



People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم
Abdelhamid Ibn Badis University – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology



Filière : Génie Electrique
Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Mémoire de Master :

Analyse de flux d'énergie dans un réseau de distribution

Présenté par :

BENNAMA Fatima Zohra

BENMESAHEL Hanifa

Soutenu le 01 Juillet 2024, devant le jury :

Présidente	Mme. BECHIRI Fatiha	MCA
Examineur :	M. KOUADRIA	MCB
Encadrant :	M. BEKKOUCHE Benaissa	Pr
Co-encadrant :	M. BELBACHIR Nassereddine	Dr

Année universitaire 2023/2024

Remerciements :

Ce mémoire est l'aboutissement d'un travail réalisé avec beaucoup d'acharnement et de dévouement, bien sûre en exploitant de nombreuses connaissances acquises lors notre cursus universitaire dans chaque étape pour assurer que notre recherche apporte une contribution fructueuse et significative à tous ceux qui la liront et qu'elle pourra les inspirer dans leurs propres recherches et réflexions.

Tout d'abord nous souhaitons exprimer notre immense gratitude à notre encadrant Pr.BEKKOUCHE Benaïssa et notre co-encadrant Dr.BELBACHIR Nasserddine pour leurs conseils avisés et précieux , leur disponibilité constante et leurs engagement à nous guider tout au long de cette recherche . Leur soutien ainsi que leur expertise ont été essentiel à la réalisation de cette thèse, nous les remercions chaleureusement, nous sommes très reconnaissantes envers leurs accompagnements et ce fut un immense plaisir de travailler sous leurs directives.

De sincères remerciements aux membres du jury Mme.BECHIRI Fatiha et Mr.KOUADRIA pour avoir pris le temps d'examiner notre travail et de participer à notre soutenance. Votre évaluation et vos avis critiques sont inestimables et contribueront grandement à l'amélioration de cette recherche.

Nous sommes profondément reconnaissantes à nos familles ainsi nos chers amis pour leur soutien inconditionnel et leur amour. Vos encouragements et votre patience ont été des piliers tout au long de ce parcours académique. Merci de nous avoir accompagnées avec tant de bienveillance et de compréhension.

Résumé :

L'intégration de la production d'énergie renouvelable décentralisée dans le réseau de distribution électrique est devenue une solution avantageuse, assurant un équilibre satisfaisant entre production et consommation d'énergie. Cette approche offre de nombreux bénéfices, tels que l'ajout d'énergie propre, la réduction des pertes de puissance active et réactive, et l'amélioration des profils de tension et de la stabilité du système, à condition que les sources soient correctement placées et dimensionnées.

Ce travail vise principalement à implémenter l'algorithme méta-heuristique d'optimisation par essaim de particules (PSO) pour valider son efficacité dans l'allocation optimale de diverses sources d'énergie renouvelable décentralisée, comme le photovoltaïque et l'éolien, ainsi que des systèmes hybrides dans le réseau de distribution électrique. L'objectif est de minimiser différentes fonctions multi-objectifs basées sur des paramètres économiques et techniques. Les résultats ont montré que l'implantation optimale de ces ressources améliore considérablement les performances des systèmes de distribution étudiés, en réduisant les pertes de puissance, en améliorant les profils de tension et en optimisant leur fonctionnement global.

Mots clés : Intégration optimale, Générateurs décentralisées, Ressources renouvelables, Algorithmes méta-heuristiques, Fonctions multi-objectifs, Réseau de distribution.

Abstract:

The integration of decentralized renewable energy production into the electricity distribution network has become an advantageous solution, ensuring a satisfactory balance between energy production and consumption. This approach offers many benefits, such as the addition of clean energy, the reduction of active and reactive power losses, and the improvement of the voltage profiles and stability of the system, provided that the sources are properly placed and sized.

This work mainly aims to implement the meta-heuristic particle swarm optimization (PSO) algorithm to validate its efficiency in the optimal allocation of various decentralized renewable energy sources, such as photovoltaics and wind power, as well as hybrid systems in the power distribution network. The goal is to minimize different multi-objective functions based on economic and technical parameters. The results showed that the optimal implementation of these resources significantly improves the performance of the distribution systems studied, reducing power losses, improving voltage profiles and optimizing their overall operation.

Key words: Optimal integration, Distributed generators, Renewable resources, Metaheuristic algorithms, Multi-objective functions, , Distribution network

ملخص:

أصبح دمج الإنتاج اللامركزي للطاقة المتجددة في شبكة توزيع الكهرباء حلاً مفيداً يضمن توازناً مرضياً بين إنتاج واستهلاك الطاقة. يوفر هذا النهج العديد من الفوائد، مثل إضافة الطاقة النظيفة، وتقليل فقدان الطاقة النشطة والتفاعلية، وتحسين ملامح الجهد واستقرار النظام، بشرط وضع المصادر وتحديد أحجامها بشكل صحيح .

يهدف هذا العمل بشكل أساسي إلى تنفيذ خوارزمية تحسين أسراب الطيور (PSO) للتحقق من كفاءتها في التوزيع الأمثل لمختلف مصادر الطاقة المتجددة اللامركزية، مثل الخلايا الكهروضوئية وطاقة الرياح، وكذلك الأنظمة الهجينة في شبكة توزيع الكهرباء. الهدف هو التقليل إلى أدنى حد من مختلف الوظائف متعددة الأهداف استناداً إلى المعايير الاقتصادية والتقنية.

أظهرت النتائج أن التنفيذ الأمثل لهذه الموارد يحسن بشكل كبير أداء أنظمة التوزيع المدروسة، حيث يقلل من فقدان الطاقة، ويحسن ملامح الجهد، ويعزز التشغيل العام للشبكة.

لكلمات المفتاحية: الإدماج الأفضل، المولدات اللامركزية، الموارد المتجددة، الخوارزميات، الوظائف متعددة الأهداف، شبكة التوزيع الكهربائي.

Abréviations :

RDG : Générateur renouvelable décentralisé.

RDE : Réseau de distribution électrique.

PSO : Optimisation par essaims de particule (particul swarm optimization).

GS : Gauss Seidel.

NR : Newton Raphson.

AG : Algorithme génétique.

DG : Production décentralisée.

SDR : Système de distribution radial.

SER : Source d'énergie renouvelable.

FACTS : Flexible alternating current transmission system.

PVDG : Production décentralisée photovoltaïque.

DSTATCOM : Distribution static synchronous compensator.

PV : photovoltaïque.

GPV : Génération (production) photovoltaïque.

VSC : convertisseur source de tension.

MOF : multi-objectifs fonctions.

TVD : total voltage deviation

TAPL :total active power loss

Table des matières :

Remerciements	2
Résumé :.....	3
Abréviations :.....	5
Liste des figures	5
Liste des tableaux	6
Introduction générale.....	7

Chapitre 1 : Généralités sur le réseau électrique

1.Introduction :.....	4
2.La production d'électricité :.....	5
2.1.2 Les énergies renouvelables :	6
2.2.2 Les Centrales Thermiques :	9
2.2.3 Les centrales hydrauliques :	10
2.2.4 Les centrales éoliennes :.....	12
2.2.5 Les centrales solaires :	13
2.2.6 Centrale biomasse :	15
2.2.7 Les centrales géothermiques :	16
3 Description des réseaux électriques :	18
3.1 Les niveaux de tension dans les réseaux électriques :.....	19
4 Hiérarchie des réseaux électriques :	20
4.1 Réseau de transport de l'énergie électrique et d'interconnexion :	20
4.2 Réseau de répartition :.....	21
4.3 Réseau de distribution :.....	22
4.3.1 Structure générale d'un réseau privé de distribution :	23
4.3.2 Modes d'alimentation des tableaux HTA :	24
4.3.3 Structure des réseaux HTA :	28
5. Conclusion :	31

Chapitre 2: Ecoulement de puissance et optimisation

1. Introduction :.....	33
2 Modélisation des éléments du réseau électrique :.....	34
2.1 Modélisation du moyen de production :.....	34
2.1.1 Modélisation des lignes :.....	34
2.1.2 Modélisation de la charge :	35

2.1.3 Modélisation du transformateur :	36
2.2 L'écoulement de puissance (Power Flow) :	37
2.2.1 L'objectif de calcul de l'écoulement de puissance :	37
2.2.2 Classification des jeux de barres (les nœuds) :	38
2.2.3 Calcul de l'écoulement de puissance :	39
2.2.4 Méthodes de Gausse-Seidel (GS) :	39
2.2.5 Méthode découplée rapide :	39
2.2.6 Méthode de Newton-Raphson (NR) :	39
2.2.7 Comparaison entre Méthode de (GS) et (NR) :	41
2.3 L'Optimisation de l'écoulement de puissance :	42
2.4 Les méthodes d'optimisation de l'écoulement de puissance :	42
2.4.1 La méthode de Gradient :	42
2.4.2 La méthode de Newton :	42
2.4.3 La méthode d'itération de Lambda (Lambda itération méthode) :	43
2.4.4 Les algorithmes génétiques :	43
2.5 Les méthodes méta-heuristique :	43
2.5.1 L'Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielle ABC :	44
2.5.2 L'Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielle ABC :	45
2.5.3 Optimisation par l'algorithme de colonies de fourmis ACO :	45
2.5.4 Optimisation par essaims de particules :	46
3 Conclusion :	48

Chapitre 3 : L'intégration du PVDG-DSTATCOM

1. Introduction :	50
2. Modélisation :	51
2.1 Ligne de distribution radiale :	51
2.2 Le générateur décentralisé photovoltaïque (PVDG) :	52
2.2.1 Système de conversion photovoltaïque :	52
2.2.2 Modèle d'un générateur PV :	53
2.2.3 Paramètres externes de la cellule photovoltaïque :	54
2.2.4 Rendement de GPV :	55
2.3 Modèle du DSTATCOM :	56
2.3.1 Introduction sur DSTATCOM :	56
2.3.2 Fonctionnement du DSTATCOM :	56

Table des matières

2.3.3 Structure d'un DSTATCOM :.....	57
2.3.4 Modélisation du DSTATCOM :.....	57
3. L'Optimisation par essais particulaires PSO :	59
3.1 L'algorithme PSO :	60
4. Systèmes d'essai, comparaison et résultats d'analyse :	62
4.1 Les systèmes à tester :	62
5. Évaluation des fonctions multi-objectifs :.....	63
5.1 Les fonctions multi-objectifs :	63
5.2 Contraintes des unités PVDG et DSTATCOM :.....	64
6. Les résultats obtenus :	65
6.1 Paramètre des performances du réseau :	68
7.Conclusion :	70
Conclusion générale	87
Références.....	88

Liste des figures

Figure 1.1 :Schéma d'une centrale nucléaire	8
Figure 1.2 :Centrale thermique	10
Figure 1.3: Le fonctionnement d'une centrale hydraulique	11
Figure 1.4: Fonctionnement d'une éolienne	12
Figure 1.5: Centrale solaire photovoltaïque.....	13
Figure 1.6: Principe de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque.....	14
Figure 1.7: Fonctionnement d'une centrale biomasse	16
Figure 1.8 : Fonctionnement de la centrale géothermique	17
Figure 1.9 : Structure du réseau électrique.....	18
Figure 1.10:Chemin de l'énergie électrique.....	19
Figure 1.11 :Schéma d'un réseau maillé	20
Figure 1.12 :Les interconnexions internationales avec le réseau de transport de l'Algérie	21
Figure 1.13 :Schéma d'un réseau bouclé	21
Figure 1.14 :Schéma d'un réseau de distribution à structure radiale	22
Figure 1.15 :Schéma d'un réseau de distribution en antenne.....	22
Figure 1.16 :Structure générale d'un réseau privé de distribution.....	23
Figure 1.17: Schéma d'un jeu de barres avec une source d'alimentation	24
Figure 1.18: Un jeu de barres sans couplage avec deux sources d'alimentation	24
Figure 1.19 :Schéma de deux jeux de barres avec couplage et deux sources d'alimentation	25
Figure 1.20 :Schéma d'un jeu de barres sans couplage et trois sources d'alimentation	25
Figure 1.21 :Schéma de Trois jeux de barres avec couplages et trois sources d'alimentation	26
Figure 1.22 : Schéma de trois jeux de barres avec couplages et trois sources d'alimentation	26
Figure 1.23: Deux jeux de barres avec deux attaches par départ et deux sources d'alimentation	27
Figure 1.24: Schéma de deux doubles jeux de barres couplés entre eux	28
Figure 1.25 :Structure des réseaux maillés.....	28
Figure 1.26 :Réseau HTA radial en simple antenne.....	29
Figure 1.27: Réseau HTA radial en double antenne sans couplage.....	29
Figure 1.28: Réseau HTA radial en double antenne avec couplage	30
Figure 2.1 : Modélisation d'une centrale de production	34
Figure 2.2 : Modélisation d'une ligne par un schéma en pi.	34
Figure 2.3 : Modèle simple d'une ligne en pi.	35
Figure 2.4 : Représentation d'une charge par la puissances consommée et fournie.	35
Figure 2.5 : Modèle d'une charge électrique	36
Figure 2.6 : Schéma équivalent d'un transformateur	36
Figure 2.7 : Modélisation d'un transformateur	36
Figure 2.8: Classification des méthodes méta-heuristiques.....	44
Figure_3.1 : Schéma d'une ligne de distribution radiale	51
Figure 3.2 : Système de conversion photovoltaïque.....	52
Figure 3.3 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	53
Figure 3.4 : structure du DSTATCOM couplé au réseau.....	57
Figure 3.5 : Diagramme vectoriel de la tension de charge.....	59
Figure_3.6 : Inspiration de l'algorithme PSO.....	60
Figure 3.7 : Schéma des réseaux de distribution électrique évalués	62
Figure 3.8: Courbes de convergence pour PV-DSTATCOM dans le réseau IEEE 33-bus.....	65
Figure 3.9 : Courbes de convergence pour PV-DSTATCOM dans le réseau IEEE 69-bus.....	65
Figure 3.10 : Profils de tension des bus pour IEEE 33-bus.....	68
Figure 3.11 : Profils de tension des bus pour IEEE 69-bus.....	68
Figure 3.12 : les pertes de puissance active pour le SDR IEEE 33-bus.....	69
Figure 3.13 : les pertes de puissance active pour le SDR IEEE 69-bus.....	69

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Classification des jeux de barre	57
Tableau 2.2: Comparaison entre deux méthodes de calcul d'écoulement de puissance.....	61
Tableau 3.1: Résultats optimaux du cas du PVDG pour le SDR IEEE 33-bus.....	90
Tableau 3.2: Résultats optimaux du cas du PVDG pour le SDR IEEE 69-bus.....	90
Tableau 3.3: Résultats optimaux du cas PVDG-DSTACOM pour IEEE 33-bus.....	91
Tableau 3.4: Résultats optimaux du cas PVDG-DSTACOM pour IEEE 69-bus.....	91

Introduction générale

L'électricité est l'une des ressources essentielles qui alimentent notre vie moderne. De l'éclairage de nos maisons aux activités industrielles complexes, elle est omniprésente et indispensable. Cependant, la route que prendra l'électricité depuis sa production jusqu'à nos prises ne sera pas simplement un trajet direct. Cela impliquera un système complexe de production, de transport et de distribution, où l'optimisation de l'écoulement de puissance jouera un rôle crucial pour assurer l'efficacité et la fiabilité du réseau.

Ce travail a pour objectif de calculer l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution radial en utilisant la méthode de Newton-Raphson, puis d'améliorer ce réseau par la méthode d'optimisation d'essaims de particulaires (PSO) en intégrant les énergies renouvelables.

Dans le premier chapitre, nous verrons comment l'électricité sera produite, transportée et enfin distribuée, ainsi que les différents types de réseaux HTA. Nous commencerons par expliquer les méthodes de production d'électricité, telles que les centrales à combustibles fossiles, les centrales nucléaires, et les énergies renouvelables comme l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, solaire thermique et géothermique. Nous expliquerons comment chaque technologie utilise des turbines pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Ensuite, nous décrirons comment l'énergie électrique produite sera transformée en haute tension pour le transport sur de longues distances, puis acheminée via des lignes de transmission à haute tension, et enfin distribuée aux consommateurs finaux après avoir été transformée à des niveaux de tension utilisables.

Dans le deuxième chapitre, nous entamerons l'écoulement de puissance ainsi que ses différentes méthodes de calcul et en ferons une comparaison. Nous expliquerons comment le calcul de l'écoulement de puissance est essentiel pour évaluer comment l'électricité se déplace à travers le réseau électrique, en tenant compte de variables telles que la tension, le courant, l'impédance du circuit et la demande électrique des consommateurs. Nous détaillerons les méthodes mathématiques utilisées, comme l'analyse nodale et les méthodes itératives telles que la méthode de Gauss-Seidel et la méthode de Newton-Raphson. Ensuite, nous passerons à l'optimisation de l'écoulement de puissance, en décrivant comment ces calculs nous permettront d'identifier et de résoudre des problèmes comme la chute de tension et l'augmentation de la puissance réactive pour garantir un fonctionnement stable et efficace du réseau.

Enfin, le troisième et dernier chapitre consistera en l'application d'une solution aux problèmes que l'on peut rencontrer dans la distribution de l'énergie électrique. Cette solution consistera à intégrer des sources d'énergies renouvelables de manière optimale afin d'améliorer les performances des réseaux de distribution. Nous présenterons la méthode d'optimisation par essaim particulaire (PSO) et montrerons comment elle sera utilisée pour optimiser l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau. La PSO, inspirée par le comportement collectif des oiseaux et des poissons, permettra de trouver des solutions optimales pour stabiliser la tension et réduire les pertes d'énergie. Nous verrons comment l'intégration des énergies renouvelables et des dispositifs comme le DSTATCOM contribuera à résoudre les problèmes de chute de tension et de puissance réactive, améliorant ainsi la stabilité et l'efficacité du réseau.

Chapitre I

Généralités sur le réseau électrique

1. Introduction :

L'électricité est très présente dans nos vies qu'elle nous accompagne dans toutes nos activités au quotidien et nous est utile de toute sorte de façon, elle joue un rôle important dans de nombreuses sphères de la vie.

L'électricité est partout pourtant nous la prenons pour acquise sans trop savoir comment elle arrive chez nous, comment elle est produite, au fait qu'est-ce que c'est l'électricité ?

Tout ce qui existe dans l'univers est composé de particules comme les atomes, un atome est constitué principalement de noyau qui comporte des protons et des neutrons, autour de ce noyau gravitent des particules qu'on appelle des électrons ils sont un peu comme les satellites qui tournent autour de la terre. Quand les électrons se déplacent d'un atome vers un autre on dit qu'il y a un mouvement d'électron et ce mouvement est ce qu'on appelle le courant électrique ou l'électricité.

Il faut d'abord avoir un matériau conducteur dans lequel les électrons peuvent bouger facilement ,un fil de cuivre par exemple et pour que leurs déplacements aient lieu il faut la présence d'un champ magnétique d'un aimant .Lorsqu'on déplace un aimant devant un matériau conducteur le champ magnétique a un impact immédiat sur les électrons ,ils bougent dans un sens ou dans l'autre selon le pôle qui passe devant eux donc le champ magnétique crée un mouvement de va et vient des électrons dans le conducteur .La variation de ce champ est causée par l'aimant qui tourne joue un rôle important dans la production d'électricité .

Mais comment l'électricité est-elle produite tous les jours dans un grand réseau électrique comme le nôtre.

Pour bien comprendre le phénomène il faut aller à la source, c'est ce que nous allons entamer dans ce chapitre, nous allons voir comment l'électricité est produite, transportée pour enfin être distribuée.

2. La production d'électricité à grande échelle :

Il faut deux éléments pour produire de l'électricité : un alternateur et une source pour faire fonctionner l'alternateur, ce dernier convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. L'alternateur est composé de deux pièces le rotor et le stator.

L'électricité est produite par la conversion de différentes formes d'énergie en énergie électrique. Ce processus nécessite toujours une source d'énergie initiale. Dans les centrales thermiques à combustibles fossiles, des ressources telles que le charbon, le pétrole, ou le gaz naturel sont brûlées pour produire de la chaleur, qui est ensuite utilisée pour générer de la vapeur. Cette vapeur entraîne des turbines connectées à des générateurs, transformant ainsi l'énergie thermique en énergie électrique. Les centrales nucléaires fonctionnent sur un principe similaire, mais utilisent la fission nucléaire pour produire de la chaleur. Les énergies renouvelables, comme l'hydroélectricité, l'énergie éolienne et l'énergie solaire, exploitent respectivement l'énergie potentielle de l'eau, l'énergie cinétique du vent, et la lumière du soleil pour générer de l'électricité. Enfin, les centrales à turbines à gaz brûlent du gaz naturel pour produire des gaz chauds sous pression, qui font tourner des turbines générant de l'électricité. Toutes ces méthodes nécessitent une source d'énergie initiale, qu'elle soit fossile, nucléaire ou renouvelable, pour être convertie en électricité utilisable.

2.1 Les sources d'énergie électrique :

Comme on l'a cité précédemment il faut une source pour mettre en mouvement le rotor de l'alternateur cependant l'énergie électrique est une énergie secondaire faite à partir d'une énergie primaire.

Sur notre planète la terre, il existe de nombreuses sources d'énergie primaire qui sont classées en deux catégories :

2.1.1 Les énergies fossiles :

Ce sont toutes les énergies qui vont disparaître de notre planète à cause de l'exploitation humaine car elles existent en quantité limitée sur la terre, elles sont :

- Le pétrole : il s'agit d'une énergie fossile remontant à l'Antiquité, qui est utilisée dans tous les domaines : la production d'électricité, le plastique, l'essence, le gasoil, etc. ;
- Le gaz naturel : elle est utilisée dans beaucoup d'habitations pour le chauffage aussi, et la cuisson. Elle est même de plus en plus présente dans l'industrie du transport.
- Le charbon : le charbon est l'énergie fossile la plus émettrice de CO_2 . Il est également utilisé dans les foyers pour la cuisson, mais également pour se chauffer dans certaines régions comme en Chine, plus grand producteur de charbon au monde [1].

Les énergies fossiles se distinguent par leur efficacité en tant que combustible, ayant connu un succès considérable depuis l'ère industrielle en raison de leur rendement optimal de leur stockage pratique et de leur disponibilité constante tout au long de l'année.

Toutefois, à l'heure actuelle, leurs désavantages commencent à se manifester, en particulier leur caractère épuisable et les émissions de gaz à effet de serre résultant de leur combustion.

Les avantages des énergies fossiles :

- Longue histoire d'utilisation avec une maîtrise avancée de la technologie associée
- Le rendement énergétique élevé, notamment avec le pétrole
- Coût inférieur à celui des énergies renouvelables
- Facilité de stockage et de transport [1].

Les inconvénients des énergies fossiles :

- Ressources non renouvelables et donc épuisables avec le temps.
- Emissions importantes de CO₂ lors de l'extraction et de la transformation, contribuant au réchauffement climatique.
- Répartition inégale des sources d'énergie fossile, entraînant des conflits économiques et sociaux.
- Malgré leurs performances et leur disponibilité, les énergies fossiles sont confrontées à une prise de conscience croissante de leurs limites environnementales et sociales [1].

2.1.2 Les énergies renouvelables :

On dit qu'une énergie est renouvelable si sa source est inépuisable ou si elle se reconstitue plus vite qu'on la consomme.

Aujourd'hui on peut compter sur cinq sources d'énergies renouvelables :

L'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [2].

L'énergie éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), le parc éolien pourrait atteindre une puissance installée de 230 GW en 2020 [2].

L'énergie hydraulique :

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. On discerne la petite hydraulique (inférieure à 10 MW) et la grande hydraulique (supérieure à 10 MW). Dans le cadre de la production décentralisée on va considérer essentiellement le petit hydraulique [4]. L'hydraulique consiste à ce que la pression de l'eau retenue dans les barrages fasse tourner les turbines qui produisent de l'énergie électrique.

L'énergie géothermique :

Le sol produit naturellement de la chaleur, l'homme peut capter cette chaleur pour produire de l'électricité. Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

La géothermie à haute énergie ou géothermie privilégiée qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité [6].

La géothermie de basse énergie implique l'utilisation de sources de chaleur situées à plusieurs centaines ou milliers de mètres sous terre, avec des températures allant de 30 à 100 °C. Elle est principalement utilisée pour chauffer les réseaux urbains. Quant à la géothermie de très basse énergie, elle concerne des sources de chaleur à des profondeurs plus faibles, avec des températures entre 10 et 30 °C. Elle est principalement utilisée pour le chauffage et la climatisation des bâtiments individuels. Comparée à d'autres sources d'énergie renouvelable, la géothermie de profondeur présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques telles que le soleil, la pluie ou le vent. Elle fournit ainsi une source d'énergie quasi-continue, n'étant interrompue que par les opérations de maintenance sur les installations géothermiques ou les réseaux de distribution d'énergie [2].

La biomasse :

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) En 2005, la biomasse est la deuxième source d'électricité renouvelable mondiale avec 1 % de la production d'électricité mondiale [2].

Les avantages des énergies renouvelables :

- Leurs exploitations n'épuisent pas les ressources de la terre.
- Elles génèrent très peu d'émissions polluantes, de nombreuses innovations technologiques de ce secteur d'activité ont vocation de diminuer de plus en plus leurs impacts.
- Les sources des énergies renouvelables font partie de la nature ce qui veut dire que les énergies renouvelables sont gratuites et illimitées.
- Leurs systèmes de générations peuvent être implantés sur tout le territoire [2].

Les inconvénients des énergies renouvelables :

- Les sources des énergies renouvelables ne sont pas constantes, par exemple l'énergie solaire et éolienne dépendent de la météo .
- Leurs installations sont très coûteuses.
- Elles ont un impact sur l'écosystème dans certain cas, par exemple lors l'installation d'un barrage hydroélectrique ceci implique l'inondation des vallées et un bouleversement de la faune et la flore .
- Un rendement très faible comparé à celui qu'on obtient lorsqu'on utilise des énergies fossiles [2].

2.2. Généralités sur les centrales électriques :

2.2.1 Les Centrales Nucléaires :

La production mondiale d'électricité dans le monde par le nucléaire est de 16 %. La principale source d'énergie électrique dans le monde reste la thermique à flamme, ce qui est mauvais pour l'atmosphère (émissions de CO₂). Le 16 mai 2007, 437 réacteurs nucléaires sont en fonctionnement dans le monde. Trente centrales sont en cours de construction, soit un gain de 6 %. Le nucléaire est une énergie en développement dans le monde, tout particulièrement en Asie [3].

Description d'une centrale nucléaire :

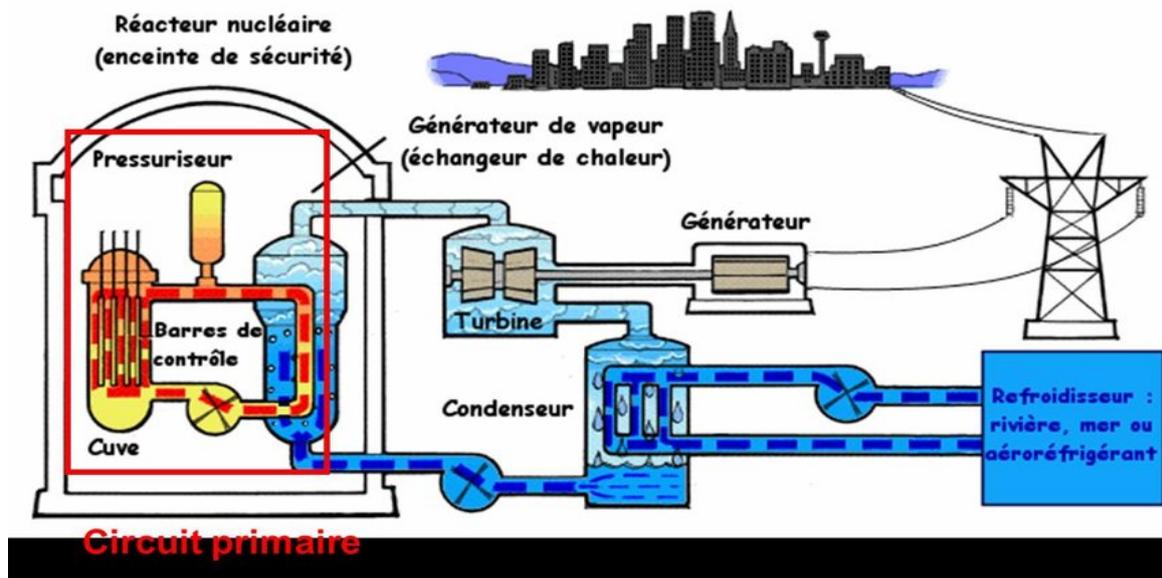


Figure 1.1 : Schéma d'une centrale nucléaire [3].

Une centrale nucléaire (Figure 1.1) regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité. Elle comprend plusieurs tranches, chaque tranche correspondant à un groupe d'installation conçu pour fournir une puissance électrique donnée (900Mwe ;1300MWe...)

Une tranche comprend généralement :

- Le bâtiment réacteur.
- Une enceinte étanche qui contient le réacteur nucléaire.
- Les générateurs de vapeur (3 ou 4 selon la génération).
- Un pressurisé.
- Une partie d'un circuit d'eau secondaire et le circuit d'eau primaire [3].

Fonctionnement d'une centrale nucléaire :

L'uranium est enfermé à l'intérieur de gaines métalliques étanches. C'est dans ces gaines que se produit la fission d'uranium. L'eau dans le cœur se réchauffe au contact de ces éléments combustibles. Cette eau, à la sortie de la cuve, cède sa chaleur à l'eau d'un second circuit, par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Une fois refroidie, elle retourne dans le cœur à l'aide d'une pompe. Cette eau est chauffée à 320°C et est maintenue à une pression de 155 atmosphères

afin de rester à l'état liquide. Dans le générateur de vapeur, l'eau du circuit secondaire se transforme en vapeur au contact des tubes parcourus par l'eau à 320° du circuit primaire. Cette vapeur fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur. A la sortie de la turbine, la vapeur se transforme en eau dans le condenseur, avant d'être renvoyée au générateur de vapeur. De l'eau en provenance de l'aéro-refrigérants traverse le condenseur par des milliers de tubes. La vapeur en provenance de la turbine se condense au contact de ces tubes froids. L'eau contenue dans ces tubes va se réchauffer d'une dizaine de degrés : cette eau tiède (30-35°) est refroidie par le courant d'air dans l'aéro-réfrigérants avant de repartir vers les tubes du condenseur. Un panache de vapeur d'eau générée par la différence de température entre l'air et l'eau s'échappe de la tour de refroidissement [3].

Inconvénients des centrales nucléaires :

- Exigence de la fermeture des sites dangereux ou la restauration de la résistance des installations.
- Les déchets hautement radioactifs renferment des cendres et des résidus issus des combustibles irradiés en réacteurs : ces déchets concentrent 90 % de la radioactivité.

Avantages des centrales nucléaires :

- Le nucléaire permet de produire de l'électricité peu coûteuse et ce, sans polluer l'atmosphère. La consommation électrique augmentant sans cesse depuis 30 ans, seul le nucléaire peut pour l'instant subvenir à nos besoins.
- Grâce à une nouvelle génération de centrales nucléaires, la sûreté sera améliorée et la production des déchets radioactifs à vie longue sera réduite [3].

2.2.2 Les Centrales Thermiques :

La centrale thermique est une centrale électrique qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur (charbon, gaz, fioul, biomasse ou déchets municipaux). La source de chaleur chauffe un fluide (souvent de l'eau) qui passe de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur). Cette vapeur entraîne une turbine couplée à un alternateur qui transforme l'énergie cinétique contenue dans la vapeur en énergie mécanique de rotation, puis en énergie électrique grâce à une génératrice de courant [4].

Principe de fonctionnement d'une centrale thermique :

Dans les centrales utilisant du charbon, il y a un filtre spécial qui retient les particules de poussière des gaz de fumées. La vapeur produite par la chaudière fait tourner une grande turbine, qui ressemble un peu à une énorme roue. Cette turbine est connectée à un alternateur, qui est comme un gros générateur d'électricité. Quand la turbine tourne, elle fait fonctionner l'alternateur pour produire de l'électricité. Le courant électrique produit est envoyé à un transformateur qui augmente sa tension avant qu'il ne soit envoyé dans les grandes lignes électriques pour être distribué aux maisons et aux entreprises. Après avoir libéré son énergie dans la turbine, la vapeur se refroidit et redevient de l'eau. Dans le condenseur, cette vapeur chaude glisse à travers des milliers de petits tuyaux remplis d'eau froide provenant de la surface (appelée eau de refroidissement). La vapeur cède sa chaleur à cette eau froide, ce qui permet à l'eau de refroidissement de redevenir froide, tandis que la vapeur se transforme en eau pour retourner à la chaudière et recommencer le processus.

La plupart des centrales refroidissent cette eau devenue relativement chaude, dans une tour de refroidissement, pour ensuite la réutiliser. Dans ces immenses tours de refroidissement, en forme d'hyperbole, l'eau entre en contact avec un courant d'air ascendant créé par le tirage naturel (effet de cheminée de la tour de refroidissement). Lorsque des ventilateurs créent ce flux d'air, la tour de refroidissement est plus petite, l'eau se refroidit et tombe sous forme de gouttelettes dans la tour de refroidissement ; L'air réchauffé saturé de vapeur d'eau, s'échappe de la tour de refroidissement en un nuage de vapeur blanc. Une grande partie de l'eau de refroidissement refroidie est pompée vers le condenseur et réutilisée et seule (1-1,5) % s'évapore. Une centrale thermique transforme 35 à 40 % de l'énergie du combustible en électricité. Elle fournit parfois aussi de la chaleur, sous forme de vapeur d'eau [4].

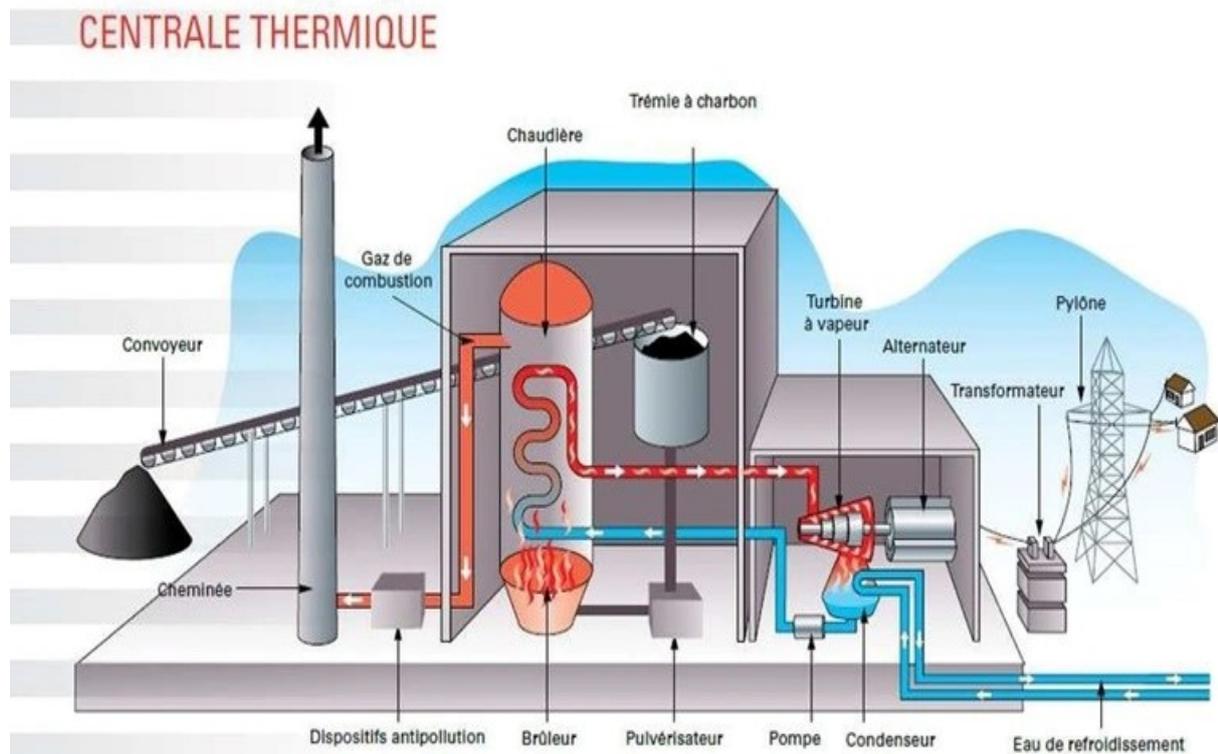


Figure 1.2 : Centrale thermique [4].

2.2.3 Les centrales hydrauliques :

Le déplacement de l'eau constitue une énergie qu'on peut exploiter. Ainsi, les centrales hydrauliques produisent de l'électricité à partir de cette énergie. L'eau est canalisée jusqu'à une turbine. Sous la pression de l'eau sur les ailettes, la turbine se met à tourner et entraîne un générateur qui produit de l'électricité. Plus les générateurs tournent vite, plus ils fournissent d'électricité. La vitesse de la turbine, et par conséquent la quantité d'électricité produite par le générateur qu'elle actionne, dépend de la pression de l'eau. Plus cette pression n'est grande et plus la turbine tourne vite. Une centrale hydraulique est alimentée par une retenue d'eau. Un barrage est établi à travers une vallée pour accumuler un grand volume d'eau [5].

Fonctionnement d'une centrale hydraulique :

Les centrales hydroélectriques disposent d'un canal de dérivation qui conduit l'eau provenant du cours d'eau ou du barrage vers les turbines électriques. Grâce à sa force, l'eau fait tourner les turbines qui entraînent immédiatement les alternateurs auxquels elles sont reliées. En fonctionnant, les alternateurs produisent le courant électrique qui est acheminé vers le transformateur. Ce dernier élément injecte l'électricité dans le réseau de transport qui l'achemine vers les consommateurs à l'aide des lignes de haute tension ou de très haute tension [5]. Comme le montre la figure (1.3) ci-contre

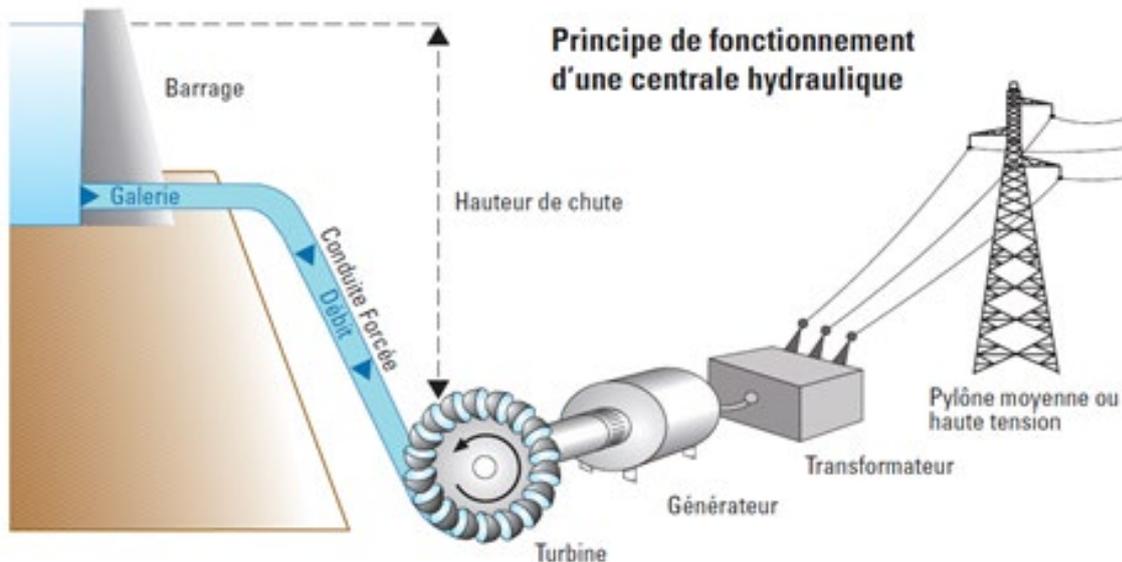


Figure 1.3: Le fonctionnement d'une centrale hydraulique [5].

Avantages de la centrale hydraulique :

- Une énergie propre générée à partir de l'eau, l'hydroélectricité est propre. Sa production n'émet aucun gaz à effet de serre.
- Une énergie renouvelable L'eau est présente sur tout notre territoire cette ressource naturelle est abondante et renouvelable.
- Une énergie stockable, Cela est possible grâce aux bassins de rétention qui permettent de générer de grandes quantités d'électricité lorsque la demande augmente [5].

Inconvénients de la centrale hydraulique :

Bien que propre et locale, l'énergie hydroélectrique présente plusieurs inconvénients :

- Une source aléatoire les variations annuelles du stock hydraulique influencent la production d'électricité des centrales hydroélectriques. L'impact direct des conditions météorologiques sur la production hydroélectrique.
- Des impacts environnementaux non négligeables. L'installation de barrages créant des retenues d'eau artificielles n'est pas sans conséquence sur l'environnement, les écosystèmes sont menacés et subissent d'importantes modifications.
- Le risque de rupture de barrage [5].

2.2.4 Les centrales éoliennes :

Les centrales éoliennes produisent de l'électricité grâce à la force du vent, une source d'énergie renouvelable inépuisable et gratuite. Il existe deux grands types d'installation, le parc terrestre et le parc implanté en mer à plusieurs kilomètres au large des côtes.

En haut du mat de l'éolienne qui peut mesurer jusqu'à 120m, l'hélice appelée aussi rotor est composée généralement de trois pales, se met à tourner sous l'effet d'un vent d'au moins 10km/h, la nacelle sur laquelle l'hélice est fixée s'oriente automatiquement pour toujours être face au vent et les pales pivotent pour en capter un maximum. Si le vent dépasse 90km/h l'éolienne arrête automatiquement de fonctionner pour question de sécurité [6].

Fonctionnement d'une éolienne :

Dans la nacelle, l'hélice fait tourner un axe, sa vitesse de rotation n'est pas suffisante pour générer de l'électricité, un multiplicateur augmente cette vitesse jusqu'à 1500trs/minet la transmet à un second axe qui fait à son tour tourner l'alternateur. Dans l'alternateur, l'interaction entre les électroaimants du rotor la partie mobiles et les bobines de fils de cuivre du stator la partie fixe produit un courant électrique. Un transformateur situé à l'intérieure du mat élève la tension de ce courant à 20kV, l'électricité est ensuite acheminée par un câble souterrain ou sous-marin et sera à nouveau élevée à 225kV ou 400kV par un poste de transformation afin d'être transportée plus facilement dans les lignes très haute tension THT du réseau comme l'indique la figure 1.4 [6].

Régulièrement tous les composants de l'éolienne sont surveillés et contrôlés.

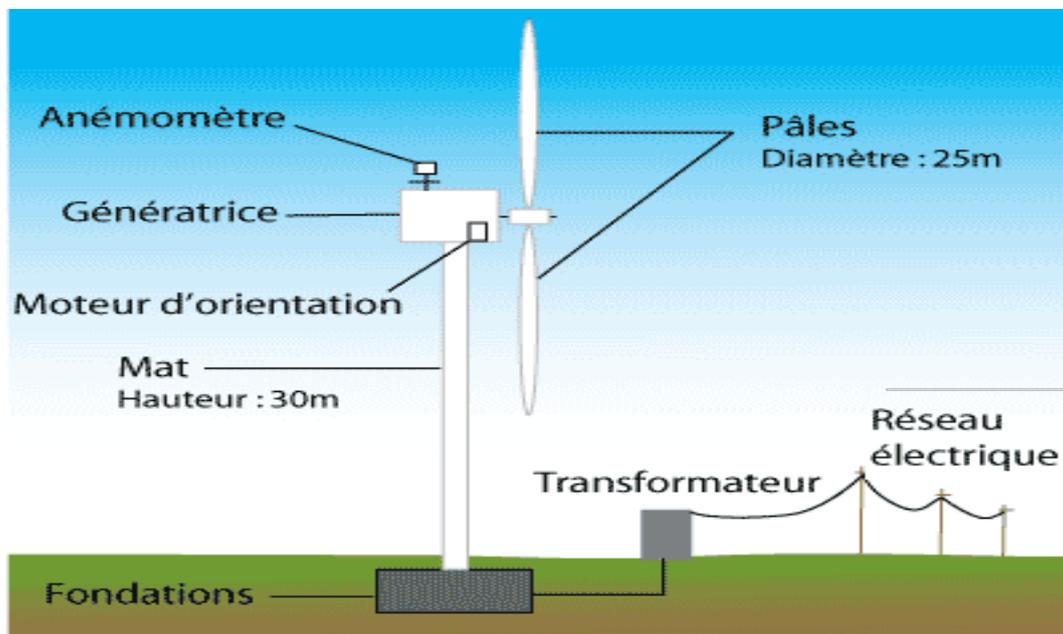


Figure 1.4: Fonctionnement d'une éolienne [6].

Les avantages d'une centrale éolienne :

- L'éolienne ne nécessite pas de carburant pour son fonctionnement.
- Aucun risque de pénurie, elle est 100% durable et fabriquée grâce au souffle du vent, elle ne connaîtra pas d'épuisement.
- Elle n'est pas nocive pour l'environnement, elle n'émet aucun gaz à effet de serre ni des déchets radioactifs.
- Le coût de fonctionnement est relativement bas car une fois installées l'éolienne nécessite peu de maintenance [6].

Les inconvénients d'une centrale éolienne :

- Dépendance des conditions météorologiques, c'est-à-dire quand le vent est faible la production d'électricité est réduite et vice versa.
- Impact visuel et sonore, les éoliennes sont considérées comme peu esthétiques et génèrent des bruits qui peuvent être gênants pour les riverains.
- Elles nécessitent un emplacement approprié avec du vent régulier et suffisamment fort pour assurer leur efficacité, ce qui limite les endroits où elles peuvent être installées [6].

2.2.5 Les centrales solaires :

Les centrales solaires sont composées de milliers de panneaux solaires qui vont venir capter l'énergie du soleil pour la transformer et la distribuer. Il existe trois types de centrales solaires : la centrale solaire photovoltaïque, la centrale solaire thermique et la centrale solaire thermodynamique. La centrale photovoltaïque possède des panneaux composés de milliers de cellules photovoltaïques qui captent les rayons du soleil pour les transformer en électricité. Cette électricité sera ensuite convertie pour circuler sur les lignes à haute tension. La centrale solaire thermique va quant à elle directement produire de la chaleur à partir de l'énergie thermique du soleil. Ses panneaux vont de ce fait recueillir la chaleur dégagée par le soleil pour alimenter la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage domestique. Enfin, les centrales solaires thermodynamiques, plus rares, ont la particularité de concentrer le rayonnement solaire à un même endroit pour chauffer un fluide caloporteur, qui sera par la suite utilisé pour sa chaleur ou pour produire de l'électricité [6].



Figure 1.5: Centrale solaire photovoltaïque [6].

Fonctionnement d'une centrale solaire photovoltaïque :

Une centrale photovoltaïque produit de l'électricité grâce à la lumière du soleil, une source d'énergie renouvelable et gratuite, la centrale est composée de panneaux dont la modularité permet de concevoir des installations à long du vaste parc photovoltaïque à quelques panneaux installés sur les toits des habitations individuelles. Chaque panneau est composé de plusieurs cellules de moins d'un millimètre 1mm d'épaisseur, elles contiennent un matériau semi-conducteur généralement le silicium, dont la propriété est de libérer des électrons et donc de produire un courant électrique après avoir été heurté par la lumière. les électrons sont ensuite collectés par des fils métalliques très fins qu'ils les acheminent jusqu'à la borne négative de la cellule , ils empruntent ensuite un circuit extérieur pour retourner dans la cellule par sa borne positive , ce déplacement d'électrons crée un courant électrique continu , le courant produit passe de cellule en cellule et de panneau en panneau et s'additionne jusqu'à un onduleur ,ce dernier convertie le courant continue des panneaux en courant alternatif qui sera ensuite élevé à 225kV ou 400kV par un poste de transformation pour être transporté facilement dans les lignes très haute tension THT du réseau. L'énergie photovoltaïque est utilisée en complément d'autres sources d'énergie afin de subvenir aux besoins en électricité [6].

Comme le montre la figure (1.6) illustre le fonctionnement d'une centrale photovoltaïque :

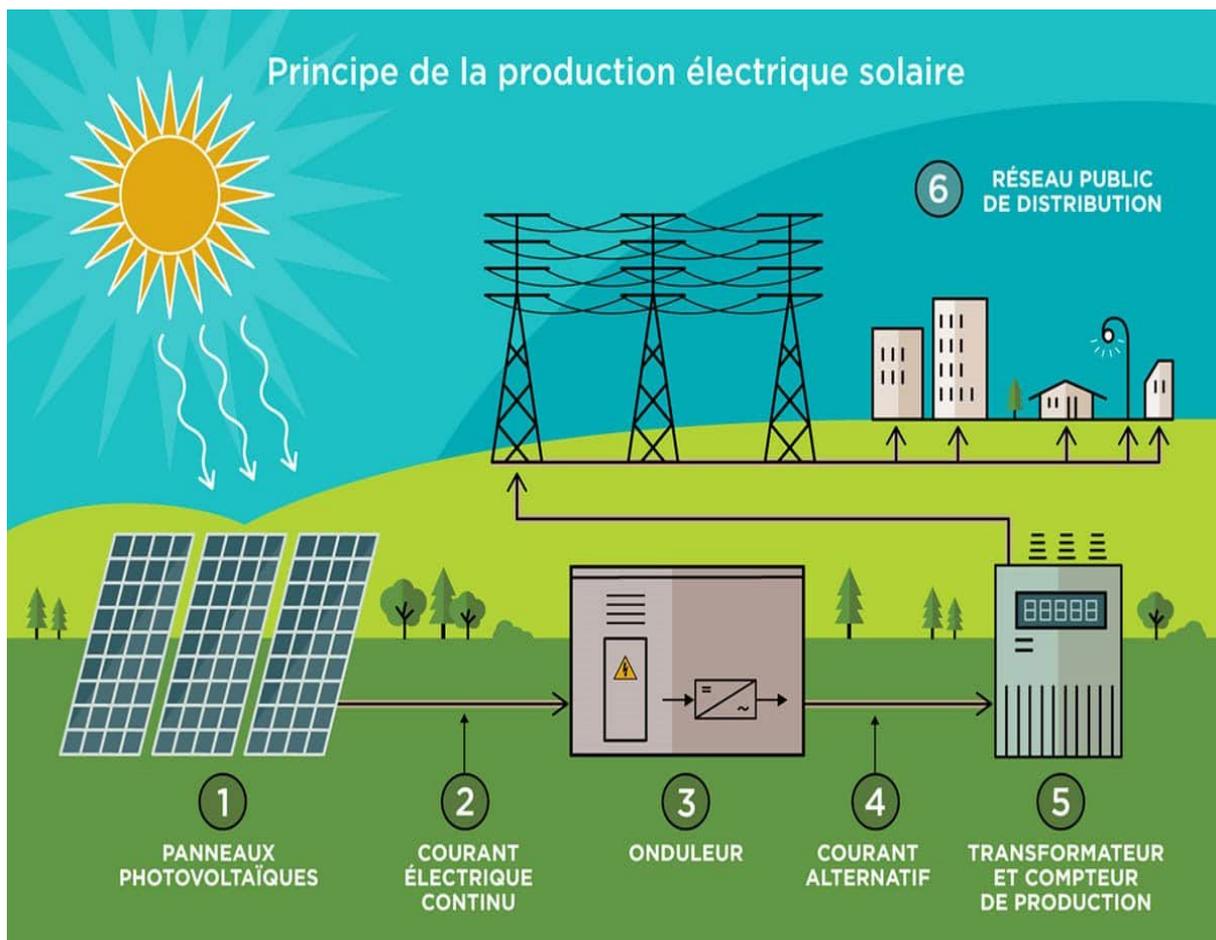


Figure 1.6: Principe de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque [6].

Les avantages d'une centrale solaire photovoltaïque :

- Il s'agit d'une énergie renouvelable, inépuisable et gratuite et donc à l'opposé des énergies fossiles. La production.
- Elle n'émet pas de polluants ou de gaz à effet de serre, ce qui permet également de limiter l'impact sur l'environnement. L'énergie solaire est donc une énergie verte.
- Les centrales solaires peuvent être installées à de nombreux endroits, du moment que le taux d'ensoleillement est suffisant. Une fois installée au bon endroit il y aura une capacité de production très importante et pourra par conséquent bien alimenter le réseau en électricité [6].

Les inconvénients d'une centrale solaire photovoltaïque :

- Elles ne peuvent pas être installées dans tous les pays du monde. Ceux-ci doivent en effet.
- Les panneaux solaires ont une durée de vie limitée. Ils doivent être changés en moyenne tous les 30 ans.
- Elles nécessitent un grand espace afin d'être installées.
- Elles fonctionnent uniquement le jour et dépendent des conditions météorologiques.
- Leurs installations sont extrêmement coûteuses [6].

2.2.6 Centrale biomasse :**Fonctionnement d'une centrale biomasse :**

Les centrales biomasse produisent de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion des matières organiques, telles que les résidus végétaux, les déchets ménagers et le biogaz issu de la fermentation de déchets.

Le combustible est acheminé dans la chaudière ,ensuite introduit dans la chambre de combustion ,en le brûlant il dégage de la chaleur qui est transmise à des tubes remplis d'eau qui tapissent la chaudière , l'eau des tubes chauffés est dirigée vers un ballon dont lequel elle se transforme en vapeur ,cette vapeur fait tourner une turbine qui à son tour fait tourner un alternateur ,ce dernier va produire un courant électrique qui est ensuite élevé à 225kV ou 400KV par un transformateur pour être transporté facilement dans le réseau électrique grâce à des lignes très haute tension .

La vapeur qui sort de la turbine passe dans un condenseur dans lequel circule de l'eau froide, elle est ainsi transformée en eau pour être renvoyer dans la chaudière. Cette vapeur peut être aussi utilisée soit pour des activités industrielles soit pour alimenter un réseau de chaleur urbain, la production simultanée d'électricité et de chaleur dans la même installation est ce qu'on appelle la cogénération.

Enfin les fumées issues de la combustion sont filtrées avant d'être évacuées par les cheminées [8].

La figure 1.7 ci-dessous montre le fonctionnement d'une centrale biomasse :

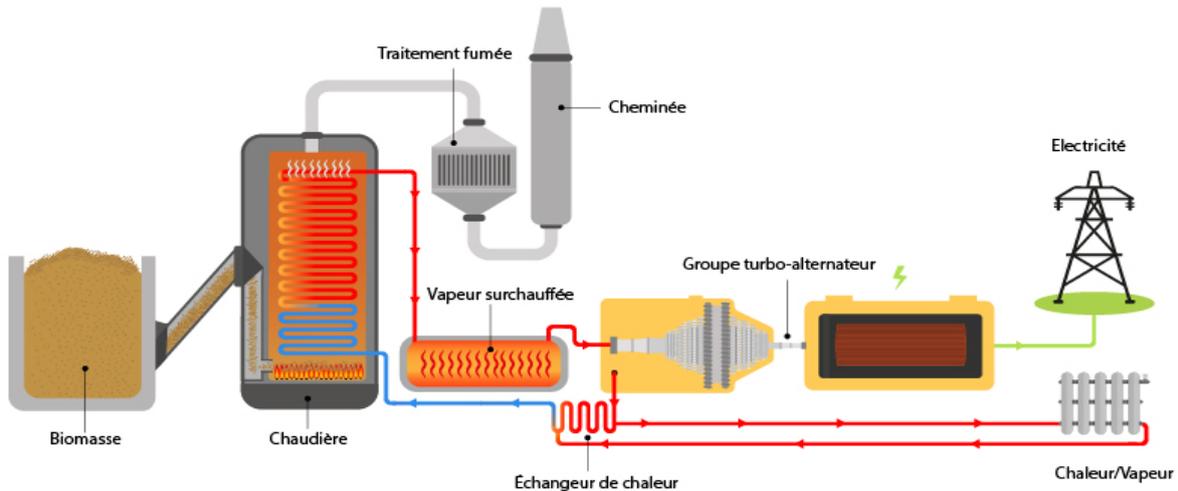


Figure 1.7: Fonctionnement d'une centrale biomasse [8].

Avantages de la biomasse :

- C'est une énergie renouvelable et peu coûteuse.
- Elle est indépendante des conditions météorologiques.

Inconvénients de la biomasse :

- Elle est polluante car la combustion des matières végétales telles que le bois émet du CO_2
- Son rendement est assez faible [8].

2.2.7 Les centrales géothermiques :

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans les centrales géothermiques, grâce à l'eau très chaude des nappes dans le sous-sol de la Terre.

La température des roches augmente en moyenne de $1\text{ }^\circ\text{C}$ tous les 30 m de profondeur. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à $100\text{ }^\circ\text{C}$ par 100 m.

Une centrale géothermique est composée de 3 parties :

- La pompe.
- L'usine qui produit l'électricité.
- Les lignes électriques qui la transportent [9]

Fonctionnement d'une centrale géothermique :

L'infiltration d'eau De l'eau de pluie ou de mer s'infiltré dans les fractures de la croûte terrestre pour constituer un réservoir dans le sous-sol, appelé nappe aquifère, à haute température, de $150\text{ à }350\text{ }^\circ\text{C}$. ensuite il y le pompage de l'eau Grâce à un forage dans le sous-sol, l'eau chaude est pompée jusqu'à la surface. Pendant sa remontée, elle perd de sa pression et se transforme en vapeur. Donc pour La production d'électricité, la pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Ensuite transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à haute tension du réseau [9].

La figure 1.8 qui suit représente le fonctionnement de la centrale géothermique :

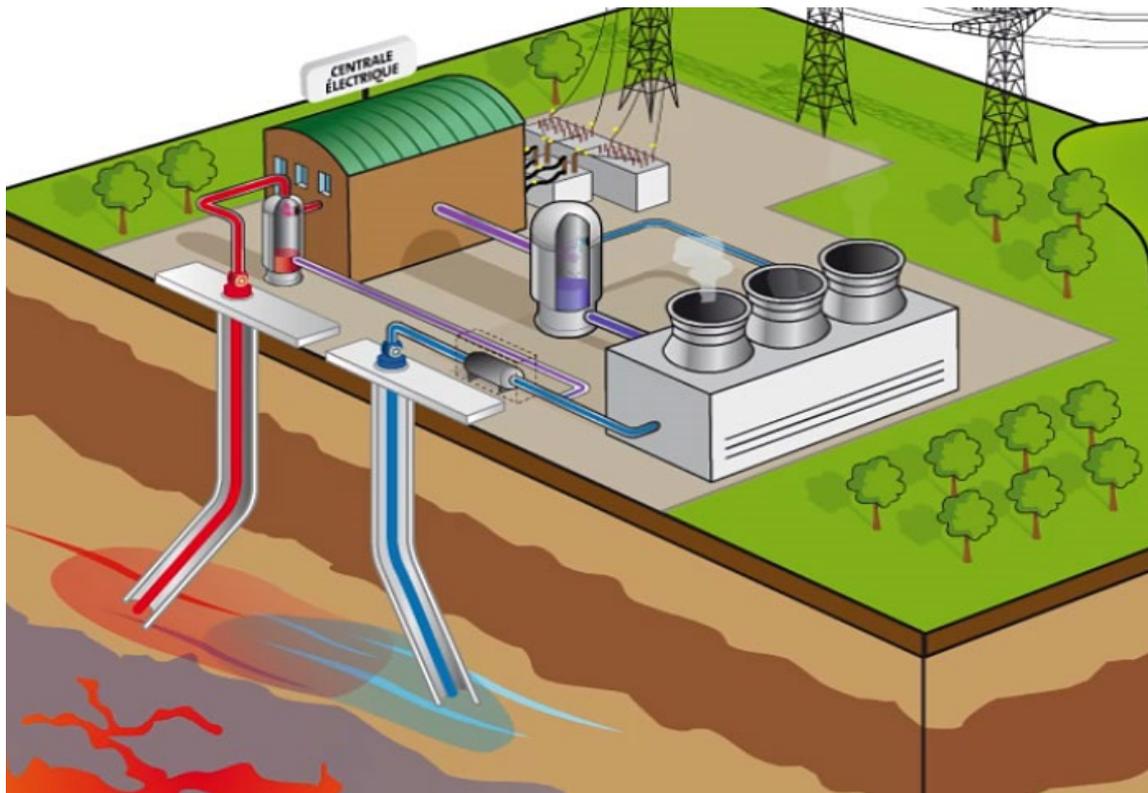


Figure 1.8 : Fonctionnement de la centrale géothermique [9].

Avantages de la centrale géothermique :

- C'est un mode de chauffage économique. La chaleur du sous-sol est disponible en continu.
- Le chauffage géothermique est écologique. La production de chaleur génère peu de gaz à effet de serre [9].

Inconvénients de la centrale géothermique :

- Certains terrains trop rocailloux ne sont pas éligibles à la géothermie.
- Le coût des installations nécessaires au chauffage géothermique est élevé [9].

3 Description des réseaux électriques :

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées [10].

Comme le montre la figure (1.9) ci-dessous :

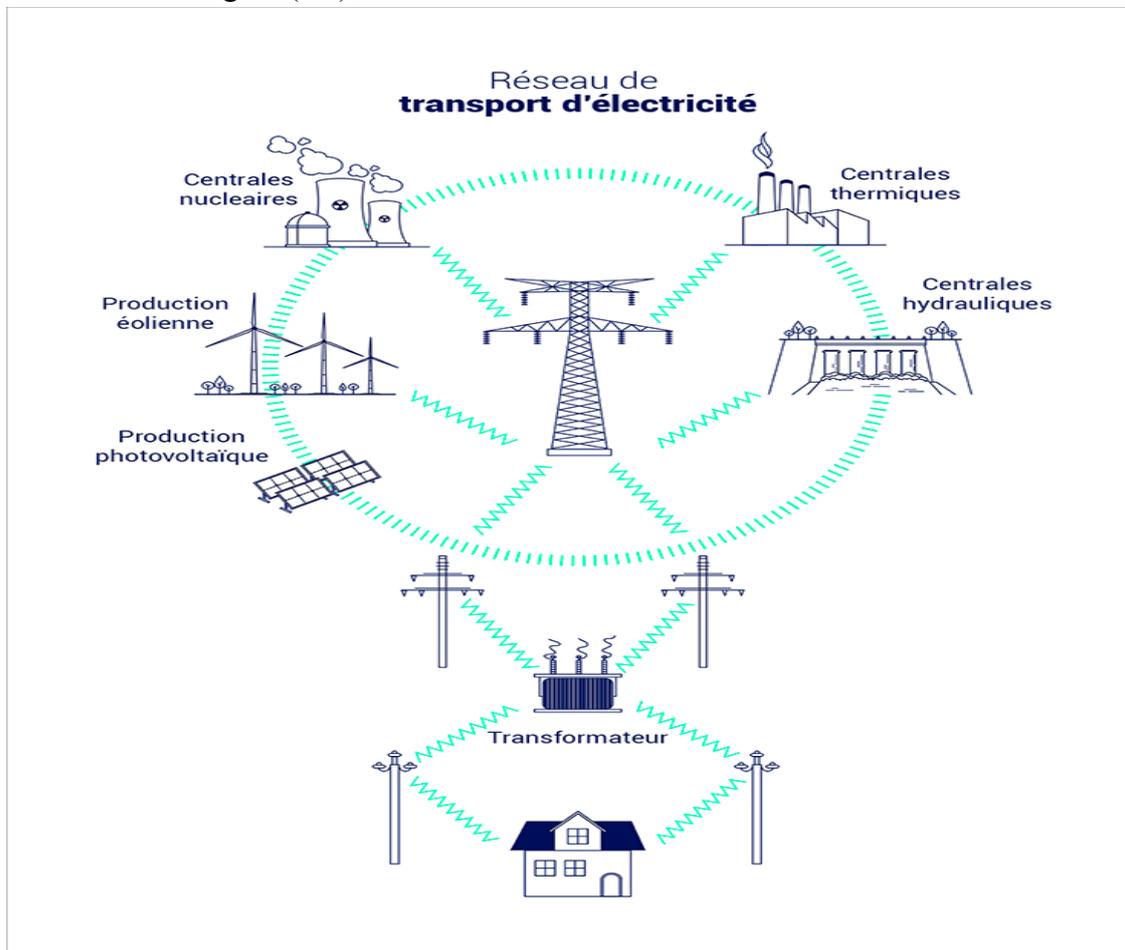


Figure 1.9 : Structure du réseau électrique [10].

L'électricité générée est injectée directement dans le réseau de transport maillé à très haut débit. La tension est transmise sur de longues distances avec des pertes minimales. Puis elle "descend" sur le réseau de distribution, puis le réseau de distribution d'où elle est distribuée aux gros consommateurs, comme les industries et au réseau de distribution basse tension.

Généralement, le réseau est composé dans le sens du transport d'énergie comme l'indique le schéma ci-dessous :

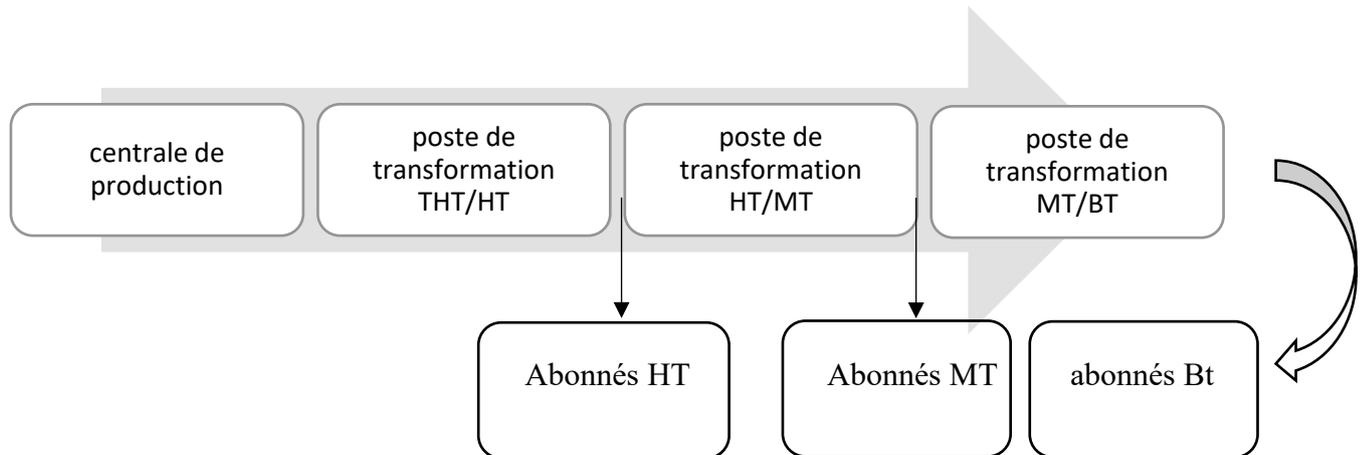


Figure 1.10 : Chemin de l'énergie électrique.

3.1 Les niveaux de tension dans les réseaux électriques :

Les électriciens ont introduit plusieurs concepts qui caractérisent les tensions auxquelles les réseaux sont soumis. Les différents niveaux de tensions sont définis de manière précise par la (C.E.I) qui est au niveau international l'organisme de référence pour la normalisation dans le domaine de l'électricité. La plus importante de ces définitions concerne la tension nominale d'un réseau (U_n) qui est la valeur efficace entre phases pour laquelle un réseau est dénommé et à laquelle certaines caractéristiques de fonctionnement de ce réseau sont rattachées.

Les niveaux de cette tension sont les suivants (ils varient d'un pays à l'autre selon des réseaux fonctionnant à 50Hz ou à 60 Hz)[11] :

- TBT : $U_n < 50V$;

Dans les réseaux de distribution on utilise les niveaux BT :

- BT $\leq 1000v$

Au sein des réseaux de répartition on utilise essentiellement de la haute tension sous la forme MT :

- MT $\leq 60v$

Enfin, dans les réseaux de transport on utilise seulement la haute tension :

- HT $> 60kv$ [11]

4 Hiérarchie des réseaux électriques :

Les réseaux électriques sont classés selon la CEI (comité électrotechnique international) ainsi :

- Un réseau de transport THT de 220kV à 800 kV .
- Un réseau de répartition HT de 60kV à 90 kV .
- Un réseau de distribution MT de 10kV à 30 kV.
- Un réseau de livraison de l'abonné BT 380V /220V.

4.1 Réseau de transport de l'énergie électrique et d'interconnexion :

A la sortie des sites de production la tension est environ 20kV, un poste élévateur est installé au près du site de production afin d'élever cette tension à 225kV ou 400kV pour qu'elle puisse être transportée sur de longues distances. Le réseau de transport permet d'acheminer l'énergie électrique des sites de production jusqu'aux consommateurs.

Les réseaux de transport sont à très haute tension (HTB) ($50 \text{ kV} < U < 400 \text{ kV}$) sont conçus pour Transporter l'énergie des grands centres de production vers les zones de consommation d'électricité. La puissance élevée transmise nécessite des fils de grande capacité le transport et les structures maillées (ou d'interconnexion). Garantie du réseau maillé Très bonne sécurité d'alimentation puisque tout composant (cordon d'alimentation, Si l'opérateur du transformateur ou du groupe de production) ne provoquera aucune panne Les réseaux de transports suivent la règle dite "N-1" (possibilité de perdre n'importe quel élément) N est le nombre de structures.

La figure ci-dessous illustre la topologie d'un tel réseau hautement maillé [12].

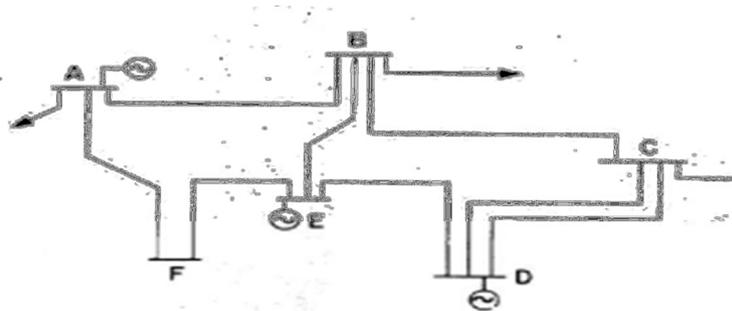


Figure 1.11 : Schéma d'un réseau maillé [12].

L'inconvénient d'une telle structure est de présenter en certains points du réseau une faible impédance de court-circuit et donc de favoriser, en cas de défaut, l'apparition de courants de courts circuits élevés. Il faudra donc dimensionner les protections en conséquence. L'interconnexion des réseaux de transport d'électricité permet un certain échange d'énergie électrique entre eux [12].

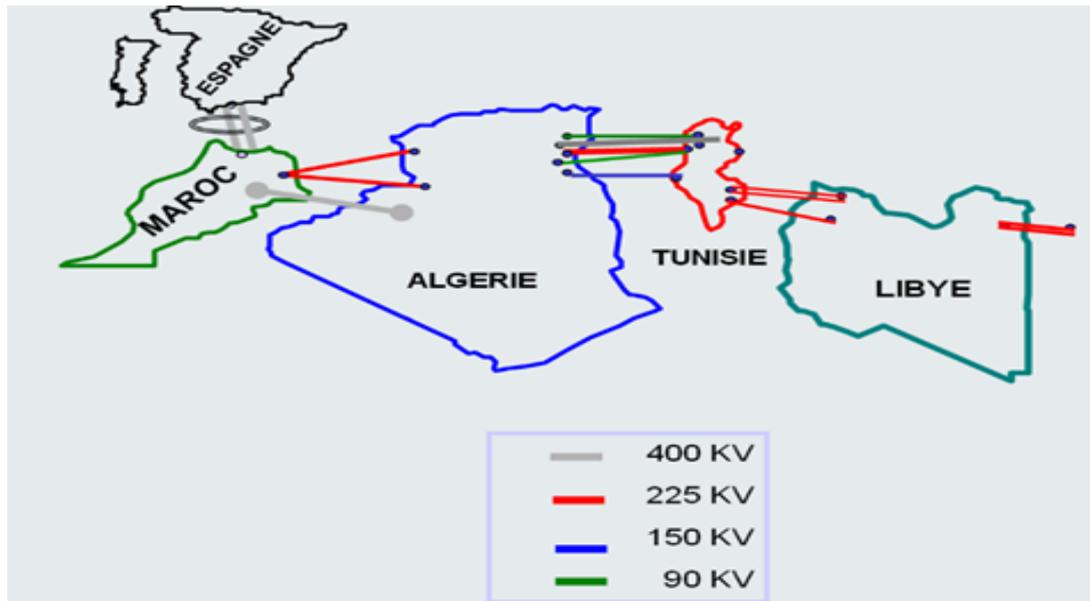


Figure 1.12 : Les interconnexions internationales avec le réseau de transport de l'Algérie [13].

Les réseaux de transport et d'interconnexion ont pour mission :

- De collecter l'électricité produite par les centrales importantes de production et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation.
- De permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas .
- Neutre directement mis à la terre [13].

4.2 Réseau de répartition :

Les réseaux de répartition ($30 \text{ kV} < U < 60 \text{ kV}$) ont pour fonction de faire la liaison entre le réseau de transport et les réseaux de distribution. Ils doivent de ce fait assurer l'alimentation du territoire qu'ils desservent qui sont en général des zones de consommation comme par exemple des installations industrielles qui du fait de leur importance économique doivent être alimentées en permanence.

Pour assurer cette fonction en permanence, même lors de la défaillance de certaines lignes de transport, les réseaux de répartition auront une topologie de réseau bouclé, ce qui permet sans aller jusqu'à un maillage aussi dense que celui du réseau de transport, d'assurer l'acheminement de l'énergie dans des conditions de sécurité raisonnablement garanties. La figure suivante montre la structure d'un tel réseau avec une alimentation par les nœuds A, C, D [12].

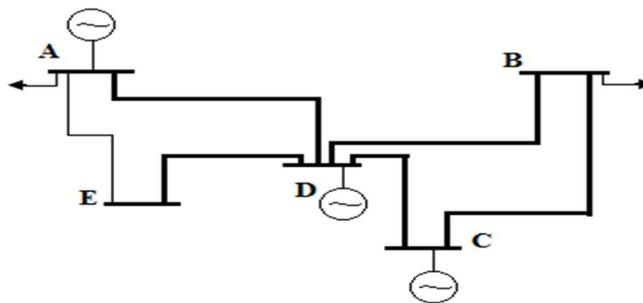


Figure 1.13 : Schéma d'un réseau bouclé [12].

4.3 Réseau de distribution :

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. IL existe deux sous niveaux des tensions :

- Les réseaux à moyen tension (de 3 à 50 kV).
- Les réseaux à basse tension (de 110 à 600 V), sur les quels sont raccordés les utilisateurs domestiques. Contrairement aux réseaux de transport et de répartition, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solution technique à la fois selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population [12].

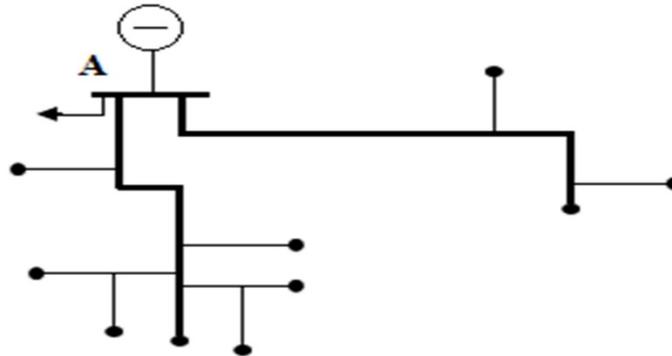


Figure 1.14 : Schéma d'un réseau de distribution à structure radiale [12].

Les réseaux de distribution sont en général à structure radiale ou arborescente, c.-à-d. qu'il n'y a qu'une seule ligne entre les nœuds. Dans ce type de réseaux nous trouvons plusieurs types de configurations topologiques mais toutes ont une structure arborescente ou radiale comme le montre la figure 1.14.

Une configuration particulière est celle des réseaux en antenne que l'on trouve plus fréquemment en milieu rural pour alimenter des consommateurs éloignés et situés en bout de ligne, situation qui est la plus exposée du point de vue de la sécurité d'alimentation [12].

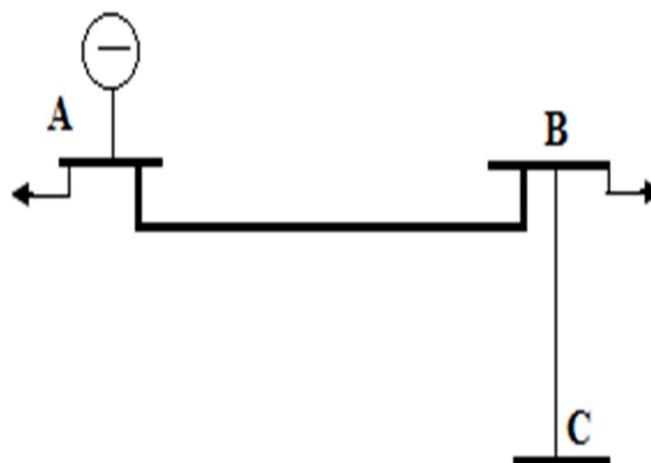


Figure 1.15 : Schéma d'un réseau de distribution en antenne [12].

4.3.1 Structure générale d'un réseau privé de distribution :

Dans le cas général avec une alimentation en HTB, un réseau privé de distribution comporte figure 1.16. :

- Un poste de livraison HTB alimenté par une ou plusieurs sources, il est composé d'un ou plusieurs jeux de barres et de disjoncteurs de protection.
- Une source de production interne.
- Un ou plusieurs transformateurs HTB / HTA.
- Un tableau principal HTA composé d'un ou plusieurs jeux de barres.
- Un réseau de distribution interne en HTA alimentant des tableaux secondaires ou des postes HTA / BT .
- Des récepteurs HTA.
- Des transformateurs HTA / BT.
- Des tableaux et des réseaux basse tension - Des réceptrices basses tensions [13].

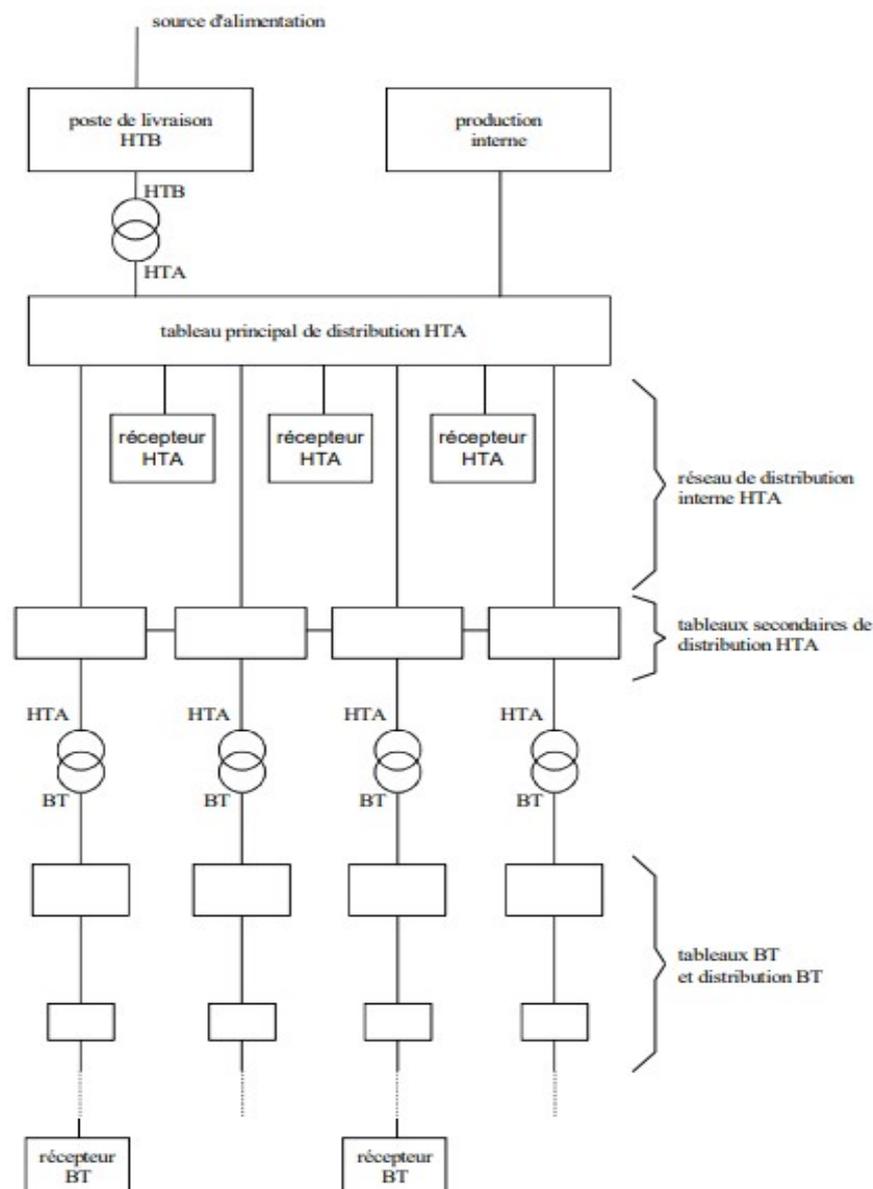


Figure 1.16 : Structure générale d'un réseau privé de distribution [13].

4.3.2 Modes d'alimentation des tableaux HTA :

- Nous allons identifier les principales solutions d'alimentation d'un tableau HTA, indépendamment de son emplacement dans le réseau.
- Le nombre de sources et la complexité du tableau diffèrent suivant le niveau de sûreté de fonctionnement désiré.
- Les schémas sont classés dans un ordre tel que la sûreté de fonctionnement s'améliore tandis que le coût d'installation augmente [11].

Un jeu de barres avec une source d'alimentation :

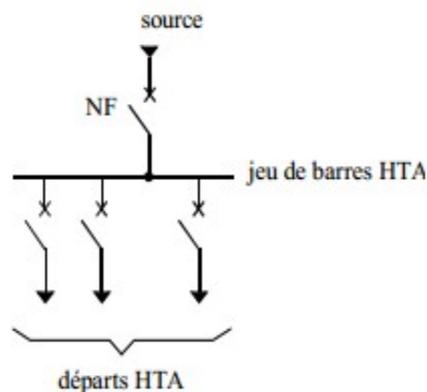


Figure 1.17: Schéma d'un jeu de barres avec une source d'alimentation [11].

Fonctionnement :

En cas de perte de la source d'alimentation, le jeu de barres est hors service jusqu'à l'opération de réparation [11].

Un jeu de barres sans couplage avec deux sources d'alimentation :

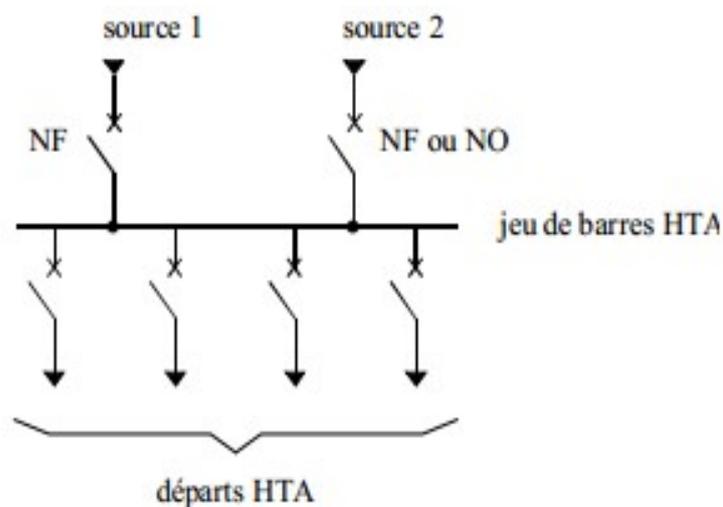


Figure 1.18: Un jeu de barres sans couplage avec deux sources d'alimentation [11].

Fonctionnement :

Les deux sources peuvent fonctionner en parallèle ou l'une en secours de l'autre. En cas de défaut sur le jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), les départs ne sont plus alimentés [11].

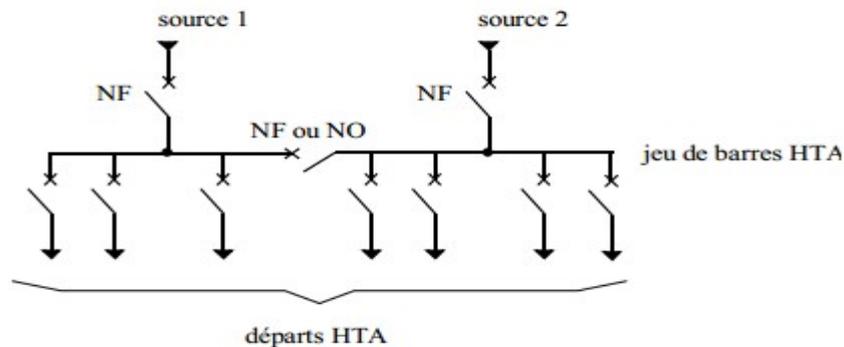
Deux jeux de barres avec couplage et deux sources d'alimentations :

Figure 1.19 : Schéma de deux jeux de barres avec couplage et deux sources d'alimentation [11].

Fonctionnement :

Le disjoncteur de couplage peut être maintenu fermé ou ouvert. S'il est ouvert, chaque source alimente un jeu de barres. En cas de perte d'une source, le disjoncteur de couplage est fermé et l'autre source alimente les deux jeux de barres. En cas de défaut sur un demi jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), une partie seulement des départs n'est plus alimentée [11].

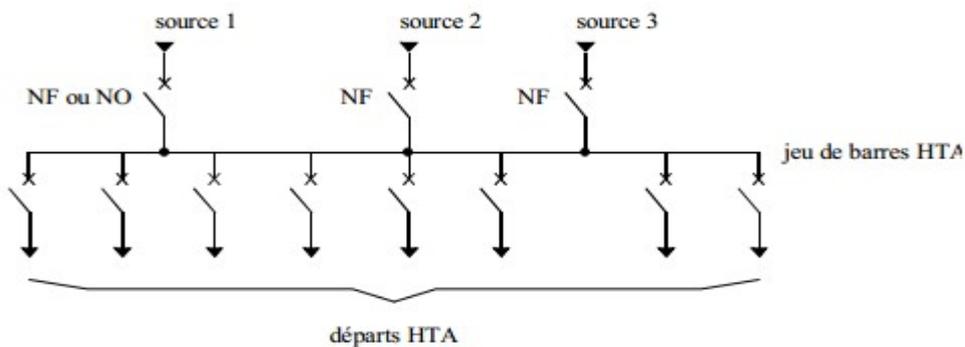
Un jeu de barres sans couplage et trois sources d'alimentation :

Figure 1.20 : Schéma d'un jeu de barres sans couplage et trois sources d'alimentation [10].

Fonctionnement :

Les 3 sources peuvent fonctionner en parallèle ou l'une en secours des deux autres. En cas de défaut sur le jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), les départs ne sont plus alimentés [11].

Trois jeux de barres avec couplages et trois sources d'alimentation :

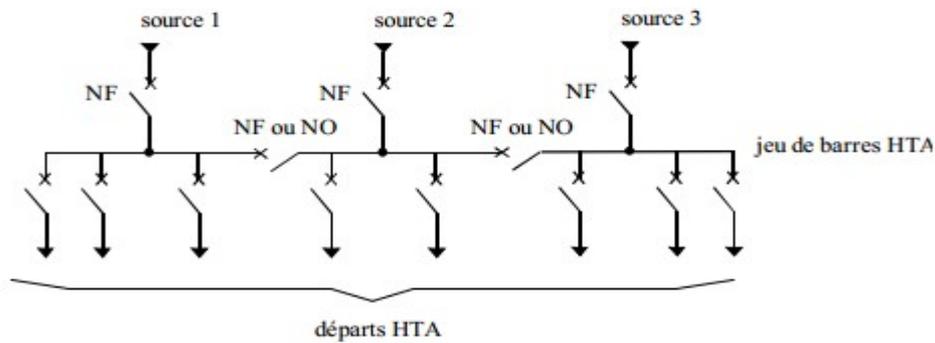


Figure 1.9 : Schéma de Trois jeux de barres avec couplages et trois sources d'alimentation [11].

Fonctionnement :

Les 2 disjoncteurs de couplage peuvent être maintenus ouverts ou fermés. S'ils sont ouverts, chaque source alimente sa section de barres. En cas de perte d'une source, le disjoncteur de couplage associé est fermé, une source alimente 2 sections de barres et l'autre 1 section de barres. En cas de défaut sur une section de barres (ou maintenance de celle-ci), une partie seulement des départs n'est plus alimentée [11].

Sources et départs en "Duplex" :

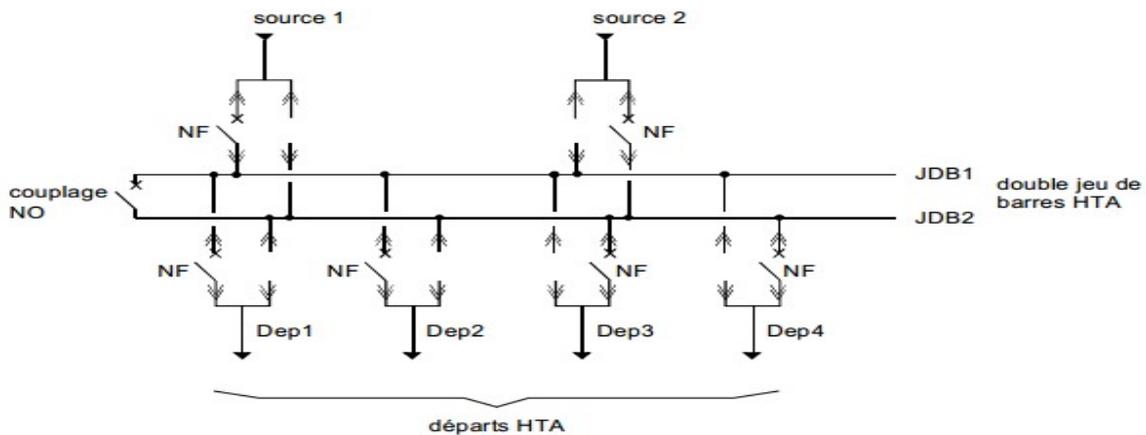


Figure 1.22 : Schéma de trois jeux de barres avec couplages et trois sources d'alimentation [11].

Fonctionnement :

Le disjoncteur de couplage est maintenu ouvert en fonctionnement normal. Chaque source peut alimenter l'un ou l'autre des jeux de barres par ses deux cellules disjoncteur débrochable. Par souci d'économie, il n'y a qu'un seul disjoncteur pour les 2 cellules débrochable qui sont installées tête-bêche. On peut ainsi facilement déplacer le disjoncteur d'une cellule à l'autre. Ainsi, si l'on veut que la source 1 alimente le jeu de barres JDB2, on déplace le disjoncteur dans l'autre cellule associée à la source 1. Le même principe est mis en place pour les départs. Ainsi, à chaque départ sont associées deux cellules débrochables et un seul disjoncteur. Chaque départ peut être alimenté par l'un ou l'autre des jeux de barres suivant l'emplacement du disjoncteur. Par exemple, la source 1 alimente le jeu de barres JDB1 et les départs Dep1 et Dep2.

La source 2 alimente le jeu de barres JDB2 et les départs Dep3 et Dep4. En cas de perte d'une source, le disjoncteur de couplage est fermé, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.

En cas de défaut sur un jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), le disjoncteur de couplage est ouvert et chaque disjoncteur est placé sur le jeu de barres en service, afin que tous les départs soient alimentés.

L'inconvénient du système "Duplex" est qu'il ne permet pas les permutations automatiques.

En cas de défaut, chaque permutation à effectuer dure plusieurs minutes et nécessite la mise hors tension des jeux de barres [11].

Deux jeux de barres avec deux attaches par départ et deux sources d'alimentation :

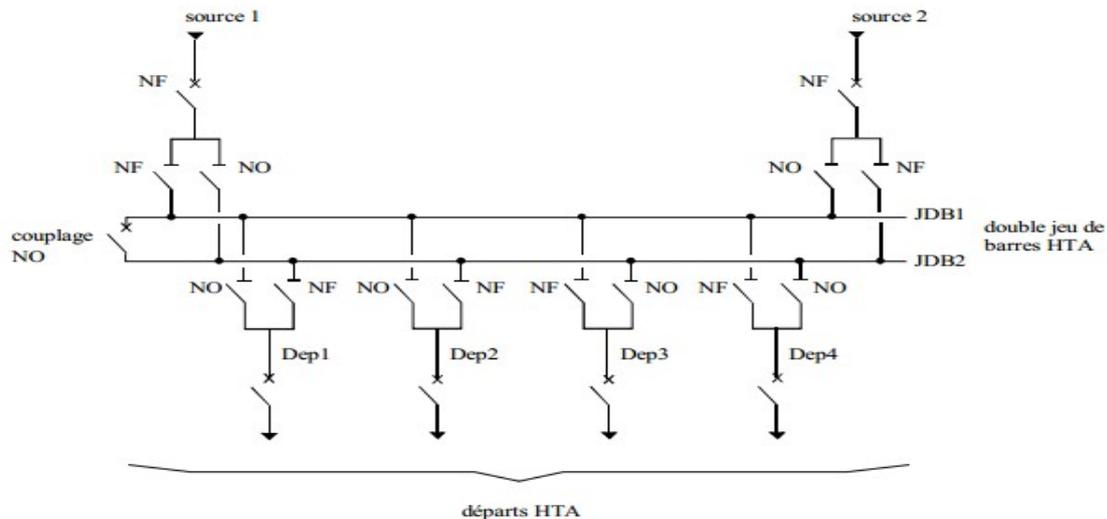


Figure 1.23: Deux jeux de barres avec deux attaches par départ et deux sources d'alimentation [11].

Fonctionnement :

Le disjoncteur de couplage est maintenu ouvert en fonctionnement normal. Chaque départ peut être alimenté par l'un ou l'autre des jeux de barres suivant l'état des sectionneurs qui lui sont associés, un seul sectionneur par départ doit être fermé. Par exemple, la source 1 alimente le jeu de barres JDB1 et les départs Dep1 et Dep2. La source 2 alimente le jeu de barres JDB2 et les départs Dep3 et Dep4.

En cas de perte d'une source, le disjoncteur de couplage est fermé, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.

En cas de défaut sur un jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), le disjoncteur de couplage est ouvert et l'autre jeu de barres alimente la totalité des départs [11].

Deux doubles jeux de barres couplés entre eux :

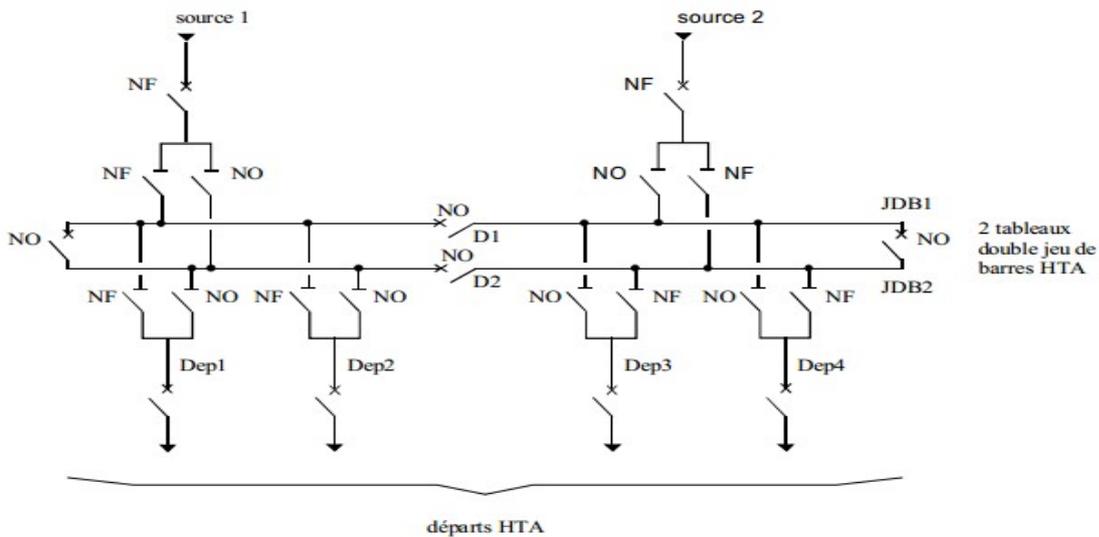


Figure 1.24: Schéma de deux doubles jeux de barres couplés entre eux [11].

Fonctionnement :

Il est presque identique au schéma précédent (2 jeux de barres, 2 attaches par départ, 2 sources d'alimentation). La décomposition du double jeu de barres en 2 tableaux avec couplage (par D1 et D2) permet une plus grande souplesse d'exploitation. Chaque jeu de barres alimente un nombre de départs moins important en fonctionnement normal.

4.3.3 Structure des réseaux HTA :

Structure maillée :

Elle permet la réalimentation en cas d'indisponibilité d'un tronçon ou d'un poste HTA/BT après l'élimination de l'élément défectueux. Elle présente l'inconvénient de n'utiliser les câbles que partiellement par rapport à leur capacité. Elle exige, de plus, un point commun par paire de câble et demande une surveillance continue du réseau en fonction de l'accroissement de la charge [11] [14].

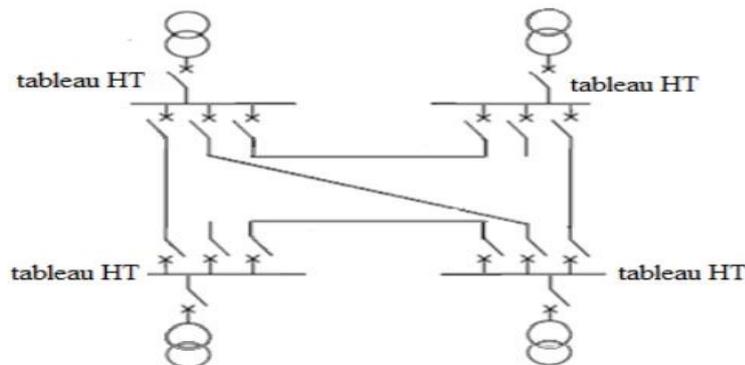


Figure 1.25 : Structure des réseaux maillés [11].

Structure radiale :

A partir d'un poste d'alimentation, elle est constituée de plusieurs artères, dont chacune va en se ramifiant, mais sans jamais retrouver un point commun (structure d'un arbre).

Les réseaux radiaux sont de structure simple et peuvent être contrôlés et protégés par un appareillage simple. Ce sont les réseaux les moins coûteux [11] [14].

Radial en simple antenne :

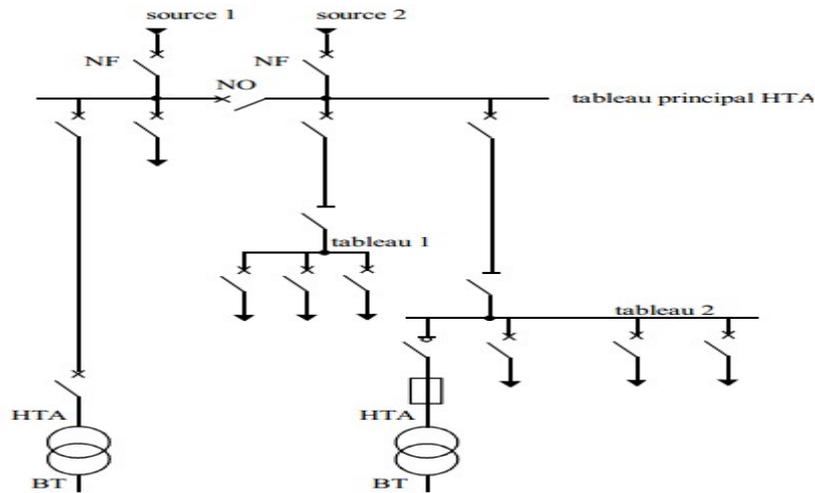


Figure 1.26 : Réseau HTA radial en simple antenne [11].

Fonctionnement :

Les tableaux 1 et 2 et les transformateurs sont alimentés par une seule source, il n'y a pas de solution de dépannage. Cette structure est préconisée lorsque les exigences de disponibilité sont faibles, elle est souvent retenue pour les réseaux de cimenterie [11].

Radial en double antenne sans couplage :

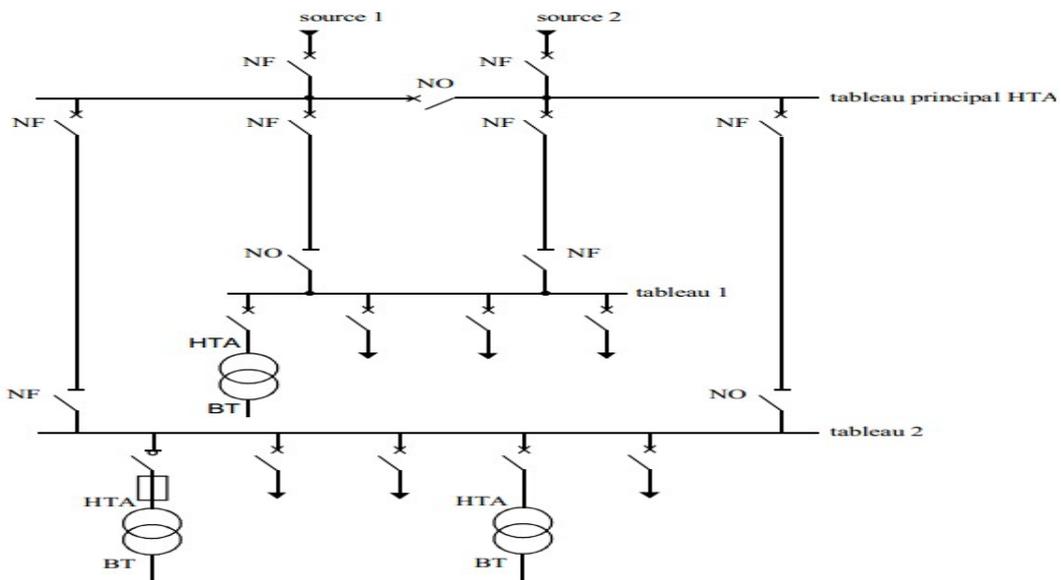


Figure 1.27: Réseau HTA radial en double antenne sans couplage [11].

Fonctionnement :

Les tableaux 1 et 2 sont alimentés par 2 sources sans couplage, l'une en secours de l'autre. La disponibilité est bonne. L'absence de couplage des sources pour les tableaux 1 et 2 entraîne une exploitation moins souple [11].

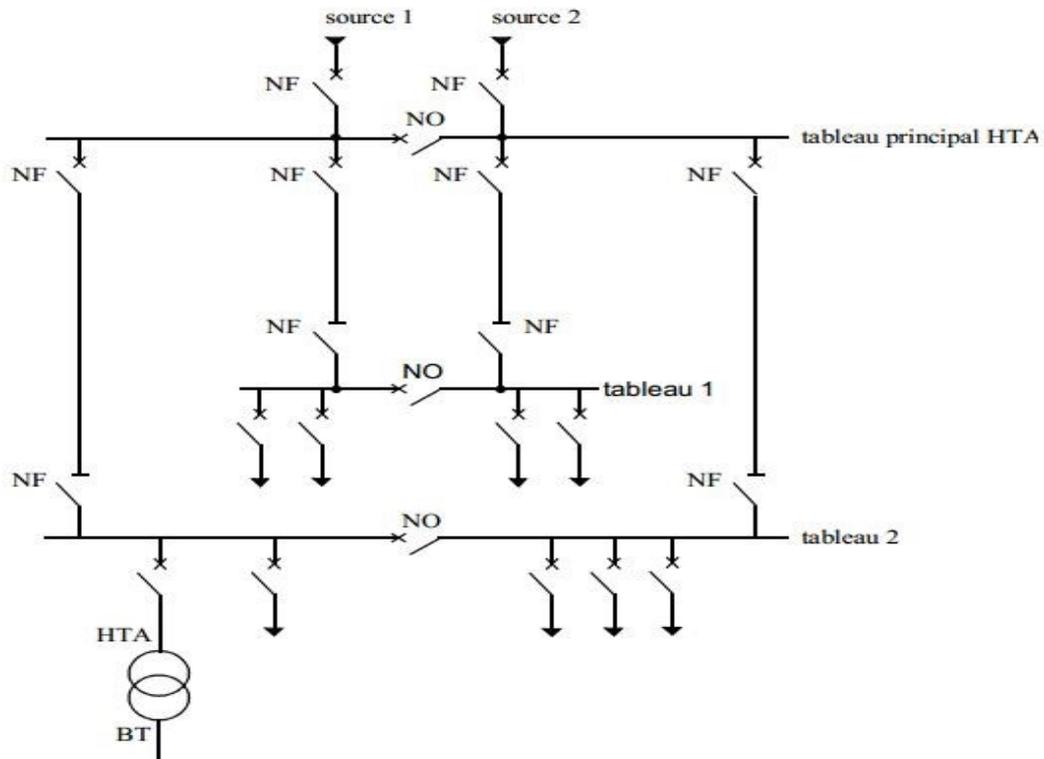
Radial en double antenne avec couplage :

Figure 1.10: Réseau HTA radial en double antenne avec couplage [11].

Fonctionnement :

Les tableaux 1 et 2 sont alimentés par 2 sources avec couplage. En fonctionnement normal, les disjoncteurs de couplage sont ouverts. Chaque demi jeu de barres peut être dépanné et être alimenté par l'une ou l'autre des sources cette structure est préconisée lorsqu'une bonne disponibilité est demandée, elle est souvent retenue dans les domaines de la sidérurgie et de la pétrochimie [11].

5. Conclusion :

Pour conclure ce chapitre, le réseau électrique est une infrastructure complexe et interconnectée qui assure l'acheminement de l'électricité des centrales de production vers les consommateurs finaux. Afin de garantir une distribution efficace et fiable de l'énergie électrique, il est indispensable de comprendre comment elle circule à travers le réseau. C'est là que le concept de l'écoulement de puissance intervient. En analysant comment la puissance électrique est répartie et circule dans le réseau, les ingénieurs peuvent optimiser son utilisation et assurer la stabilité du système.

Dans ce chapitre, nous avons exploré comment l'électricité est produite, transportée et distribuée. Nous avons également abordé l'importance des technologies modernes et des infrastructures intelligentes dans la gestion et l'optimisation du réseau électrique. Les systèmes de surveillance en temps réel et les outils d'analyse avancés jouent un rôle crucial dans la détection et la résolution rapide des problèmes, minimisant ainsi les interruptions et améliorant l'efficacité globale du réseau.

Dans le prochain chapitre, nous allons approfondir le concept de l'écoulement de puissance, les méthodes utilisées pour le calculer, et les techniques d'optimisation pour améliorer les performances du réseau. Nous examinerons également les défis liés à l'intégration des sources d'énergie renouvelable et les stratégies pour surmonter ces obstacles, afin d'assurer une transition fluide vers un réseau électrique plus durable.

Chapitre II

Écoulement de puissance et optimisation

1. Introduction :

Selon Le Ministère Algérien de l'Energie et des Mines, Le réseau national algérien de distribution de l'électricité a atteint 328.996 km de longueur en fin 2017[16], cette évolution introduit évidemment des variations dans les paramètres du réseau, telle que la charge, le changement d'états de certains composants et autres évènements. La question qui se pose comment l'ingénierie peut-elle assurer l'efficacité de distribution d'énergie vers le consommateur face aux problèmes qui surviennent, et comment optimiser cette répartition d'énergie si nécessaire ?

Prenant compte que le réseau de distribution représente le maillon final du système électrique. Il comporte un grand nombre de composants qui interagissent entre eux , de ce fait le réseau de distribution est très complexe.

La complexité de ce dernier présente le défi majeur aux ingénieurs dans l'exploitation et la planification du système électrique, afin de garantir une distribution efficace avec le minimum de pertes, défaillance, coût d'entretien et d'exploitation.

Pour cela, une bonne compréhension de comportement d'énergie électrique en temps de sa répartition à travers les lignes du réseau électrique doit être bien acquise.

La répartition des charges, autrement dit l'écoulement de puissance (Power Flow), en termes simples, a pour objectif de déterminer l'état électrique complet du réseau, à savoir les tensions à tous les nœuds, les transits de puissance dans toutes les branches, les pertes, etc... [16] à partir des consommations et des productions spécifiées en ses nœuds.

Pour le but de bien répondre à la question précédente on va entamer les notions de base de l'analyse d'écoulement de puissance, les méthodes numériques pour le résoudre et nous concluons par la méthode de calcul la plus appropriée pour un tel système, ainsi nous allons voir les méthodes d'optimisation des performances de ce réseau pour assurer l'efficacité de distribution d'énergie et bien évidemment garantir l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.

2 Modélisation des éléments du réseau électrique :

Un réseau électrique contient un ensemble de composants conçu pour produire et transporter l'énergie électrique d'une façon continue sous des formes spécifiques soumises à des contraintes bien déterminées, qu'on doit modéliser afin d'étudier un réseau complexe, des modèles ou schémas équivalents de ces principaux composants.

Les éléments principaux d'un réseau peuvent être classés en trois sous-systèmes :

- Production (génératrices).
- Transport, répartition et distribution (lignes).
- Utilisation (consommateurs) [17].

Dans les sections qui suivent, on va exposer quelques modèles de base relatifs aux composants du réseau qui sont nécessaires pour le calcul de l'écoulement de puissance Pour (générateurs, différents types de transformateurs, lignes et charges).

2.1 Modélisation du moyen de production :

Un moyen de production sera simplement représenté par une fourniture de puissance active P et une fourniture ou consommation de puissance réactive Q , selon le réglage d'alternateur.

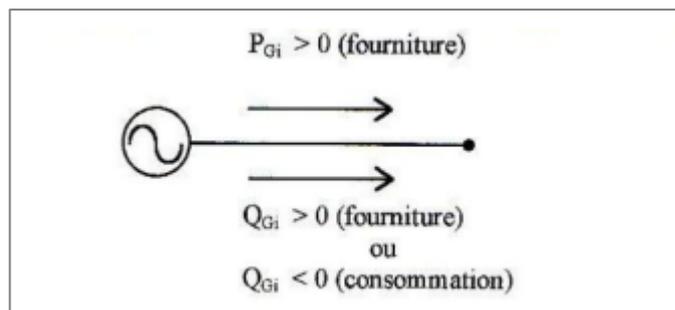


Figure 2.1 : Modélisation d'une centrale de production [17].

2.1.1 Modélisation des lignes :

Une ligne de transport électrique a quatre paramètres qui affectent sa fonction : la résistance R , l'inductance L , la capacité C et la conductance G . Les lignes de transport sont modélisées par leur schéma en π classique (figure 2.2).

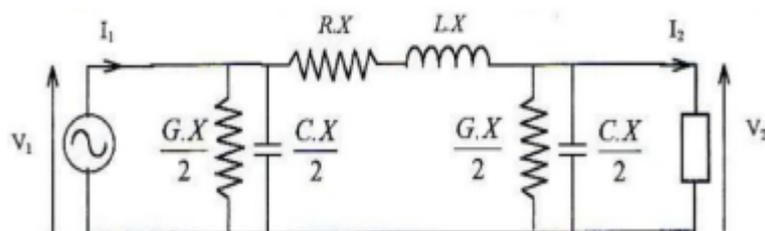


Figure 2.2 : Modélisation d'une ligne par un schéma en pi [17].

Une simplification du modèle nous donne (figure 2.3) :

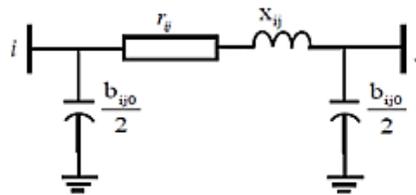


Figure2.3 : Modèle simple d'une ligne en pi [17].

La matrice d'admittance nodale d'une ligne reliant un nœud i à un nœud j est donnée par :

$$\underline{Y} \begin{pmatrix} y_{ij} + \frac{y_{ij0}}{2} & -y_{ij} \\ -y_{ij} & y_{ij} + \frac{y_{ij0}}{2} \end{pmatrix}$$

Où l'admittance série y_{ij} vaut :

$$\underline{y}_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} = g_{ij} - jb_{ij}$$

Avec :

r_{ij} : la résistance série de la ligne ;

x_{ij} : la réactance série de la ligne ;

L'admittance transversale correspondant aux effets capacitifs s'écrit :

$$\underline{y}_{ij0} = jb_{ij0}$$

Avec :

b_{ij0} : La susceptance transversale [17].

2.1.2 Modélisation de la charge :

Une charge sera simplement représentée par une consommation de puissance active et une fourniture ou consommation de puissance réactive. La puissance réactive peut être fournie ou consommée, selon la nature de la charge capacitive ou inductive (Figure 2.4).

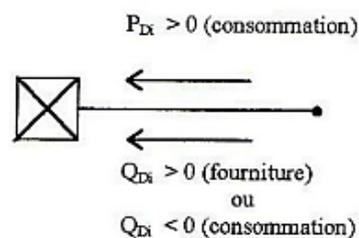


Figure 0.4 : Représentation d'une charge par la puissances consommée et fournie [17].

(Figure 2.5) représente une charge électrique modélisée sous forme d'une impédance Z charge qui consomme de la puissance active et réactive constante :

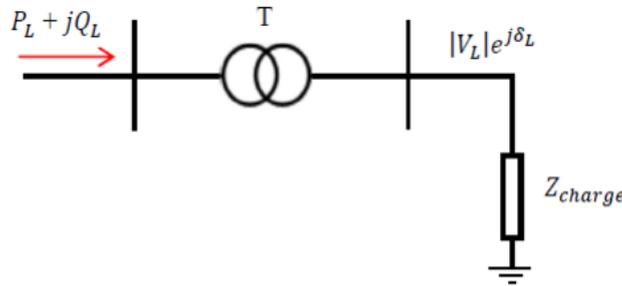


Figure 2.5 : Modèle d'une charge électrique [17].

Cette charge représente souvent des postes de répartition (sous stations) qui alimentent des réseaux de distribution [17].

2.1.3 Modélisation du transformateur :

Un transformateur est bien modélisé par un schéma équivalent avec des éléments en série (les résistances des enroulements primaires et secondaires, les inductances de fuites) et des éléments en parallèle (l'inductance de magnétisation et éventuellement une résistance modélisant les pertes "fer"). Ramené au même niveau de tension (primaire ou secondaire), ce schéma peut se réduire à un simple schéma en T. Il admet lui-même un équivalent en π [17].

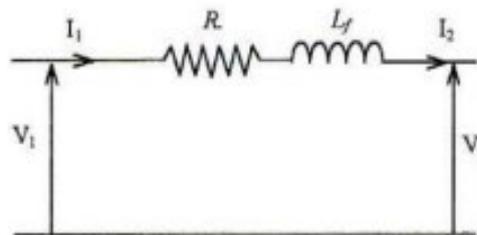


Figure 2.6 : Schéma équivalent d'un transformateur [17].

(Figure 2.7) représente un schéma équivalent en π :

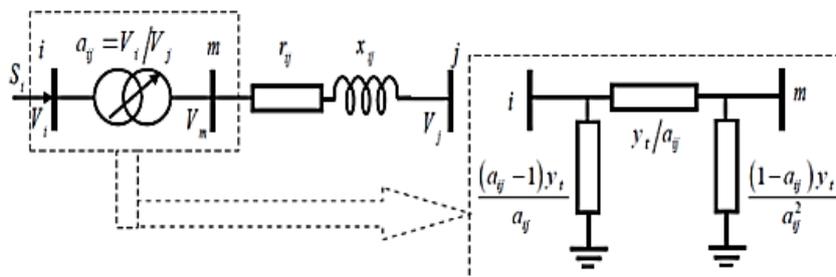


Figure 2.7 : Modélisation d'un transformateur [17].

La matrice d'admittance d'un transformateur inséré entre un nœud i et un nœud j s'écrit :

$$Y = \begin{pmatrix} \frac{1}{a^2} y_{ij} & -\frac{1}{a} y_{ij} \\ -\frac{1}{a} y_{ij} & y_{ij} \end{pmatrix}$$

Avec :

a : le rapport de transformation.

y_{ij} : l'admittance de la branche i - j [17].

2.2 L'écoulement de puissance (Power Flow) :

Les écoulements de puissances sont utilisés afin d'observer les tensions et puissances à chacun des jeux de barres à l'aide des simulations permettant de comparer les résultats avec les tensions et puissances obtenues en temps réel lorsqu'il y a des changements ou des ajustements dans le réseau (perte de lignes, changement brusque de charges, etc.). Ils sont donc utilisés pour voir la réaction d'un réseau électrique lorsque celui-ci est en régime stable et permanent. Ceci permettra alors de prévoir comment gérer des situations où les conditions dans celui-ci changent [18].

2.2.1 L'objectif de calcul de l'écoulement de puissance :

L'analyse de l'écoulement de puissance est un facteur critique dans l'étude, l'exploitation et la planification du réseau de distribution. De nombreux travaux de recherche ont été menés pour le développement des solutions de ce problème afin d'atteindre les objectifs requis, qui sont les suivants :

- L'analyse d'écoulement puissance est très importante dans les phases de planification de nouveaux réseaux ou d'ajouts à des réseaux existants, comme l'ajout de nouveaux sites de production, la réponse à une demande de charge accrue et la localisation de nouveaux sites
- L'identification des zones de congestion de la surcharge potentiel du réseau et proposer des solutions afin d'optimiser la configuration du réseau.
- Evaluer la stabilité du réseau électrique en examinant les effets de l'écoulement de puissance due aux paramètres critiques afin de garantir la stabilité et la fiabilité du réseau.
- La réduction des pertes d'énergie dans le réseau en identifiant où les pertes sont les plus importants aides à proposer des solutions pour optimiser l'efficacité énergétique du système.
- Faciliter l'intégration des sources d'énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, en évaluant leur impact sur l'écoulement de puissance et en optimisant leur intégration dans le système électrique.
- La minimisation au minimum le coût de production pour satisfaire la demande (charge) d'un système de puissance tout en maintenant sa sécurité [18].

2.2.2 Classification des jeux de barres (les nœuds) :

À chaque jeu de barre (nœud), sont définis les 4 paramètres :

P : puissance active injectée ou soutirée.

Q : puissance réactive injectée ou soutirée.

V : module de la tension.

δ : déphasage de la tension [19].

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les jeux de barres du système sont classés en trois catégories :

Les jeux de barres de contrôle (control bus) : Appelés aussi les jeux de barres (P V), pour ce type de jeux de barre, on associe les centrales de production. On spécifie la puissance active et le module de la tension. Les variables à déterminer sont la phase de la tension et la puissance réactive.

Les jeux de barres de charge (load bus) : Appelés aussi les jeux de barres (P Q), pour ce type de jeux de barre, on associe généralement les charges. Ces dernières sont caractérisées par la consommation des puissances active et réactive. On peut aussi associer des générateurs avec des puissances active et réactive fixées. Les variables à déterminer sont le module et la phase de la tension.

Le jeu de barres de référence (slack bus) : Ce jeu de barres connu aussi par le jeu de barres balancier ou bilan, est choisi parmi ceux où un générateur est connecté. Le rôle de ce jeu de barres est de fournir la puissance supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes transmission, car celles-ci ne sont pas connues d'avance. En plus, ce jeu de barres sert de référence pour les phases des tensions.[19].

Tableau 2.1 : Classification des jeux de barre [18].

Type de nœuds	Variables connues	Variables inconnues
PQ	Les puissances actives et réactives (P, Q)	Tension amplitude et angle de phase (V, δ)
PV	Puissance active et la tension (P, V)	Angle de phase de tension et puissance réactive (δ , Q)
Référence	Tension amplitude et angle de phase (V, δ)	Le courant, les puissances active et réactive (P, Q)

2.2.3 Calcul de l'écoulement de puissance :

La nécessité de réduire le temps passé à résoudre manuellement les problèmes complexes a inspiré l'ingénierie d'entamer la résolution avec des méthodes numériques, dans cette partie on va citer les différentes méthodes numériques pour l'analyse de l'écoulement de puissance, ainsi, on va détailler l'une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des répartitions de charge dans le réseau de distribution.

Parmi les diverses méthodes on peut citer :

- La méthode de Gaussien-Seidel (GS) .
- La méthode de Newton-Raphson (NR) .
- La méthode de découplage rapide [19].

2.2.4 Méthodes de Gauss-Seidel (GS) :

Les premières méthodes étaient basées sur la méthode de Gauss – Seidel relative à la matrice admittance Y . Elle ne nécessite pas beaucoup d'espace mémoire et sa programmation est relativement simple. Pour un système à plusieurs variables, La méthode de Gauss–Seidel utilise à chaque itération la valeur la plus récente calculée. La méthode de Gauss–Seidel se caractérise par sa faible convergence ; elle peut diverger complètement si la valeur initiale est mal choisie. Mais les petits réseaux ne nécessitent que peu d'itérations pour converger. Les grands réseaux, par contre demandent un grand nombre d'itérations si toutefois ils convergent. Ce désavantage a poussé les chercheurs à développer la méthode de Newton – Raphson [20].

2.2.5 Méthode découplée rapide :

La variation de la puissance active est moins sensible à la variation de la tension V , par contre, elle est sensible à celle de la phase θ . D'autre part, la variation de la puissance réactive est plus sensible à la variation de la tension V , et elle est moins sensible à celle de la phase θ . La méthode découplée rapide (Fast Decoupled Load Flow) effectue le même temps d'exécution que celle de Newton–Raphson pour les très petits réseaux. Cependant, elle devient plus rapide pour les réseaux plus importants et pour les tolérances habituelles [20].

2.2.6 Méthode de Newton-Raphson (NR) :

C'est la méthode la plus utilisée pour l'EP parce que ses caractéristiques de convergence sont relativement plus rapides par rapport à d'autres méthodes et sa fiabilité est comparativement bonne car elle peut résoudre des cas qui mènent à une divergence par d'autres processus. Comme nous l'avons cité auparavant, que si la valeur initiale choisie est proche de la solution, alors le résultat est obtenu très rapidement, mais si elle est plus éloignée de la solution, la méthode peut prendre plus de temps à converger. D'après la littérature, la méthode NR est largement utilisée pour résoudre les équations non linéaires. L'équation est exprimée sous une forme de coordonnées polaires, dans laquelle " j " inclut le nœud " i " [21].

$$I_i = \sum^n |Y_{ij}|V_j < \theta_{ij} + \delta_j \quad (\text{II.1})$$

La puissance active et réactive au nœud i est la suivante :

$$P_i - jQ_i = V^*I_i \quad (\text{II.2})$$

Substitution de I_i dans l'équation (II.1) à partir de l'équation (II.2) :

$$P_i - jQ_i = |V_i| < -\delta_j \sum_{j-1}^n |Y_{ij}| |V_i| < \delta_{ij} + \delta_j \quad (\text{II.3})$$

Les parties réelle et imaginaire sont séparées :

$$P_i = \sum_{j-1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.4})$$

$$Q_i = \sum_{j-1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II.5})$$

Les équations d'écoulement de puissance ci-dessus constituent un ensemble d'équations algébriques non linéaires en termes de $|V|$ en par unité et δ en radian. Les équations (II.4) et (II.5) sont développées dans la série de *Taylor* sur l'estimation initiale et en négligeant tous les termes d'ordre supérieur, on obtient l'ensemble suivant d'équations linéaires.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Dans l'équation ci-dessus, l'élément de l'amplitude et de l'angle des différentes tensions des nœuds sont omis parce qu'ils sont déjà connus. Les éléments de la matrice Jacobienne sont obtenus après dérivées partielles d'équations (II.4) et (II.5) sont exprimés, ce qui donne une relation linéarisée entre les faibles variations de l'amplitude et l'angle de la tension. L'équation peut être écrite sous forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_3 \\ J_2 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Où J_1, J_2, J_3 et J_4 sont les éléments de la matrice Jacobienne.

Les valeurs corrigées de l'itération k peuvent être exprimées par ce qui est appelé le calcul des mismatches ($\Delta^{(k)}$ et $\Delta Q^{(k)}$), qui sont représentés comme suit :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sp} - P_i^{(k)cal} \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sp} - Q_i^{(k)cal} \quad (\text{II.9})$$

Où P_i^{sp} et Q_i^{sp} représentent les valeurs spécifiées de P_i et Q_i au nœud i . Ces valeurs sont donc fixes. $P_i^{(k)cal}$ et $Q_i^{(k)cal}$ représentent les valeurs calculées de la $k^{\text{ème}}$ itération.

Les nouvelles valeurs estimées de la tension des nœuds sont les suivantes :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (\text{II.10})$$

$$|V^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}| \quad (\text{II.11})$$

2.2.7 Comparaison entre Méthode de (GS) et (NR) :

La comparaison entre les deux méthodes de résolution du problème de Power flow a pour objectif de savoir quelle est la méthode la plus appropriée pour l'appliquer au réseau de distribution. Les avantages et les inconvénients de chaque méthode sont classés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.2 : Comparaison entre deux méthodes de calcul d'écoulement de puissance [22].

Méthode	Avantages	Inconvénients
Gauss-Seidel	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicité de technique. - Petit besoin en mémoire de l'ordinateur. - Moins de temps de calcul par d'itération. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lenteur de la convergence résultant d'un plus grand nombre d'itérations. - Augmentation du nombre d'itération avec l'augmentation du nombre de bus.
Newton-Raphson	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite moins de nombre d'itérations pour atteindre la convergence, et prend moins de temps de calcul. - Plus précise et pas sensible aux facteurs tels que la sélection de bus slack, régulation transformatrice... - Le nombre d'itérations nécessaires à cette méthode est presque indépendant de la taille du système. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite plus de calculs impliqués dans chaque itération et exige un grand temps de calcul par itération et une grande mémoire de l'ordinateur. - Technique de la solution difficile (programmation difficile).

Prenons en considération que le réseau de distribution comporte un nombre très important des composants selon sa structure et sa façon de fonctionnement, la méthode de Newton-Raphson est la plus efficace pour l'étude de ce système vu que la méthode est presque indépendante de la taille du système car le nombre d'itération de celle-ci n'augmente pas à l'augmentation du nombre de bus contrairement à la deuxième méthode.

Après ce qu'on a vu à propos du choix de la bonne méthode pour résoudre notre problème, il nous ne reste plus que connaître les méthodes d'optimisation des performances de ce réseau après avoir résolu le problème de Power Flow, pour assurer toujours l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. Dans la partie qui suit, on va exposer ce principe d'optimisation ainsi que ces méthodes de calcul.

2.3 L'Optimisation de l'écoulement de puissance :

Le problème de puissance optimale (OPF) est un problème d'optimisation non linéaire proposé par Carpentier au début des années 1960, basé sur la répartition économique de la puissance. Sauf pour l'aspect économique. Le fonctionnement optimisé d'écoulement de puissance garantit la sécurité des limites du générateur et une bonne transmission de puissance. Afin de résoudre fondamentalement le problème de l'optimisation de la répartition de puissance, de gros efforts ont été déployés. La complexité du problème et la taille des données conduisent à des systèmes non linéaires d'ordre supérieur. La solution de ce dernier a incité certains chercheurs à rechercher des méthodes plus simples et plus rapides capables d'améliorer sa convergence, de réduire le temps d'exécution et d'économiser de grandes quantités de mémoire informatique.

L'optimisation de l'écoulement de puissance (Optimal Power Flow) est une opération très importante pour les gestionnaires de réseaux. Il s'agit de trouver la meilleure combinaison de variables d'état, à savoir les consignes des tensions, les prises du transformateur, l'état de la réactance, etc. Cette combinaison optimale minimise d'une part les pertes dues à l'effet Joule, les coûts de production, et améliore le profil et la stabilité de tension dans le système de puissance. D'autre part, cela maximise la sécurité de l'exploitation du système électrique [23].

2.4 Les méthodes d'optimisation de l'écoulement de puissance :

2.4.1 La méthode de Gradient :

Historiquement, les méthodes de gradient sont les plus anciennes. Elles permettent de résoudre des problèmes non linéaires et sont basées sur une hypothèse forte sur la connaissance de la dérivée de la fonction objective en chacun des points de l'espace. Cette méthode peut être classée en deux catégories de premier ordre et de deuxième ordre, le premier ordre est basé sur une approximation linéaire en séries de Taylor avec initialisation du gradient, et le deuxième ordre est basé sur l'approximation quadratique en séries de Taylor avec initialisation du gradient en utilisant le Hessien [23].

2.4.2 La méthode de Newton :

La méthode de Newton est une méthode très puissante grâce à sa convergence rapide, en particulier si l'estimation initiale de la solution $x(0)$ est suffisamment proche de la solution optimale $x(m)$. L'idée de cette méthode est de minimiser, à chaque itération k , une approximation quadratique de la fonction objectif originale $f(x)$ au voisinage de l'estimation actuelle de la solution $x(k)$. L'approximation quadratique de $f(x)$ est obtenue à partir du développement en série de Taylor à l'ordre 2 [23].

$$f(x^{(k+1)}) \cong f(x^{(k)}) + [\Delta f(x^{(k)})]^T [\Delta x^{(k+1)}] + \frac{1}{2} [\Delta x^{(k+1)}]^T [\nabla^2 f(x^{(k)}) [\Delta x^{(k+1)}]]^T$$

Où : $F: R^n \rightarrow R^n$ est régulière (au moins différentiable). On cherche donc $x(m)$ tel que $F(x) = 0$
Pour toute $i = 1, \dots, n$.

2.4.3 La méthode d'itération de Lambda (Lambda itération méthode) :

La méthode d'itération de Lambda est une des méthodes utilisées pour trouver la valeur de lambda du système et trouver le dispatching économique optimal des générateurs. Contrairement aux autres méthodes d'itération, lambda itération n'utilise pas la valeur précédente de l'inconnue pour trouver la valeur suivante c'est-à-dire il n'y a pas une équation qui calcule la valeur suivante en fonction de la valeur précédente. La valeur suivante est prédéfinie par intuition, elle est projetée avec interpolation de la bonne valeur possible jusqu'à ce que le décalage spécifié soit obtenu. On va maintenant discuter comment trouver le dispatching économique optimal utilisant la méthode d'itération de Lambda.

- La méthode exige qu'il y ait une correspondance entre une valeur lambda et la sortie (en MW) de chaque générateur
- La méthode commence avec des valeurs de lambda en-dessous et en-dessus de la valeur optimale (qui est inconnue), puis par itération limite la valeur optimale [23].

2.4.4 Les algorithmes génétiques :

Les algorithmes génétiques AG sont inspirés du concept de sélection naturelle et de la théorie de l'évolution et de la génétique élaborée par Charles Darwin. Plusieurs programmes génétiques ont été introduits par Holland en 1975 et largement développés par Koza en 1992. Les AG travaillent sur des chaînes de caractères de taille fixe. On définit au départ une population d'individus de façon aléatoire. Chaque individu est marqué par une chaîne de caractères particulière évaluant son chromosome. Les individus vont être évalués sur la base d'une fonction objective, sélectionnés, se reproduire et subir des mutations. C'est un processus itératif qui prend généralement fin lorsque la population n'évolue plus entre deux périodes [23].

2.5 Les méthodes méta-heuristique :

Les premières méta-heuristiques datent des années 1980, si elles sont d'origine discrète, on peut les adapter à des problèmes continus. Elles sont utilisées généralement quand les méthodes classiques (mathématiques) ont échoué de trouver la solution souhaitée, leur efficacité n'est pas toujours garantie, elle dépend, de la nature du problème envisagé et les paramètres de l'algorithme. Ces méthodes sont largement appliquées aux différents domaines notamment dans le domaine de l'optimisation de l'énergie électrique.

Les méthodes d'optimisation méta-heuristiques sont inspirées parfois de la théorie d'évolution chez les sociétés d'animaux et d'insectes dans laquelle on trouve les algorithmes génétiques AG, parfois sont inspirées de la théorie d'éthologie de ces sociétés, parmi ces méthodes : l'algorithme du Loup Gris (GWO), Stratégies d'Evolution (SE), Programmation Evolutionnaire (PE), Optimisation par Essaim de Particules(PSO), Recuit Simulé (RS), Recherche Taboue (RT)...etc [24].

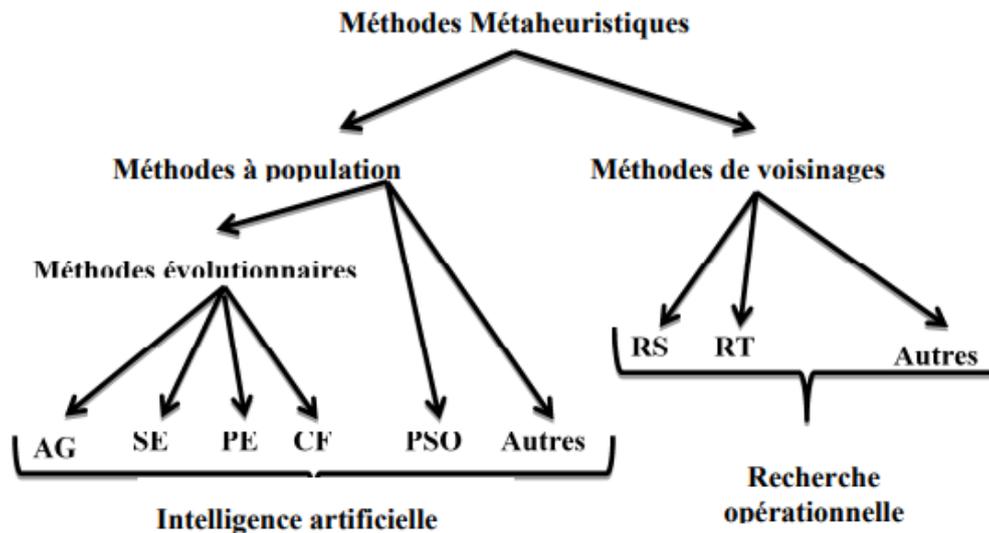


Figure2.8: Classification des méthodes méta-heuristiques.

CF : Colonie de Fourmies .

AG :Algorithmes Génétique .

SE : Stratégies d'Evolution .

PE : Programmation Evolutionnaire .

PSO : Optimisation par Essaim de Particules .

RS : Recuit Simulé .

RT : Recherche Taboue.

Dans laquelle on cite les algorithmes d'optimisation par essais particulaires PSO, les colonies des Fourmies ACO, les colonies des abeilles ABC :

2.5.1 L'Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielle ABC :

L'algorithme ABC (Artificiel Bee Colony) est développé par Karaboga et Basturk en 2005, en inspectant les comportements des abeilles réelles pour trouver la source de nourriture, qui s'appelle le nectar, et partager l'information des sources de nourriture aux autres abeilles dans le nid. Dans cet algorithme, les abeilles artificielles sont définies et classifiées en trois groupes: abeilles employeuses (abeilles qui recherche la nourriture), spectatrices (abeilles d'observation) et scouts (éclaireuses) sont chargées de trouver de nouvelles nourritures, (le nectar de nouvelles source). Pour chaque source de nourriture, il y a seulement une abeille employeuse. C'est-à-dire, le nombre d'abeilles employeuses est égal au nombre de sources de nourriture. Si l'abeille employeuse d'un site ne réussit pas de trouver la source de nourriture, elle doit forcément devenir un scout pour rechercher aléatoirement de nouvelles sources de nourriture. De l'écoulement de puissance (Optimal Power Flow) est une opération très importante pour les gestionnaires de réseaux. Il s'agit de trouver la meilleure combinaison de variables d'état, à savoir les consignes des tensions, les prises du transformateur, l'état de la réactance, etc. Cette combinaison optimale minimise d'une part les pertes dues à l'effet Joule, les coûts de production, et améliore le profil et la stabilité de tension dans le système de puissance. D'autre part, cela maximise la sécurité de l'exploitation du système électrique [25].

2.5.2 L'Algorithme d'optimisation de colonie d'abeilles artificielle ABC :

2.5.3 Optimisation par l'algorithme de colonies de fourmis ACO :

L'étude des fourmis a longtemps été négligée par les entomologistes. Jusqu'à ce que, Hölldobler et Wilson ont corrigé cette lacune en 1990 en publiant un ouvrage concentrant tout ce que l'on connaissait des fourmis. Les fourmis constituent à l'heure actuelle un support majeur pour les théories développées en écologie comportementale et en sociobiologie. On peut citer plusieurs raisons à cette inspiration : L'influence des fourmis sur leur environnement naturel est extrêmement importante. Il a par exemple été montré (qu'elles déplacent plus de terre en forêt tropicale que les vers de terre, ou encore que le poids total des fourmis sur terre est du même ordre de grandeur que le poids des humains. De plus, la domination des fourmis est une preuve de leur adaptation à des environnements très variés [23].

a) l'étude des fourmis se fait assez facilement en laboratoire car elles s'adaptent sans trop de difficultés à des environnements différents de leur habitat d'origine

b) les fourmis possèdent une gamme de comportements très variés, collectifs ou Individuels.

L'optimisation par colonies de fourmis, s'inspire du comportement des fourmis lorsque celles-ci sont à la recherche de nourriture. Une fourmi en se déplaçant pose de la phéromone, substance olfactive et volatile, sur son chemin. Les fourmis se dirigent de manière probabiliste en tenant compte de la quantité de phéromone qui est autour d'elles et qui a été précédemment déposée par les autres membres de la colonie. Plus la quantité de phéromone indiquant un chemin est grande, plus la fourmi a tendance à suivre ce chemin. Cependant, comme la phéromone s'évapore progressivement, le choix probabiliste que prend une fourmi pour choisir son chemin évolue continuellement. Comme l'illustre la Figures si dessus, les fourmis qui reviendront au nid le plus rapidement, après avoir visité la source de nourriture, sont celles qui auront emprunté les deux branches les plus courtes. Ainsi, la quantité de phéromone présentée sur le plus court chemin est relativement plus importante que celle présente sur le chemin le plus long. En sachant qu'une piste présentant une plus grande concentration en phéromone est plus attirante pour les fourmis, elle aura une plus grande probabilité d'être choisie. Le chemin le plus court sera renforcé par les passages successifs et deviendra à terme la piste empruntée par la majorité des insectes [23] [24] [25].

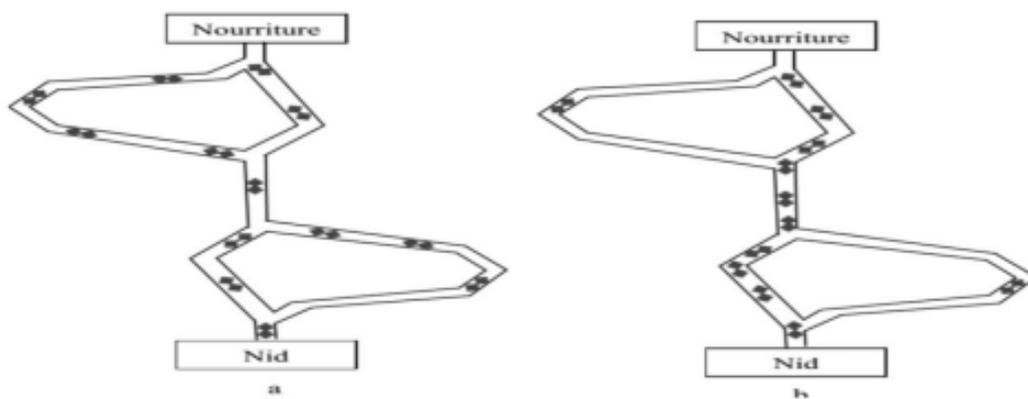
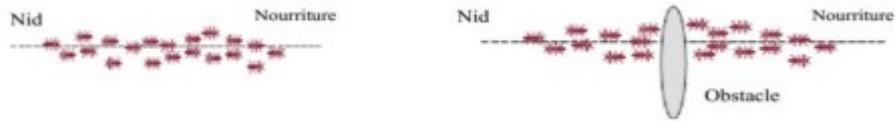


Figure 2.9 : Expérience de sélection des branches les plus courtes par une colonie de fourmis [23].

(a) au début de l'expérience

(b) à la fin de l'expérience



a) : Des fourmis réelles suivant un chemin entre le nid et une source de nourriture

b) : Un obstacle survient sur le chemin les fourmis choisissent de tourner à gauche ou à droite, avec des probabilités égales.



c) : La quantité de phéromone est déposée plus rapidement sur le chemin le plus court

d) : Toutes les fourmis ont choisi le chemin le plus court

Figure 0.10 : Illustration de la capacité des fourmis à chercher de la nourriture en minimisant leur mouvement.

2.5.4 Optimisation par essaims de particules :

L'optimisation par essaim de particules (PSO) est une technique d'optimisation parallèle développée par Kennedy et Eberhart, en s'inspirant du comportement social des individus qui ont tendance à imiter les comportements d'ensemble qu'ils observent dans leur entourage (des oiseaux s'assemblant en nuées, des bancs de poissons sous l'eau ou des essaims d'abeilles dans leur déplacement), tout en y apportant leurs variations personnelles. PSO présente beaucoup de similitudes avec les techniques de calcul évolutionnaire. La différence d'autres techniques heuristiques, PSO a un mécanisme flexible et bien équilibré pour augmenter et s'adapter aux capacités d'exploration globale et locale. Cependant, à la différence des algorithmes génétiques, qui miment les mécanismes génétiques de l'évolution, PSO ne comporte aucun opérateur d'évolution tel que le croisement ou la mutation, cet algorithme s'inspirant plutôt de la formation d'une culture [23] [26].

L'initialisation de l'algorithme PSO se fait par une population de solutions potentielles aléatoires, interprétées comme des particules se déplaçant dans l'espace de recherche. Chaque particule est attirée vers sa meilleure position atteinte par le passé ainsi que vers la meilleure position atteinte par les particules de tout l'essaim.

L'algorithme PSO comprend plusieurs paramètres de réglage qui permettent d'agir sur le compromis exploration – exploitation. L'exploration est la capacité de tester différentes régions de l'espace à la recherche de bonnes solutions candidates. L'exploitation est la capacité de concentrer la recherche autour des solutions prometteuses afin de s'approcher le plus possible de l'optimum. L'optimisation des essaims de particules (PSO) est un algorithme d'optimisation intelligent basé sur l'intelligence essaim. Il est basé sur un modèle mathématique simple, développé par Kennedy et Eberhart en 1995, pour décrire le comportement social des oiseaux et des poissons. Le modèle repose principalement sur les principes de base de l'auto-organisation,

utilisés pour décrire la dynamique de systèmes complexes. L'intelligence essaim est la capacité de tels systèmes à atteindre un niveau d'intelligence plus élevé, ce qui est absolument inaccessible pour aucune des unités du système. Par exemple, une volée d'oiseaux en tant que société a des comportements très complexes, ce qui dépasse le niveau d'intelligence de l'un des oiseaux du troupeau, bien sûr. Cependant, ces modèles complexes sont créés via des tâches simples et répétitives, effectuées par l'un des membres du groupe. PSO utilise un modèle de comportement social très simplifié pour résoudre les problèmes d'optimisation, dans un cadre coopératif et intelligent. PSO est l'une des méta-heuristiques les plus utiles et les plus célèbres, elle est appliquée avec succès à divers problèmes d'optimisation [26].

Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, survole, l'espace de recherche, en quête de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes :

- Une composante physique : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
- Une composante sociale : la particule tend se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins. Dans le cas d'un problème d'optimisation, la qualité d'un site de l'espace de recherche est déterminée par la valeur de la fonction objective en ce point [26] [27].

La Figure illustre le schéma vectoriel du déplacement d'une particule qui détermine de nouvelle position d'une particule dans un processus PSO.

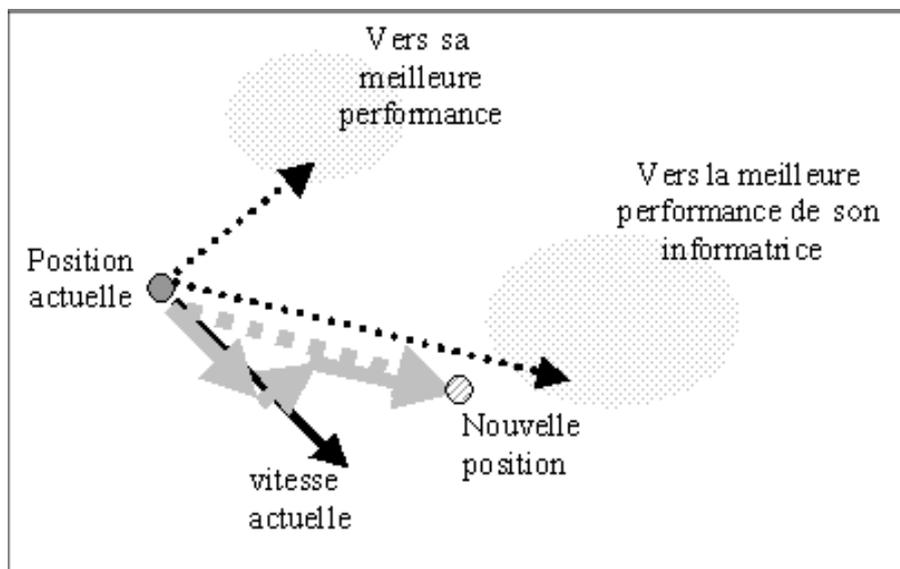


Figure 2.11 : Schéma de principe du déplacement d'une particule [27].

3 Conclusion :

Ce chapitre vise à introduire le problème du calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique. Nous avons exploré les méthodes conventionnelles telles que Newton-Raphson, Gauss-Seidel et la méthode découplée rapide, démontrant leur efficacité. Une comparaison de ces méthodes a permis de déterminer la méthode la plus adaptée pour un réseau de distribution.

Nous avons ensuite présenté le problème de l'écoulement optimal de puissance et les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation non linéaires. Nous nous sommes concentrés sur la méthode d'optimisation par essais particuliers (PSO), une approche méta-heuristique inspirée des comportements sociaux, reconnue pour sa simplicité et sa fiabilité.

Pour assurer une bonne compréhension, une application numérique sera effectuée dans le chapitre suivant.

Chapitre III

L'intégration optimale des PVDG-DSTATCOM

1. Introduction :

Les capacités des lignes de distribution sont généralement limitées. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en compte les futurs ajouts de charge et comment ils seront pris en charge. La production décentralisée (DG) basée sur des sources d'énergie renouvelables peut contribuer à résoudre les défis mentionnés ci-dessus pour les futurs systèmes de distribution radiale moyenne tension (SDR). En plus des unités de production traditionnelles, les systèmes électriques modernes intègrent une variété de sources d'énergie renouvelables (SER). Plusieurs dispositifs FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) sont disponibles. Actuellement, les dispositifs FACTS distribués sont les outils les plus sophistiqués de compensation d'énergie réactive utilisés dans les RDS. Dans les RDS, le flux de puissance réactive entraîne des problèmes tels que des pertes de puissance, un faible facteur de puissance et une chute de tension. Par conséquent, la compensation de la puissance réactive est essentielle au bon fonctionnement des RDS pour répondre aux préoccupations mentionnées.

Dans les SDR passifs, certains avantages obtenus par l'intégration de sources de production décentralisée photovoltaïque (PVDG) sont attribuables à d'autres dispositifs, parmi lesquels le DSTATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator) se distingue. L'allocation de DSTATCOM pour améliorer les performances des RDS est considérée comme l'une des solutions les plus abordables. Au cours des dernières années, de nombreux algorithmes d'optimisation ont été appliqués pour trouver l'allocation optimale des unités PVDG et DSTATCOM simultanément, permettant l'injection de puissances actives et réactives dans les RDS, comme l'algorithme PSO.

Dans ce chapitre, un problème d'allocation des unités PVDG et DSTATCOM a été formulé afin de minimiser une fonction multi-objectif qui est considérée comme la somme des paramètres techniques et économiques de perte de puissance réactive totale, déviation de tension totale, ainsi que le coût d'investissement des PVDG et des dispositifs DSTATCOM. Résoudre le problème d'allocation mentionné des PVDG et des unités DSTATCOM était basé sur l'application d'algorithme d'optimisation qui a été développé au cours des dernières années, qui est l'optimisation des essaims de particules (PSO). L'algorithme sélectionné a été testé sur les deux systèmes de distribution radiale IEEE 33 et 69 bus.

Le reste de l'étude consiste à présenter les modèles des unités PVDG et DSVC. Ainsi l'évaluation des fonctions multi-objectifs proposées dans le présent document. A la fin, l'étude révèle les résultats et l'analyse optimaux obtenus.

2. Modélisation :

2.1 Ligne de distribution radiale :

Dans l'industrie, une ligne de distribution radiale fonctionne en acheminant l'électricité depuis une sous-station principale vers plusieurs points de consommation à travers une seule ligne principale, avec des branches secondaires desservant différentes installations. Ce type de configuration permet une distribution unidirectionnelle de l'énergie, simple à mettre en œuvre et économique à maintenir. Cependant, en raison de la nature critique des opérations industrielles, des dispositifs supplémentaires sont souvent intégrés pour améliorer la fiabilité et la qualité de l'alimentation électrique. Ces dispositifs incluent des transformateurs de régulation de tension pour maintenir des niveaux de tension stables, des compensateurs de puissance réactive comme les DSTATCOM pour stabiliser la tension et améliorer la qualité de l'énergie, ainsi que des dispositifs de protection avancés pour détecter et isoler rapidement les pannes, minimisant ainsi les interruptions. Grâce à ces améliorations, la ligne de distribution radiale peut répondre efficacement aux besoins énergétiques élevés et sensibles des installations industrielles.

La photo qui suit représente une ligne de distribution radiale :

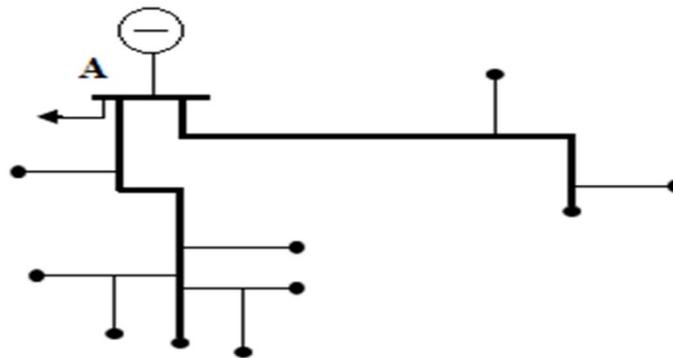


Figure 3.1 : Schéma d'une ligne de distribution radiale [12].

L'électricité circule en un seul sens, partant de la source vers les charges finales. Ce schéma simplifié permet une distribution efficace de l'énergie électrique, mais il peut entraîner des interruptions en cas de panne sur la ligne principale. Des dispositifs de protection et de régulation sont souvent installés pour assurer la fiabilité et la qualité de l'alimentation électrique car la continuité du service est cruciale.

2.2 Le générateur décentralisé photovoltaïque (PVDG) :

La conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique, soit « L'effet photovoltaïque » été découvert par le physicien français Becquerel en 1839. Cette conversion est assurée par les cellules photovoltaïques (PV) qui sont composées de silicium (cellules semi-conductrices $P-N$), basées sur l'effet photoélectrique. Quand la radiation solaire tombe sur la zone de semi-conducteur $P-N$, on parvient à générer une différence de potentiel et un flux de courant. Le courant de sortie dépend de la radiation solaire, de la température, de la vitesse du vent et des caractéristiques de chaque cellule photovoltaïque, avec un rendement de 100 W/m² (en 1999).

Pour obtenir des courants et des tensions désirées, les cellules photovoltaïques sont regroupées en modules. De même, un panneau photovoltaïque est formé par plusieurs modules connectés en parallèle ou en série entre eux pour arriver à la puissance désirée.

Un générateur photovoltaïque est une source de courant continu et par conséquent sa sortie doit être adaptée pour sa connexion à un réseau alternatif ou pour alimenter une charge AC [28].

2.2.1 Système de conversion photovoltaïque :

Le système de conversion photovoltaïque est basé sur des blocs modulaires, comme représenté dans la figure (3.2), Ainsi, la chaîne de conversion photovoltaïque se compose du générateur photovoltaïque (la cellule PV, les panneaux et leurs connections), le convertisseur statique et de l'ensemble hacheur système de commande ou le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, à savoir rechercher le point de puissance maximale (MPPT) [28] .

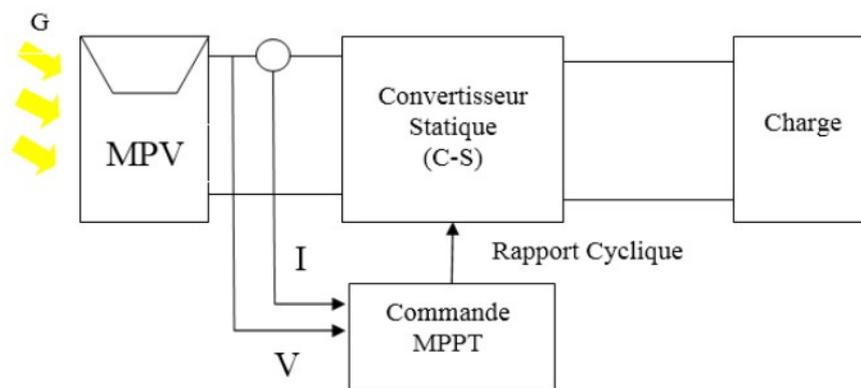


Figure 3.2 : Système de conversion photovoltaïque [28].

2.2.2 Modèle d'un générateur PV :

La cellule photovoltaïque (PV) est l'élément de base d'un générateur PV. Elle est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie de la lumière et la transforme directement en courant électrique. Son principe de fonctionnement fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

Une cellule photovoltaïque est représentée par le schéma équivalent dans la figure ci-dessous [28].

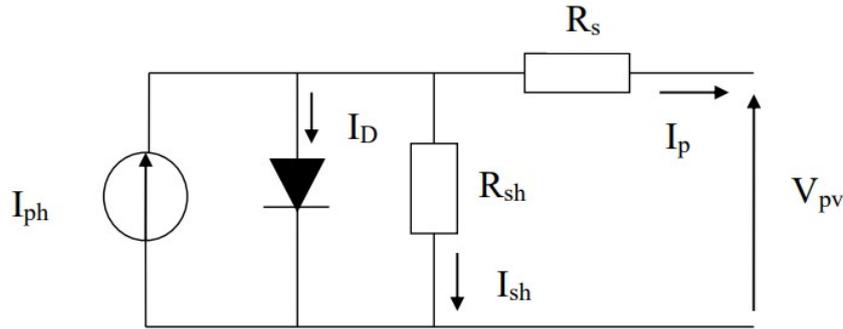


Figure 3.3 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [28].

La cellule se compose d'une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la fonction dont celle-ci a été réalisée.

D'après la loi de Kirchhoff, et à partir de la figure (3.3), le courant délivré par une cellule PV est donné par [28] :

$$I_p = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (III.1)$$

Le courant de jonction I_D est donné par :

$$I_D = I_0 \left(e^{q \left(V + \frac{R_s I}{n k T} \right)} - 1 \right) \quad (III.2)$$

Le courant dans la résistance R_{sh} est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_p R_s}{R_{sh}} \quad (III.3)$$

L'équation caractéristique deviendra :

$$I_p = I_{ph} - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_s I}{n k T} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_p R_s}{R_{sh}} \quad (III.4)$$

Où, I_p est le courant de cellule, V_{pv} est la tension de cellule, R_s est la résistance série de la cellule, T représente la température de la cellule [°K].

q est la charge d'électron $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$, I_0 représente le courant de saturation en [A].

K est la constante de Boltzman ($1.3854 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), n est le facteur de qualité de diode [28].

2.2.3 Paramètres externes de la cellule photovoltaïque :

Les paramètres externes peuvent être déterminés à partir d'équation caractéristique ou les courbes courant-tension, ou les plus connus sont :

- Courant de court-circuit : C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. Dans le cas idéal (R_s nulle, R_{sh} infinie) ce courant se confond avec le Photo-courant I_{ph} . Dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation III.4), on obtient [28]:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_s I_{cc}}{n k T} \right)} - 1 \right) - \frac{I_{cc} R}{R_{sh}} \quad (III.5)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme suivant :

$$I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_s I_{cc}}{n k T} \right)} \right) \quad (III.6)$$

On obtient alors l'expression approchée du courant de court-circuit :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{ph}}} \quad (III.7)$$

- Tension de circuit ouvert : C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV). Son expression est déduite de l'équation suivante :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V_{co}}{n k T} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (III.8)$$

Dans le cas idéal sa valeur est inférieure à :

$$V_{co} = \frac{q}{n k t} \times \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (III.9)$$

Pour une photopile en silicium la tension de circuit ouvert V_{co} est de 0.55 à 0.6 V.

- Puissance optimale et facteur de forme : La puissance utile maximale $PM = V_M \cdot I_M$, S'obtient en optimisant le produit courant-tension, soit :

$$\frac{I_M}{V_M} = - \left(\frac{dI}{dV} \right) \times M \quad (III.10)$$

Quant au facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, ou fill factor, il est défini par [28] :

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{co} I_{cc}} \quad (III.11)$$

2.2.4 Rendement de GPV :

On parle souvent de rendement de conversion pour des cellules photovoltaïques, ce terme correspond à la capacité de la cellule à transformer l'énergie des photons qui la percutent. Les cellules PV sont donc testées par les constructeurs sous un spectre lumineux artificiel correspondant à un spectre solaire typique AM1.5 (soit à l'irradiance totale reçue sur le sol terrestre à une altitude de 0° avec un angle de 48°) sous une température fixe de 25°C. Pour simplifier, cette convention a permis de normaliser les rendements donnés dans les notices des capteurs afin de pouvoir les comparer. La puissance moyenne totale reçue lors des tests par les cellules assemblées en module PV est de 1000 W/m² sous 25°C [28].

Le rendement η d'un générateur PV est le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par le photo-générateur, comme l'illustre l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P_{mp}}{G.S} \quad (\text{III.12})$$

Où P_{mp} est point de puissance maximale, S est la surface du GPV.

On peut calculer ce rendement aussi pour différents éclairagements, mais le plus souvent, c'est dans les conditions standards STC, que l'on calcule avec la puissance crête P_c :

$$\eta = \frac{P_c}{1000.S} \quad (\text{III.13})$$

De nombreux scientifiques travaillent sur l'augmentation des rendements de conversion des cellules photovoltaïques. Actuellement, les panneaux commerciaux ont pour la plupart d'entre eux, un rendement d'environ 14%. Ceci peut se traduire par la production de 140 Watts crêtes pour un module PV qui reçoit 1000 W/m² [28].

2.3 Modèle du DSTATCOM :

2.3.1 Introduction sur DSTATCOM :

Les moyens mécaniques et traditionnels de réglage de tension dans les réseaux de distribution, notamment les régulateurs en charge ou hors charge des transformateurs de distribution HTA/BT, les condensateurs, sont de nos jours inefficaces pour répondre aux nouvelles contraintes des réseaux de distribution qui sont devenus très complexes. En effet, les insuffisances qui caractérisent ces moyens de réglage sont la lenteur d'action et l'usure qui limitent leur efficacité. Par exemple, les condensateurs shunts qui peuvent fournir de la puissance réactive au système de puissance ne sont pas capables de générer une puissance réactive continue et ont un comportement oscillatoire sur les réseaux de distribution. Les gestionnaires de réseaux électriques éprouvent alors la nécessité de recourir aux applications de l'électronique de puissance qui ont introduit des systèmes flexibles de transmission (FACTS) dans les systèmes de puissance tels que le SVC, l'UPFC et le STATCOM. En effet, ces dispositifs peuvent faciliter le contrôle du flux d'énergie, l'amélioration du transfert de puissance, l'augmentation de la réserve réactive des générateurs, la réduction des écarts de tension et des pertes. Ces dispositifs permettent d'améliorer l'efficacité des équipements installés sur les réseaux en augmentant la capacité de transfert de puissance et en améliorant les performances de ces réseaux. Le D-STATCOM, composant issu de cette famille est un convertisseur de source de tension pouvant être connecté en dérivation sur le réseau de distribution et dont le but est d'injecter un courant capacitif ou inductif sur la tension pour compenser les tensions aux jeux de barre, les déséquilibres et les fluctuations de tension et améliorer l'efficacité du système de distribution [29].

2.3.2 Fonctionnement du DSTATCOM :

Le DSTATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator) est un dispositif avancé utilisé dans les réseaux de distribution pour stabiliser la tension et améliorer la qualité de l'énergie. Il fonctionne principalement en fournissant ou en absorbant de la puissance réactive grâce à un convertisseur à source de tension (VSC). Le VSC utilise des dispositifs de commutation comme les IGBT pour convertir le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) et réguler la tension AC en synchronisation avec le réseau. Un condensateur de bus DC stocke l'énergie nécessaire pour le VSC et stabilise la tension du bus DC. Un filtre d'interconnexion est utilisé pour atténuer les harmoniques générés par le VSC avant que le courant ne soit injecté dans le réseau. Le contrôle du DSTATCOM est assuré par des algorithmes sophistiqués, qui régulent les composantes directes (d) et quadratures (q) des courants injectés en fonction des besoins de compensation. Les mesures de tension et de courant du réseau sont transformées en coordonnées dq pour une régulation plus efficace, et un régulateur PID génère les signaux de modulation pour les IGBT, permettant une réponse rapide et précise aux variations de charge et aux perturbations du réseau. Ainsi, le DSTATCOM joue un rôle crucial dans le maintien de la stabilité de la tension et l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux de distribution [29].

2.3.3 Structure d'un DSTATCOM :

Structure d'un DSTATCOM La structure triphasée du DSTATCOM est donnée sur la figure (2.1). Le DSTATCOM repose sur la topologie de l'onduleur de tension. Dans les réseaux de distribution à basse tension (BT), les DSTATCOM à deux niveaux et généralement couplés au réseau par un filtre RL. Le réseau électrique est représenté par trois tensions simples (v_a , v_b et v_c) et ses impédances Internes. La charge est une charge inductive triphasée couplée en étoile [29].

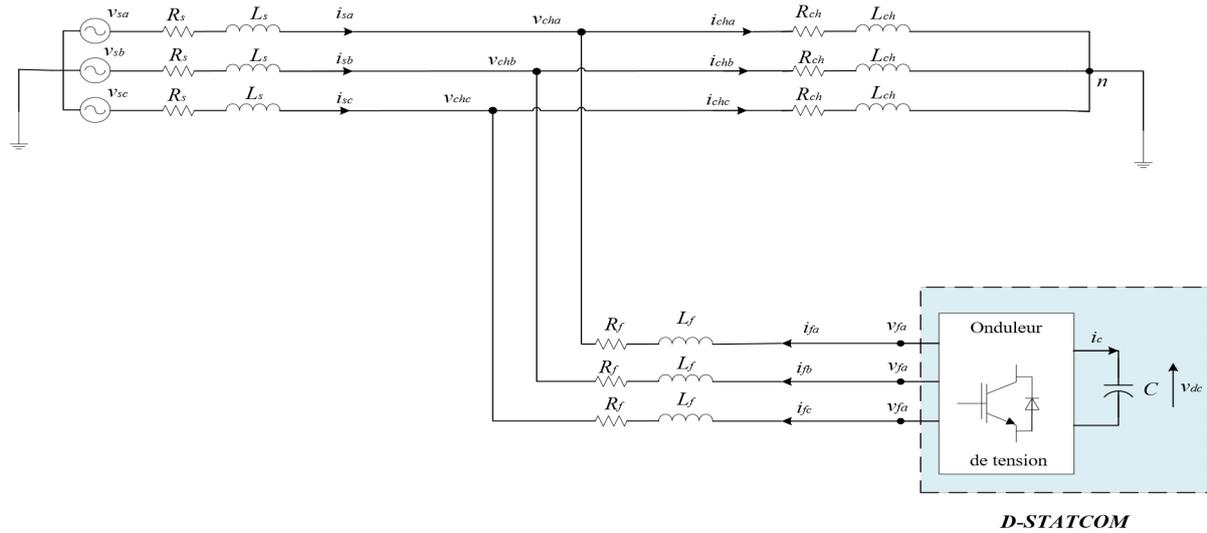


Figure 3.4 : Structure triphasée du DSTATCOM couplé au réseau [29].

2.3.4 Modélisation du DSTATCOM :

A partir de la figure (3.4), l'expression des tensions de charge sont définies par [29] :

$$\begin{aligned} V_{cha} &= -L_f \frac{dI_{fa}}{dt} - R_f * I_{fa} + V_{fa} \\ V_{chb} &= -L_f \frac{dI_{fb}}{dt} - R_f * I_{fb} + V_{fb} \\ V_{chc} &= -L_f \frac{dI_{fc}}{dt} - R_f * I_{fc} + V_{fc} \end{aligned} \quad (III.14)$$

Ce qui donne [29] :

$$\begin{aligned} \frac{dI_{fa}}{dt} &= \frac{1}{L_f} (V_{fa} - V_{cha} - R_f * I_{fa}) \\ \frac{dI_{fb}}{dt} &= \frac{1}{L_f} (V_{fb} - V_{chb} - R_f * I_{fb}) \\ \frac{dI_{fc}}{dt} &= \frac{1}{L_f} (V_{fc} - V_{chc} - R_f * I_{fc}) \end{aligned} \quad (III.15)$$

D'autre part, nous avons [29] :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{I_c}{C} \quad (III.16)$$

Multiplier (III.17) par V_{dc} donne [29] :

$$\frac{dV_{dc}^2}{dt} = \frac{2V_{dc} * I_c}{C} \quad (III.17)$$

L'équation du côté continu (III.17) peut être liée au côté alternatif par la conservation des puissances actives suivantes [29]:

$$V_{dc} * I_c = V_{cha} * I_{fa} + V_{chb} * I_{fb} + V_{chc} * I_{fc} \quad (III.18)$$

En utilisant (III.18), l'équation (III.17) devient [29]:

$$\frac{dV_{dc}^2}{dt} = \frac{2(V_{cha} * I_{fa} + V_{chb} * I_{fb} + V_{chc} * I_{fc})}{C} \quad (III.19)$$

Modèle total du DSTATCOM dans le repère abc est donné par l'équation suivante [29]:

$$\begin{aligned} \frac{dI_{fa}}{dt} &= \frac{1}{L_f} (V_{fa} - V_{cha} - R_f * I_{fa}) \\ \frac{dI_{fb}}{dt} &= \frac{1}{L_f} (V_{fb} - V_{chb} - R_f * I_{fb}) \\ \frac{dI_{fc}}{dt} &= \frac{1}{L_f} (V_{fc} - V_{chc} - R_f * I_{fc}) \\ \frac{dV_{dc}^2}{dt} &= \frac{2(V_{cha} * I_{fa} + V_{chb} * I_{fb} + V_{chc} * I_{fc})}{C} \end{aligned} \quad (III.20)$$

Pour simplifier le modèle du DSTATCOM, on fait appelle à la transformation de concordia , ce qui nous donne [29]:

$$\begin{aligned} \frac{dI_{f\alpha}}{dt} &= \frac{1}{L_f} (V_{f\alpha} - V_{ch\alpha} - R_f * I_{f\alpha}) \\ \frac{dI_{f\beta}}{dt} &= \frac{1}{L_f} (V_{f\beta} - V_{ch\beta} - R_f * I_{f\beta}) \\ \frac{dV_{dc}^2}{dt} &= \frac{2(V_{ch\alpha} * I_{f\alpha} + V_{ch\beta} * I_{f\beta})}{C} \end{aligned} \quad (III.21)$$

La transformation du système biphasé (III.21) dans le repère (d-q) nécessite la matrice de rotation suivante [29]:

$$\begin{bmatrix} Xd \\ Xq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X\alpha \\ X\beta \end{bmatrix} \quad (III.22)$$

Avec $\varphi = \omega t$: l'angle du vecteur tension de charge dans le repère α - β donné par [29] :

$$\varphi = \arctan\left(\frac{V_{ch\beta}}{V_{ch\alpha}}\right) \quad (\text{III.23})$$

L'axe direct du repère tournant d-q est typiquement fixé sur le vecteur tension de charge V_{ch} , afin d'annuler la composante V_{chq} , comme le représente la figure suivante [29]:

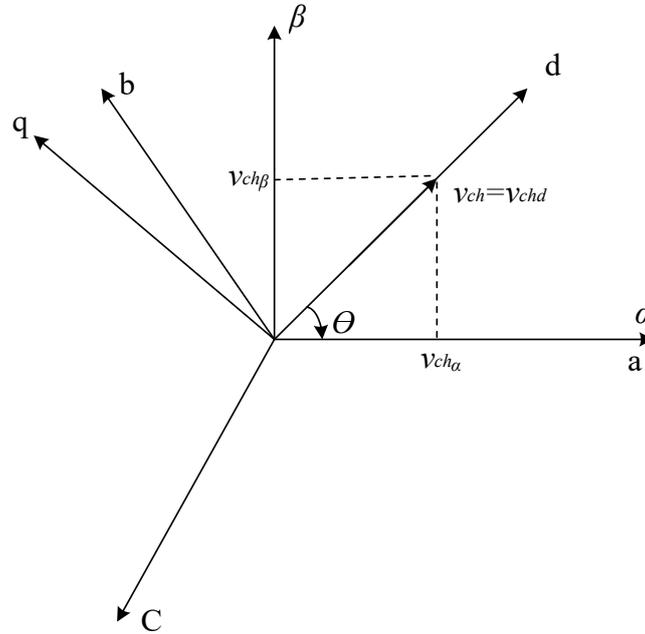


Figure 3.5 : Diagramme vectoriel de la tension de charge [29].

Après la transformation, le modèle du DSTATCOM dans le repère d-q est donné par :

$$\begin{aligned} \frac{dI_{fd}}{dt} &= \frac{1}{L_f} (R_f * I_{fd} + V_{fd} - V_{chd} - L_f * \varphi * I_{fq}) \\ \frac{dI_{fq}}{dt} &= \frac{1}{L_f} (R_f * I_{fq} + V_{fq} - V_{chq} - L_f * \varphi * I_{fd}) \\ \frac{dV_{dc}^2}{dt} &= \frac{2V_{chd} * I_{fd}}{C} \end{aligned} \quad (\text{III.24})$$

L'équation (III.24) montre que le modèle du DSTATCOM dans le repère d-q fait apparaître des termes de couplage entre les axes d et q [29].

3. L'Optimisation par essais particuliers PSO :

La méthode PSO (Particle Swarm Optimization) est une méta-heuristique qui vise à trouver l'optimum d'une fonction en un temps de traitement relativement court. Elle vise à résoudre des problématiques dans différents domaines sans avoir besoin de modifier le principe de base de l'algorithme.

La méthode PSO est basé sur les interactions sociales entre des particules afin d'atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun où chaque particule a une certaine capacité de mémorisation et de traitement d'information.

3.1 L'algorithme PSO :

L'algorithme PSO est utilisé pour localiser les valeurs optimales des fonctions non linéaires continues et a été introduit en 1995 par James Kennedy qui fut un socio-psychologue et Russell Heberhart ingénieur électricien.

Cet algorithme est principalement inspiré du comportement social des nuées d'oiseaux ou des bancs de poissons (voir figure 3.6). Dans l'algorithme de PSO, au lieu d'utiliser des opérateurs génétiques, les individus sont évolués par la compétition et la coopération entre les individus eux-mêmes à travers les générations. Chaque particule ajuste son vol en fonction de sa propre expérience seule ou avec ses compagnons.

Chaque individu est nommé, une particule qui, en fait, représente une solution potentielle à un problème.

Trois composants influenceront le mouvement d'une particule de position à l'autre :

- La composante physique ou la composante d'inertie influence le mouvement vers la direction actuelle de la particule.
- La composante cognitive attire la particule vers la meilleure position par laquelle elle est passée jusqu'à l'itération actuelle.
- La composante sociale oriente la particule vers la meilleure position trouvée par l'essaim lors la recherche [30].



(a)



(b)

Figure 3.6 : Inspiration de l'algorithme PSO

(a) Nuée de oiseaux qui vole

(b) Un banc de poisson

Dans l'algorithme PSO, chaque particule i est modélisée par un vecteur de position X_i et un vecteur de changement de position V_i appelé (vitesse) dans un espace de d dimension. La meilleure position de chaque particule est enregistrée et présentée comme P_{best} , tandis que la meilleure particule parmi toutes les particules de la population est représentée par G_{best} . À chaque itération k , chaque particule est déplacée selon les équations suivantes :

$$V_i^{k+1} = \omega \cdot V_i^k + C_1 r_1 [P_{best}^k - X_i^k] + C_2 r_2 [G_{best}^k - X_i^k] \quad (\text{III.25})$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (\text{III.26})$$

Où, c_1 et c_2 sont des coefficients d'accélération, r_1 et r_2 sont deux valeurs aléatoires. Le paramètre ω est appelé le poids d'inertie, il permet d'équilibrer l'exploration et l'exploitation

d'une manière générale. Ce coefficient permet de contrôler l'influence de vitesse V_i actuelle sur celle de la prochaine itération. Le coefficient ω est suit une variation linéaire selon l'équation suivante :

$$\omega = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min})\left(\frac{k}{k_{max}}\right) \quad (III.27)$$

Où, ω_{max} et ω_{min} sont les valeurs de poids d'inertie maximum et minimum, respectivement. k_{max} est le nombre maximum d'itérations et k représente l'itération actuelle [30].

Algorithme Pseudocode de PSO

Initialiser population

Pour t=1 : Génération maximale

Pour i=1 : Nombre de population

Si $f(x_{i,d}(t)) < f(p_i(t))$ puis $p_i(t) = X_{i,d}(t)$

$f(p_g(t)) = \min(f(p_t(t)))$

Fin

Pour d=1 : dimension

$V_{i,d}(t+1) = W V_{i,d}(t) + C1r1(p_i - X_{i,d}(t)) + C2r2(p_g - X_{i,d}(t))$

$X_{i,d}(t+1) = X_{i,d}(t) + V_{i,d}(t+1)$

Si $V_{i,d}(t+1) > Vmax$ ensuite $V_{i,d}(t+1) = Vmax$

Si non si $V_{i,d}(t+1) < Vmin$ ensuite $V_{i,d}(t+1) = Vmin$

Fin

Si $X_{i,d}(t+1) > Xmax$ ensuite $X_{i,d}(t+1) = Xmax$

Si non si $X_{i,d}(t+1) < Xmin$ ensuite $X_{i,d}(t+1) = Xmin$

Fin

Fin

Fin

Fin

Les chercheurs ont proposé de nombreux algorithmes PSO, en éditant les paramètres de (ω , $c1$, $c2$ et r) pour atteindre ses fonctions et performances optimales. C'est pourquoi nous avons proposés dans le premier travail (l'intégration optimale des unités PVDG dans les réseaux de distribution électrique) des algorithmes PSO améliorés basés sur des cartes chaotiques (Chaotic Maps) modifiés et des coefficients d'accélération (accélération coefficients) adaptatifs [30].

4. Systèmes d'essai, comparaison et résultats d'analyse :

4.1 Les systèmes à tester :

Pour évaluer la performance de l'algorithme PSO, plusieurs réseaux de test standards ont été utilisés, notamment les réseaux de bus IEEE 33 et IEEE 69, représentés à la Figure (3.8) Dans le domaine des systèmes électriques, ces réseaux de test sont fréquemment utilisés pour tester et comparer les algorithmes d'optimisation.

Le réseau de bus IEEE 33 est composé de 33 bus et 32 branches et a une charge totale de 3715,00 kW et 2300,00 kVar. Le système de bus IEEE 69, en revanche, se compose de 69 bus et 68 branches, avec une charge totale de 3790,00 kW et 2690.00 kVar.

La tension par défaut définie pour les deux réseaux de test est de 12,66 kV, ce qui se trouve être le niveau de tension standard pour les réseaux de distribution d'énergie. Tant que le réseau de base est modélisé avec une charge de puissance fixe il est nécessaire de simuler la variation de charge à plusieurs reprises afin d'étudier la fluctuation de la charge sur une période de 24 heures. L'efficacité de l'algorithme pour résoudre le problème de flux de puissance optimal doit être déterminée à l'aide de ces réseaux de test standard. Trouver le meilleur point de fonctionnement pour un système d'alimentation en optimisant la distribution de la production et de la charge tout en respectant de multiples contraintes, y compris l'équilibre de puissance Les limites de tension et le fonctionnement de l'équipement sont l'objectif du problème de flux de puissance optimal. Plusieurs mesures de performance ont été utilisées pour évaluer l'efficacité des algorithmes. Les résultats de ces évaluations pourraient fournir des informations utiles sur les faiblesses et les forces de l'algorithme, en aidant les chercheurs et les praticiens à choisir la meilleure technique pour un problème particulier [31].

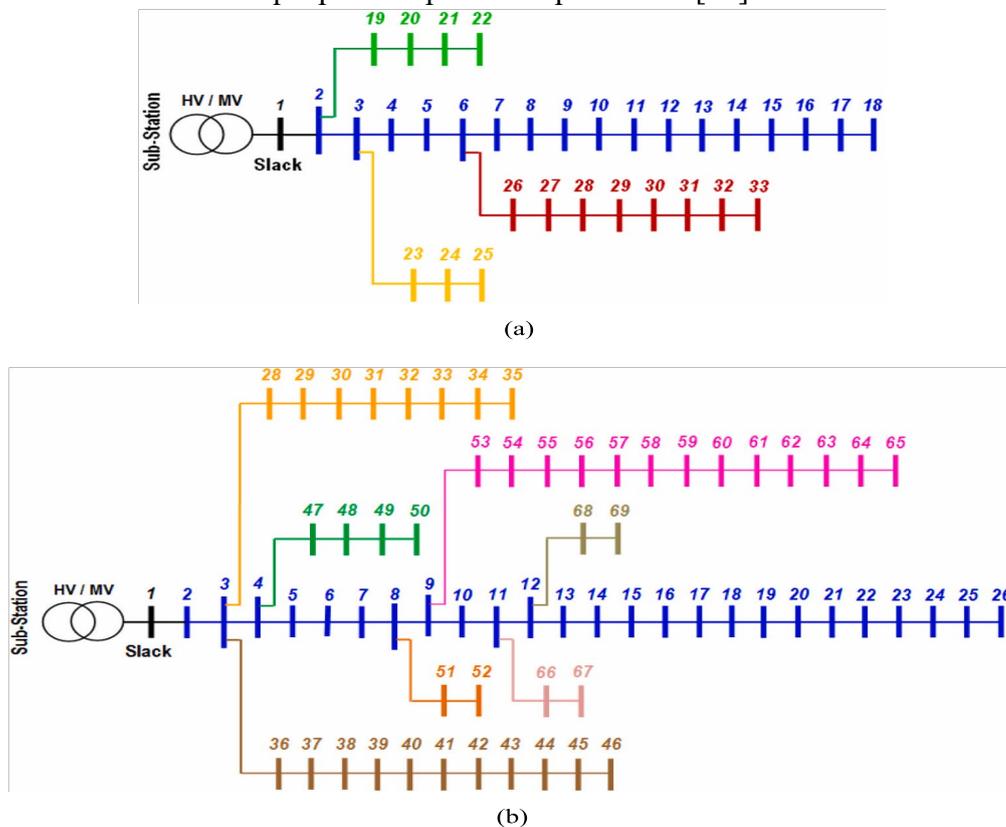


Figure 3.7 : Schéma des réseaux de distribution électrique évalués : (a). IEEE 33-bus, (b). IEEE 69-bus [31].

5. Évaluation des fonctions multi-objectifs :

5.1 Les fonctions multi-objectifs :

Ici, une fonction multi-objectifs (MOF) a été développée pour déterminer efficacement le dimensionnement optimal et le placement des unités de production décentralisée photovoltaïque (PVDG) et de distribution statique synchrone (DSTATCOM) dans les systèmes de distribution électrique (EDS) étudiés. Le MOF est conçu pour minimiser simultanément les paramètres technico-économiques de la perte de puissance active totale (TAPL), de l'écart de tension totale (TVD)[32] :

$$MOF = \text{Minimiser} [(\sum_{i=1}^{N_{Bus}} \sum_{j=2}^{N_{Bus}} TAPL_{i,j} + \sum_{j=2}^{N_{Bus}} TVD_j)] \quad (III.28)$$

Les deux paramètres que nous avons étudiés dans cette thèse sont : la perte de puissance active totale (TAPL) et l'écart de tension totale (TVD).

Le premier paramètre est le TAPL :

$$TAPL_{ij} = \sum_{i=1}^{N_{bus}} \sum_{j=2}^{N_{bus}} APL_{i,j} \quad (III.29)$$

$$APL_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j) (Q_i * P_j + P_i * Q_j) \quad (III.30)$$

Le deuxième paramètre c'est le TVD , il est exprimé comme ci-dessous :

$$TVD_j = \sum_{j=2}^{N_{bus}} |1 - V_j| \quad (III.31)$$

5.2 Contraintes de qualité :

Les équilibres de puissance actifs/réactifs du système de puissance évalué sont représentés par Eq (III.32) et (III.33) comme des contraintes d'égalité. Toute la puissance active/réactive fournie par la sous-station, en plus de celles générées par les dispositifs PVDG-DSTATCOM, équivalent à la demande de puissance active/réactive requise et aux pertes de puissance active/réactive [33].

$$P_{Sous-station} + P_{PVDG} = P_{charge} + APL \quad (III.32)$$

$$Q_{Sous-Station} + Q_{DSTATCOM} = Q_{charge} + RPL \quad (III.33)$$

5.3 Contraintes d'inégalité :

La tension au bus i reste inchangée entre les limites supérieure et inférieure, comme le montre l'équation (III.34) et (III.35) , l'écart de tension entre la tension prévue aux bus de charge (1.0) et la tension V_j est maintenue en dessous de la tension maximale autorisée V_{max} . L'équation (III.36) reflète la contrainte de sécurité de la ligne de distribution [33].

$$V_{min} \leq |V_i| \leq V_{max} \quad (III.34)$$

$$|1 - V_j| \leq \Delta V_{max} \quad (III.35)$$

$$|S_{ij}| \leq S_{max} \quad (III.36)$$

5.2 Contraintes des unités PVDG et DSTATCOM :

Les contraintes associées aux unités PVDG et DSTATCOM sont présentées comme suit :

- Les limites de capacité des unités PVDG et DSTATCOM sont définies par les équations (III.37) et (III.38) [33]:

$$P_{PVDG}^{min} \leq P_{PVDG} \leq P_{PVDG}^{max} \quad (III.37)$$

$$Q_{DSTATCOM}^{min} \leq Q_{DSTATCOM} \leq Q_{DSTATCOM}^{max} \quad (III.38)$$

- Les équations (III.39) et (III.40) stipulent que la puissance active/réactive injectée doit être inférieure à la puissance demandée par la charge [33] :

$$\sum_{i=1}^{N_{PVDG}} P_{PVDG,i} \leq \sum_{i=1}^{N_{bus}} P_{charge,i} \quad (III.39)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{DSTATCOM}} Q_{DSTATCOM,i} \leq \sum_{i=1}^{N_{bus}} P_{charge,i} \quad (III.40)$$

- Les équations (III.41) et (III.42) précisent que les positions des unités PVDG et DSTATCOM ne sont autorisées qu'à partir du bus numéro 2, le bus 1 étant considéré comme le slack-bus [33] :

$$2 \leq PVDG_{position} \leq N_{bus} \quad (III.41)$$

$$2 \leq DSTATCOM_{position} \leq N_{bus} \quad (III.42)$$

- Le nombre de dispositifs PVDG et DSTATCOM intégrés est limité à trois, conformément aux équations (III.43) et (III.44) [33] :

$$N_{PVDG} \leq N_{PVDG.MAX} \quad (III.43)$$

$$N_{DSTATCOM} \leq N_{DSTATCOM.MAX} \quad (III.44)$$

- Les équations (III.45) et (III.46) spécifient qu'un seul dispositif PVDG ou DSTATCOM est autorisé par emplacement [33] :

$$n_{PVDG,i} | emplacement \leq 1 \quad (III.45)$$

$$n_{DSTATCOM,i} | emplacement \leq 1 \quad (III.46)$$

6. Les résultats obtenus :

Les résultats suivants ont été obtenus pour l'algorithme PSO qui est appliqué sur deux systèmes de test standard RDS pour minimiser le MOF avec le nombre maximum d'itérations de 150, Cette étude contient trois cas :

- Cas 1 : RDS sans PVDG ou DSTATCOM .
- Cas 2 : RDS avec PVDG seulement.
- Cas 3: RDS avec PVDG hybride et DSTATCOM

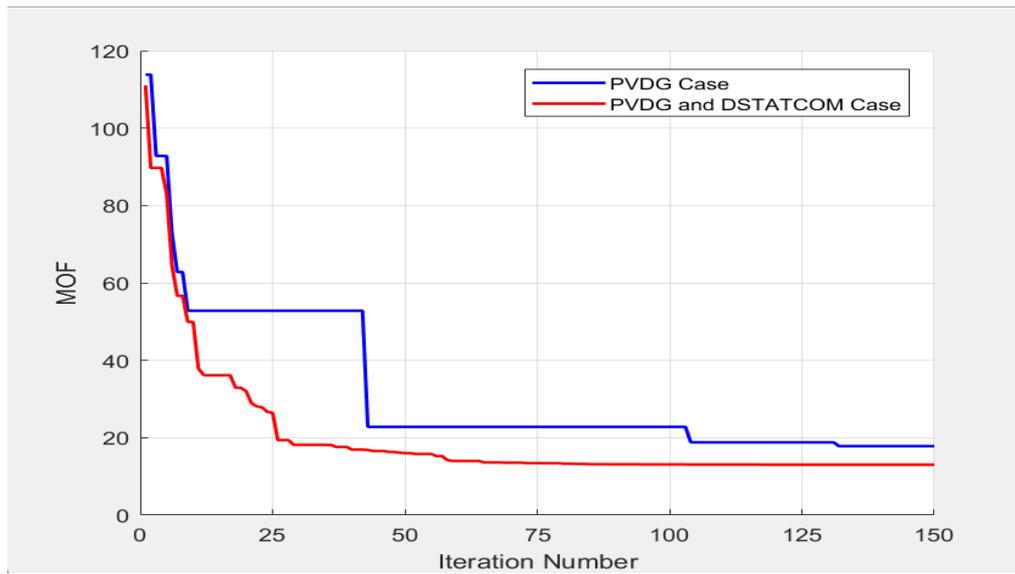


Figure 3.8 : Courbes de convergence pour PV-DSTATCOM dans le réseau IEEE 33-bus.

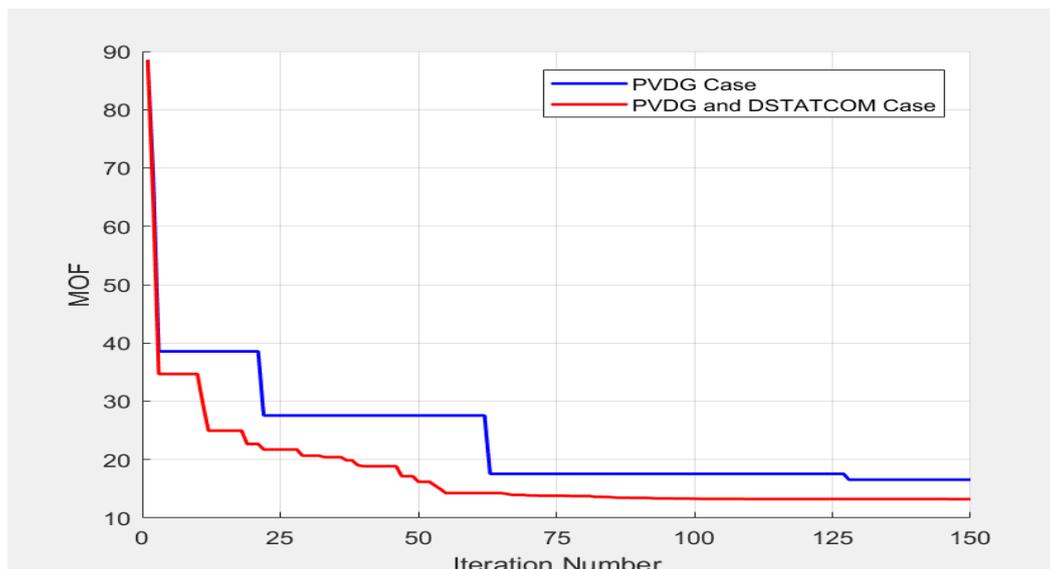


Figure 3.9 : Courbes de convergence pour PV-DSTATCOM dans le réseau IEEE 69-bus.

Pour clarifier l'efficacité et la robustesse de l'algorithme PSO dans l'atteinte de la solution optimale pour le problème formulé précédemment, nous avons implémenté et illustré ses caractéristiques de convergence dans les Figures précédentes (3.8 et 3.9) pour les deux systèmes de test standards SDR. Après analyse et comparaison des résultats obtenus, il est notable que l'algorithme PSO a démontré une grande efficacité en fournissant des résultats appropriés pour la minimisation des MOF.

Par conséquent, la PSO est une approche qui a fourni la valeur minimale du MOF pour l'allocation optimale des unités hybrides PVDG et DSTATCOM dans les deux systèmes de test de normes RDS. Pour les deux RDS IEEE 33 et IEEE 69, la PSO a minimisé le MOF et converge moins de 150 itérations lors de la recherche de la solution optimale.

Les tableaux 3.1 et 3.2 présentent les paramètres techniques optimisés ainsi que l'allocation optimale des unités PVDG dans les deux systèmes de test standard RDS respectivement, lors de l'application de la méthode PSO. Ces tableaux révèlent l'efficacité de cet algorithme à fournir de bons résultats pour les deux systèmes de test SDR. En comparant les résultats, il est évident que les unités PVDG ont été réparties de manière optimale dans les deux SDR. De plus, la méthode PSO a montré une grande efficacité en minimisant la plupart des paramètres pour les deux systèmes de test.

Pour le RDS 33 bus IEEE, la méthode PSO a réduit le TAPL à 89.404 kW et le TVD à 0.916 p.u. pour les unités PVDG. Pour le RDS 69 bus IEEE, la technique PSO a également réduit le TAPL à 70.668 kW et le TVD à 1.020 p.u.

Tableau 3.1 : Résultats optimaux du cas du PVDG pour le SDR IEEE 33-bus.

Applied Algorithms	P_{PVDG} in MW, (Bus)	TAPL (kW)	TVD (p.u)
Basic Case (Before installation)		210.987	1.812
PSO	1.7808(23) 0.5784(13) 1.8608(27)	89.404	0.916

Tableau 3.2 : Résultats optimaux du cas du PVDG pour le SDR IEEE 69-bus.

Applied Algorithms	P_{PVDG} in MW, (Bus)	TAPL (kW)	TVD (p.u)
Basic Case (Before installation)		224.948	1.870
PSO	0.7254(50) 0.6507(15) 1.7960(61)	70.668	1.020

Les tableaux 3.3 et 3.4 représentent les résultats optimaux obtenus lors l'intégration des unités hybrides PVDG et DSTATCOM dans les deux réseaux de test standard RDS lors l'application de l'algorithme PSO, selon les deux tableaux 3 et 4 il est clair que l'algorithme PSO a montré son efficacité à fournir de bons résultats pour les deux RDS IEEE-33 et IEEE-69. Il est évident que les unités hybrides PVDG et DSTATCOM étaient réparties de manière optimale dans les deux SDR

Le cas des unités hybrides a également réduit les pertes de puissance actives totales de 210,987 kW à 16,973 kW et le TVD de 1.812 p.u à 0.131 p.u pour le bus 33 IEEE en revanche pour le bus 69 IEEE. Les pertes actives ont été réduites de 224,948 kW à 7.212 kW ainsi le TVD de 1.870 p.u à 0.188 p.u

Tableau 3.3 : Résultats optimaux du cas hybride PVDG et DSTACOM pour IEEE 33-bus.

Applied Algorithms	P_{PVDG} in MW, (Bus)	Q_{DSVC} in MVAR, (Bus)	TAPL (kW)	TVD (p.u)
Basic Case (Before installation)			210.987	1.812
PSO	1.6410(3) 0.9872(30) 0.7477(14)	0.3780(13) 1.0109(30) 0.5165(24)	16.973	0.131

Tableau 3.4 : Résultats optimaux du cas hybride PVDG et DSTACOM pour IEEE 69-bus.

Applied Algorithms	P_{PVDG} in MW, (Bus)	Q_{DSVC} in MVar, (Bus)	TAPL (kW)	TVD (p.u)
Basic Case (Before installation)			224.948	1.870
PSO	1.6549(61) 0.4582(17) 0.5370(51)	0.6580(61) 0.5513(66) 0.5566(62)	7.212	0.188

6.1 Paramètre des performances du réseau :

La figure suivante montre la comparaison des profils de tension de bus dans le cas de base, et le reste des cas étudiés lors l'intégration optimale dans les deux systèmes de test SRD sur la base des résultats obtenus par la PSO.

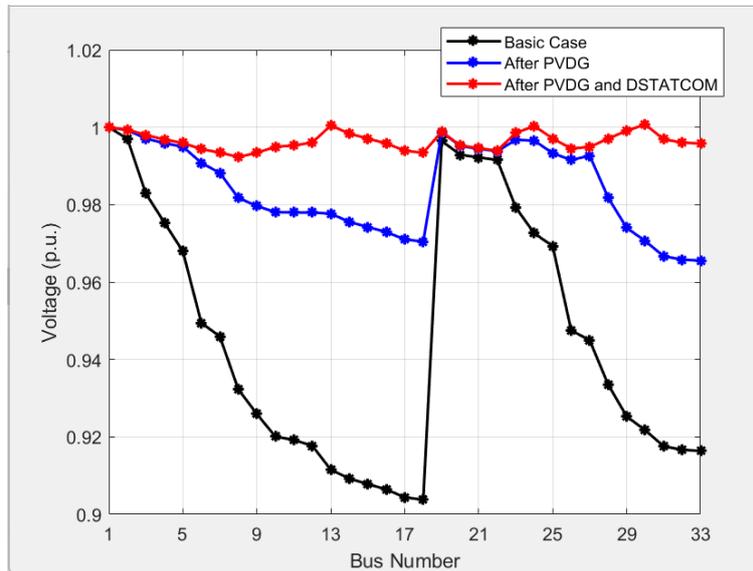


Figure 3.10 : Profils de tension des bus pour IEEE 33-bus.

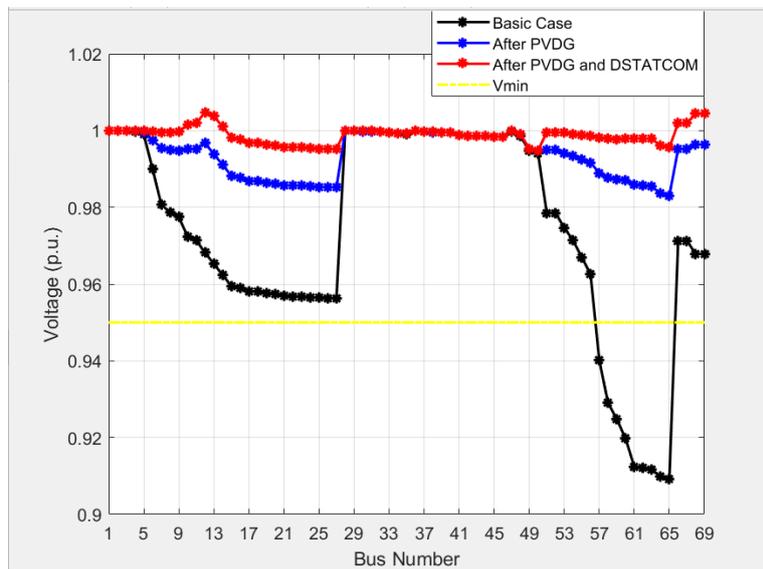


Figure 3.11: Profils de tension des bus pour IEEE 69-bus.

L'influence de l'intégration de toutes les études de cas sur les profils de tension des deux systèmes de test est mentionnée dans les figures 3.10 et 3.11, La tension a été améliorée presque dans chaque bus des deux SRD après l'intégration de tous les cas étudiés.

En outre, on remarque que des résultats supérieurs et une amélioration significative ont été obtenus lors de l'intégration du cas des unités hybrides PVDG et DSVC dans les deux SDR.

Cet impact et cette amélioration étaient liés à la minimisation de la déviation de tension, tant qu'elle indique la valeur de la tension du RDS et combien elle est loin de la valeur de tension nominale de 1 p.u.

Les figures ci-dessous illustrent l'effet de l'intégration optimale de tous les cas étudiés sur la variation des pertes de puissance active dans chaque branche de deux systèmes de test.

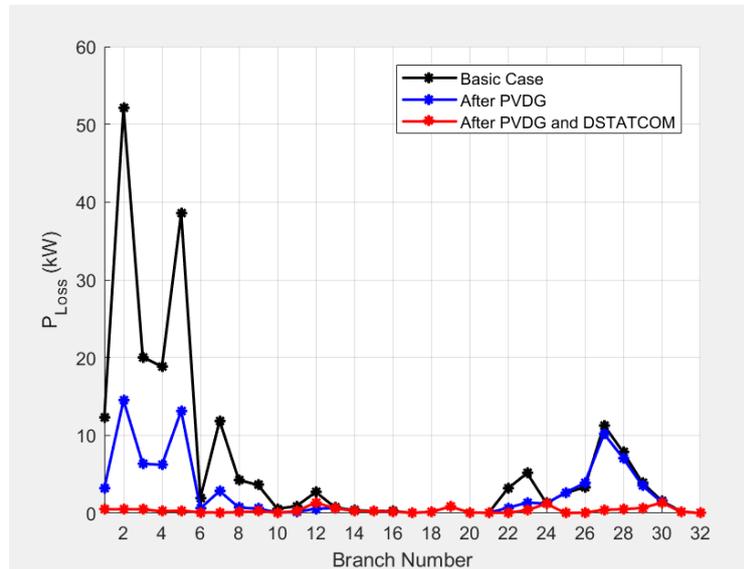


Figure 3.12 : Les pertes de puissance active pour le SDR IEEE 33-bus.

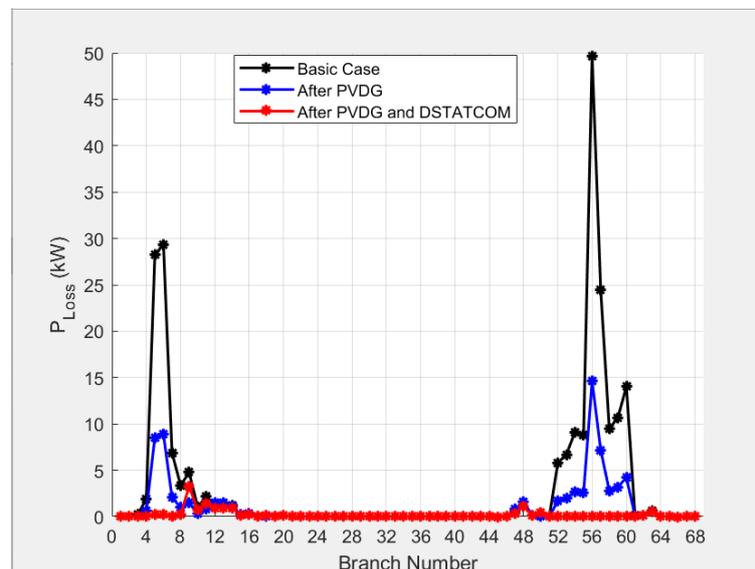


Figure 3.13 : Les pertes de puissance active pour le SDR IEEE 69-bus.

En raison de la structure des deux systèmes de distribution qui est radial, les pertes de puissance active sont élevées dans la plupart de leurs branches, et c'est pourquoi il est important de les réduire pour atteindre de nombreux avantages techniques et économiques. Comme le montre les deux figures précédente (les figures 3.12 et 3.13), l'intégration de tous les cas étudiés dans les deux systèmes de test RDS, a contribué de manière excellente à réduire les pertes de puissance active presque dans chaque branche des deux RDS.

Le cas des unités hybrides PVDG et DSTATCOM a fourni les meilleurs résultats de cette minimisation dans chaque branche des deux SRD s'il fournit des puissances actives et réactives. L'intégration des unités hybrides PVDG et DSTATCOM a également réduit les pertes de puissance actives totales de 210,987 kW à 16,973 kW pour le bus 33 IEEE et de 224,948 kW à 7.212 kW pour le bus 69 IEEE.

7. Conclusion :

Afin de conclure, ce chapitre évalue l'efficacité et la performance des algorithmes d'optimisation méta-heuristique récents, en particulier l'algorithme PSO, pour résoudre le problème de l'allocation optimale dans divers cas étudiés des systèmes de test IEEE. L'objectif est de minimiser les fonctions multi-objectives basées sur des paramètres techniques et économiques. Les résultats montrent que la technique PSO a été appliquée avec succès pour résoudre le problème formulé, démontrant une bonne robustesse et efficacité. Elle a permis d'atteindre des solutions optimales en fournissant le meilleur emplacement et dimensionnement dans toutes les études de cas, tout en affichant une rapide convergence pour les deux normes SDR.

Le choix optimal ayant donné les meilleurs résultats de minimisation du MOF est celui des unités hybrides PVDG et DSVC, qui a conduit à une réduction significative des pertes de puissance et à une amélioration des profils de tension. Les écarts de tension ont été réduits à 0,131 p.u. pour le premier RDS IEEE-33 et à 0,188 p.u. pour le second RDS IEEE-69. Sur la base de ces résultats, il est recommandé d'intégrer largement les unités hybrides PVDG et DSTATCOM dans les SDR pratiques.

Les travaux futurs se concentreront sur l'allocation et la mise en œuvre optimales d'autres unités, comme les systèmes de stockage d'énergie par batterie, en plus du DSTATCOM. De nouveaux algorithmes d'optimisation seront appliqués en tenant compte des incertitudes de charge et de la variation de sortie des DG pour résoudre un MOF complexe, incluant divers indices technico-économiques, afin d'améliorer encore les systèmes de distribution étudiés.

Conclusion générale

L'intérêt croissant pour le déploiement des générateurs décentralisés (DG) renouvelables, notamment l'éolien et le solaire, nous a poussés à optimiser leur planification et leur intégration dans les réseaux de distribution électrique. Dans ce travail, nous avons étudié l'intégration optimale des DG renouvelables conformément à la norme IEEE. Nous avons utilisé l'algorithme méta-heuristique PSO pour optimiser des fonctions multi-objectifs basées sur divers paramètres techniques et économiques.

Nos études ont abouti à des solutions permettant d'identifier les emplacements et les tailles optimaux pour l'intégration des sources d'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution. Nous avons optimisé les paramètres techniques tels que les pertes de puissance et les profils de tension, tout en prenant en compte les coûts d'investissement et de fonctionnement des sources d'énergie comme paramètres économiques.

Nous avons commencé par un rappel sur la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique. Ensuite, nous avons abordé le problème de l'écoulement de puissance et ses méthodes de calcul, avec un intérêt particulier pour la méthode de Newton-Raphson. Nous avons aussi traité le problème de l'écoulement optimal de puissance en utilisant des méthodes méta-heuristiques, notamment la méthode d'optimisation par essais particuliers (PSO).

L'étude a consisté à déterminer les emplacements et les tailles optimales des sources d'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution électrique, selon les normes IEEE 33-JB et IEEE 69-JB. Les simulations ont été divisées en deux parties. La première partie portait sur l'intégration du PVDG dans un réseau conforme à la norme IEEE en utilisant la méthode PSO, qui a permis de minimiser les pertes réactives et les fluctuations de tension. La deuxième partie traitait de l'intégration des unités hybrides PVDG et DSTATCOM dans les réseaux IEEE, utilisant toujours l'algorithme PSO, et a montré une réduction significative des pertes actives et des fluctuations de tension.

Nous avons conclu que l'intégration optimale d'une unité hybride PVDG et DSTATCOM, en utilisant la méthode PSO, a permis de minimiser le TAPL de 210,987 kW à 16,973 kW et le TVD de 1.812 p.u à 0.131 p.u pour le bus 33 IEEE. Pour le bus 69 IEEE, les pertes actives ont été réduites de 224,948 kW à 7.212 kW et le TVD de 1.870 p.u à 0.188 p.u.

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'importance des méthodes d'optimisation méta-heuristiques pour intégrer des sources d'énergies renouvelables à différents emplacements du réseau, améliorant ainsi les performances globales, la fiabilité et la continuité du service. L'intégration de l'énergie photovoltaïque (PV) dans un réseau de distribution a offert de nombreux avantages. En produisant de l'électricité à proximité des points de consommation, les systèmes PV ont réduit les pertes de puissance active et réactive, améliorant les profils de tension. Cette production locale a allégé la charge sur les transformateurs et les lignes de transmission, prolongeant leur durée de vie et réduisant les besoins en investissements supplémentaires. Les systèmes PV, modulaires, ont été ajoutés progressivement, offrant une flexibilité précieuse pour s'adapter aux variations de la demande énergétique. Ils ont aussi contribué à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et ont diversifié les sources de production, augmentant la résilience du réseau.

L'intégration des systèmes photovoltaïques a également présenté des avantages économiques, notamment la création d'emplois dans l'installation et la maintenance des panneaux solaires, et des économies à long terme sur les coûts énergétiques pour les consommateurs. En résumé, l'intégration de l'énergie photovoltaïque a amélioré la fiabilité, la stabilité, l'efficacité et la durabilité environnementale du réseau de distribution électrique. Il est crucial d'investir dans les énergies renouvelables pour développer des installations hybrides, notamment l'énergie solaire, surtout compte tenu de l'étendue du désert algérien, ce qui peut être rentable financièrement à long terme et contribuer au développement du marché de l'électricité en Algérie.

Références

- [1] www.aurel-automobile.fr/fr/les-energies-fossiles---definition--avantages-inconvenients---, consulté le 02/02/2024.
- [2] B. Robyns, P. Bastard, "Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques", *La revue 3EI n°39*, Décembre 2004.
- [3] M.E.CHELBI, «étude énergétique d'une centrale thermique à vapeur», mémoire de Master, université de Annaba, 2016
- [4] A, Daghboudj S, "Etude numérique du vrillage des aubes d'une turbine à Vapeur axiale", *Mémoire Master, Université Larbi Tébessi, Tébessa*, 2011.
- [5] Ian Graham (2000), "Les énergies en questions, l'énergie hydraulique", Bonneuil-les-Eaux [France] Gamma ; Montréal : École active, c2000, 48p..
- [6] www.energieeolienne.fr Consulté le 06/02/2024.
- [7]www.geo.fr/environnement/quest-ce-quune-centrale-solaire-et-comment-ca-marche-213387. Consulté le 06/02/2024.
- [8] www.edf.fr .Consulté le 07/02/2024
- [9] www.greenwatt.fr.Consulté le 08/02/2024.
- [10] www.elearning.univ-bejaia.dz Consulté le 08/02/2024.
- [11] www.se.com/dz/fr/ « Les architectures de réseaux ».
- [12] DR L.Boufenneche, « réseaux électriques » ,Cours réseau électrique, université des frères Mentouri, Costantine 2016
- [13] Merlin Gerin,« Protection des réseaux électriques », *PozzoGrosMonti* ,Italie 2003
- [14] www.SchneiderElectric.com , «Postes HTA/BT».
- [15] Site de Ministère de l'énergie et des Mines/ Le Ministre/Energie/Electricité et Gaz/Distribution de l'électricité.

- [16] J Duncan Glover, Mulukutla S Sarma, Thomas J Overbye, "Power System Analysis and Design" 5th Edition, 2008, p352.
- [17] Mr. Athmane BOUZIDI, ' Modélisation et simulation des réseaux électriques', *cours Réseaux électrique*.
- [18] Srinivas M.S. Distribution load flows: a brief review Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, vol. 2 (2000), pp. 942-945 vol.2
- [19] Onah, C. O., Agber, J. U., Ufene, F. A." Load Flow Modeling and Performance Analysis of Suleja 132/33 kV Sub-Transmission Station", *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, Volume 16, (Jul. – Aug. 2021), PP 38-48.
- [20] BOUDROUAZ Yacine, 'Méthode de Newton pour le calcul d'écoulement de puissance optimal', *Mémoire de Master, Ecole Nationale Polytechnique Département d'Electrotechnique*, 2015.
- [21] Archita Vijayvargia,' Comparison between Different Load Flow Methodologies by Analyzing Various Bus Systems', *Scientific conference, International Journal of Electrical Engineering*. ISSN 0974-2158 Volume 9, Number 2 (2016), pp. 127-138
- [22] Mr. Bourihane Sami, 'Ecoulement Optimal de puissance dans un réseau électrique', *Mémoire Master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia-Jijel*,2018/1019.
- [23] M.Slimani ,cours de 'Les méthodes d'optimisation des réseaux électriques',ChapitreIII, *Université Ibn Khaldoune de Tiaret*,2016.
- [24] Bastie.P, Thierry.A.S,' L'optimisation via la simulation:Proposition d'une architecture integrent le formalise DEVS'', *conference paper*,2016.
- [25] MANCER Nabil, "Contribution `à l'Amélioration de l'Efficacité de la Sélectivité du Système de Protection des Réseaux Electriques par les Méthodes Meta heuristiques'', *Thèse Doctorat, Génie électrique, Universit'e Mohamed Kheider Biskra*, janvier-2017.
- [26] Mohammed Abidou, 'Optimal power flow using particle swarm optimization', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, October 2002.
- [27] M. Clerc * et P. Siarry **, « Une nouvelle métaheuristique pour l'optimisation difficile : la méthode des essaims particulaires »J3eA - Vol. 3 - 7 (2004).
- [28] N.Belbachir , «Modélisation et Optimisation de l'Intégration d'une Centrale Photovoltaïque au Réseau de Moyenne Tension (MT) » *thèse de doctorat , université Mostaganem*,2020.

- [29] N,Chenine,« commande par Backstepping du DSTATCOM » , mémoire de Master fin d'étude ,université Ouergla,2017.
- [30] <https://www.sciencedirect.com/particle-swarm-optimization-algorithm> , consulté le 15/05/2024.
- [31] N.BELBACHIR , M.Hosny, M.Zellagui et S.Kamel “Optimizing energy management of hybrid wind generation battery energy storage units with long term memory artificial hummingbird algorithm under daily load source uncertainties in...” , Journal of Energy Storage, Février 2024.
- [32] N.BELBACHIR , M.Zellagui , R.A.El-Sehiemy et C.Z.El –Bayeh , “Multi-Objective Optimal Allocation of Hybrid Photovoltaic Distributed Generators and Distribution Static Var Compensators in Radial Distribution Systems Using Various Optimization Algorithms” , Journal of Electrical Systems, Mars 2022.
- [33] N.Belbachir , S.Kamel, Fatma A.Hashim ,JuanYu , H.Zeinoddini-Meymand et ,S.F.Sabbeh “Optimizing Hybrid PVDG and DSTATCOM Integration in Electrical Distribution Systems Based on a Modified Homonuclear Molecules Optimization Algoritm” , Wiley, IET Renewable Power Generation août 2023.