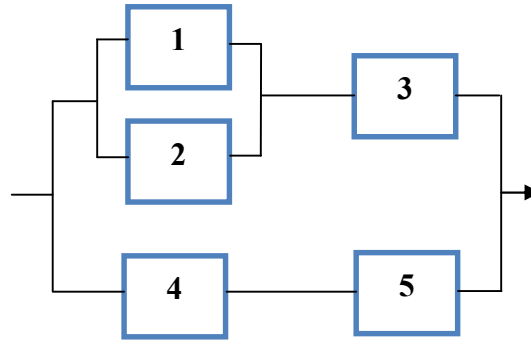


Fig. (III-6) : Exemple d'un système série-parallèle

$$p_1 = 0.8, p_2 = 0.9, p_3 = 0.7, p_4 = 0.9 \text{ et } p_5 = 0.7 \quad (\text{III-39})$$

Les fonctions- u des éléments prennent la forme :

$$u_1(z) = 0.8z^1 + 0.2z^0 \quad (\text{III-40})$$

$$u_2(z) = u_4(z) = 0.9z^1 + 0.1z^0 \quad (\text{III-41})$$

$$u_3(z) = u_5(z) = 0.7z^1 + 0.3z^0 \quad (\text{III-42})$$

En suivant la procédure présentée dans le titre (III.3.4) on obtient :

$$U_6(z) = u_1(z) \underset{\max}{\otimes} u_2(z) = (0.8z^1 + 0.2z^0) \underset{\max}{\otimes} (0.9z^1 + 0.1z^0) \quad (\text{III-43})$$

$$U_6(z) = 0.8 \times 0.9z^1 + 0.8 \times 0.1z^1 + 0.2 \times 0.9z^1 + 0.2 \times 0.1z^0$$

$$U_6(z) = 0.98z^1 \times 0.02z^0$$

$$U_7(z) = U_6(z) \otimes_{\times} u_3(z) \quad (\text{III-44})$$

$$U_7(z) = 0.72(1.361z^1 + 0.028z^0) \otimes_{\times} 0.7(z^1 + 0.429z^0)$$

$$U_7(z) = 0.72 \times 0.7(1.361z^1 + 0.028z^1 + 1.361 \times 0.429z^0 + 0.028 \times 0.429z^0)$$

$$U_7(z) = 0.504(1.361z^1 + 0.623z^0)$$

$$U_7(z) = 0.686z^1 + 0.314z^0$$

$$U_8(z) = u_4(z) \otimes_{\times} u_5(z) \quad (\text{III-45})$$

$$U_8(z) = 0.9(z^1 + 0.111z^0) \otimes_{\times} 0.7(z^1 + 0.429z^0)$$

$$U_8(z) = 0.63z^1 + 0.37z^0$$

$$U(z) = U_7(z) \otimes_{\times} U_8(z) = 0.504(1.361z^1 + 0.623z^0) \otimes_{\times} 0.63(z^1 + 0.588z^0) \quad (\text{III-46})$$

$$U(z) = 0.504$$

$$\times 0.63(1.361z^1 + 0.623z^1 + 1.361 \times 0.588z^1 + 0.623 \times 0.588z^0)$$

$$U(z) = 0.3175(2.784z^1 + 0.366z^0)$$

$$U(z) = 0.686 \times 0.63z^1 + 0.686 \times 0.37z^1 + 0.314 \times 0.37z^0$$

$$U(z) = 0.88382z^1 + 0.11618z^0$$

Et finalement :

$$R = U'(1) = 0.88382 \approx 0.884 \quad (\text{III-47})$$

$$R = U'(1) = 0.3175 \times 2.784 \approx 0.884$$

Il y a plusieurs cas où l'on estime la fonction structure du système binaire qui est une tâche très compliquée. Dans certains de ces cas la fonction structure et la fiabilité du système peut s'obtenir de manière récurrente, comme dans le cas des systèmes séries-parallèles complexes. La section suivante de ce chapitre sera orientée vers ces cas.

III.4 Introduction aux systèmes multi états :**III.4.1 Concept de base des systèmes Multi états :**

Tous les systèmes techniques sont désignés pour assurer leurs fonctions désirées suivant un environnement donné. Certains systèmes effectuent leurs tâches avec différents niveaux distincts d'efficacité, souvent désignés par des niveaux de performances.

Un système qui peut avoir un nombre fini de niveaux de performances est appelé système multi états SME. Souvent un SME est composé d'éléments qui à leurs tours peuvent avoir plusieurs états.

Actuellement, le système binaire est un cas simple d'un SME ou l'on peut avoir que deux états (fonctionnement parfait ou panne complète).

Il y a plusieurs situations où le système peut être considéré comme un SME. Tout système constitué de plusieurs unités ayant un effet cumulatif sur le système en entier peut être considéré comme un SME. De ce fait, le niveau de performance d'un tel système dépend de la disponibilité de ses unités, une fois que différent nombre de disponibilité des unités peuvent fournir différents niveaux de performance de leurs tâches.

Le niveau de performance des éléments composant le système peut également varier résultant d'une détérioration (fatigue, pannes partielles) ou à cause des conditions ambiantes variables. Les défaillances des éléments peuvent entraîner la dégradation de la performance du SME entier.

Le niveau de performance des éléments peut varier du fonctionnement parfait vers la panne totale. Les défaillances qui peuvent entraîner la décroissance de la performance dans un élément sont appelées pannes partielles. Après une panne partielle, les éléments continuent de fonctionner à des niveaux de performances réduites, et après une panne complète les éléments sont complètement incapables d'assurer leurs tâches désignées.

Exemple III- 3 :

Dans les systèmes électro énergétiques constitués de système de production et de transport d'énergie, chaque unité de production peut fonctionner suivants différents niveaux de performances (capacité de production). Les unités de production sont constituées de plusieurs composants complexes. Les défaillances de ces différents composants peuvent entraîner à des situations pour lesquelles l'unité de production continue de fonctionner, mais avec une capacité réduite. Ceci peut se produire durant des pannes de plusieurs éléments auxiliaires, tels que les pompes d'eau, les ventilateurs, etc. Par exemple R. Billinton et Allan ont étudiés une unité de

production de 50 MW suivant trois états. Les niveaux de performances (capacité de production) correspondant à ces états et les probabilités de ces états sont décrits sur le tableau. (III-2) :

Tableau. (III-2) : Distribution de puissance d'un générateur de 50MW

<i>Nombre d'état</i>	<i>Capacité de production (MW)</i>	<i>Probabilité</i>
<i>1</i>	<i>50</i>	<i>0.960</i>
<i>2</i>	<i>30</i>	<i>0.033</i>
<i>3</i>	<i>0</i>	<i>0.007</i>

III.4.2 Performances d'un SME :

Dans le but d'analyser le comportement du SME on doit savoir les caractéristiques de ses éléments. Tout élément j d'un système peut avoir k_j différents états correspondants aux niveaux de performances, représentées par un ensemble $\mathbf{g}_j = \{g_{j0}, g_{j1}, \dots, g_{jk_j-1}\}$, avec g_{ji} le niveau de performance de l'élément j dans l'état i tel que $i \in \{0, 1, \dots, k_j - 1\}$.

Le niveau de performance G_j de l'élément j à un instant quelconque est une variable aléatoire qui prend ses valeurs à partir de $\mathbf{g}_j$; $G_j \in \mathbf{g}_j$. Dans certains cas, la performance de l'élément ne peut être mesurée par une simple valeur ; des outils mathématiques plus complexes sont demandés, souvent des vecteurs. Dans ces cas, la performance de l'élément est définie comme un vecteur aléatoire.

Les probabilités associées avec ces différents états (niveau de performance) de l'élément j du système peuvent être représenté par un ensemble :

$$\mathbf{p}_j = \{p_{j0}, p_{j1}, \dots, p_{jk_j-1}\} \quad (\text{III-48})$$

Avec

$$p_{ji} = \text{Prob}\{G_j = g_{ji}\} \quad (\text{III-49})$$

Comme dans le cas des systèmes binaires, les probabilités des états des éléments d'un SME peuvent être interprétées comme des probabilités des états durant un temps de mission fixé, les états des probabilités pour un temps spécifié, ou des disponibilités (dans le cas des éléments binaires). Les indices de fiabilités correspondent aux indices utilisés pour exprimer les états des probabilités de ses éléments.

Notons que depuis que les états des éléments qui composent le groupe complet des événements mutuellement exclusifs (cela veut dire que l'élément peut toujours être dans un et un seul état parmi k_j états)

$$\sum_{i=0}^{k_j-1} p_{ji} = 1 \quad (\text{III-50})$$

L'expression définissant la fonction pour une variable aléatoire discrète G_j et la collection des paires $g_{ji}, p_{ji}, i = 0, 1, \dots, k_j - 1$, détermine complètement la distribution des probabilités des performances (PD) de l'élément j .

Observons que le comportement des éléments binaires (éléments avec seulement des défaillances totales) peut également être représenté par une distribution de performances (niveau de performance correspondant à un état complètement fonctionnel), g^* est la probabilité que l'élément soit dans un état complètement fonctionnel. Considérons que le niveau de performance d'un élément en état de défaillance complète est zéro, on peut obtenir sa distribution de performance comme suit : $g_i = \{0, g^*\}, p_i = \{1 - p, p\}$ (III-51)

La distribution de performance peut être représentée graphiquement sous forme de courbe cumulative. Dans cette représentation, chaque valeur de performance x correspond à une probabilité que l'élément fourni un niveau de performance qui n'est pas inférieure à un certain niveau :

$$\text{Prob}\{G_j \geq x\}. \quad (\text{III-52})$$

Pour comparer les graphes représentant la distribution de performance des éléments binaires i et j et celui avec cinq états sont représentés sur la figure suivante :

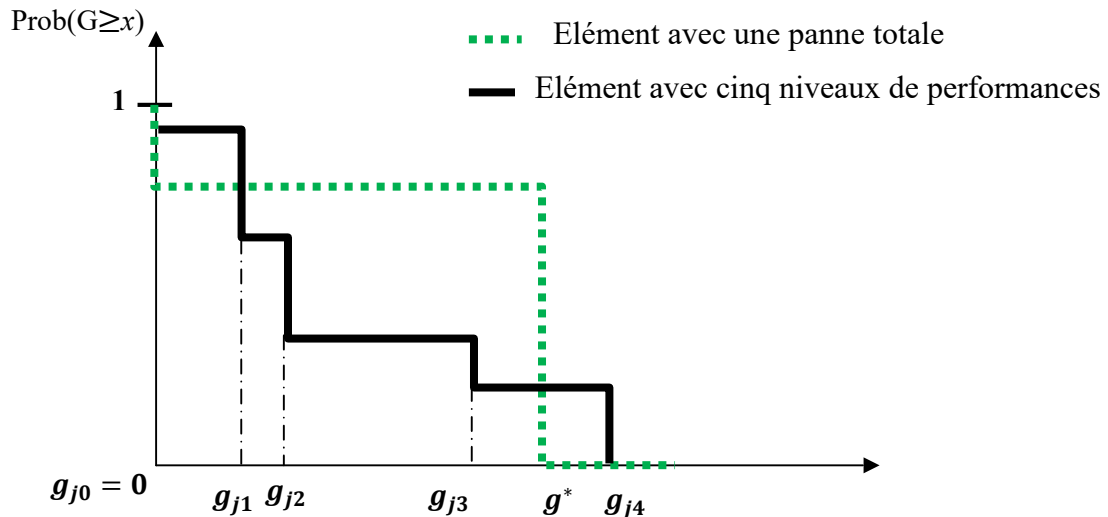


Fig. (III-7) : Comparaison entre un système binaire et un système multi états

Observons que la performance cumulative discrète est toujours une fonction décroissante par paliers.

Lorsque le SME est constitué de n éléments, ses niveaux de performances sont déterminés de manière triviale par les niveaux de performances de ses éléments. A chaque moment, les éléments du système ont des niveaux de performances correspondants à leurs états.

L'état du système entier est déterminé par les états de ses éléments.

Considérons que le système entier possède K différents états et que g_i est le niveau de performance du système entier à l'état i ($i \in \{0, \dots, K-1\}$).

Le niveau de performance de SME est une variation aléatoire qui peut prendre des valeurs de l'ensemble $\{g_1, \dots, g_{K-1}\}$.

$$\text{Soit } L^n = \{g_{10}, \dots, g_{1k_1-1}\} \times \{g_{20}, \dots, g_{2k_2-1}\} \times \dots \times \{g_{n0}, \dots, g_{nk_n-1}\} \quad (\text{III-53})$$

L'espace des combinaisons des niveaux de performances possibles pour tous les éléments des systèmes est $M = \{g_0, \dots, g_{K-1}\}$ (III-54)

L'espace des valeurs possibles des niveaux de performances pour le système entier est caractérisé par la transformée $\phi(G_1, \dots, G_n): L^n \rightarrow M$, elle transforme l'espace des niveaux de performances des éléments en un espace des niveaux de performance du système, elle est appelée fonction structure du système. Notons que la fonction structure du SME est une extension de la fonction structure binaire. La seule différence réside dans la définition des espaces d'états : la fonction structure complexe binaire est transformée $\{0, 1\}^n \rightarrow \{0, 1\}$, alors que le SME traite des espaces beaucoup plus complexes.

L'ensemble de performances aléatoires des éléments $\{G_1, \dots, G_n\}$ joue le même rôle dans le SME que les éléments du vecteur d'état dans les systèmes binaires.

Maintenant, on peut définir un modèle générique du SME. Ce modèle englobe les fonctions probabilité de masse des performances pour tous les éléments du système et la fonction structure du système :

$$g_j, p_j$$

Est associé :

$$\phi(G_1, \dots, G_n)$$

On doit noter que ce modèle simple du SME, convient de manière satisfaisante à plusieurs applications, il ne parvient pas à décrire des caractéristiques importantes des SME, tels que le temps moyen de bon fonctionnement avant la première défaillance MTTF, nombre moyen de défaillances durant la période de fonctionnement, etc. L'analyse de ces caractéristiques exige l'application de l'approche du processus aléatoire qui ne fera pas partie de cette thèse.

Peu importe la façon avec laquelle la structure de la fonction est définie. Elle peut être représentée dans un tableau, sous forme analytique, ou décrite par un algorithme pour déterminer sans ambiguïté la performance G du système pour un ensemble donné $\{G_1, \dots, G_n\}$.

III.4.3 Fonction d'acceptabilité :

Le comportement d'un SME est caractérisé par son évolution dans l'espace d'état. L'ensemble entier des états possibles du système peut être divisé en deux ensembles disjoints correspondant au fonctionnement acceptable et non acceptable. L'entrée du système dans le sous-ensemble des états inacceptable constitue une défaillance.

La fiabilité du SME peut être définie comme la capacité du maintien dans les états acceptables durant la période de fonctionnement.

Par conséquent, le fonctionnement du système est caractérisé par sa performance résultante G , les états acceptables dépendent de la valeur de cet index. Dans quelques cas, cette dépendance peut être exprimée par une fonction d'acceptabilité binaire $F(G)$ qui peut prendre la valeur 1 si et seulement si le fonctionnement du SME est acceptable. Ceci se produit lorsque l'efficacité de fonctionnement du système est complètement déterminée par son état interne (par exemple, seulement les états où le réseau préserve ses connectivités dans un état acceptable). Dans de tels cas, un ensemble particulier des états d'un SME présente un intérêt pour le consommateur.

Souvent, les états inacceptables (correspondant à $F(G)=0$) sont interprétés comme des états de défaillance du système, qui une fois sont atteints, implique que le système doit être réparé ou isolé.

L'ensemble des états acceptables peuvent également être définies lorsque le niveau de fonctionnalité présente un intérêt à un point particulier du temps (tels que la fin de la période de garantie).

Bien plus souvent, l'acceptabilité des états du système dépendent de la relation entre les performances du SME et le niveau désiré de cette performance (demande) qui est déterminée en dehors du système. Lorsque la demande est variable, la période d'opération « T » du SME est souvent divisée en « M » intervalles T_m ($1 \leq m \leq M$) où un niveau de demande constant w_m est affecté à chaque intervalle m .

Dans ce cas, la demande W peut être représentée par une variable aléatoire qui peut prendre des valeurs discrètes de l'ensemble $w = \{w_1, \dots, w_m\}$. La fonction de la demande variable peut être représentée (en analogie avec la pmf de la performance du SME) par deux vecteurs (w, q) , lorsque $q = \{q_1, \dots, q_M\}$ est le vecteur des probabilités correspondant au niveau de la demande $q_j = \text{Prob}\{W = w_j\}$. (III-55)

La relation désirée entre la performance du système et la demande peut également être exprimée par une fonction d'acceptabilité $F(G, W)$. Les états acceptables du système correspondent à $F(G, W)=1$ et les états inacceptables correspondent à $F(G, W)=0$. Cette équation définit le critère de défaillance du SME.

III.4.4 Indices de performances des SME et leurs évaluations en utilisant l'UGF

Pour caractériser le comportement des SME numériquement à partir d'une fiabilité et d'un point de vue performance, on doit déterminer les indices de performance du SME. Certaines de ces indices sont basées sur un examen de l'évolution du système dans le domaine temporel. Dans ce cas, la relation entre la performance du système de production et la demande représentée par les deux processus stochastiques correspondants doivent être étudiées. Cette étude n'est pas dans le cadre de cette thèse puisque la technique UGF permet de déterminer que les mesures fondées sur les distributions du rendement.

Lorsque le système est considéré dans un l'instant donné ou dans un état d'équilibre ou tout simplement en régime permanent (lorsque sa distribution de performances résultante ne dépend pas du temps), son comportement est déterminé par son taux de performance représentée comme une variable aléatoire G . Considérons plusieurs indices de performance de sortie du système qui peuvent caractériser un état quelconque du système.

Le premier indice naturel de la performance d'un système est son taux de performance de sortie G . Cet indice peut être obtenu en appliquant la fonction de structure du système suivant le taux de performance des éléments du système. Chaque état spécifique du système j est caractérisé par le taux de performance associé $G = g_j$ du système, qui détermine le comportement du système dans l'état donné, mais ne reflète pas l'acceptabilité de l'état du point de vue du consommateur.

Afin de représenter l'acceptabilité d'état du système, nous pouvons utiliser la fonction $F(G)$ ou $F(G, W)$ défini précédemment. La fonction de l'acceptabilité divise l'ensemble des états possibles du système en deux sous-ensembles disjoints (états acceptables et inacceptables). Par conséquent, si le comportement du système est représenté par une fonction d'acceptabilité, le système dans son ensemble peut être considéré comme binaire.

Dans de nombreux cas pratiques, il ne suffit pas de savoir si l'état est acceptable ou pas. Les dommages causés par un état inacceptable peuvent être une fonction de déviation du taux de performance du système à partir d'une demande. Habituellement, l'écart de performance à un sens unique (écart de performance par rapport à une demande lorsque la demande n'est pas satisfaite) est intéressant. Par exemple, la capacité de production cumulée de générateurs électriques disponibles devrait dépasser la demande. Dans ce cas, l'écart de performance possible

(Déficit de performance) prend la forme :

$$D^-(G, W) = \max (W - G, 0) \quad (III-56)$$

Lorsque la performance du système ne doit pas excéder la demande (par exemple, le temps nécessaire pour exécuter la tâche d'assemblage dans une ligne d'assemblage doit être inférieur à une valeur maximale admissible, afin de maintenir la productivité souhaitée), la redondance des performances est utilisée en tant que mesure de l'écart de performance :

$$D^+(G, W) = \max (G - W, 0) \quad (III-57)$$

La prévision ou l'espérance d'acceptabilité du système $E(F(G, W))$ détermine la fiabilité ou la disponibilité du système est la probabilité que le SME soit dans un des états acceptables :

$$Prob\{F(G, W) = 1\} \quad (III-58)$$

Selon le sens du système et les probabilités d'état des éléments, elle peut être interprétée comme $R(t)$, la fiabilité du SME à un instant spécifié t , ou que $R(T)$, la fiabilité du SME pendant un temps T fixe durant sa mission (pour les systèmes non réparables), ou la disponibilité instantanée $A(t)$ ou l'état d'équilibre disponibilité A (pour les systèmes réparables).

La déviation de performance prévisionnelle $E(D^-(G, W))$ ou $E(D^+(G, W))$ peut être interprétée comme Δ_t , la déviation de la performance prévisionnelle instantanée à l'instant t , ou la moyenne de la déviation de performance en régime permanent Δ .

Dans certains cas, nous avons besoin de connaître la performance conditionnelle prévisionnelle du SME. Cette mesure représente la performance moyenne du SME étant donné qu'elle soit dans des états acceptables. Afin de déterminer la performance conditionnelle prévisionnelle $\tilde{\epsilon}$, on doit définir la fonction auxiliaire comme $\tilde{G}(G, W) = GF(G, W)$. L'indice $\tilde{\epsilon}$ peut être déterminé comme suit :

$$\tilde{\epsilon} = \frac{E(\tilde{G})}{Prob\{F(G, W) = 1\}} = \frac{E(GF(G, W))}{E(F(G, W))} \quad (III-59)$$

Ayant la fonction de probabilité de masse de la performance G de sortie du SME aléatoire et la fonction de la demande W sous forme de fonctions-u $U_{MSS}(z)$ et $u_w(z)$, on peut obtenir les fonctions-u représentant la fonction probabilité de masse des fonctions aléatoires $F(G, W)$, $\tilde{G}(G, W)$, $D^-(G, W)$ ou $D^+(G, W)$ en utilisant les opérateurs de compositions suivant $U_{MSS}(z)$ et $u_w(z)$

$$U_F(z) = U_{MSS}(z) \otimes_F u_w(z) \quad (III-60)$$

$$U_{\tilde{G}}(z) = U_{MSS}(z) \otimes_{\tilde{G}} u_w(z) \quad (III-61)$$

$$U_D(z) = U_{MSS}(z) \otimes_D u_w(z) \quad (III-62)$$

Une fois que les valeurs prévisionnelles des fonctions ***G, F, D et $\tilde{G}$*** sont égales aux dérivées des fonctions-u correspondantes ***$U_{MSS}(z), U_F(z), U_D(z)$ et $U_{\tilde{G}}(z)$*** pour $z=1$, la performance du SME (MSS) peut s'obtenir par :

$$E(G) = U'_{MSS}(1) \quad (III-63)$$

$$E(F(G, W)) = U'_F(1) \quad (III-64)$$

$$E(D(G, W)) = U'_D(1) \quad (III-65)$$

$$E(\tilde{G}(G, F))/E(F(G, W)) = U'_{\tilde{G}}(1)/U'_F(1) \quad (III-66)$$

III.5 Conclusion :

La théorie d'Ushakov permet l'évaluation de la fiabilité d'un système qui peut fonctionner en dégradation donc c'est une théorie plus générale comparée à la théorie de fiabilité classique, elle peut être étendue vers d'autres domaines tels que les systèmes informatiques, hydraulique, de téléphone ou nucléaire. Le chapitre suivant se base sur la sureté de fonctionnement des systèmes.

Chapitre IV

IV.1.Introduction :

L'étude de la fiabilité et des mécanismes de défaillance dans la mise au point d'un nouveau produit, que ce soit en électrotechnique ou dans n'importe quel domaine, est une étape indispensable pour pouvoir passer du stade du laboratoire aux applications. La fiabilité dans les systèmes de production est une question clé qui est en train de prendre une importance considérable au moins pour trois raisons :

- Les systèmes de production d'énergie électrique sont des dispositifs complets et complexes pour lesquels l'étude de leur fiabilité est critique. La complexité des systèmes multiplie les risques de leur défaillance et rend impérative les études de fiabilité.
- Leur large diffusion dans les grands systèmes leur confère des rôles à risques : Ils ont un impact direct sur la sécurité, où dans certains cas la vie humaine est en jeu.
- Ils sont un facteur du développement économique.

Ce chapitre présente la sûreté de fonctionnement des systèmes où les principaux termes seront évoqués.

IV.2 La sûreté de fonctionnement des systèmes[79] :

Le terme "sûreté de fonctionnement" (SdF) est un terme générique qui englobe plusieurs concepts :

- La fiabilité : assurer la continuité de service ;
- La maintenabilité : la capacité d'être réparable ;
- La disponibilité : être prêt à l'emploi ;
- La sécurité : non occurrence d'événements catastrophiques d'un système ou d'un produit ;

Un des grands mérites du concept de SdF est de s'être attaché à l'intégration des méthodes et des techniques destinées à garantir l'aptitude d'un système à délivrer un service dans lequel on puisse avoir confiance et à s'assurer que cette confiance soit justifiée. La SdF d'un système est précisément la propriété qui permet à ses utilisateurs de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre. Cette notion de confiance est fondamentale pour les systèmes matériel/logiciel qui contiennent des erreurs souvent introduites lors des phases de conception. La figure (IV-1) représente l'arbre de la SdF d'un système regroupant trois classes :

- Les entraves sont les circonstances indésirables mais non inattendues.
- Les moyens correspondent aux méthodes et techniques permettant de garantir l'aptitude du système à délivrer un service conforme à l'accomplissement de sa fonction.
- Les attributs expriment les performances attendues du système.

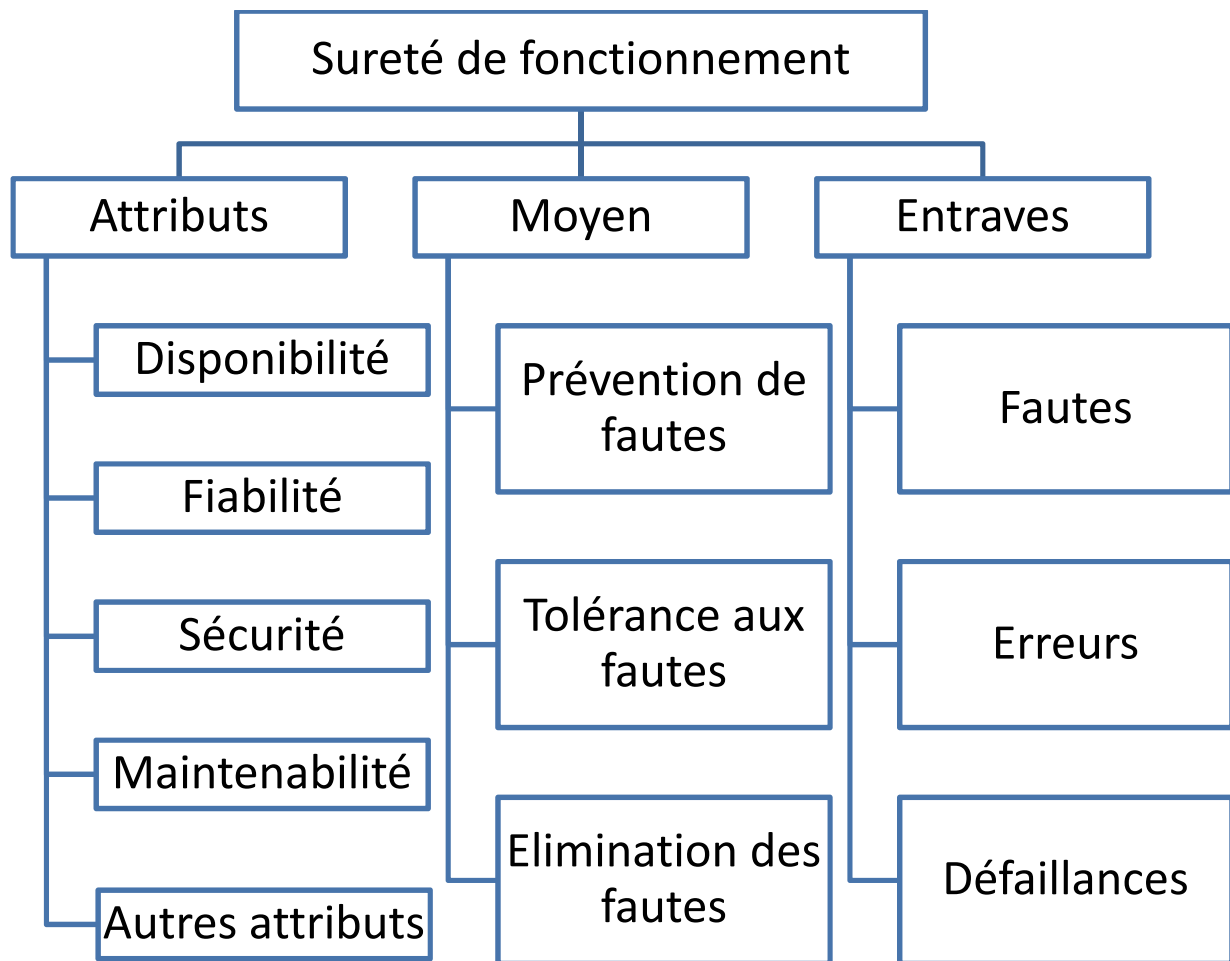


Fig. (IV-1) : Hiérarchie de la sûreté de fonctionnement des systèmes

Selon la norme CEI 50 191, la sûreté de fonctionnement recouvre les caractéristiques de fiabilité, maintenabilité et disponibilité. La SdF est aussi définie comme la science des défaillances : elle inclut alors leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise [22].

IV.3 Éléments constitutifs de la sûreté de fonctionnement des systèmes :

IV.3.1 Fiabilité :

Le terme fiabilité a été admis en 1962 par l'Académie de Sciences selon la définition :

« Grandeur caractérisant la sécurité du fonctionnement, ou mesure de la probabilité de fonctionnement d'un appareillage selon les normes prescrites ». Plus tard, dans les années 70, le Comité Électrotechnique International a proposé la définition suivante :

"Caractéristique d'un dispositif, exprimée par la fiabilité, qu'il accomplisse une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée ".

La définition de la fiabilité par L'Oxford English Dictionary" est la qualité d'une entité sur laquelle on peut compter à un instant donné. En anglais « reliability » vient de « to rely on » signifiant « compter sur, avoir confiance en... », Alors que « fiabilité » en français vient effectivement du mot « fiable », c'est-à-dire en qui on peut se fier.

Cette aptitude se mesure généralement par la probabilité qu'une entité E réalise une fonction requise, dans des conditions données pendant une période de temps donnée $[0, t]$:

$$R(t) = \text{Prob} \{E \text{ non défaillante sur } [0, t]\} \quad (\text{IV-1})$$

L'aptitude contraire est la probabilité de défaillance de l'entité E , quelquefois nommée «défiabilité» et notée : $\overline{R}(t) = 1 - R(t)$ (IV.2)

Il est important de bien distinguer les différentes évaluations de cette probabilité en fonction des considérations suivantes :

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

IV.3.2 Disponibilité :

La disponibilité est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné. Elle est donc généralement mesurée par la probabilité qu'une entité E soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant t donné :

$$A(t) = \text{Prob}\{E \text{ non défaillante à l'instant } t\} \quad (\text{IV.3})$$

L'aptitude contraire « indisponibilité » :

$$\overline{A}(t) = 1 - A(t) \quad (\text{IV.4})$$

IV.3.3Maintenabilité :

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

$$M(t) = \text{Prob} \{E \text{ réparée sur } [0, t]\} \quad (\text{IV.5})$$

$$\text{L'aptitude contraire « non maintenabilité » : } \overline{M}(t) = 1 - M(t) \quad (\text{IV.6})$$

IV.3.4 Sécurité :

En fait, le concept de sécurité est probablement le plus difficile à définir et à évaluer car il englobe des aspects très divers. Cependant, la norme sur la sécurité des machines donne cette définition : « Aptitude d'une machine à accomplir sa fonction, à être transportée, installée, mise au point, entretenue, démontée et mise en service dans les conditions d'utilisation normales spécifiées dans la notice d'instructions, sans causer de lésions ou d'atteinte à la santé ».

IV.3.5 Autres éléments :

Il existe d'autres éléments qui constituent la sûreté de fonctionnement comme la durabilité et la testabilité

IV.4 Défaillance :

On dira qu'une entité connaît une défaillance lorsqu'elle n'est plus en mesure de remplir sa (ou ses) fonction(s). Par extension, on considère parfois qu'il y a une défaillance lorsqu'il y a altération de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise.

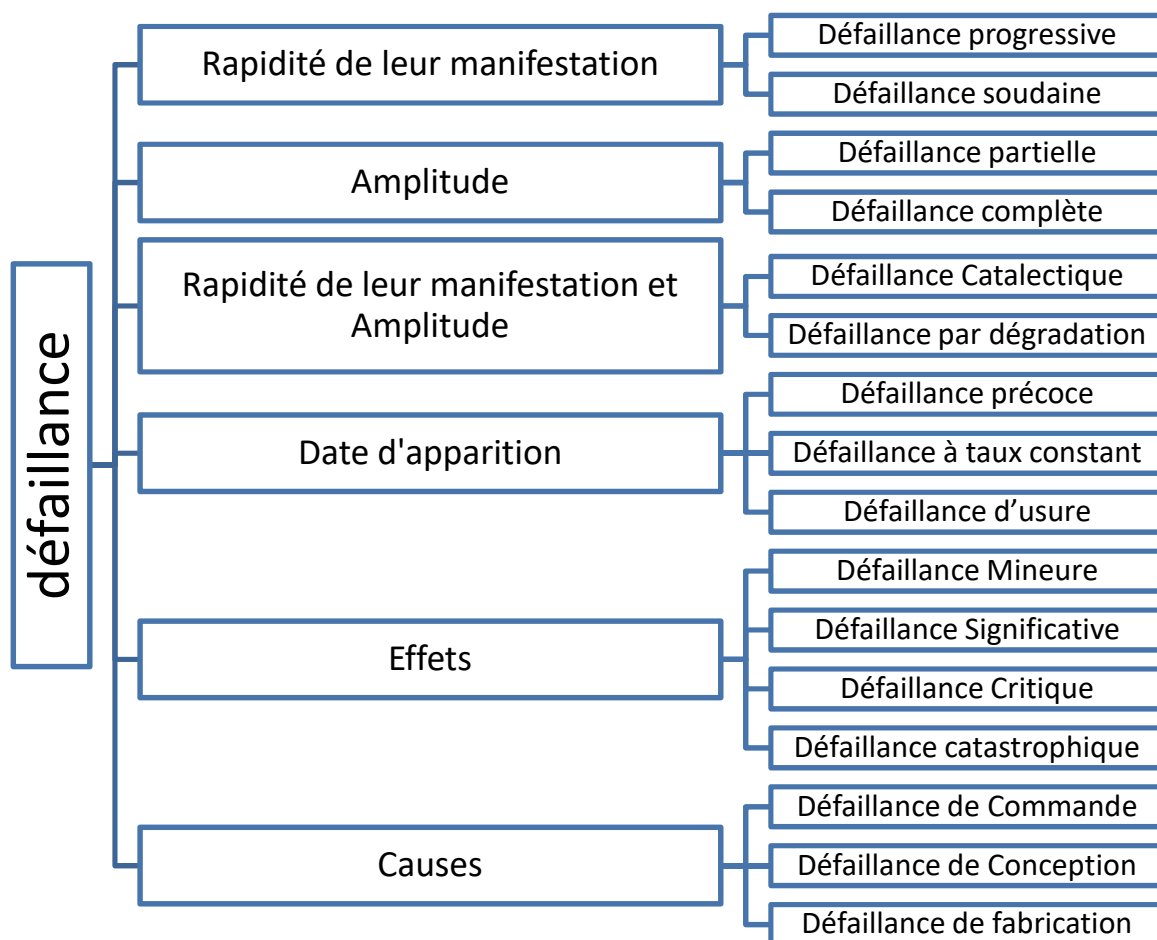


Fig.(IV-2) : Hiérarchie de défaillance

IV.4.1 Taux de défaillance et de réparation instantanés :

IV.4.1.1 Taux de défaillance instantané :

Le taux instantané de défaillance, $\lambda(t)$, est une des caractéristiques de la fiabilité. La valeur $\lambda(t)dt$ représente la probabilité conditionnelle d'avoir une défaillance dans l'intervalle de temps $[t, t+dt]$, sachant qu'il n'y a pas eu de défaillance dans l'intervalle de temps $[0, t]$.

Ainsi, en appliquant le théorème des probabilités conditionnelles, puis le théorème des probabilités totales, $\lambda(t)$ s'écrit :

$$\lambda(t)dt = \frac{\text{Prob \{défaillant sur } [t, t+dt] \text{ sans défaillance sur } [0, t]\}}{\text{Prob \{non défaillant sur } [0, t]\}} \quad (\text{IV.7})$$

$$\lambda(t)dt = \frac{\text{Prob \{défaillant sur } [0, t+dt]\} - \text{Prob \{défaillant sur } [0, t]\}}{\text{Prob \{non défaillant sur } [0, t]\}} \quad (\text{IV.8})$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{IV.9})$$

IV.4.1.2 Taux de réparation instantané :

La valeur $\mu(t)dt$ représente la probabilité pour qu'une entité n'étant pas réparée à l'instant t le soit à l'instant $t+dt$. Le taux de réparation $\mu(t)$ s'écrit alors :

$$\mu(t) = \frac{1}{1-M(t)} \cdot \frac{dM(t)}{dt} \quad (\text{IV.10})$$

IV.4.2 Les mécanismes de défaillance :

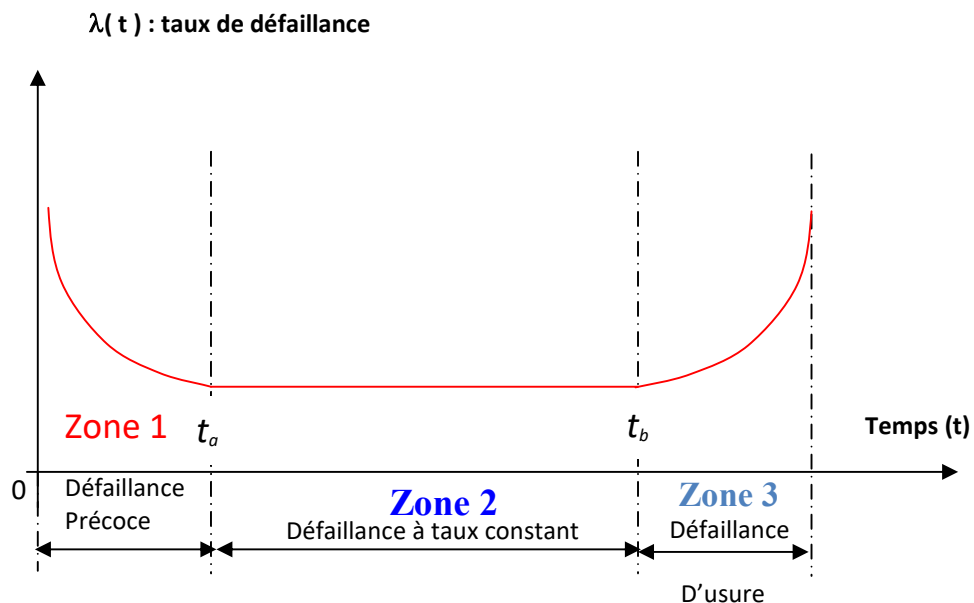


Fig. (IV-3) : Taux de défaillance en fonction du temps (courbe en baignoire)

IV.4.2.1 Défaillance précoces :

Les défaillances précoces proviennent soit d'erreurs de conception (pour des matériels de conception récente : composants mal utilisés, etc.), soit de composants excessivement fragiles ou insuffisamment prêts, soit de certaines erreurs de fabrication. Durant cette période de défaillances précoces et lorsqu'un dispositif n'a pas encore présenté de défaillance, la probabilité de voir une défaillance apparaître diminue.

On améliore donc un lot de dispositifs en le soumettant à un essai de durées couvrant les t_a premières heures et en ne laissant subsister que les dispositifs qui ont survécu jusqu'à t_a . Cette période peut durer de quelques dizaines à quelques centaines d'heures pour les composants.

IV.4.2.2 Défaillances à taux constant :

Ces défaillances apparaissent entre t_a et t_b ; cette période est souvent appelée vie utile de l'appareil. Le fait que le taux $\lambda(t)$ soit constant (λ_0) entre t_a et t_b permet des calculs de fiabilité très faciles et l'emploi de méthodes simples pour l'estimation de λ_0 . Il est évident que l'on n'améliore pas la fiabilité d'un appareil dans cet intervalle par un essai de fonctionnement préalable, puisque λ reste le même; on ne fait qu'en diminuer la vie utile. La plupart des défaillances à taux constant proviennent de l'existence simultanée de mécanismes internes de dégradation et d'erreurs de fabrication. L'existence de nombreux mécanismes à vitesses d'évolution très dispersées et le mélange de nombreux lots de production accentuent l'aspect aléatoire de l'apparition des défaillances.

IV.4.2.3 Défaillances d'usure (systématiques) :

Les défaillances systématiques apparaissent au-delà de t_b . Contrairement aux défaillances précédentes qu'il convient d'attribuer à des erreurs de fabrication, c'est-à-dire à des causes multiples, la cause des défaillances systématiques peut en général être détectée par le fabricant. On ne peut reculer l'époque t_b sans modifier la technologie interne du composant.

En tout état de cause, après le temps t_b , le système se dégrade et il y a souvent intérêt à éliminer toutes les pièces défaillantes pour les remplacer par des neuves.

IV.5 Métrique de la sûreté de fonctionnement :**IV.5.1 Temps moyen de fiabilité :**

MTTF : (Mean Time To Failure)

Est la durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (IV.11)$$

MTTR : (Mean Time To Repair)

Est la durée moyenne de réparation.

$$MTTR = \int_0^{\infty} (1 - M(t)) dt \quad (IV.12)$$

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

MDT (Mean Down Time) est la durée moyenne d'indisponibilité après défaillance

MTBF (Mean Time Between Failure) est la durée moyenne entre deux défaillances :

$$MTBF = MDT + MUT \quad (IV.13)$$

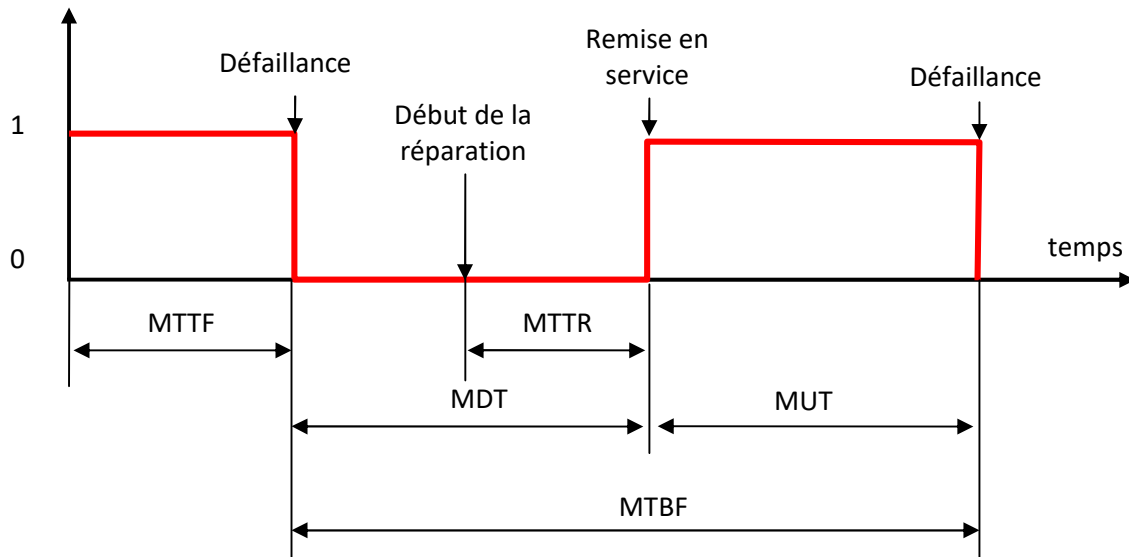


Fig. (IV-4) : Durées moyennes associées à la sûreté de fonctionnement

IV.5.2 Théorie de fiabilité :

On considère une entité pouvant se trouver dans différents états. Cet ensemble d'états, noté E , se décompose en deux sous-ensembles formant une partition :

Le sous-ensemble M des états de marche (y compris le fonctionnement dégradé)

Le sous-ensemble D des états de défaillance.

Considérons T la variable aléatoire qui représente le temps écoulé entre la mise en service d'une entité et la première défaillance observée.

La fiabilité à l'instant t est la probabilité qu'une entité E soit non défaillante sur la durée $[0, t]$.

On appelle également fiabilité, la probabilité associée $R(t)$ définie par :

$$R(t) = \text{Prob} \{t < T\} \quad (IV.14)$$

Pour compléter l'approche théorique de la notion de fiabilité, il est nécessaire de définir les notions suivantes :

La fonction $F(t)$ représente la fonction de répartition de la variable aléatoire T . Elle équivaut à la dé fiabilité $R(t)$ (la probabilité de défaillance du système) ou à la probabilité complémentaire à 1 de la fiabilité $\overline{R}(t)$ définie par :

$$F(t) = \text{Prob}\{t \geq T\} = 1 - R(t) = \overline{R(t)} \quad (\text{IV.15})$$

La fonction $f(t)$ désigne la densité de probabilité de t et elle est donnée par :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{IV.16})$$

IV.6 Méthodologies dynamiques pour l'étude de la fiabilité d'un système :

IV.6.1 Chaines de Markov :

Les chaines de Markov - ou Méthode de l'Espace des Etats (MEE) - ont été développées dans les années 1950 pour l'analyse de la fiabilité des systèmes réparables. Cette méthode consiste à représenter le fonctionnement d'un système par un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états de fonctionnement et de panne. Un support graphique (le graphe des états) permet de visualiser les différents états d'un système qui sont représentées par des cercles et relier entre eux par des arcs orientés qui correspondent aux transitions (pannes et réparations) entre états. Pour un système à « n » composants, si chaque composant a deux états (fonctionnement et panne), le nombre maximum d'états est « $2n$ ». Un modèle Markovien est présenté sur **Fig. (IV-5)**.

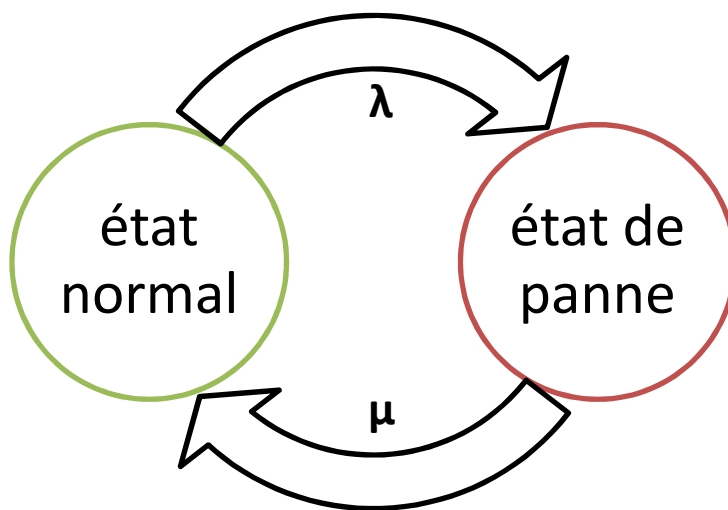


Fig. (IV-5) :Modèle de Markov

IV.6.2 Réseaux Bayésiens :

Le problème de la modélisation et de l'analyse de la fiabilité dynamique se pose dès lors que l'état de fonctionnement du système et l'état des variables fonctionnelles du système s'influencent mutuellement.

Les Réseaux Bayésiens Dynamiques (DBN) constituent un outil mathématique intéressant pour modéliser ce problème en permettant une représentation graphique des processus stochastiques. Ces DBN sont utilisés pour représenter l'interaction complexe entre

l'état du système et l'état des variables, d'une part, et le processus et la perturbation externe, d'autre part.

Si l'intérêt de l'approche est évident, son application à des problèmes physiques réels reste difficile car elle ne permet pas de décrire simplement les états de fonctionnement et de dysfonctionnement du système.

IV.6.3 Réseaux de Petri :

Les réseaux de Petri ont été inventés en 1962 par Carl Adam Petri. Ils sont basés sur la théorie des automates. Ces réseaux permettent de représenter le comportement des systèmes dans les conditions de fonctionnement normal ainsi que leur comportement en cas de défaillance de leurs composants

IV.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présentés les différentes structures des systèmes, puis on a cité les composants de la sûreté de fonctionnement et les mécanismes de défaillance. On a cité également les méthodologies dynamiques pour déterminer la fiabilité d'un système complexe. Le prochain chapitre s'intéressera aux méthodes d'optimisation.

Chapitre V

V. Introduction :

Dans les vingt dernières années, on a vu que l'ensemble des techniques mathématiques et algorithmiques de résolution de problèmes de base se développent considérablement. Les progrès significatifs des techniques d'évaluation associés à l'augmentation considérable de la capacité de calcul des machines permettent aujourd'hui de traiter des problèmes de plus en plus complexes, avec des tailles des données de plus en plus importantes. L'une des conséquences de ceci est que la construction même des modèles, de façon fiable et efficace, n'est plus un problème secondaire mais elle est devenue un problème central.

En outre, d'autres problèmes apparaissent, aussi bien dans le monde des techniques numériques que dans les méthodes de simulation. Du point de vue des premières, la résolution numérique de systèmes d'équations de grande taille (millions ou milliards d'équations et d'inconnues, voire une infinité) n'est pas une tâche aisée. En ce qui concerne la simulation, la prise en charge de la rareté de certains événements est un problème non trivial.

V.1 Les problèmes d'optimisation

La résolution des problèmes d'optimisation est utilisée dans un grand nombre de domaines [23, 24, 25]. A l'origine, ce sont les militaires qui se sont intéressés à ces questions au cours de la seconde guerre mondiale. C'était en fait un nouveau domaine de recherche en mathématiques appliquées qui a vu le jour avec la recherche opérationnelle. Le développement de l'informatique a ouvert de nouveaux horizons à la résolution de ces problèmes, et a permis un élargissement massif des champs d'application de ces techniques.

La résolution d'un problème d'optimisation est un problème complexe, car de nombreux facteurs interviennent et interagissent entre eux. Néanmoins, l'optimisation appliquée au domaine d'électrotechnique permet de résoudre des problèmes qui étaient insolubles auparavant et aboutit souvent à des solutions originales.

Dans ce chapitre, nous présentons différentes méthodes d'optimisation. L'ensemble de ces méthodes est tellement vaste qu'il est impossible de tout exposer. Ainsi, nous présentons les principales méthodes d'optimisation.

V.2 Les éléments d'optimisation

L'optimisation est une des mathématiques consacré à l'étude du (ou des) minimum(s)/maximum(s) d'une fonction à une ou plusieurs variables sur un certain domaine de définition, de l'étude de leur existence à leur détermination, en général par la mise en œuvre d'un algorithme et par suite un programme. Pour mener à bien une opération, plusieurs

éléments sont indispensables et conditionnent la solution trouvée. La figure suivante présente les quatre éléments essentiels à la résolution d'un problème d'optimisation.

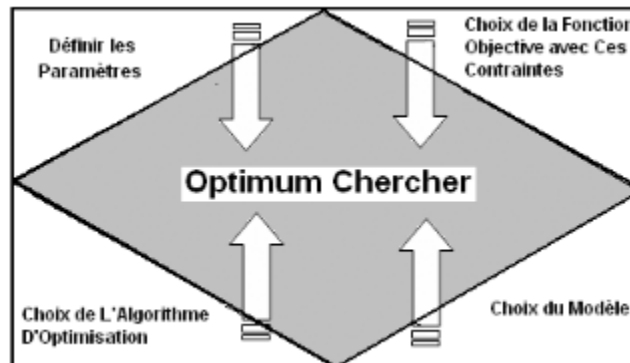


Fig. (V-1) : Eléments indispensable d'optimisation

En général, un grand nombre de paramètres sont indispensables, il faut être capable de définir les paramètres utiles à l'optimisation. Certains paramètres ont une influence sur la fonction choisie, d'autres pas. Etant donné le coût des simulations, seul les paramètres influents sont à retenir :

- **Une fonction objective :**

Définie l'objectif à atteindre. La définition de cette fonction est en fait un problème délicat. Car le problème est formulé en un problème d'optimisation par l'intermédiaire de la fonction objective. C'est elle qui est au centre de l'optimisation, c'est donc sur elle que dépend la pertinence de la solution.

- **Un modèle :**

Précis, robuste et malléable du système étudié est indispensable. Ce modèle doit être utilisable sur un domaine d'étude le plus large possible.

- **Un algorithme d'optimisation :**

Permet de trouver la solution. Différentes méthodes d'optimisation existent et en sont présentées.

V.3 L'optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire [25,26] occupe une place très importante en recherche opérationnelle, en mathématiques discrètes et en informatique. Son importance se justifie d'une part par la grande difficulté des problèmes d'optimisation et d'autre part par de nombreuses applications pratiques pouvant être formulées sous la forme d'un problème d'optimisation combinatoire. Bien que les problèmes d'optimisation combinatoire soient souvent faciles à définir, ils sont généralement difficiles à résoudre. En effet, la plupart de ces

problèmes appartiennent à la classe des problèmes *NP-difficiles* et ne possèdent donc pas à ce jour de solution algorithmique efficace valable pour toutes les données.

L'optimisation combinatoire consiste à minimiser (ou maximiser) une fonction souvent appelée fonction coût, d'une ou plusieurs variables soumises à des contraintes. Le sujet de l'optimisation combinatoire dans un domaine discret. Il faut trouver parmi toutes les possibilités, souvent en nombre fini, la possibilité optimale. Ceci paraît facile mais devient infaisable dès que la taille du problème est suffisamment grande. La taille pour laquelle la recherche d'un optimum devient infaisable est petite, très souvent plus petite que la taille des problèmes pratiques. En général, la difficulté d'un problème grandit très vite avec le nombre des variables. Il n'est pas alors faisable d'examiner toutes les possibilités.

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

- Méthodes exactes.
- Méthodes approchées.
- Les méthodes exactes fournissent systématiquement une solution (optimale) au problème traité si une telle solution existe. Dans le cas contraire, ce type de méthode permet d'affirmer qu'il n'existe pas de solution au problème traité.
- Les méthodes approchées fournissent une solution approchée au problème traité. Elles sont en général conçues de manière à ce que la solution obtenue puisse être située par rapport à la valeur optimale : de telles méthodes permettent d'obtenir des bornes inférieures ou supérieures de la valeur optimale tel que :
- Méthodes Heuristiques .
- Méthodes Méta heuristiques.

V.4 La démarche heuristique

L'heuristique [23, 27] est une méthode, une technique ou un critère de guidage ou de décision, en général empirique ou obtenu par approximation, permettant de choisir la voie la plus prometteuse de recherche de la solution au problème posé, ou d'éliminer les voies les moins intéressantes, sans garantie sur la validité ou la précision de l'information ainsi fournie.

Entrer dans le domaine des heuristiques, c'est se départir d'emblée les schémas classiques. En effet, alors que la démarche classique mathématique est centrée sur l'objet de l'étude, sur la compréhension de sa structure et de sa logique, la démarche heuristique repousse le problème lui-même au rang d'illustration pour dégager des schémas de pensée plus généraux et donc originaux.

Les heuristiques disposent d'une simplicité et donc d'une rapidité dans leur exécution plus élevée que les méthodes classiques. Ces règles s'appliquant à un ensemble particulier la recherche des faits se voit simplifiée et accélérée (moins de possibilité). D'où une analyse des situations améliorées. Mais une méthode heuristique trop simplifiée ou au contraire trop générale peut conduire à des biais cognitifs, générant des erreurs de décision.

L'utilisation de plus de ces éléments simples (les heuristiques) afin de créer des éléments plus complexes (les méta- heuristiques) permet donc de réduire considérablement l'ensemble de recherche global de l'algorithme.

L'une de leur caractéristique principale et à première vue défaut, dont hérite également les méta- heuristiques, est qu'ils peuvent dans certains cas ne pas proposer de solution optimale au problème. Mais au résultat s'y approchant d'assez près pour qu'il soit considéré comme correct, on parle alors de garantie de performance.

V.4.5 Les méta- heuristiques

Les métas-heuristiques sont apparues dans les années 1980 et forment une famille d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile, pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace. Elles sont généralement utilisées comme des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents, sans nécessiter de changements profonds dans l'algorithme employé [23, 28, 29, 30, 31].

Etymologiquement parlant de ce mot est composé dans un premier temps du préfixe méta qui signifie « au delà » ou « plus haut » en grec puis de « heuristique » qui signifie « trouver ». Cette décomposition permet de facilement comprendre le but premier de ces algorithmes : trouver des solutions à des problèmes en utilisant plusieurs (méta) heuristiques.

Les métas-heuristiques utilisent des processus aléatoires comme moyens de récolter de l'information et de faire face à des problèmes comme l'explosion combinatoire. En plus de cette base stochastique, les méta- heuristiques sont généralement itératives, c'est-à-dire qu'un même schéma de recherche est appliqué plusieurs fois au cours de l'optimisation, et directes, c'est-à-dire qu'elles n'utilisent pas l'information du gradient de la fonction objectif. Elles tirent en particulier leur intérêt de leur capacité à éviter les optima locaux, soit en acceptant une dégradation de la fonction objective au cours de leur progression, soit en utilisant une population de points comme méthode de recherche.

Les méta-heuristiques, du fait de leur capacité à être utilisées sur un grand nombre de problèmes différents, se prêtent facilement à des extensions. Pour illustrer cette caractéristique, citons notamment :

- ❖ L'optimisation multi objective (dites aussi multicritère) [32], ou il faut optimiser plusieurs objectifs contradictoires. La recherche vise alors non pas à trouver un optimum global, mais un ensemble d'optima «au sens de Pareto» formant la «surface de compromis» du problème.
- ❖ L'optimisation multimodale, ou l'on cherche un ensemble des meilleurs optima globaux et/ou locaux.
- ❖ L'optimisation de problèmes bruités, où il existe une incertitude sur le calcul de la fonction objectif. Incertitude dont il faut alors tenir comptes dans la recherche de l'optimum.
- ❖ L'optimisation dynamique, ou la fonction objective varie dans le temps. Il faut alors approcher au mieux l'optimum à chaque pas de temps.
- ❖ La parallélisation, ou l'on cherche à accélérer la vitesse de l'optimisation en répartissant la charge de calcul sur plusieurs unités. Le problème revient alors à adapter les méta- heuristiques pour qu'elles soient distribuées.
- ❖ L'hybridation, qui vise à tirer parti des avantages respectifs de méta- heuristiques différentes en les combinant [32, 33].

Enfin, la grande vitalité de ce domaine de recherche ne doit pas faire oublier qu'un des intérêts majeurs des méta- heuristiques est leur facilité d'utilisation dans des problèmes concrets. L'utilisateur est généralement demandeur de méthodes efficaces permettant d'atteindre un optimum avec une précision acceptable dans un temps raisonnable. Un des enjeux de la conception des méta- heuristiques est donc de faciliter le choix d'une méthode et de simplifier son réglage pour l'adapter à un problème donné.

V.5.1 Organisation générale

D'une manière générale, les méta- heuristiques s'articulent autour de trois notions [32]:

- ***Diversification /exploration*** : désigne les processus visant à récolter de l'information sur le problème optimisé.
- ***L'intensification/exploitation*** : vise à utiliser l'information déjà récoltée pour définir et parcourir les zones intéressantes de l'espace de recherche.

- **La mémoire** : est le support de l'apprentissage, qui permet à l'algorithme de ne tenir compte que des zones où l'optimum global est susceptible de se trouver, évitant ainsi les optimums locaux.

Les méta-heuristiques progressent de façon itérative, en alternant des phases d'intensification, de diversification et d'apprentissage. L'état de départ est souvent choisi aléatoirement, l'algorithme se déroulant ensuite jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

V.5.2 Applications

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

V.5.2.1 Méta-heuristique à recuit simulé

La méthode de recuit simulé s'inspire du processus de recuit physique [33, 34]. Ce processus utilisé en métallurgie pour améliorer la qualité d'un solide cherche un état d'énergie minimale qui correspond à une structure stable du solide. Les origines du recuit simulé remontent aux expériences réalisées par Metropolis et al dans les années 50 pour simuler l'évolution d'un tel processus de recuit physique. Metropolis et al utilisent une méthode stochastique pour générer une suite d'états successifs du système en partant d'un état initial donné. Tout nouvel état est obtenu en faisant subir un déplacement (une perturbation) aléatoire à un atome quelconque.

L'utilisation d'un tel processus du recuit simulé pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire. Le recuit simulé peut être vu comme une version étendue de la méthode de descente. Le processus du recuit simulé répète une procédure itérative qui cherche des configurations de coût plus faible tout en acceptant de manière contrôlée des configurations qui dégradent la fonction de coût. À chaque nouvelle itération, un voisin de la configuration courante est généré de manière aléatoire. Selon les cas, ce voisin sera soit retenu pour remplacer celle-ci, soit rejeté. Si ce voisin est de performance supérieure ou égale à celle de la configuration courante, il est systématiquement retenu. Dans le cas contraire, il est accepté avec une probabilité qui dépend de deux facteurs : d'une part l'importance de la dégradation (les dégradations plus faibles sont plus facilement acceptées), d'autre part un paramètre de contrôle, la température (une température élevée correspond à une probabilité plus grande d'accepter des dégradations). La température est contrôlée par une fonction décroissante qui définit un schéma de refroidissement. Les deux paramètres de la méthode

définissent la longueur des paliers et la fonction permettant de calculer la suite décroissante des températures. En pratique, l'algorithme s'arrête et retourne la meilleure configuration trouvée lorsque aucune configuration voisine n'a été acceptée pendant un certain nombre d'itérations à une température ou lorsque la température atteint la valeur zéro.

La performance du recuit simulé dépend largement du schéma de refroidissement utilisé. De nombreux schémas théoriques et pratiques ont été proposés. De manière générale, les schémas de refroidissement connus peuvent être classés en trois catégories :

- ✚ réduction par paliers : chaque température est maintenue égale pendant un certain nombre d'itérations, et décroît ainsi par paliers.
- ✚ réduction continue: la température est modifiée à chaque itération.
- ✚ réduction non- monotone: la température décroît à chaque itération avec des augmentations occasionnelles.

Il existe des schémas qui garantissent la convergence asymptotique du recuit simulé. En pratique, on utilise des schémas relativement simples même s'ils ne garantissent pas la convergence de l'algorithme vers une solution optimale.

Le recuit simulé constitue, parmi les méthodes de voisinage, l'une des plus anciennes et des plus populaires. Il a acquis son succès essentiellement grâce à des résultats pratiques obtenus sur de nombreux problèmes NP- difficiles. La preuve de convergence a également contribué à cette popularité, bien que cette preuve n'ait pas de portée en pratique.

V.5.2.2 Les méta- heuristiques évolutionnaires/génétiques

V.5.2.2.1 Origines

Les algorithmes génétiques appartiennent à une famille d'algorithmes appelés méta-heuristique dont le but est d'obtenir une solution approchée [35, 36], en un temps correct, à un problème d'optimisation, lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte pour le résoudre. Les algorithmes génétiques utilisent la notion de sélection naturelle développée par le scientifique Charles Darwin au XIXème siècle.

Dans cette théorie, une population d'individus évolue grâce au mécanisme de la reproduction sexuée. Les individus les plus adaptés à leur milieu se reproduisent plus que les autres, favorisant les caractères les plus adaptés. Ainsi une girafe avec un cou plus long que les autres aura accès à plus de nourriture, et aura donc plus de chances de survivre et de se reproduire. Ses descendants auront un cou plus long, et en moyenne la population de girafe aura un cou plus long.

L'utilisation d'algorithmes génétiques dans la résolution de problèmes est à l'origine des recherches de John Holland dès 1960. La nouveauté introduite a été la prise en compte de l'opérateur croisement en complément des mutations, et c'est cet opérateur qui permet le plus souvent de se rapprocher de l'optimum d'une fonction en combinant les gènes contenus dans les différents individus de la population [32, 37,38].

V.5.2.2 Principe

Les algorithmes génétiques classiques introduits par Holland s'appuient fortement sur un codage universel sous forme de chaînes 0/1 de longueur fixe et un ensemble d'opérateurs génétiques : les sélections, les croisements ou recombinaison et les mutations. Un individu sous ce codage, appelé un chromosome, représente une configuration du problème. Les opérateurs « génétiques » sont définis de manière à opérer aléatoirement sur un ou deux individus sans aucune connaissance sur le problème.

La génétique a mis en évidence l'existence de plusieurs opérateurs au sein d'un organisme donnant lieu au brassage génétique. Ces opérations interviennent lors de la phase de reproduction lorsque les chromosomes de deux organismes fusionnent.

Ces opérations sont imitées par les algorithmes génétiques afin de faire évoluer les populations de solutions de manières progressives.

Les sélections :

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

Il existe plusieurs techniques de sélection, les principales sont :

- Sélection par rang,
- Probabilité de sélection proportionnelle à l'adaptation,
- Sélection par tournoi,
- Sélection uniforme.

Le croisement :

Lors de cette opération, deux chromosomes s'échangent des parties de leurs chaînes, pour donner de nouveaux chromosomes. Ces croisements peuvent être simples ou multiples. Dans le premier cas, les deux chromosomes se croisent et s'échangent des portions d'ADN en un seul point. Dans le deuxième cas, il y a plusieurs points de croisement. Pour les algorithmes génétiques, c'est cette opération qui est prépondérante. Sa probabilité d'apparition

lors d'un croisement entre deux chromosomes est un paramètre de l'algorithme génétique. En règle générale, on fixe la proportion d'apparition à 0.7.

Les mutations :

D'une façon aléatoire, un gène peut, au sein d'un chromosome être substitué à un autre. De la même manière que pour les croisements, on définit ici un taux de mutation lors des changements de populations qui est généralement compris entre 0.001 et 0.01. Il est nécessaire de choisir pour ce taux une valeur relativement faible de manière à ne pas tomber dans une recherche aléatoire et conserver le principe de sélection et d'évolution. La mutation sert à éviter une convergence prématurée de l'algorithme.

Codage :

Pour les algorithmes génétiques, un des facteurs les plus importants, si ce n'est le plus important, est la façon dont sont codés les solutions, c'est-à-dire les structures de données qui coderont les gènes.

Codage binaire :

Le principe est de coder la solution selon une chaîne de bit. Ce type de codage est le plus utilisé car il présente plusieurs avantages [36, 37, 38, 39]. Il existe au moins un côté négatif qui fait que d'autres existent. Ce codage est peu naturel par rapport à un problème donné.

Codage à caractère multiple :

Ce type de codage est plus naturel que le codage binaire. Il est utilisé dans de nombreux cas poussés [36, 37, 38, 39, 40].

Codage sous forme d'arbre :

Ce codage utilise une structure arborescente avec une racine de laquelle peuvent être issus un ou plusieurs fils. Un de leurs avantages est qu'ils peuvent être utilisés dans le cas de problèmes où les solutions n'ont pas une taille finie. Les arbres de tailles quelconques peuvent être formés par le biais de croisement et de mutations.

Le problème de ce type de codage est que les arbres résultants sont souvent difficiles à analyser et que l'on peut se retrouver avec des arbres dont la taille est importante.

Pour le choix du type de codage, il suffit de choisir celui qui semble le plus naturel en fonction du problème à traiter et développer ensuite l'algorithme de traitement.

Bien que les algorithmes génétiques soient considérés aujourd'hui comme une méthode d'optimisation, l'objectif initial consistait à concevoir des systèmes d'apprentissage généraux, robustes et adaptatifs, applicables à une large classe de problèmes.

L'universalité d'un tel algorithme pose évidemment des problèmes d'efficacité en pratique. En effet, en tant que méthode d'optimisation, un algorithme génétique classique se base uniquement sur des opérateurs « aveugles ». Une autre voie intéressante pour améliorer l'efficacité des algorithmes génétiques consiste à combiner le cadre génétique avec d'autres méthodes de résolution [37].

V.5.2.3 Les méta- heuristiques éthologiques/colonies de fourmis

Cette méta-heuristique s'inspire des comportements collectifs des fourmis dans leurs découvertes de nouvelles sources de nourriture [35, 36, 37, 38] : en effet ces insectes utilisent des phéromones afin de marquer les informations qu'ils ont recueillies sur leur environnement. On appelle cela stigmergie.

L'utilisation de ces phéromones leur permettent de repérer le plus court chemin entre une source de nourriture et leur nid. Car malgré leur capacité cognitive limitée, elles sont collectivement capables de résoudre des problèmes complexes.

V.7 Conclusion

Les méthodes de résolution sont extrêmement nombreuses, elles sont basées sur des principes totalement différents, chacune explore et exploite l'espace de recherche selon des techniques qui lui sont propres.

Comparer ces méthodes entre elles n'est pas une chose facile. Toutefois, il n'existe pas de méthodes de recherche qui soit véritablement plus performante qu'une autre sur l'ensemble des problèmes.

Pour cette étude, on choisira les méthodes GWO (Loups gris) et CSO (Chats) parce qu'elles sont extrêmement performantes dans de nombreux domaines, Ce sont des méthodes très efficaces et s'adapte bien le problème posé.

Le chapitre suivant se base sur les solutions obtenues par l'algorithme de GWO et CSO.

Chapitre VI

VI. Introduction

En raison de la préoccupation croissante pour l'environnement et l'épuisement des ressources naturelles tels que les combustibles fossiles, les efforts de recherche sont actuellement focalisée sur l'obtention de nouvelles sources d'énergie propres. Pour préserver la planète, les sources d'énergie renouvelables offrent une nouvelle perspective pour assurer nos besoins énergétiques. L'énergie éolienne et solaire est une énergie écologique, disponible et inépuisable. Les éoliennes et les panneaux solaires sont classés parmi les énergies vertes; par conséquent, les émissions de CO₂ seraient réduites et les avantages pourraient être partagés par tous les consommateurs sur le réseau électrique. En raison de ces avantages en tant que source d'énergie renouvelable et respectueuse de l'environnement, le développement et l'utilisation de l'énergie éolienne pour satisfaire demande électrique ne cesse de s'étendre à travers le monde.

La reconfiguration du système électro énergétique est une tâche complexe et importante dans la planification du système. Une configuration non adaptée entraîne une augmentation des pertes de puissance, une mauvaise qualité de tension et un mauvais facteur de puissance [70-71-72].

La reconfiguration d'un système éolien et d'un système hybride (éolien solaire) consiste à déterminer la configuration optimale visant une meilleure performance à partir d'une disponibilité et d'un coût raisonnable. Pour réaliser cet objectif, nous nous sommes intéressés à deux méthodes métaheuristiques à savoir la méthode inspiré du comportement des chats (CSO) et la méthode inspiré du comportement des loups (GWO).

VI.1 Méthode inspiré du comportement des chats (CSO) :

Les méthodes d'optimisation inspirées de la nature tels que la méthode des algorithmes génétiques, les colonies de fourmis, les essaims particulaires, les abeilles, etc... Ont inspirés de nombreux chercheurs à intensifier et à étendre l'application de ces méthodes [65-66]. Le problème formulé dans cette thèse est une nouvelle méthode métaheuristique qui s'adapte à l'optimisation basé sur un algorithme développé à partir des comportements des chats pour résoudre un problème spécifique [69].

L'optimisation a été toujours utilisée dans presque tous les domaines l'ingénierie. Au cours des dernières années, plusieurs méthodes d'optimisation sont utilisées tels que l'algorithme d'optimisation des chats (CSO) [67-68].

VI.2 Présentation de l'algorithme CSO :

Tableau (VI-1) énumère les caractéristiques de CSO

algorithme général	Optimisation de l'essaim de chats
décision de variable	Position du chat dans chaque dimension
Solution	Chats position
Ancienne solution	Ancienne position du chat
Nouvelle solution	Nouvelle position du chat
La meilleure solution	Tout chat avec la meilleure forme physique
Fonction Fitness	Distance entre le chat et la proie
Solution initiale	Positions aléatoires des chats
Sélection	-
Processus de génération de nouvelles solutions	Recherche et traçage d'une proie

Algorithme inspiré des comportements des chats

Les procédures de calcul de CSO peuvent être décrites comme suit :

- **Étape 1** : Créer la population initiale de chats, les disperser dans l'espace de solution M-dimensionnel ($X_{i,d}$) et assigner aléatoirement chaque vitesse de chat dans la plage à vitesse maximale selon temps($t_{i,d}$).
- **Étape 2** : Selon la valeur de MR, assigner à chaque chat un signe pour les trier dans le processus de recherche ou de traçage.
- **Étape 3** : Évaluer la valeur de la forme physique de chaque chat et sauvegarder le chat avec la meilleure fonction.

- **Étape 4** : La position du meilleur chat (X_{best}) représente la meilleure solution jusqu'à présent.
- **Étape 5** : En fonction de leurs signes, appliquer les chats en mode recherche ou traçage selon le processus décrit ci-dessous.
- **Étape 5** : Si l'objectif est atteint, mettre fin au processus. Sinon Répéter les étapes 2 à 5.

 Organigramme inspiré des comportements des chats

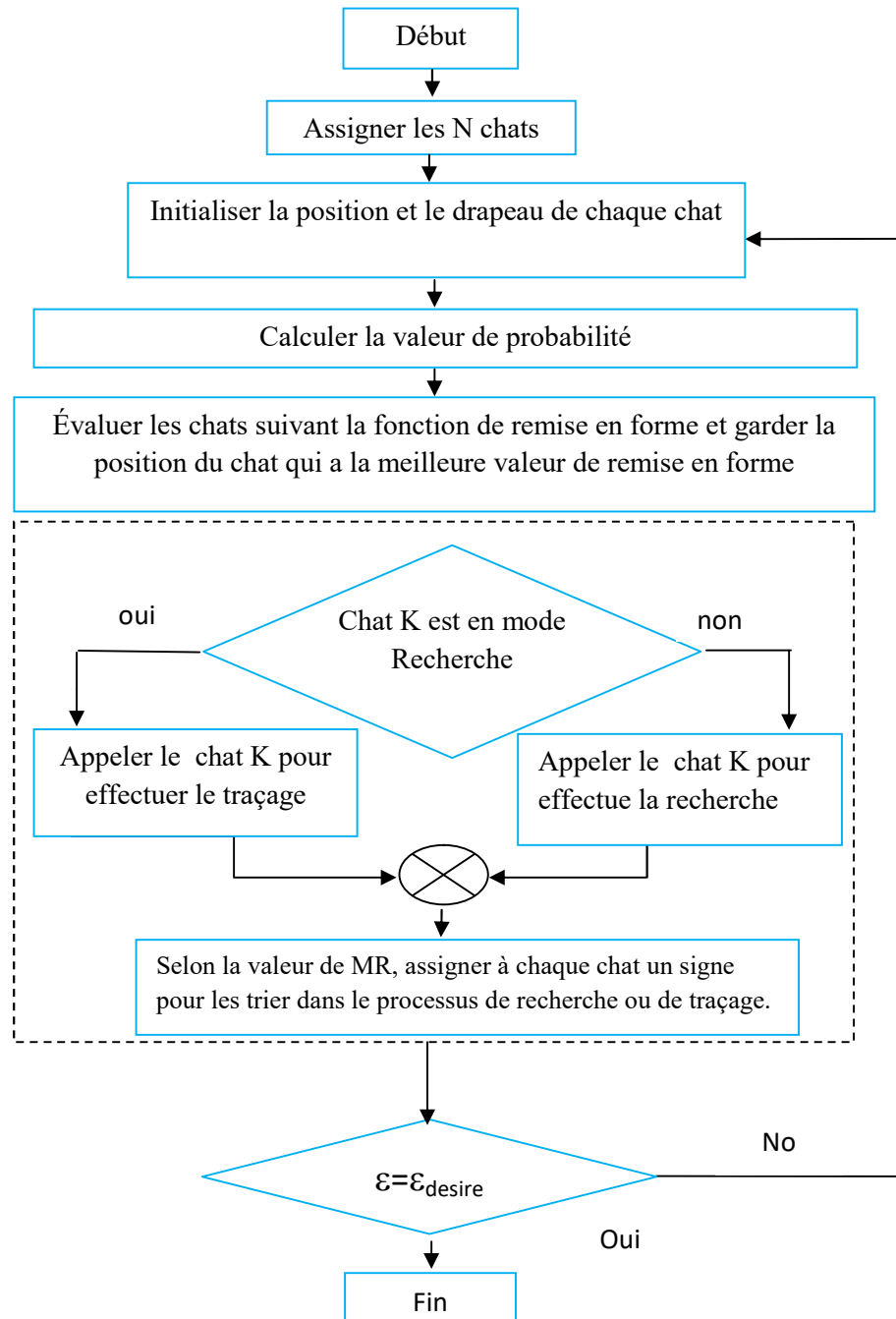


Fig. (VI-1): Organigramme de la méthode CSO.

Le CSO peut facilement être représenté en combinant les deux modes recherche et traçage et donnant un ensemble combiné de règles de solution.



Fig. (VI-2): Mode recherche (sommeil et recherche)

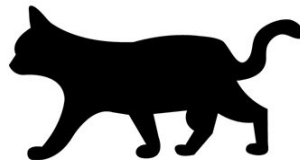


Fig. (VI-3): Mode de traçage (pour suite)

VI.3 Caractéristiques globales du réseau à optimiser

On choisira un système électro énergétique composé d'un parc d'éolien de sept unités de production associé à un réseau de transport haute tension et d'un réseau de distribution en moyenne tension. Des transformateurs sont utilisés pour adapter le niveau de tension. Ce système est donné par le tableau suivant :

L'étude de système est composés des unités éoliennes, transformateurs HT lignes HT, transformateurs HT/MT, lignes MT. Nous appliquerons la méthode UMGF pour évaluer la fiabilité et l'algorithme CSO pour trouver des solutions optimales selon les niveaux de charge pour une consommation choisie. La figure suivante présente ce système :

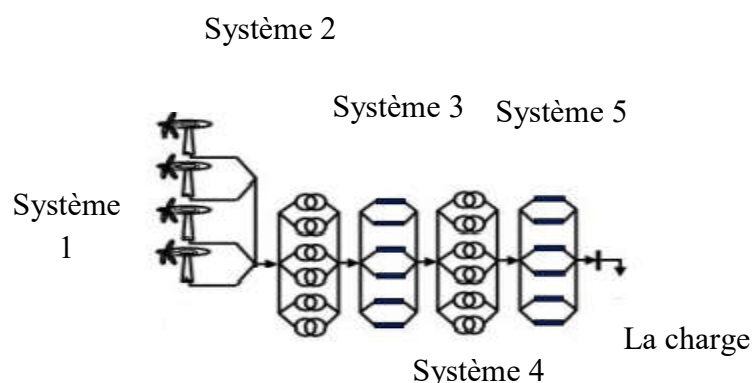


Fig. (VI-4): Système électro- énergétique

Les paramètres choisis de différentes composantes du système, tels que le nombre de composants, la disponibilité, le coût et la performance sont résumé sur le tableau suivant :

Tableau (VI-2) : Caractéristiques des éléments prédisposés

Sous-système	Nombre de composants	Disponibilité A	Coût C mln \$	Performance (MW)
Unités de production	1	0.992	7.735	6
	2	0.986	6.475	5
	3	0.994	6.698	6
	4	0.988	6.290	6
	5	0.980	6.146	5
	6	0.991	4.484	4
	7	0.992	3.926	3
Transformateurs HT	1	0.994	2.805	18
	2	0.990	2.272	18
	3	0.997	2.594	12
	4	0.991	2.569	12
	5	0.998	1.857	8
Lignes HT	1	0.971	1.985	16
	2	0.997	1.983	14
	3	0.991	1.842	14
	4	0.976	1.318	12
Transformateurs HT/MT	1	0.978	0.842	16
	2	0.986	0.875	16
	3	0.978	0.745	14
	4	0.983	0.654	12
	5	0.981	0.625	12
	6	0.971	0.608	12
	7	0.985	0.492	10
	8	0.973	0.415	10
Lignes MT	1	0.984	0.456	14
	2	0.993	0.432	12
	3	0.989	0.364	10
	4	0.981	0.283	8
	5	0.968	0.242	8

Le système de production et de transport d'énergie électrique alimente une charge. Cette courbe sera présentée sous une forme cumulée, puis discrétisée suivant quatre niveaux.

Ces niveaux sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau. (VI-3): Niveaux de la charge cumulée

Charge (MW)	Durée (h)
30	830
20	1520
15	5680
8	750

Le premier travail de recherche sur lequel nous nous sommes basé consiste à déterminer les puissances optimale à fournir pour chaque sous système à savoir, les systèmes de production, les transformateurs et les lignes. En appliquant la méthode des chats (CSO), nous avons obtenue les résultats suivants [73] :

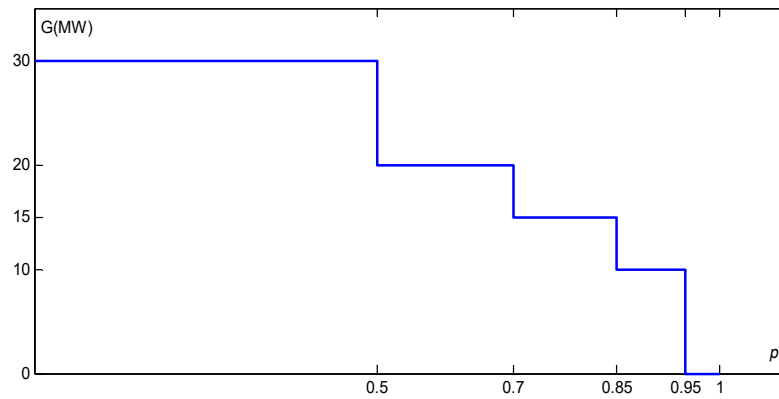


Fig. (VI-5): Puissance optimale à générée en fonction de la fiabilité des unités de production

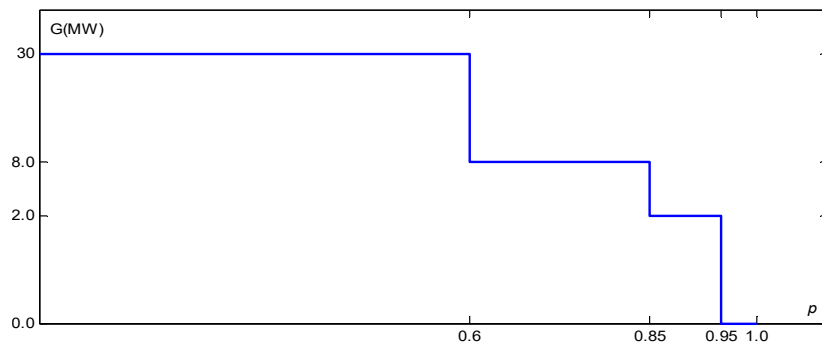


Fig. (VI-6): Puissance optimale à générée en fonction de la fiabilité des transformateurs HT

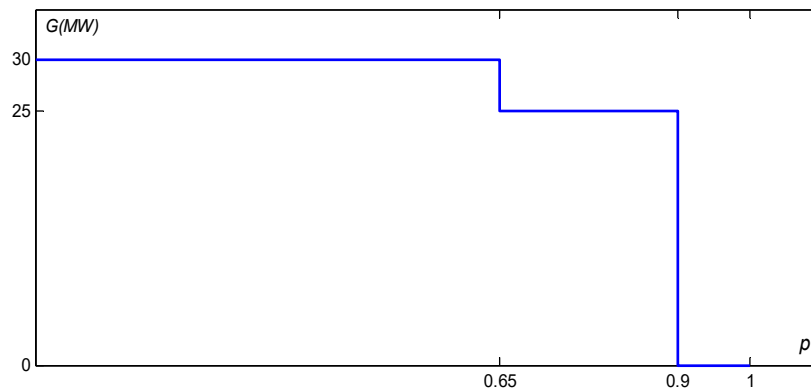


Fig. (VI-7): Puissance optimale à générée en fonction de la fiabilité des lignes HT/MT

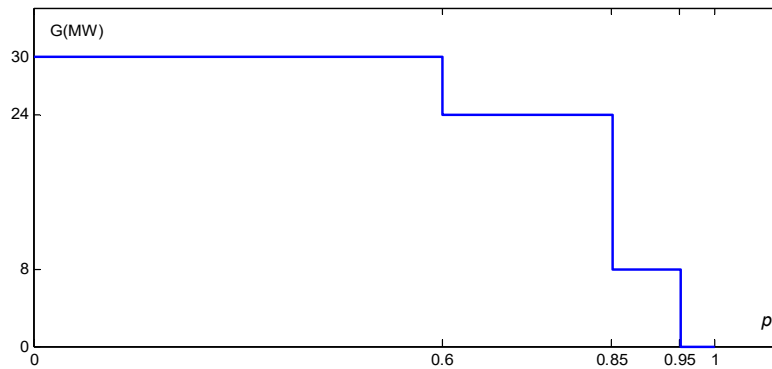


Fig. (VI-8): Puissance optimale à générée en fonction de la fiabilité des transformateurs MT

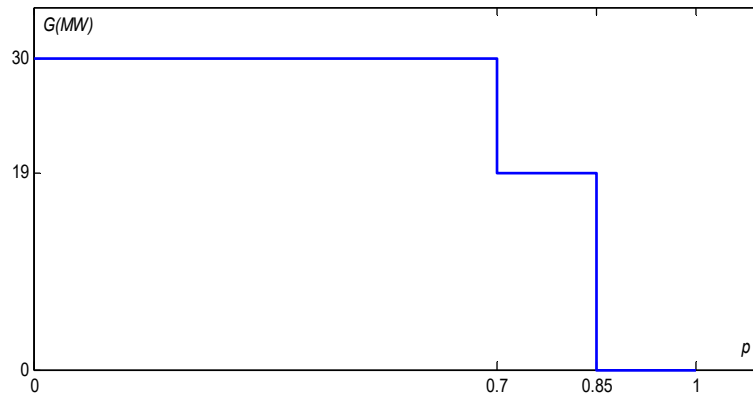


Fig. (VI-9): Puissance optimale à générée en fonction de la fiabilité des lignes MT

VI.4 Discussion :

Les cinq courbes obtenues montrent une concordance entre la puissance générée et la fiabilité, à chaque niveau de fiabilité correspond une puissance optimale à générer. Une puissance maximale est générée pour un niveau de fiabilité meilleur ce qui correspond à une faible probabilité de défaillance. Une puissance minimale est fournie pour un faible niveau de fiabilité correspondant à une plus grande probabilité de défaillance. Des puissances nulles, correspondent à des fiabilités d'ordre zéro. Ceci en concordance avec le cas réel ou un composant en parfait état donne une production maximale, alors qu'un composant en mauvais état fournie une production réduite. De plus, l'application de cet algorithme nous a permis d'optimiser la puissance à fournir pour chaque niveau de fiabilité.

VI.5 Optimisation par la méthode de GWO (L'optimisation par les loups gris)

VI.5.1 Définition de l'optimisation par les loup gris (Grey Wolf Optimisation GWO)

La méthode d'optimisation par les loups gris (GWO) est méthode récente qui a été développée pour la première fois par le chercheur Mirjalili en 2014. C'est une technique basée sur l'intelligence naturelle des loups gris pour chasser leurs parois. Dans leurs vies naturelles, les loups gris chassent en groupe.

Les loups gris sont considérés comme des prédateurs, ce qui signifie qu'ils sont au sommet de la chaîne alimentaire. Les loups gris préfèrent généralement vivre en groupe. La taille du groupe est de 5-12 en moyenne. D'un intérêt particulier est qu'ils avoir une hiérarchie sociale dominante très stricte

A chaque fois qu'une paroi apparaissent seule ou dans un troupeau. Si cette paroi se trouve dans un troupeau, la première tâche consiste à l'isoler du reste du troupeau. Une fois seule, un ensemble de loups commencent à encercler cette paroi. Mais cette paroi est parfois assez forte, pour cela, un loup volontaire va essayer de l'agacer afin de la faire faiblir. Une fois affaiblie, les autres loups l'encerclent suivant une forme bien définie. Les attaques se succèdent de la part de l'ensemble des loups encerclant la paroi jusqu'à ce que l'occasion se présente pour l'achever définitivement.

L'intelligence artificielle vise à développer un algorithme pour résoudre les problèmes d'optimisation à partir de cette intelligence naturelle des animaux.

Dans cet algorithme la population est divisée en quatre groupes : alpha (α), bêta (β), delta (δ) et oméga (ω). Les trois premiers des loups les plus forts sont désignés par α , β et δ . Ces derniers, guident les autres loups désignés par ω vers des zones prometteuses de l'espace de recherche. Les dirigeants sont un mâle et une femelle, appelés alphas. Celui-ci est principalement responsable de prendre des décisions sur la chasse, le lieu de repos, le temps de réveille et ainsi de suite. Les décisions du chef alpha sont dictées aux autres éléments du groupe. Cependant, une autre sorte de comportement démocratique a également été observé, dans laquelle alpha suit les autres loups dans le groupe. Naturellement, les chefs alpha sont reconnues par leurs queues vers le bas. Le loup alpha est aussi appelé le loup dominant puisque ses ordres devraient être suivis par l'ensemble. Ils sont seulement autorisés à s'accoupler avec les femelles qui sont dans le troupeau. Un fait intéressant est que alpha n'est pas nécessairement le membre le plus fort, mais celui qui est le meilleur en termes de

gouvernance. Cela montre que l'organisation et la discipline au sein du troupeau est beaucoup plus important que la force.

Le deuxième niveau dans la hiérarchie des loups gris est la version bêta. Les loups désignés par bêtas sont des loups subordonnés qui aident les loups 'alpha dans la prise de décision ou d'autres activités avec l'ensemble. Le loup bêta peut être mâle ou femelle, et il /elle est probablement le meilleur candidat pour succéder au chef 'alpha au cas où celui-ci décède ou devient très vieux. Le loup bêta devrait obéir et respecter son chef alpha et il doit commander les loups qui lui sont subordonnés. Il joue le rôle de conseiller du loup alpha et doit assurer la discipline du troupeau. La version bêta renforce les commandes de la version alpha et donne ses commentaires. Le loup gris qui reçoit ses ordres de beta est désigné par oméga

Les loups delta sont des loups qui doivent se soumettre aux alphas et aux bêtas, mais ils dominent les loups oméga. Ces loups sont des anciens chasseurs et assurent la fonction de gardiens. Ils sont responsables de regarder les limites du territoire et avertir l'ensemble en cas de danger. Ils protègent et garantissent la sécurité du reste. Le loup oméga joue le rôle de bouc émissaire. Les loups oméga doivent toujours se soumettre à tous les autres loups les plus dominants. Ce sont les derniers loups autorisés à manger. Les anciens sont les loups expérimentés qui utilisé pour être alpha ou bêta. Les chasseurs aident les loups alphas et betas quand ils chassent la proie et fournissent la nourriture pour le reste. Enfin, les gardiens sont responsables de prendre soin des loups faibles, malades ou blessés. En plus de la hiérarchie sociale des loups, la chasse en groupe est un autre comportement social intéressant des loups gris. Les principales phases de la chasse du loup gris sont les suivantes :

- Suivre, chasser et approcher la proie.
- Poursuivre, encercler et harceler la proie jusqu'à ce qu'elle arrête de bouger.
- Attaque de la proie [41].

VI.5.2 Opérateurs

1) Hiérarchie sociale

Afin de modéliser mathématiquement la hiérarchie sociale des loups lors de la conception de l'algorithme (GWO), la meilleure solution est donnée par le chef désigné par l'alpha. Par conséquent, les deuxièmes et troisièmes meilleures solutions sont données par les groupes bêta (b) et delta (d) respectivement. Le reste des solutions candidates sont supposés être données par les groupes omégas (x). Dans l'algorithme GWO, la chasse (fonction optimisation) est guidée par a, b et d. Les loups (x) suivent les autres [79].

2) Encerclement des proies

Afin de modéliser mathématiquement le comportement d'encerclement, les équations suivantes sont proposées:

$$\vec{D} = |\vec{C} * X_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (VI.1)$$

$$\vec{D}(t+1) = X_p(t) - \vec{A} * \vec{D} \quad (VI.2)$$

Où t indique l'itération en cours, $\vec{A}$ et $\vec{C}$ sont des vecteurs des coefficients, X_{pest} est le vecteur de position de la proie et X est le vecteur de position. Les vecteurs $\vec{A}$ et $\vec{C}$ sont calculés comme suit:

$$\vec{A} = 2a * r_1 \quad (VI.3)$$

$$\vec{C} = 2 * r_2, X_p \quad (VI.4)$$

a est réduit linéairement de 2 à 0, et r_1, r_2 sont des vecteurs aléatoires dans [0.1] [28].

3) Chasse

Les loups gris ont la capacité de reconnaître l'emplacement des proies et les encerclées. La chasse est généralement guidée par l'alpha, les groupes bêta et delta pourraient également participer à la chasse de temps en temps. Cependant, dans un espace de recherche abstrait, nous n'avons aucune idée de l'emplacement de l'optimum (proie). Afin de simuler mathématiquement le comportement de chasse des loups gris, nous supposons qu'alpha (meilleure solution candidate), beta et delta ont une meilleure connaissance à propos de l'emplacement potentiel de la proie. Par conséquent, nous sauvegardons les premières trois meilleures solutions obtenues jusqu'à présent et on oblige les autres agents (y compris les omégas) pour mettre à jour leurs positions selon la position des meilleurs agents de recherche. Les formules suivantes sont proposées à cet égard :

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 * \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}(t)| \quad (VI.5)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 * \vec{X}_\beta(t) - \vec{X}(t)| \quad (VI.6)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 * \vec{X}_\delta(t) - \vec{X}(t)| \quad (VI.7)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (VI.8)$$

Où

- $\vec{X}_\alpha(t)$: la position de l'alpha.

- $\vec{X}_\beta(t)$: la position de la bêta.
- $\vec{X}_\delta(t)$: la position de delta.
- $\vec{C}_1, \vec{C}_2, \vec{C}_3$ sont des vecteurs aléatoires
- X indique la position de la solution actuelle.

On peut observer que la position finale serait dans un endroit aléatoire dans un cercle qui est défini par les positions d'alpha, bêta et delta dans l'espace de recherche. En d'autres termes, alpha, bêta et delta estiment la position de la proie, et les autres loups mettent à jour leurs positions au hasard autour de la proie [41].

4) Attaque de la proie

Comme mentionné ci-dessus les loups gris prennent la décision de chasser en attaquant la proie quand elle arrête de bouger. Afin de modéliser mathématiquement l'approche de la proie, nous diminuons la valeur de $\vec{a}$. Notons que la plage de fluctuation de $\vec{A}$ est également diminuée. En d'autres termes $\vec{A}$ est une valeur aléatoire dans l'intervalle $[-2a, 2a]$ et a est diminué de 2 à 0 au cours des itérations. Lorsque les valeurs aléatoires de A sont dans l'intervalle $[-1, 1]$, la position suivante d'un agent de recherche peut être dans n'importe quelle position entre sa position actuelle et la position de la proie. Une valeur de $|A| < 1$ force les loups à attaquer vers la proie. Avec les opérateurs proposés jusqu'à présent, l'algorithme (GWO) permet à ses agents de recherche pour mettre à jour leur position en fonction de l'emplacement des agents alpha, bêta et delta et attaquer a proie. Cependant, l'algorithme (GWO) est sujet à la stagnation dans les solutions locales. Il est vrai que le mécanisme d'encerclement proposé montre l'exploration dans une certaine mesure, mais l'algorithme (GWO) a besoin de plus d'opérateurs pour continuer l'exploration. Les concepts de mise à jour de position sont présentés dans la figure (VI-10). Sur cette figure, On peut constater qu'un loup dans la position de (X, Y) est capable de se déplacer autour de la proie avec les équations proposées.

Bien que les sept (7) des emplacements possibles sont été représentés sur la figure (VI-10), les paramètres aléatoires A et C permettent aux loups de se déplacer à n'importe quelle position dans l'espace continu autour de la proie [41].

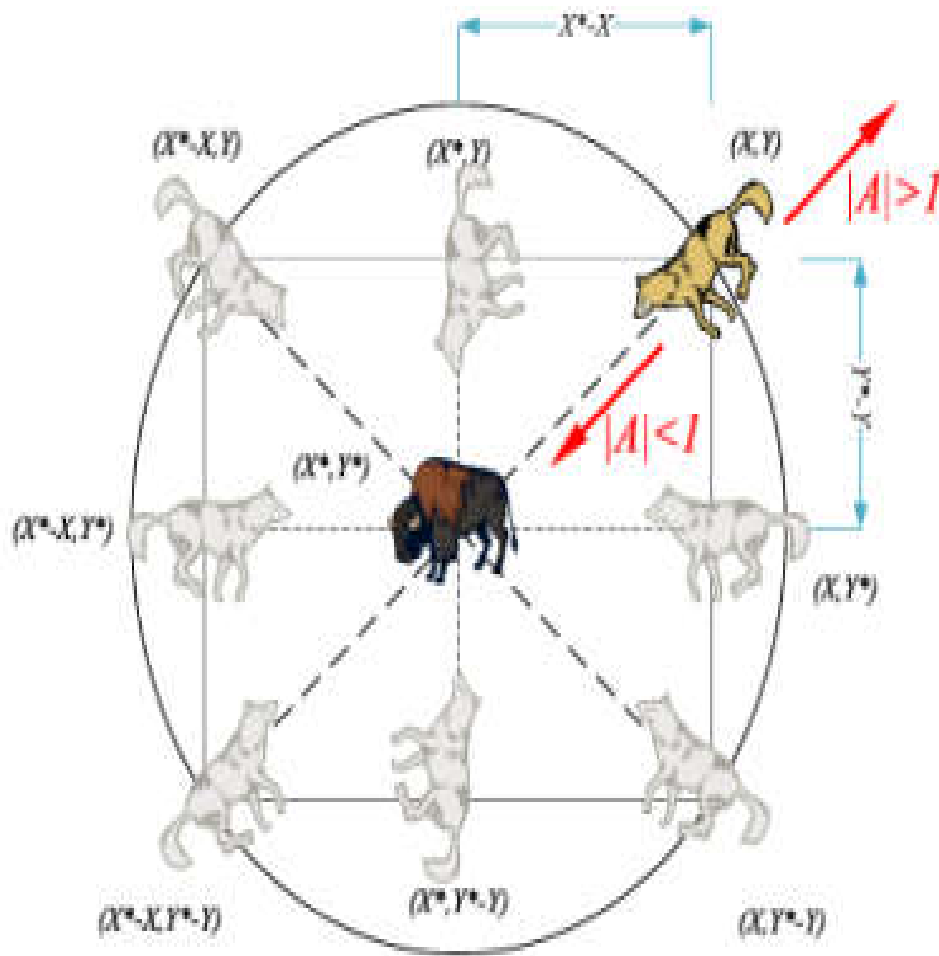


Fig. (VI-10): Mécanisme de positionnement de l'agent de recherche et de l'effet de ce qui le présente [41].

VI.6 Les étapes générales de l'algorithme GWO

Les étapes générales de l'algorithme (GWO) sont:

- Initialiser une population de loups au hasard sur la base des limites supérieure et inférieure des variables.
- Calculer la valeur objective correspondante pour chaque Loup.
- Choisir les trois premiers meilleurs loups et sauvegarde-les sous α , β et δ .
- Actualiser la position du reste de la population (loups) en utilisant les équations (VI-5), (VI-6), (VI-7) et (VI-8).
- Mise à jour des paramètres a , A et C .
- Passez à la 2^{ème} étape si le critère final n'est pas satisfait.
- Choisir la position de α comme optimum optimal approximé [41].

VI.7 Organigramme de l'algorithme (GWO) :

La figure (VI-11) représente les étapes de l'algorithme de l'optimisation de loup gris (GWO).

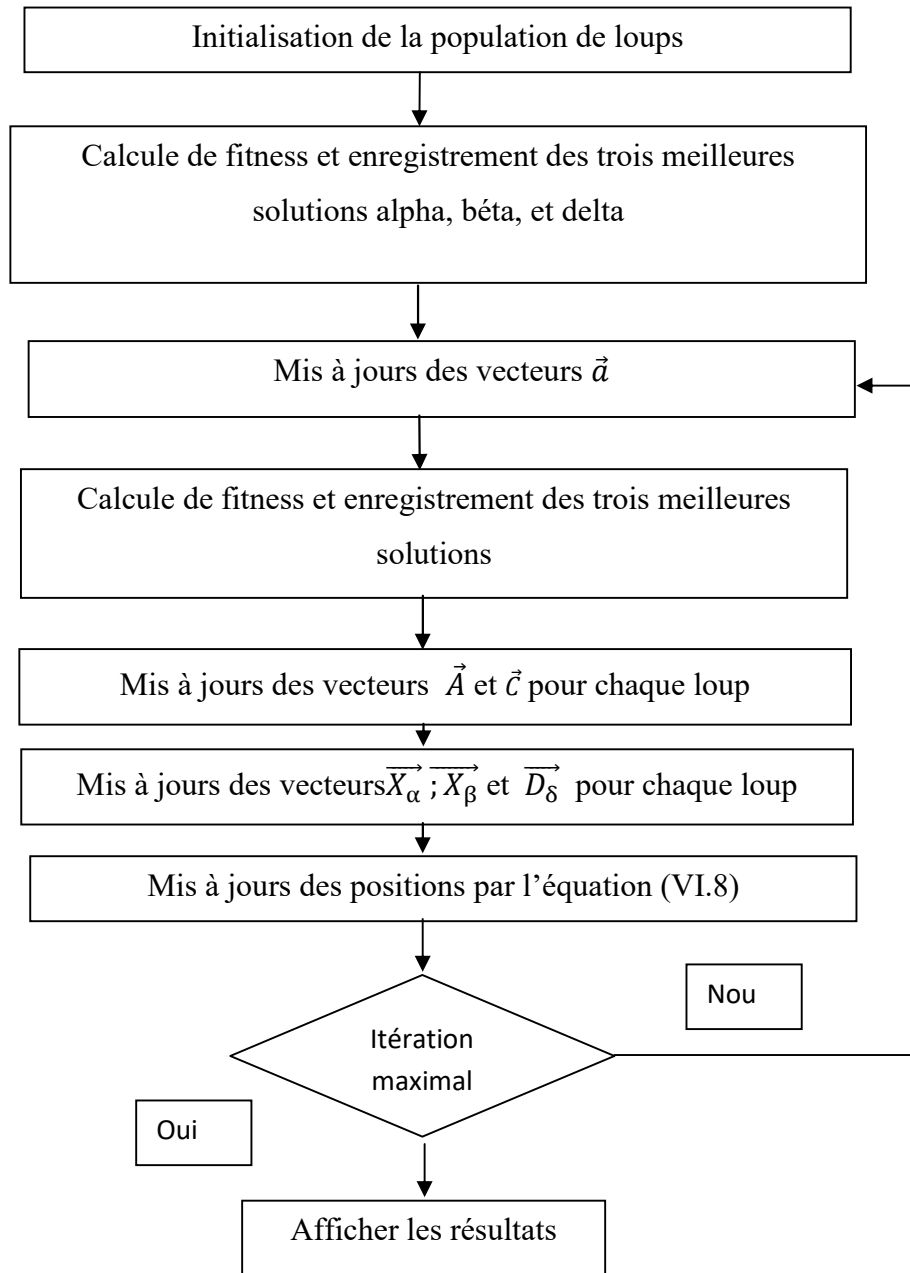


Fig. (VI-11): Organigramme de la méthode (GWO)

Mirjalili et al. a montré que l'algorithme (GWO) est capable de fournir des résultats très compétitifs par rapport aux 'autres métaheuristiques bien connues. D'une part, l'exploration de cet algorithme présente un coût très élevée et doit d'éviter les optimaux locaux. De plus, l'équilibre entre exploration et exploitation est très simple et efficace pour résoudre des problèmes difficiles selon les résultats dans des problèmes réels [41] [42].

** L'algorithme (GWO) :**

Est défini comme suit :

- 1 : **Données :**
- 2 : Le nombre maximal d'itération max itération
- 3 : Le nombre des loups de gris
- 4 : **Sortie :**
- 5 : La variable optimale X_α ,
- 6 : Sélectionner une valeur aléatoire pour α , A, C, X_i , $i= 1, \dots, n$
- 7 : Calculer la fonction objective pour chaque position des loups gris
- 8 : **Pour t de 0 à itération max faire**
- 9 : **Pour** chaque loup gris **faire**
- 10 : une mise à jour de la position des loups gris
- 11 : **Fin Pour**
- 12 : Mettre à jour α , A, C
- 13 : Calculer la fonction objective pour chaque loup gris
- 14 : Mettre à jour $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$
- 15 : **Fin Pour**
- 16 : **Fin**

VI.8 Système éolien solaire considéré :

Le système de conversion d'énergie éolien solaire considéré est un système électro énergétique série-parallèle contenant n sous-systèmes $i = 1, 2, \dots, n$ disposés en série. Chaque sous-système i contient un certain nombre d'appareils différents connectés en parallèle. Pour chaque sous-système i, il existe un certain nombre de versions d'appareils disponibles sur le marché. Pour chaque sous-système i, les appareils sont caractérisés selon leur version v, leur performance (E_{iv}), leur disponibilité (A_{iv}) et leur coût (C_{iv}) [43].

Le coût total du système peut être calculé comme suit:

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

VI.9 Caractéristiques globales du réseau à optimiser

La structure du système électro-énergétique, fait intervenir les colonnes (sous-systèmes) production, (sous-systèmes) transformation, (sous-systèmes) transport et (sous-systèmes) distribution d'énergie. Ces colonnes sont illustrées ci-dessous:

G_i : Représente la performance ou bien la capacité en % de la puissance totale.

p_i : Représente la fiabilité de l'élément considéré en %.

C_i : Représente le coût en % de l'investissement sur chaque colonne (sous système).

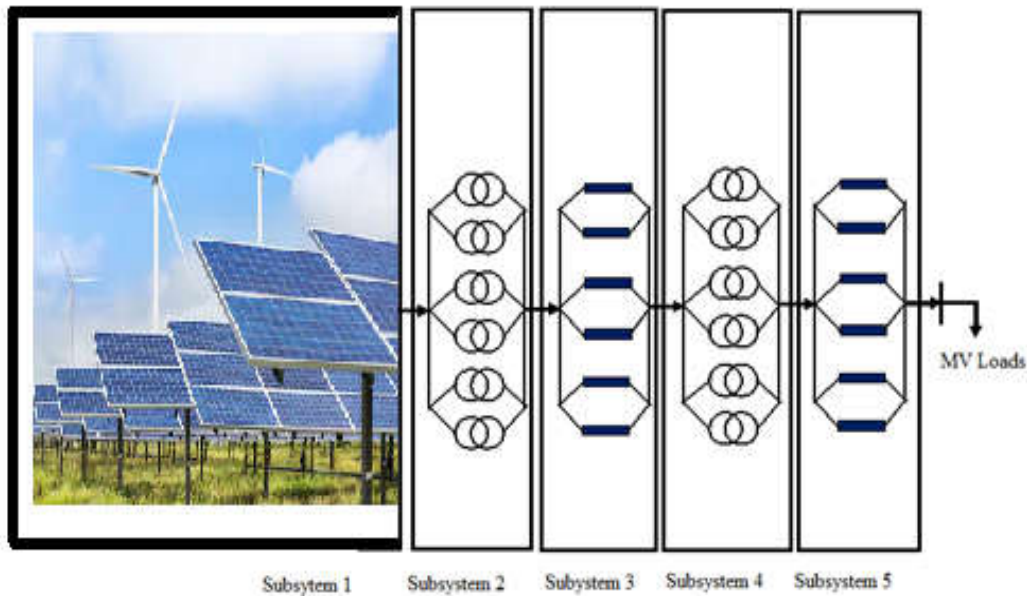


Fig. (VI-12) : Système électro- énergétique

Le système de production et de transport d'énergie électrique alimente une charge. Cette courbe sera présentée sous une forme cumulée, puis discrétisée suivant quatre niveaux. Ces niveaux sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau. (VI-4) : données de la demande cumulative annuelle

Load (MW)	28	24	22	18
Duration (h)	1752	1752	3504	1752

VI. 10 Solutions obtenues par l'algorithme de (GWO):

L'exécution du programme basé sur la méthode des loups gris (GWO) nous permet d'obtenir le tableau suivant :

Tableau (VI-5) : Solution optimale des structures avec différentes contraintes de fiabilité

Contraintes		Topologie	Topologie optimal	Coût, Fiabilité et Performance		
C₀ mln n\$	E₀ MW			C mln \$	A %	E MW
86	32	Sous- système 1	1-2-3-4-5-5-7	82.416	0.997	35
		Sous- système 2	1-2-3-4-5			
		Sous- système 3	1-2-2-4			
		Sous- système 4	1-2-3-4-4-6-7-8			
		Sous- système 5	1-2-3-4-5			
80	30	Sous- système 1	1-1-2-2-5-5-7	76.220	0.954	30
		Sous- système 2	1-2-2-3			
		Sous- système 3	2-2-3-4			
		Sous- système 4	2-3-3-4-5-5-6-7			
		Sous- système 5	1-1-1-2-3			
75	28	Sous- système 1	2-2-2-2-5-5-7	73.45	0.997	28
		Sous- système 2	2-2-3-4-5-5-7			
		Sous- système 3	2-2-3-3-3			
		Sous- système 4	2-2-3-3-4-5-7-7			
		Sous- système 5	2-2-3-3-4			

VI.11 Interprétation des résultats

Le tableau (VI-5) illustre la structure des configurations optimales du système ou quasi optimales qui ont les meilleurs niveaux de disponibilité et qui répondent aux contraintes de coût et de performance. Le système est conçu par une combinaison de composants sélectionnés parmi les versions disponibles présentées dans le tableau (VI-5). Trois structures optimales correspondant à différentes contraintes sont présentées dans ce tableau. On constate par exemple que pour une performance souhaitée de 32 MW et une contrainte de coût égale à

86 millions de dollars, la structure optimale offre une disponibilité de 0,997. Pour des performances de 30 MW et une contrainte de coût de 80 mln \$, la configuration optimale ne peut offrir qu'une disponibilité de 0,954. En maintenant la contrainte de coût à 75 mln \$ et en réduisant les performances souhaitées à 28 MW, la disponibilité du système monte de manière optimale à 0,997.

VI.12 Conclusion :

La simulation du système éolienne solaire est une étape importante de notre travail, elle a permis d'avoir des résultats acceptables. Le programme réalisé peut être utilisé dans d'autres systèmes de production. Il peut également être utilisé pour effectuer des simulations sur d'autres configurations de systèmes où la topologie présente une géométrie différente. Le seul handicap est la disponibilité des données relatives à chaque composant. Ces données sont parfois données dans des sites bien définis (Site web Sonelgaz, EDF, ou d'autres).

Mais souvent, il est difficile d'avoir toutes les données quand les composantes sont de versions différentes (différents fabricants)

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans une première phase sur les systèmes de conversions d'énergie électrique. Dans une deuxième phase, des détails ont été présentés sur les profils de la tension sur les réseaux de transport d'énergie électriques. Une troisième phase est relative à une nouvelle technique appelée technique d'Ushakov. Elle a été présentée dans un premier temps au système binaire puis elle a été étendue aux systèmes multi-états. Cette technique basée sur la fonction générée universelle (UGF) avait donnée des résultats satisfaisants sur l'évaluation de la fiabilité. Raison pour laquelle nous avons adopté cette méthode pour le calcul de la fiabilité d'un système à source d'énergie renouvelable. En associant deux techniques métaheuristiques basés sur le comportement des chats et de loups gris, nous avons pu déterminer les configurations optimales et améliorer la fiabilité du système. L'association du calcul de la fiabilité à l'optimisation apparaît dans une première vue comme simple et facile à mettre en œuvre. Mais en réalité et durant le passage de l'algorithme au programme finale, on se heurte à des difficultés énormes pour aboutir à des résultats concrets.

Notre but était fixé sur le renouvellement des composantes du système électro énergétique basé sur une production à sources d'énergies renouvelables. Cette tâche a été effectué par modification de configuration voir même un remplacement des composants qui ne respectent pas les critères calculés. Dans le but de réduire la facture de remplacement ou de modification des composants, des méthodes d'optimisation ont été appliquées. Le but majeur vise une fiabilité satisfaisante. Les deux méthodes d'optimisation ont permis d'avoir des résultats rassurants.

Les méthodes ont présentés l'avantage de se baser sur une population de solution. Notre logique étant de s'attacher à converger vers un minimum global plutôt que de stagner sur un minimum local.

Nous tenons également à souligner que cet outil présente un support construit à partir de la nature. En effet, il permet de favoriser le lien entre la nature et les méthodes mathématiques de résolutions auxquelles est confrontée la recherche. Située comme le maillon central de notre travail, elle nous a permis la mise au point de deux programmes :

- Le premier concerne l'optimisation de la topologie du réseau suivant une configuration optimale.
- Le second, se charge de l'optimisation globale en intégrant le système de production. Le but visé a été de satisfaire une charge en réalisant un compromis entre coût et fiabilité du système. Ceci est réalisé grâce à un algorithme de sélection des différents composants

Conclusion générale

pour la redondance afin de concevoir un design optimal du système globale « réseaux électriques ».

Selon les politiques et les perspectives visés par les sociétés de production, transport et distribution d'énergie électrique tout en respectant les budgets alloués par les gouvernements ou les actionnaires, les calculs obtenus dépassent parfois certains budgets. Dans ces conditions, le recours à un budget supplémentaire s'avère plus que nécessaire. Cette option largement utilisé au cours des années passés se limite de peu à peu vis-à-vis de la crise mondiale imposé par une pandémie mondiale.

Un volet de recherche nouveau peut prendre naissance par une nouvelle contrainte imposée par une crise sanitaire. Le problème auquel on se heurte est celui de donner un modèle d'équation de contrainte présentant cette pandémie. C'est un sujet plus qu'intéressant qu'on peut proposer aux futurs thésards. Les résultats de recherches auront des retombés considérables sur les économies des différents pays.

Comme perspective, nous suggérons de tester l'application de ces méthodes sur des systèmes réels plus complexes afin de tester leurs robustesses.

Nous espérons un développement de ces méthodes par leurs applications sur des projets réels. En effet, il serait intéressant de favoriser leurs mises en œuvre, de manière globale dans d'autres projets dans des contextes variés (autres milieux, groupes...).

Ainsi nous pensons que notre travail de recherche apporte une contribution, certes modeste mais néanmoins nouvelle, à un besoin de la communauté scientifique. Notre place nous conforte sur le besoin de poursuivre ce travail vers l'extension des applications.

REFERENCE

- [1] A.Vergnol, «Intégration dans le réseau électrique et le marché de l'électricité de production décentralisée d'origine renouvelable», thèse de doctorat, Université de Lille, 2010.
- [2] Réseau Electrique, Encyclopédie Encarta, 2006.
- [3] S. Bouri, «Optimisation de la production et de la structure d'énergie électrique par les colonies de fourmis», thèse de doctorat, Université de Djilali Liabès, 2007.
- [4] G.J. Anders, «Probability concepts in electric power system», Wiley Publication, New York, 1996.
- [5] O. Gergaud, «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur», thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan Bretagne, 2002.
- [6] R. Redjem, «Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne», thèse de doctorat, Université de Constantine, 2009.
- [7] H. Persoz, G. Santucci, L. Jean-Claude, P. Sapet, «La planification des réseaux électriques », Editions Eyrolles, 1984.
- [8] M. Crape, «Commande et régulation des réseaux électriques », Chap.2 Traité EGEM série génie électrique, Lavoisier, 2003.
- [9] H. Kouara, «Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension», mémoire de magister, Université de Batna, 2006.
- [10] R. Devre, B. Jacquet, «Perturbations dans les installations électriques et électroniques Problèmes et solutions», Note d'information.
- [11] C. Jacques, G. Preville, S. Jean-Louis, «Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II)», Techniques de l'ingénieur D 4315.
- [12] F. Cherif, «Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique », thèse de doctorat, Université de Batna, 2006.
- [13] N. David, «A Self-Tuning Filter for the Mitigation of Power System Harmonics», mémoire de master en science, Université de Alberta, Edmonton, 2000.
- [14] A. Derek Paice, «Power Electronic Converter Harmonic», IEEE Press New York, 1996.
- [15] T. Gönen, «Electric Power System Engineering: Analysis and Design» John Wiley & Sons, Edition, 1988.

Référence

- [16] G. Fusco, M. Russo, «Adaptive Voltage Control in Power Systems; Modeling, Design and Applications», Chap. 1" The voltage control problem in power systems" Université de Cassino, Italia, September 2006.
- [17] B.De Metz-Noblat, G. Jeanjean, «Stabilité dynamiques des réseaux électriques industriels», Cahier Technique n° 185.
- [18] P. Kundur, «Power System Stability and Control», IEEE Transactions on Power System 1994.
- [19] R. Gagnon, «Étude de la Ferro résonance dans les réseaux compensées séries et shunt», thèse de doctorat, Université de Laval, Québec. Canada, 1997.
- [20] S. Repo, «On-line Voltage Stability Assessment of Power system - An approach of Back-box modelling», thèse de doctorat, Université de Tampere, 2001.
- [21] C. Ben Salah, A. Belhadj, «Contribution à l'analyse de la stabilité statique de la tension», thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Montréal, 1996
- [22] P. blanquart, J. claudoncin, «Fiabilité», Technique de l'ingénieur
- [23] R. Meziane, «Optimisation de la structure d'un réseau de production d'énergie électrique et amélioration de sa performance», thèse de doctorat, USTO, 2007.
- [24] E. H.L. Aarts, J.K. Lenstra, «Local search in combinatorial optimization», John Wiley & Sons, 1997.
- [25] D. Corne, M. Dorigo, F. Glover, «New Ideas in Optimization», McGraw-Hill, pp.11-32, 1999.
- [26] A. Yalaoui, «Allocation de fiabilité et de redondance dans les systèmes parallèle- série et série- parallèle», thèse de doctorat, Université Troyes, 2004.
- [27] O. Roux, «applications à l'optimisation et à la programmation automatique», thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, 2001.
- [28] Méta heuristique, Wikipédia encyclopédie, 20 décembre 2005.
- [29] B. Holldobler, O. Edward Wilson, «Voyage chez les Fourmis» Seuil, 1996.
- [30] B. Bullnheimer, R.F. Hartl, C. Strauss «A new rank-based version of the ant system», A computational study Central European Journal of Operations Research, Vol. 7, No 1, pp.25-38, 1999.
- [31] D. Corne, M. Dorigo, F. Glover, « New Ideas in Optimization», McGraw-Hill, 1999.
- [32] J. Hao, P. Galinier, M. Habib, «Méta heuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes», Revue d'Intelligence Artificielle, Vol : No. 1999.
- [33] Méta heuristique, Wikipédia encyclopédie, 20 décembre 2005.

Référence

- [34] J. Dreco, A. Petrowski, P. Siarry, E. Taillard, «Métaheuristiques pour l'optimisation difficile», Eyrolles, 2003.
- [35] S. Martello, S. I.H. Osman, C. Roucairol, « Meta- Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization», Kluwer, Boston, 1999.
- [36] Algorithmes génétiques, Wikipedia, encyclopédie, 20 décembre 2005.
- [37] M. Dorigo, «Optimization, learning and natural algorithms», thèse de doctorat, Polytechnique de Milan, Italia, 1992.
- [38] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz, «Inspiration for optimization from social insect behavior », Vol. 406, No. 6791, pp. 39-42, 2000.
- [39] J.H. Holland, «Adaptation in natural and artificial systems», Université de Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [40] S. Chen, S. Smith, «Commonality and genetic algorithms», Technical Report CMU-RITR- 96-27, Université de Carnegie Mellon, Pittsburgh, PA, USA, 1996.
- [41] S. Mirjalili, Sm. Mirjalili, A. Lewis, «Grey wolf optimizer», Adv Eng Softw, Vol. 69, pp46–61, 2014.
- [42] M.A. Kimouche, M. Benzid, «Les méthodes méta-heuristiques pour l'optimisation en génie électrique», Master en Electromécanique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia Jijel, 2019.
- [43] H. Boudjella, «contrôle des puissances et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC)», thèse magister, Université DjilaliLiabes Sidi Bel Abbes, 2019.
- [44] G. Levitin, A. Lisnianski,D. Elmakis, «Structure optimization of power system with different redundant elements», Electric Power System Research, Vol. 43, pp. 19-27, 1997.
- [45] J. Hudson, K. Kapur, «Reliability analysis for multistate system with multistates Components», IEE Transaction on Reliability, Vol. 15/2, pp. 127-134, 1983.
- [46] D. E. Fyffe, W. W. Hines, N. K. Lee, «system reliability allocation and a computation algorithm», IEEE Transaction on Reliability, Vol.17, pp. 64-69, 1968.
- [47] C .Sung, Y. Cho, «Branch and bound redundancy optimization for series system with multiple choice constraints», IEEE Transaction on Reliability, Vol. 48, pp. 108-117, 1996.

Référence

- [48] J. E. Ramirez-Marquez, D. W. Coit, «A heuristic for Solving the redundancy allocation problem for multi states series parallel systems», Reliability Engineering and System Safety. Vol.83, pp. 341-349, 2004.
- [49] G. J. Anders, «Probability concepts in electric power system», Wiley Publications, New York, 1996.
- [50] R. N. Allan, I. G. Musa, «Evaluation of the generating systems», Inter. Conf. on Power Supply Systems, IEE conf. Pub. 225, pp. 22-26, 1983.
- [51] R. Allan, D. Gomez, «Operational parameters in generation reliability evaluation», Power System Computation Conf, PSOC Helseinki, pp. 174-178, 1984.
- [52] R. N. Allan, R. Billinton, N. M. Abdel-gawad, «The IEEE reliability test system – extensions to evaluation of the generation system», IEEE Trans. On Power System, PWRS Vol. 1, No 4, pp. 1-7, 1986.
- [53] R. N. Allan, R. Billinton, S. Shahidehpour, C. Singh, «Bibliography of the application of probability methods in power system reliability evaluation », IEEE Transaction Power Systems, Vol. 3, pp. 1555-64, 1988.
- [54] R. N. Allan, R. Billinton, S. Shahidehpour, A. M. briephohl, C. H. Grigg, «Bibliography of the application of probability methods in power system reliability evaluation», IEEE Transaction Power Systems, Vol. 9, No 1, 1994.
- [55] W. Barlow, A. W. Wu, «Coherent system with multistate components», Math Operational Research, Vol. 3/4, pp. 275-281, 1985.
- [56] A. Bauer, B. Bullnheimer, R. F. Hartl, C. Strauss, «Minimizing total tardiness on a single machine using ant colony optimization», Central European Journal of Operational Research, Vol. 8, No. 2, pp. 125-141, 2000.
- [57] A. Bauer, B. Bullnheimer, R. F. Hartl, C. Strauss, «An ant colony optimization approach for the single machine total tardiness problem», Proceeding of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, IEEE Press, Piscataway, NJ, pp. 1445-1450, 1999.
- [58] R. Bellman, S. Dreyfus, «Dynamic programming and the reliability of multicomponents devices», Operational Research, Vol. 6, pp. 200-206, 1958.
- [59] I. Ushakov, «Handbook of reliability engineering », New York, Wiley, 1994.
- [60] I. AUshakov, G. Levitin, A. Lisnianski, «Multi-state system reliability: from theory to practice», Proc. of 3 Int. Conf. on mathematical methods in reliability, MMR 2002, Trondheim, Norway, pp. 635-638, 2002.

Référence

- [61] I. A. Ushakov, «Optimal standby problems and a universal generating function», Soviet Journal of Computing System Science, Vol. 25, No 4, pp. 79-82, 1987.
- [62] I. A. Ushakov, «Universal generating function», Soviet Journal of Computing System Science, Vol. 24, No 5, pp. 118-129, 1986.
- [63] P. M. Pradhan, G. Panda, «Solving multi objective problems using cat swarm optimization», Expert Systems with Applications, Vol. 39, No 3, pp. 2956–2964, 2012.
- [64] G. Ram, D. Mandal, R. Kar & Ghoshal, S. P, «Cat swarm optimization as applied to time-modulated concentric circular antenna array: Analysis and comparison with other stochastic optimization methods», IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 63, No 9, pp. 4180–4183, 2015.
- [65] Y. Sharafi, M. A. Khanesar, M. Teshnehlab, «Discrete binary cat swarm optimization algorithm», In Computer, Control & Communication (IC4). 3rd IEEE International Conference on Computer, Control & Communication (IC4), Karachi, Pakistan, 25–26 September, 2013.
- [66] L. Xu, & W. B. Hu, «Cat swarm optimization-based schemes for resource-constrained project scheduling», Applied Mechanics and Materials, Vol. 220, pp. 251–258, 2012.
- [67] S. D. Yang, Y. L. Yi, Z. Y. Shan, «Chaotic cat swarm algorithms for global numerical optimization», Advanced Materials Research, Vol. 602, pp. 1782–1786, 2013.
- [68] S. D. Yang, Yi, Y. L., Lu, Y. P, «Homotopy-inspired cat swarm algorithm for global optimization», Advanced Materials Research, Vol. 602, pp. 1793–1797, 2013.
- [69] R. Meziane, S. Boufala, M. Amara, A. Hamzi, «Cat swarm algorithm constructive method for hybrid solar gas power system reconfiguration» 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Marrakech and Ouarzazate, Morocco, 10–13 December, 2015.
- [70] M. Y. Mon, «Design and calculation of 5 MVAR shunt capacitor bank at 33kV Bus indistribution substation», International Journal of Scientific Engineering and Technology Research, VOL. 3, No15, pp. 3259–3263, 2014.
- [71] R. Magadum, T. Timsani, «Minimization of power loss in distribution networks by different techniques», Int. J. Sci. Eng. Res. Vol. 3, No 5, pp. 521–527, 2012.
- [72] A. E. B. Abu-Elanien, K. B. Shaban, «Modern network reconfiguration techniques for service restoration in distribution systems: a step to a smarter grid», Alexandria Engineering Journal, Vol. 57, No 4, pp. 3959–3967, 2018.

Référence

- [73] A. Hamzi, R. Meziane, A. Bouanane, «The study of reducing the cost of investment in wind energy based on the cat swarm optimization with high reliability» , Telkomnika Telecommunication, Computing, Electronics and Control, Vol. 18, No. 4, pp. 2245-2250, August 2020.
- [74] Site: <http://energie-biomass.e-monsite.com/pages/les-avantages.html>
- [75] Site : <http://energie-biomass.e-monsite.com/pages/les-inconvenients.html>
- [76] Site: <http://lamethanisationpourlesnuls.emonsite.com/pages/avantagesinconvenients/avantages.html>
- [77] Site: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pétrole>
- [78] Site : http://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_nucl%C3%A9aire
- [79] A. Villemeur, «Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels Fiabilité, facteurs humains, informatisation», Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France. Ed. Eyrolles, Paris, 1988.

"..... تحديث أنظمة إنتاج الطاقة التقليدية والمتجددة....."

الملخص:

يعد نظام إنتاج الطاقة الكهربائية مثلاً على الأنظمة التي تستند إليها عملية التوريد بأكملها التي يجب أن تضمنها شبكات التوزيع والنقل. في الواقع ، يشكل نظام الإنتاج الحلقة الأساسية في هذه السلسلة. بالإضافة إلى عناصر أنظمة الإنتاج التي تتدهور خصائصها مع تقدم العمر والاستخدام. تملّي الحاجة إلى استبدال هذه الانظمة لضمان استمرار الخدمة للمكونات المعرضة لأعطال. أي انقطاع طويل الأمد يمكن أن يكون مكلفاً. وبالتالي فإن الهدف في هذه الدراسة هو تقديم نهج استبدال شامل يتبع سياسة استبدال جيدة وذو موثوقية جيدة.

كلمات افتتاحية:التجديد،الصيانة،الموثوقية،الطاقة الشمسية،الرياح.

« ... Modernisation des systèmes de production classiques et renouvelables ... »

Résumé :

Le système de production d'énergie électrique est un exemple de ces systèmes sur lequel repose tout le processus de fourniture que le réseau transport distribution doit assurer. En effet, le système de production constitue le maillon essentiel de cette chaîne. Par ailleurs, les éléments des systèmes de production dont les caractéristiques se dégradent avec l'âge et avec l'usage. Le besoin de remplacement est dicté par la nécessité d'assurer une continuité de service à des composantes assujetties à des défaillances accidentelles. Toute interruption prolongée peut, en effet se révéler couteuse. L'objectif est donc de proposer une démarche globale de remplacement suivant une politique de remplacement bien orientée et bonne Fiabilité.

Mots clés : Renouvellement, Maintenance, Fiabilité, Solaire, Éolienne.

« Modernization of conventional and renewable production systems »

Abstract:

The electrical energy production system is an example of these systems on which the entire supply process that the transmission distribution network must ensure is based. Indeed, the production system constitutes the essential link in this chain. In addition, the elements of production systems whose characteristics deteriorate with age and use. The need for replacement is dictated by the need to ensure continuity of service to components subject to accidental failures. Any prolonged interruption can indeed be costly. The objective is therefore to offer a comprehensive replacement approach following a well-oriented replacement policy and good reliability.

Key words: Renewal, Maintenance, Reliability, Solar, Wind.