

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

Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de fin d'étude

Sous le thème

Contrôle de la puissance en présence
de la production décentralisée

Master en Electrotechnique

Option : Réseaux Electriques

Energies renouvelables

Réalisé par :

M^{elle} ALLIOUACHE LYDIA

M^{elle} HAMZA DJAHIDA

Encadré par :

M^{me} N. AOUZELLAG

Promotion 2019/2020

Remerciements

Je remercie tout d'abord notre dieu qui nous a donné le courage et la volanté et qui nous a aidé et montré le chemin du savoir.

Je tiens à adresser mon vif remerciement à mon encadreur Mme N.AOUZELLAG Pour son aide, ses conseils et sa confiance.

Je remercie également les enseignantes et les enseignants de département de génie électrique de Bejaïa.

Je remercie enfin, tous ceux qui ont contribué, de près et de loin, à la réalisation de ce mémoire.



*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,
L'amour, le respect, la reconnaissance...
Aussi, c'est tout simplement que*

Je dédie ce mémoire

À MES CHÈRES PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

À MES CHÈRES ET ADORABLE FRÈRES ET SŒURS

Hafida , Moumen, Louhab , Mourad, Farhat , que j'aime profondément.

À L'ÉPOUX DE MA SŒUR, A MES CHÈRES COUSINS et COUSINES

À MES AMIS DE TOUJOURS : Yasmin, Bina, Nacima, Celia, Zoulikha, Sara, Lydia, Lynda, Sadjia, Wissam , Faryel, Juba et tous mes collègues de l'option énergie renouvelable...

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.



Djahida

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,
L'amour, le respect, la reconnaissance...
Aussi, c'est tout simplement que*

Je dédie ce mémoire

À MES CHÈRES PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

À MES CHÈRES ET ADORABLE SŒURS

Massilia, Karima, ma petit sœur Nawel , que j'aime profondément.

À MES CHÈRES COUSINS et COUSINES

À MES AMIS DE TOUJOURS : Yasmîn, Bina, Nacima, Celia, Zoulikha, Sara, Lydia, Radia, Ryma, Wissam, Siham, Juba, et surtout mon très chère amie Fatah et tous mes collègues de l'option Réseaux Electrique...

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.



Lydia

Liste des figures

Fig.I.1 : Schéma d'un réseau électrique.....	4
Fig.I.2 : Structure générale d'un réseau électrique	9
Fig.I.3 : Structure maillée d'un réseau de transport électrique	10
Fig.I.4 : Schéma simplifié d'un réseau bouclé.....	11
Fig.I.5 : Réseau de distribution à configuration radiale.....	11
Fig.I.6 : Schéma d'un réseau arborescent.....	12
Fig. I.7 : Réaction de groupe lors d'une variation de fréquence	12
Fig. I.8 : Réglage hiérarchisé de tension	13
Fig.I.9 : Principe de fonctionnement de la pile à combustible et son utilisation de l'hydrogène	16
Fig.I.10 : Production de l'électricité à partir de la technique cogénération	17
Fig. I.11 : Production d'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque	18
Fig. I.12 : Production d'électricité à partir de l'énergie solaire thermique.....	19
Fig. I.13 : Principe de fonctionnement d'une énergie hydraulique.....	20
Fig. I.14 : Principe de la conversion d'énergie éolienne.....	21
Fig. I.15 : Production d'électricité à partir de l'énergie géothermique	21
Fig. II.1 : Réseaux de distributions avec PD et sans PD.....	28
Fig. II.2 : Evolution de la fréquence lors du black-out Italien	30
Fig. II.3 : Creux de tension.....	31
Fig. II.4 : Séparation du réseau de transport en plusieurs sous – réseaux	33
Fig. II.5 : Exemple de cellules de réseau de distribution	33
Fig. II.6 : Schéma d'un STATCOM	34
Fig. II.7 : Schéma d'un SVC	35
Fig. II.8 : Schéma de base d'un TCSC	35
Fig.II.9 : Schéma d'un UPFC	36
Fig. II.10 : Schéma de base d'un TCPAR.....	37
Fig. II.11 : Fonctionnement d'une installation de stockage gravitaire	38

Fig. II.12 : Schémas de principe d'une installation de stockage air comprimé	39
Fig. II.13 : Schéma d'une batterie à circulation.....	39
Fig. II.14 : Schémas d'une installation de stockage thermique	40
Fig.III.1 : Topologie du réseau électrique étudié	43
Tab.III.1 : Données des lignes	43
Tab.III.2 : Données aux jeux de barres	44
Fig. III.2 : Puissances délivrées par les générateurs et la PD	45
Fig. III.3 : Tensions aux niveaux des jeux de barres	46
Fig.III.4 : Puissances actives transportées par les lignes reliées au JB Darguina.....	47
Fig.III.5 : Puissances actives transportées par les lignes non reliées au JB Darguina.....	48
Fig.III.6 : Puissances réactives transportées par les lignes reliées au JB Darguina	49
Fig.III.7 : Puissances réactives transportées par les lignes non reliées au JB Darguina	50
Fig.III.8 : Pertes actives dans les lignes reliées au JB Darguina	51
Fig.III.9 : Pertes actives dans les lignes non reliées au JB Darguina	52
Fig.III.10 : Pertes totales pour les différents cas étudiés	55
Fig.III.11 : Variation du taux d'intégration.....	55

Liste d'abréviation et symbole

KWh: Kilo Watt heure

KV: Kilo Volt

MW: Méga Watt

V: Volt

KVA: Kilo Volt Ampère

Km²: Kilo mètre carré

HT : Haute Tension

MT : Moyenne Tension

BT : Basse Tension

THT: Très Haute Tension

TBT : Très Basse Tension

BTA: Basse tension niveau B

HTB: Haute tension niveau B

HTA: Haute tension niveau A

PD : Production décentralisée

JB : jeu de barre

P : Puissance active au nœud considéré de la ligne électrique

ΔP : Variation de puissance du groupe

P₀ : Puissance active délivré par le poste source

f : Fréquence du réseau (Mesuré) Hz

f₀: Fréquence du réseau (Référence) Hz

Δf : Variation de la fréquence du réseau

IPC : Interline Power Controller

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

FACTS : Flexible alternatif curant transmission systems (Systèmes de transmissions flexibles des courants alternatifs)

Liste d'abréviation et symbole

STATCOM: Static Synchronous Compensator (Compensateur statique)

UPFC: Unified Power Flow Controller

TCPAR: Thyristor Controlled Phase Angle Regulator

SVC : Static Var Compensator (Compensateur statique de puissance réactive)

SSSC: Static Synchronous Series Compensator

TCSC : Thyristor controlled series compensator (compensateur série contrôlée par thyristors)



Remerciement

Dédicaces

Liste des figures

Liste des abréviations et symboles

Introduction générale..... 1

CHAPITRE I

I.1. Introduction..... 3

I.2. Généralités sur les réseaux électriques 3

I.2.1. Description d'un réseau électrique..... 5

I.2.2. Structure générale des réseaux électriques 6

I.2.2.1. Production..... 7

I.2.2.2. Transport 7

I.2.2.3. Répartition 8

I.2.2.4. Distribution 8

I.2.3. Topologies des réseaux électriques..... 10

I.2.3.1. Réseaux maillés..... 10

I.2.3.2. Réseaux bouclés 11

I.2.3.3. Réseaux radiaux 11

I.2.3.4. Réseaux arborescents 12

I.2.4. Service système..... 12

I.2.4.1. Réglage de la fréquence 12

I.2.4.2. Réglage de la tension 13

I.3. Production d'énergie décentralisée 14

I.3.1. Caractéristiques de Production Décentralisée 15
I.3.2. Différentes technologies de la production décentralisée 15
 I.3.2.1. Energies primaires fossiles (Les énergies non renouvelables)..... 15
 I.3.2.2. Energies renouvelables 17
I.4. Conclusion 22

CHAPITRE II

II.1. Introduction 23
II.2. Problèmes de congestion dans les réseaux électriques..... 23
 II.2.1. Influence de la congestion sur le réseau de transport 23
 II.2.2. Solutions pour traiter la congestion..... 24
II.3. Impacts de l'intégration des ressources renouvelables au réseau électrique..... 24
 II.3.1. Impacts de la production décentralisée sur le réseau de transport 25
 II.3.2. Impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution 27
II.4. Moyens et solutions utilisés pour atténuer la congestion dans les réseaux ainsi pour le contrôle de la puissance 32
 II.4.1. Ilotage 32
 II.4.2. Dispositifs FACTS..... 34
 II.4.3. Stockage d'énergie électrique..... 37
II.5. CONCLUSION..... 40

CHAPITRE III

III.1. Introduction 42
III.2. Réseau de transport et d'interconnexion étudié 42
 III.2.1. Données du réseau étudié 43
 III.2.2. Résultats de simulation 44
III.3. Conclusion 56
Conclusion générale 57

Bibliographie

ANNEXES



**INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction générale

Le secteur électrique est en pleine mutation et dans de nombreux pays un vaste mouvement de dérégulation des marchés électriques apparaît, les causes et les buts sont très variés, l'une des conséquences est la connexion de nombreux moyens de production. Ces derniers sont très diversifiés (ferme éolienne, centrale de cogénération, capteurs photovoltaïques, etc.) [1]. L'introduction de ces productions au sein des réseaux n'est pas sans impact notable sur ceux-ci (modification du sens de transit des puissances, congestion des lignes, modification du plan de tension, etc.). Il faut alors dans un premier temps lister ces impacts et les hiérarchiser pour identifier ceux qui sont critiques ou susceptibles de le devenir. A cette fin, une méthodologie d'étude rigoureuse et systématique doit être mise en place [2]. Ce n'est alors que dans un second temps que le ou les impacts critiques doivent être analysés pour une meilleure gestion du plan de tension et des transits de puissances.

Une grande part de la consommation énergétique algérienne est dédiée à la production d'électricité. L'abondance des réserves de gaz et leur faible coût d'exploitation expliquent que celui-ci soit économiquement avantageux et arrive en tête dans les ressources exploitées pour la production d'électricité. Le gaz naturel avec la turbine à gaz à cycle combiné est la principale technologie de production d'électricité mise en service. Cependant, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement est nécessaire. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

On observe ces dernières années une croissance d'implantation des systèmes de production d'électricité photovoltaïque en Algérie. Néanmoins, cette intégration a été limitée à la région sud du pays vu la disponibilité de la source primaire le long de l'année, alors que dans la région Nord-Est, particulièrement la ville de Béjaïa qui est entourée de montagnes, constitue un facteur qui favorise le développement de la production à base de l'éolien.

L'intérêt porté sur la production de l'énergie à base de ressources renouvelables est évidemment lié à de nombreux avantages. Parmi ceux-ci, le respect de l'environnement, la gratuité de la source primaire, et le fait qu'elle soit inépuisable. Face à cette pénétration massive de cette production, il est impérativement nécessaire d'étudier l'évolution des réseaux sur le plan de tension et les flux de puissances ainsi que sur les sources de productions classiques afin de garantir la bonne gestion de l'énergie.

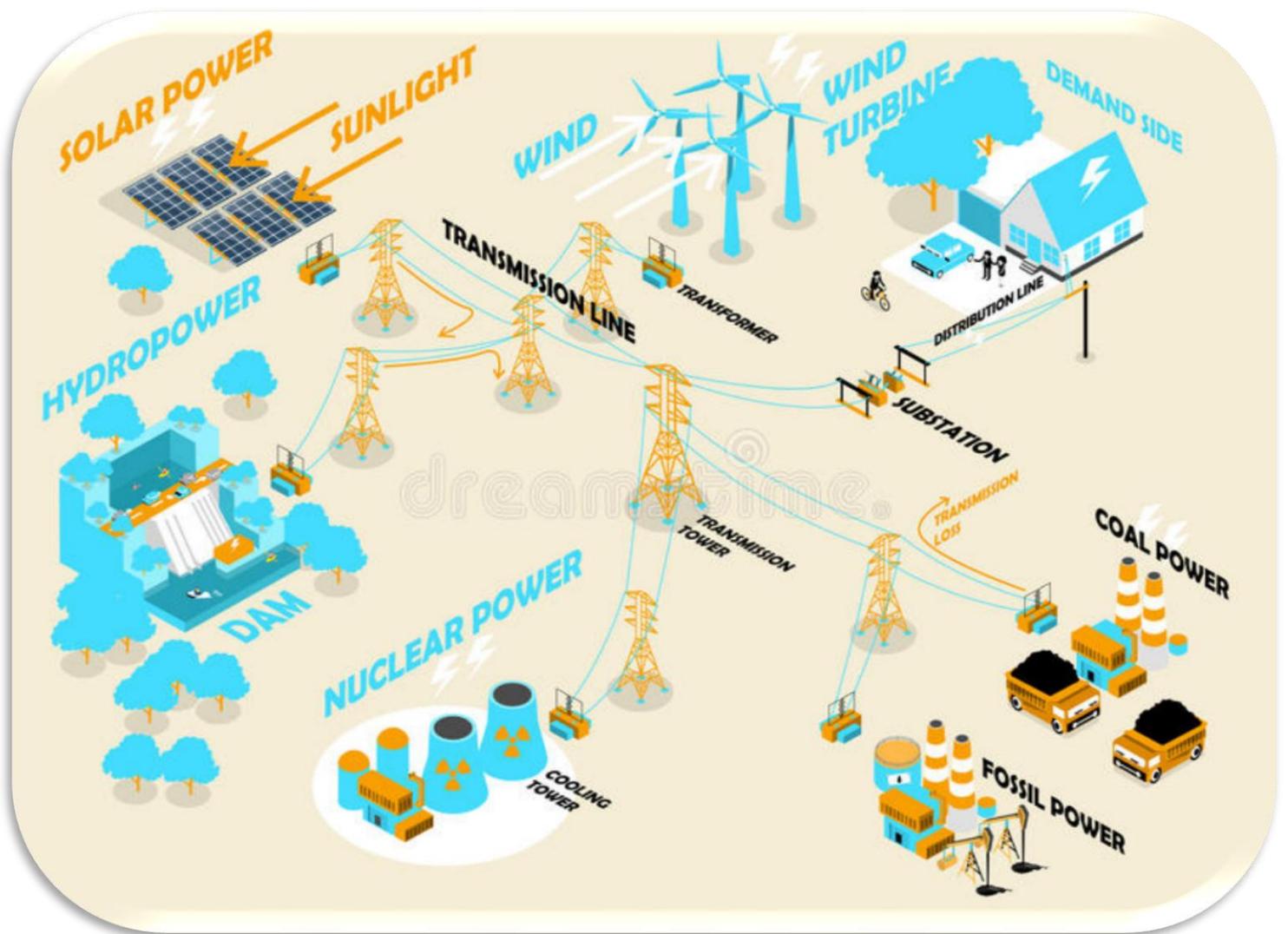
Afin de répondre aux objectifs cités ci-dessus, ce mémoire est organisé en trois chapitres de la manière suivante :

Le premier chapitre, donne une vision globale des concepts classiques de réseau électrique en développant ses différentes architectures et des productions décentralisées en citant ses différentes technologies.

Le deuxième, nous traiterons les problèmes de la congestion dans le réseau électrique et leur influence sur le réseau de transport et les différents impacts d'intégration de la production décentralisée sur les réseaux de transport et de distribution.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous présenterons et discuterons les résultats de simulation obtenus à partir d'un programme en langage MATLAB. Celui-ci nous permettra d'évaluer les différents paramètres d'un réseau de transport et d'interconnexion Algérien pour trois cas d'étude : réseau à l'état initial, réseau avec insertion de la production décentralisée et modification des paramètres du réseau sans et avec la présence de cette dernière.

CHAPITRE I



Chapitre I : Etat de l'art sur les réseaux électriques et les productions décentralisées

I.1. Introduction

L'énergie électrique, dans le monde entier, est devenu un bien de consommation nécessaire tant pour la vie quotidienne que pour l'économie des pays, et les moindres problèmes d'origine électrique influent considérablement sur la continuité des activités économiques. Donc la possession des réseaux électriques fiables et économiques fonctionnant convenablement et assurant une continuité du service et une bonne qualité d'énergie est devenue primordiale afin de contribuer positivement au développement de nos sociétés modernes .

En effet, le réseau électrique qui constitue le vecteur de transit de l'énergie électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production (type conventionnels ou renouvelables) jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Donc les réseaux électriques sont traditionnellement exploités d'une manière centralisée. Ainsi, la plus grande partie de la production électrique est centrée autour de centrales à grande capacité de production (centrales hydrauliques, thermiques, nucléaires). Cette production est souvent liée à des emplacements géographiques adéquats (sources d'eau, impératifs techniques, ...). Le « système » électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de lignes, des milliers de postes de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique [1].

Dans ce chapitre, nous allons présenter dans la première partie les différentes structures et architectures du réseau électrique et la seconde partie s'intéressera aux différents types de production décentralisée.

I.2. Généralités sur les réseaux électriques

A. Rôle: Les réseaux électriques sont considérés comme des infrastructures énergétiques hautement critiques pour notre société. Ces réseaux ont pour rôle d'acheminer l'énergie des sites de production vers les lieux de consommation d'électricité tout en garantissant une très grande robustesse et le meilleur rendement possible, avec des étapes de baisse du niveau de tension dans des postes de transformation. Donc Le « système électrique » est l'ensemble des équipements électriques qui assurent la livraison à tous les consommateurs des kWh produits.

De plus, le réseau électrique a pour mission de connecter les centres de production tels que les centrales (hydrauliques, thermiques...etc.) avec les centres de consommation (villes, usines...) [3]. En plus de sa fonction principale d'acheminer l'énergie, le réseau électrique sert de plus en plus comme support de communication. En effet, dans l'objectif de renforcer la robustesse des réseaux et de faciliter leur exploitation, des moyens de communications sont installés et permettent aux gestionnaires de mieux appréhender et exploiter leurs réseaux.

Les réseaux électriques ont aussi pour rôle de garantir un approvisionnement sûr et économique de l'énergie. Il n'est pas possible que ce rôle soit assuré par un type unique de réseau. Une bonne solution consiste à établir une hiérarchie de trois catégories de réseau dont les fonctions sont différentes et qui se distinguent par le niveau de tension de leur ligne ou le niveau de puissance qui transite. Ces fonctions sont les suivantes :

- ▶ L'acheminement de l'énergie des centrales de production aux abords des grands centres de consommation, c'est le rôle du réseau de transport.
- ▶ La répartition de cette énergie en différents points de chacun des centres de consommation de manière à mieux assurer la sécurité de l'alimentation de l'ensemble des consommateurs, c'est le rôle des réseaux de répartitions.
- ▶ L'alimentation directe de chacun des consommateurs à partir du réseau de répartition, c'est le rôle des réseaux de distribution [4].

B. Organisation du réseau électrique : L'énergie électrique est acheminée des centres de production jusqu'aux consommateurs en transitant par différents niveaux de tension. En sortie des centrales de production, des lignes à haut niveau de tension permettent de transporter des puissances importantes sur des longues distances, puis des lignes aux niveaux de tension de plus en plus bas acheminent l'énergie jusqu'aux points de consommation finaux.

En effet, la tension à la sortie des grandes centrales est portée à 400 kV pour limiter les pertes d'énergies sous forme de chaleur dans les câbles des lignes électriques de transport [5]. La majorité des pertes sur le réseau sont des pertes par effet Joule dues à la résistivité des conducteurs. Ensuite, la tension est progressivement réduite au plus près de la consommation, pour arriver aux différents niveaux de tension auxquels sont raccordés les consommateurs (Fig. I.1).

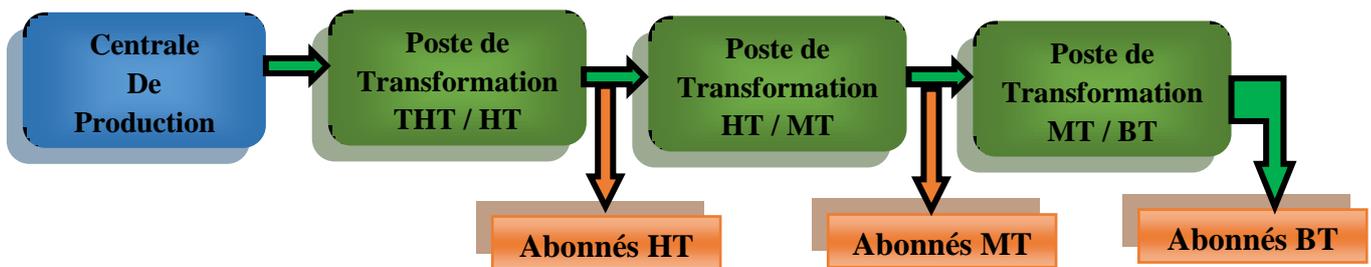


Fig.I.1 : Schéma d'un réseau électrique

C. Niveaux de tension : Le réseau est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques qui permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs. Ces niveaux de tension diffèrent d'un type de réseau à un autre et diffèrent d'un pays ou d'une région à une autre. Mais quel que soit le niveau de tension considéré, les éléments constituant le réseau électrique sont principalement les mêmes. Selon la norme IEC (International Electrotechnical Committee) les niveaux de tension sont définis comme suit :

- THT (Très haute tension) : tensions composées supérieures à 220 kV ;
- HT (Haute tension) : tensions composées comprise entre 33 kV et 220 kV ;
- MT (MV) : (Moyenne tension) : tensions composées comprise entre 1 kV et 33 kV ;
- BT (Basse tension) : tension comprise entre 100 V et 1 kV ;
- TBT (Très basse tension) : inférieure à 100 V [6].

D. Système de transformation : Pour transporter une énergie électrique à grande distance, il est essentiel, sur le plan économique, de minimiser l'énergie gaspillée par effet Joule le long de la ligne de transport, la solution la plus rentable consiste à élever le niveau de tension au départ pour le ramener à une tension plus basse, éventuellement la tension de départ, au point d'utilisation. Les deux opérations de changement de tension sont effectuées par des transformateurs.

I.2.1. Description d'un réseau électrique

Un réseau, c'est d'abord un certain nombre de fonctions et de comportements d'ensemble, qu'il faut définir, mettre en œuvre, maîtriser grâce à une conception et une exploitation convenables. Ce sont ensuite des matériels (lignes, postes, appareillage, parafoudres, etc.) qui, assemblés, forment le réseau physique ; la qualité conditionne très largement celle du réseau, donc celle de la desserte en électricité de ses clients.

De plus, le réseau électrique est essentiellement composé de lignes électriques, câbles exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Ces postes permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Parmi les éléments principale de réseau, on site les composants suivant :

A. Ligne électrique: qui est un ensemble de conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique. La ligne électrique se compose de plusieurs types : lignes de grand transport, lignes d'interconnexion et de répartition et lignes de distribution.

B. Câbles souterrains: qui sont des conducteurs entourés d'une gaine qui assure l'isolation du câble par rapport à son environnement extérieur. Ainsi, son dimensionnement est lié à la puissance transportée et à la capacité linéique des câbles [7].

C. Postes de transformation : c'est une installation d'organes de liaison et d'organes de manœuvre où parvient l'énergie des centrales et d'où cette énergie est orientée vers les centres de consommation. Les postes électriques sont composés de différents appareils électriques : des transformateurs ; des dispositifs de sécurité et des jeux de barre [8]. Les postes électriques ont trois fonctions principales :

- Le raccordement d'un tiers au réseau d'électricité (aussi bien consommateur que producteur type centrale nucléaire).

- L'interconnexion entre les différentes lignes électriques (assurer la répartition de l'électricité entre les différentes lignes issues du poste).
- La transformation de l'énergie en différents niveaux de tension.

D. Appareillages (mesure, surveillance, coupure ...): l'appareillage électrique est un élément qui permet d'obtenir la protection et l'exploitation sûre et ininterrompue d'un réseau électrique. On désigne par appareillage électrique tous les appareils qui servent à réaliser des connexions ou des combinaisons avec d'autres types d'appareils. On retrouve dans cette famille toutes sortes d'éléments comme les appareils de commande, les appareils utilisés pour la protection ou pour le réglage par exemple, et toutes sortes d'accessoires utilisés pour les installations électriques pour particuliers et professionnels. On distingue par exemple tous les éléments qui forment l'appareillage de connexion, comme les contacteurs, les disjoncteurs ou les interrupteurs [9].

De plus l'appareillage électrique permet d'adapter, à chaque instant, la structure du réseau aux besoins de ses utilisateurs, producteurs et consommateurs d'électricité, et de préserver, totalement ou partiellement, cette fonction en cas d'incident. C'est assez dire l'importance du rôle de l'appareillage électrique pour la manœuvre et la protection du réseau.

Les différents éléments qui constituent un appareillage électrique peuvent se trouver à tous les niveaux d'un réseau où il existe des besoins de protection ou de connexion. On peut aussi trouver ce type d'éléments dans les postes électriques. On retrouve alors dans ce type de bâtiments des disjoncteurs qui ont pour rôle d'assurer la protection de tout le système de distribution [9]. Il peut s'agir d'appareils de relais par exemple, ou de divers équipements de mesure et de communication qui permettent de contrôler facilement le poste électrique.

I.2.2. Structure générale des réseaux électriques

L'architecture ou le design du réseau est un facteur clé pour assurer la qualité de l'énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. Cette architecture peut être divisée en deux parties ; D'une part, l'architecture du poste, et de l'autre part l'architecture des réseaux de distribution et du transport. La figure I.2 illustre une vue globale sur la structure générale d'un réseau électrique. On distingue quatre niveaux : production, transport, répartition et distribution.

Les grandes centrales de production d'énergie électrique sont en général basées sur des alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Elles sont connectées sur le réseau de transmission à haute tension. En effet, le but premier d'un réseau d'énergie est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs. Comme l'électricité ne se stocke pas en grande quantité, la production doit s'adapter sans cesse à la consommation, c'est pourquoi l'énergie produite doit être acheminée en temps réel jusqu'aux consommateurs[10].

Une fois sur le réseau de distribution, l'électricité haute tension HTA alimente directement les clients industriels. Pour les autres clients (particuliers, commerçants, artisans...), elle est convertie en basse tension (BT) par des postes de transformation avant d'être livrée. Au final, la qualité de l'alimentation en électricité des utilisateurs du réseau est donc le résultat de la qualité de tout ce parcours.

I.2.2.1. Production

La production d'électricité est essentiellement un secteur industriel, destiné à mettre à disposition de l'ensemble des consommateurs la possibilité d'un approvisionnement adapté à leurs besoins en énergie électrique. La production qui sert à produire l'énergie électrique grâce à des turbo-alternateurs qui transforme l'énergie mécanique des turbines en énergie électrique à partir d'une source primaire (gaz, pétrole, hydraulique...).

Cette production peut être classée suivant le type d'énergie primaire utilisée pour générer de l'électricité. En générale, chaque source de production (centrale électrique) regroupe plusieurs groupes turbo-alternateurs pour assurer la disponibilité pendant les périodes de maintenance. Ils sont connectés sur le réseau de transport via un transformateur de groupe. La gamme de la puissance active produite par ces groupes est comprise entre 100MW pour les centrales thermiques de faibles puissances et 1650MW pour les plus puissantes tranches des centrales nucléaires [11]. Par ailleurs, on trouve dans les pays industrialisés des puissances installées de plus en plus élevées pour répondre à la demande croissante en énergie électrique.

Depuis une dizaine d'années, la production d'énergie électrique n'est plus uniquement centralisée. De plus en plus, des générateurs de faible puissance, exploitant principalement des énergies renouvelables qui représentent une part croissante de la production d'électricité dans le monde, avec des pays leaders. Ces énergies sont souvent produites par des générateurs décentralisés à petite échelle par rapport aux centrales traditionnelles et connectées aux réseaux de distribution au lieu des réseaux de transport. Ce type de production sera développé dans le paragraphe I.3.

I.2.2.2. Transport

Un alternateur produit la puissance électrique sous moyenne tension (12 à 15 kV), et elle est injectée dans le réseau de transport à travers des postes de transformation pour être transmise sous haute ou très haute tension afin de réduire les pertes dans les lignes. Les réseaux de transport sont à haute tension (de 60kV à 400 kV) et ont pour but de transporter l'énergie des grands centres de production vers les régions consommatrices d'électricité sur de grandes distances. Le niveau de la tension de transport varie selon les distances et les puissances transportées, plus les distances sont grandes plus la tension doit être élevée, la même chose pour la puissance, par exemple, le réseau de transport en Algérie utilise une tension de 220 kV, le réseau européen utilise 400 kV, et le réseau nord-américain 735 KV.

La structure de ces réseaux est essentiellement de type aérien. Ces réseaux ont une architecture maillée (paragraphe I.2.3.1), ainsi les productions ne sont pas isolées mais toutes reliées entre elles ou interconnectées, cette structure permet une sûreté de fonctionnement. Cela est fait aussi pour éviter une congestion forte sur une seule branche du réseau. Les réseaux maillés garantissent une très bonne sécurité d'alimentation, car la perte de n'importe quel élément (lignes, transformateur ou groupe de production) n'entraîne aucune coupure d'électricité si l'exploitant du réseau de transport respecte la règle dite du "N-1" (possibilité de perdre n'importe quel élément du réseau sans conséquences inacceptables pour les consommateurs) [12]. L'énergie électrique est exportée à travers des lignes électrique ou lignes de transmission, d'un lieu à un autre. Il existe 2 types principaux de ligne :

- Les lignes aériennes : assurent la majeure partie du transport longue distances.
- Les lignes souterraines : souvent utilisés pour le transport de l'électricité à travers des zones peuplées.

I.2.2.3. Répartition

Les réseaux de répartition sont à haute tension (de l'ordre de 60 à 150 kV) et ont pour but d'assurer à l'échelle régionale la fourniture d'électricité. Leur fonction de faire la liaison entre les réseaux de transport et les réseaux de distribution. Le réseau de répartition prend sa source dans le réseau de transport à partir des poste d'interconnexion THT/HT(MT) et sert fournir les gros consommateurs industriels sous haute ou moyenne tension, et à répartir les puissances dans différentes régions rurales ou urbaines.

La gestion de la tension et de la fréquence des réseaux de répartition est effectuée de manière centralisée. Ils doivent de ce fait assurer l'alimentation du territoire qu'ils desservent qui sont en générale des zones importantes de consommation. Pour assurer cette fonction, ces réseaux auront une topologie de réseau bouclé (paragraphe I.2.3.2), ce qui permet d'assurer l'acheminement de l'énergie dans des conditions de sécurité raisonnablement garanties [12].

I.2.2.4. Distribution

Les réseaux de distribution constituent l'architecture la plus importante du système électrique. Ils assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local. Leur tension est inférieure ou égale à 50 kV (HTA), ils sont constitués de deux types de réseaux : le réseau moyen tension (MT) avec un niveau de 10 kV et 30 kV connecté au réseau de transport, et le réseau basse tension (BT) entre 230 et 400 V.

Ces réseaux sont la partie d'un réseau électrique desservant les consommateurs d'électricité. Ils acheminent l'énergie électrique d'un réseau de transport ou un réseau de répartition aux transformateurs desservant les clients locaux. Ils sont composés de postes source (avec les transformateurs, les équipements de compensation), et de lignes aériennes ou souterraines.

Les réseaux de distribution ont principalement une structure radiale (paragraphe I.2.3.3), chaque départ raccordé au jeu de barres du poste source dessert un « arbre » se subdivisant à plusieurs reprises avant d'atteindre les transformateurs de distribution. A la différence d'une structure maillée, une structure radiale est une structure arborescente (paragraphe I.2.3.4). Ainsi, le flux de puissance n'a qu'un trajet possible pour transiter du poste de transformation HT/MT ou MT/BT vers le point de consommation considérée [13]. Ce type réseau est décomposé en deux types :

A. Réseaux de distribution à moyenne tension

- ◆ HTA (30 et 10 kV le plus répandu) ;
- ◆ Neutre à la terre par une résistance ;
- ◆ Limitation à 300 A pour les réseaux aériens et imitation à 1000 A pour les réseaux souterrains ;
- ◆ Réseaux souterrains en boucle ouverte.

B. Réseaux de distribution à basse tension

- ◆ BTA (230 / 400 V) ;
- ◆ Neutre directement à la terre ;
- ◆ Réseaux de type radial, et arborescent.

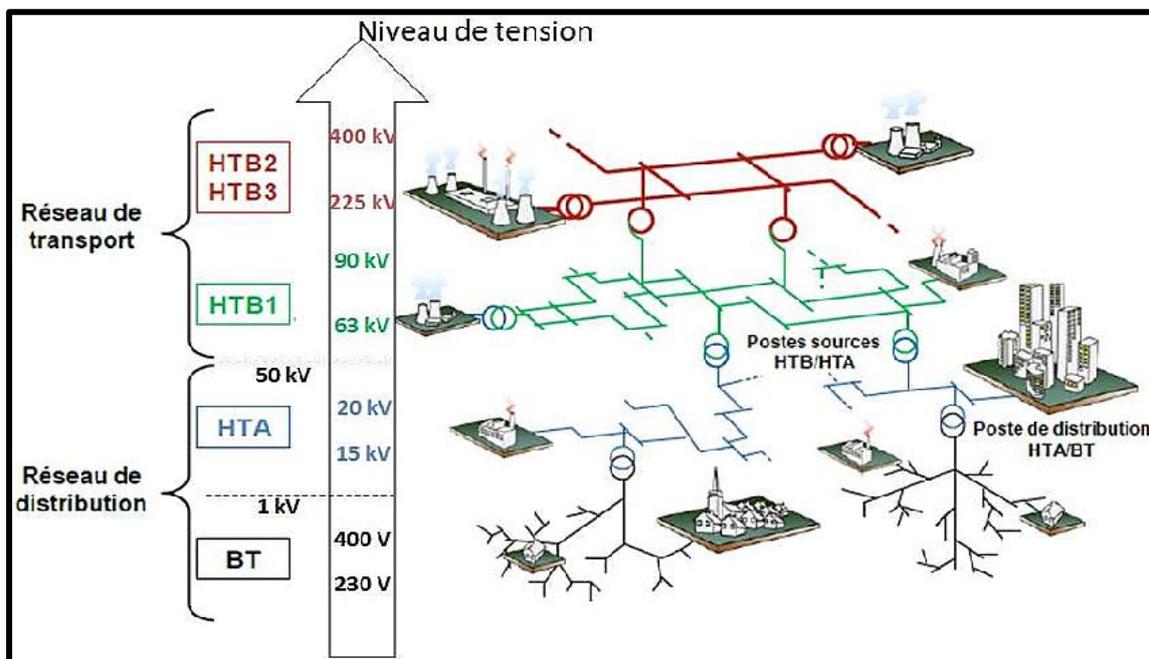


Fig.I.2 : Structure générale d'un réseau électrique

I.2.3. Topologies des réseaux électriques

Les topologies diffèrent d'un type de réseau à un autre, et chaque type de structure possède des spécificités et des modes d'exploitation très différents. Cette topologie est dictée par : le niveau fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation. Les différentes topologies qu'on trouve usuellement sont :

- Les réseaux maillés ;
- Les réseaux bouclés ;
- Les réseaux radiaux ;
- Les réseaux arborescents

I.2.3.1. Réseaux maillés

Une topologie maillée est une topologie de réseau dans laquelle tous les nœuds de réseau sont connectés les uns avec les autres. Cette topologie (Fig. I.3) est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale [14]. Parmi les avantages et inconvénients de cette topologie nous citons :

✚ **Avantages de la topologie maillée :** Il s'agit d'une topologie robuste, le dépannage, en cas de problème, est facile par rapport aux autres topologies de réseau. De plus, elle assure une meilleure sécurité et une bonne confidentialité.

✚ **Inconvénients de la topologie maillée :** Le premier inconvénient de cette topologie est que ça nécessite un matériel beaucoup plus (câbles, etc.) par rapport à d'autres type de topologies. De plus, l'installation et la configuration sont difficiles si la connectivité devient plus importante, avec un prix de l'installation et de l'entretien plus cher.

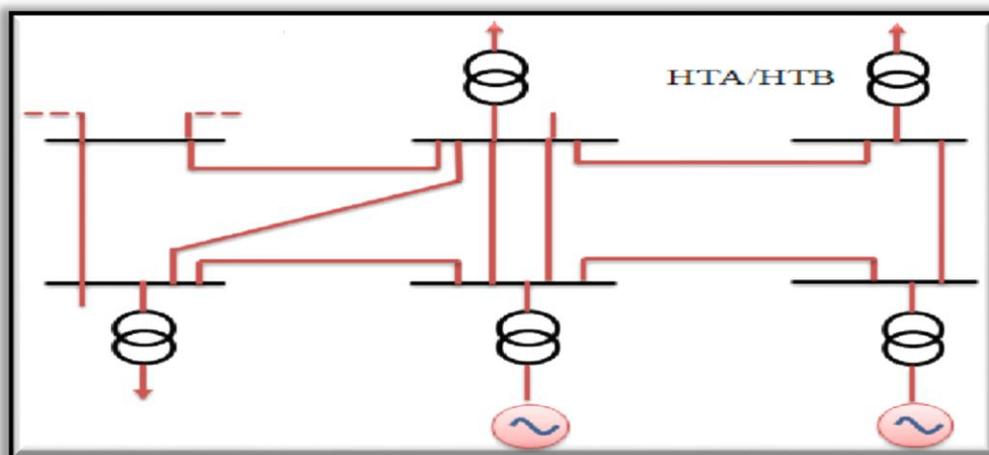


Fig.I.3 : Structure maillée d'un réseau de transport électrique

I.2.3.2. Réseaux bouclés

Si l'énergie transportée par un réseau vers un client y parvient par plusieurs parcours, on parle de distribution bouclée (généralement utilisé pour les réseaux de répartition et distribution MT). Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés (Fig. I.4). [15]

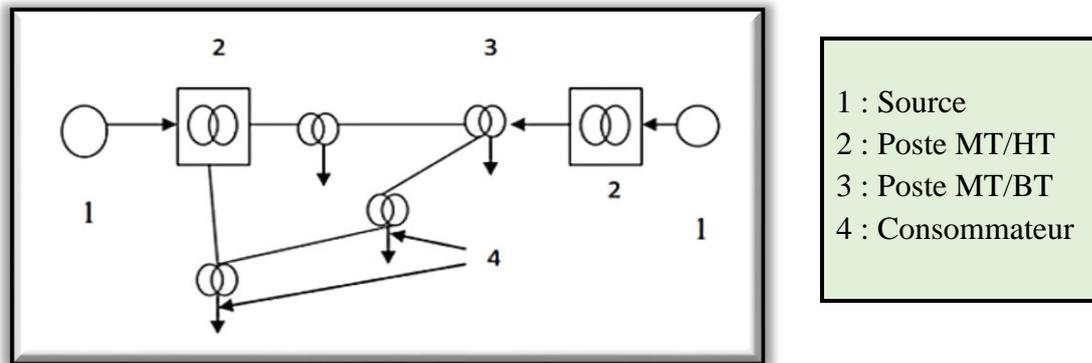


Fig.I.4 : Schéma simplifié d'un réseau bouclé

I.2.3.3. Réseaux radiaux

Si l'énergie transportée par un réseau vers un client y parvient par un seul parcours, on parle de distribution radiale (généralement utilisé pour le réseau rural). C'est une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT.

Le principe de fonctionnement de réseau radial est à une seule voie d'alimentation. Ceci signifie que tout point de consommation sur une telle structure ne peut être alimenté que par un seul chemin électrique possible. Ce schéma (Fig. I.5) est particulièrement utilisé pour la distribution de la MT en milieu rural. En effet il permet facilement et à un moindre coût, d'accéder à des points de consommation de faible densité de charge (supérieure à 10 KVA) et largement répartis géographiquement (supérieure à 100 km²).

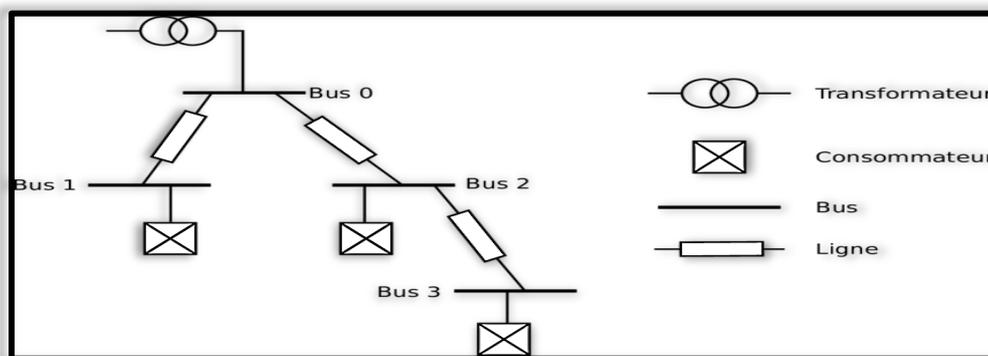


Fig.I.5: Réseau de distribution à configuration radiale

I.2.3.4. Réseaux arborescents

Cette structure (Fig. I.6) est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain où la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT [15].

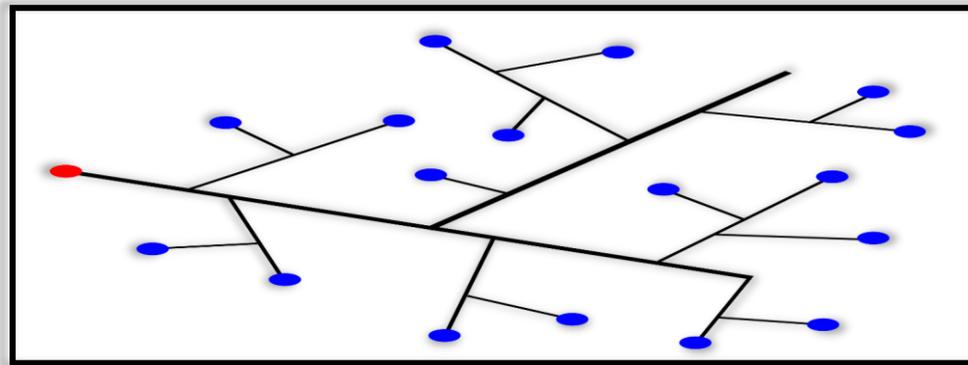


Fig.I.6 : Schéma d'un réseau arborescent

I.2.4. Service système

Ce sont les différents services complémentaires qui contribuent au maintien de la stabilité du réseau, ils comportent principalement :

- ✚ Le réglage de la fréquence.
- ✚ Le réglage de la tension.
- ✚ Exploitation et rétablissement du réseau après un défaut majeur (possibilité d'ilotage).
- ✚ Compensation des pertes de transport (gestion de l'énergie).

I.2.4.1. Réglage de la fréquence

Le défi majeur d'un gestionnaire du réseau consiste à garder l'équilibre entre la production et la consommation en temps réel. Trois réglages sont mis en œuvre pour réagir au moment du déséquilibre. Il s'agit du réglage primaire, réglage secondaire et réglage tertiaire [16].

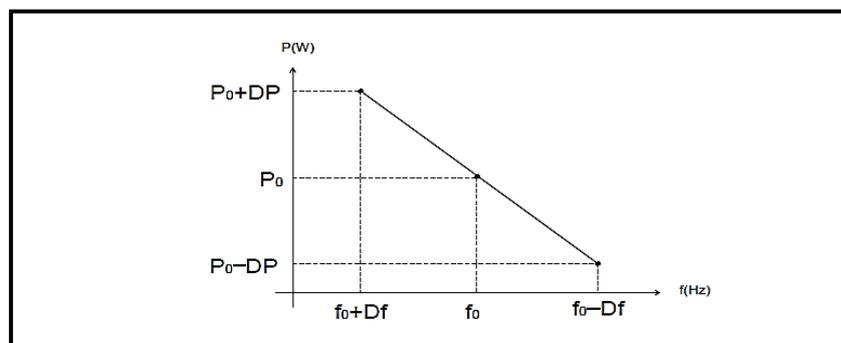


Fig. I.7 : Réaction de groupe lors d'une variation de fréquence [16]

➤ Réglage primaire de la fréquence

Ce réglage est automatisé, il intervient pendant les premières secondes après l'incident, chaque groupe de production agit localement grâce au régulateur de vitesse sur la puissance réglante primaire afin de corriger l'écart entre la production et la consommation.

➤ Réglage secondaire de la fréquence

Ce réglage est centralisé et également automatisé, il rentre en jeu lorsque le réglage primaire n'est pas suffisant pour annuler complètement la variation de la fréquence. Il a pour rôle (quelque minute) de ramener l'écart de la fréquence et de la puissance à des valeurs très faibles, grâce à des groupes participant à ce réglage.

➤ Réglage tertiaire de la fréquence

Ce réglage est centralisé et n'est pas automatisé, il intervient après le réglage primaire et secondaire (15 à 30 minute), se fait d'une manière manuelle par appel téléphonique depuis le centre de dispatching.

I.2.4.2. Réglage de la tension

Le réglage de la tension à pour objectif [17] :

- ✓ Exploiter le réseau en assurant la sûreté ;
- ✓ Maintenir la tension d'alimentation des clients dans les plages contractuelles ;
- ✓ Respecter les contraintes de fonctionnement des matériels ;
- ✓ Réduire les pertes actives ;
- ✓ Utiliser au mieux la capacité des ouvrages de transport ;

On a trois niveaux hiérarchiques du réglage de tension :

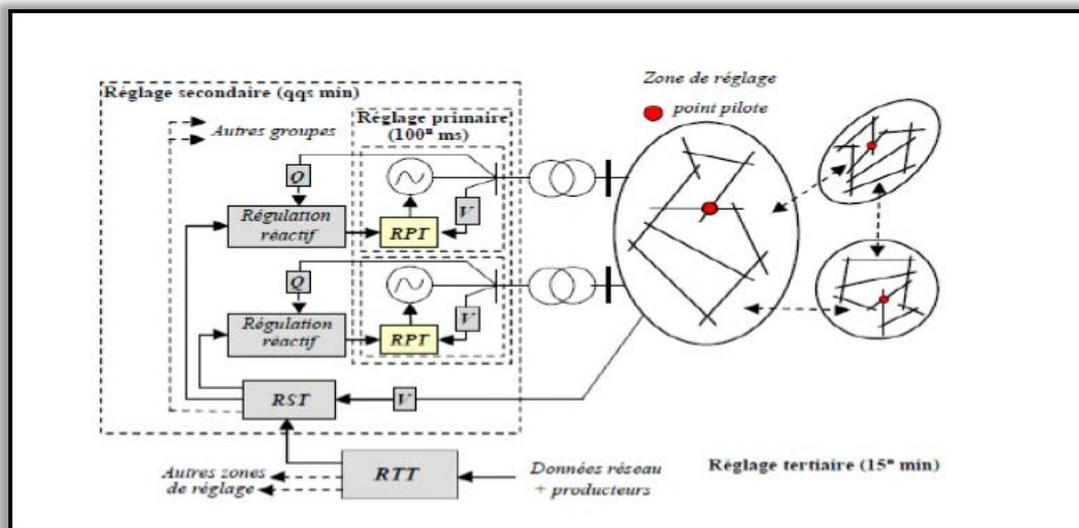


Fig. I.8 : Réglage hiérarchisé de tension [17]

➤ Réglage primaire

C'est une régulation locale qui fixe la puissance réactive fournie par les alternateurs raccordés au réseau dans les limites acceptables en agissant sur l'excitation de ces machines.

➤ Réglage secondaire

Il se fait au niveau régional, il a pour objet de limiter les transits de puissance réactive sur les lignes d'interconnexion et maintenir la tension en certains nœuds (pilotes) représentatifs de la tension de chaque zone à sa valeur de consigne.

➤ Réglage tertiaire

Il est manuel, effectué par le dispatching national, consiste à réévaluer, dans un intervalle de 15 minute, les consignes de tension des nœuds pilotes de chaque zone de réglage.

I.3. Production d'énergie décentralisée

La production décentralisée, dite encore « dispersée » ou « distribuée », est la production d'énergie électrique à l'aide des installations de petites puissances raccordées aux réseaux électriques à des niveaux de tension peu élevée : basse ou moyenne tension. De plus, Le terme « production décentralisée » est de l'opposer à la production classique de grosses puissances connectées au réseau de transmission HT, laquelle est gérée de façon centralisée par les gestionnaires de réseau. Cette production, souvent située sur les réseaux de distribution, se caractérise par sa petite taille. Son exploitation n'est pas planifiée de manière centralisée, ni coordonnée et n'apporte généralement pas de services système.

Le développement de la production décentralisée doit être examiné sous deux aspects principaux : d'une part les conséquences sur le réseau auquel est directement raccordée l'installation, d'autre part les conséquences sur le fonctionnement et la sûreté de l'ensemble du système électrique. Donc, cette production se développe dans tous les pays, sur base d'unités de cogénération, d'énergies renouvelables ou de production traditionnelle, installées par des producteurs indépendants [18].

De nombreuses raisons, techniques et économiques, justifient le développement de ce type de production, parmi lesquelles nous relevons les suivantes :

- Les sites pour une production de puissance réduite sont plus faciles à trouver ;
- La production est réalisée à proximité de son utilisation, de manière à réduire les frais de transport ;
- Le gaz naturel, vecteur énergétique souvent utilisé en production décentralisée, est supposé être facilement disponible dans la plupart des centres de consommation ;
- Les rendements énergétiques supérieurs des systèmes de cogénération ou à cycle combiné (gaz et vapeur) permettent une réduction des frais de fonctionnement.

La production décentralisée a donc inévitablement un impact plus ou moins important sur les réseaux aux plans suivants : topologie ou conception, dimensionnement, gestion prévisionnelle, exploitation en temps réel [18].

I.3.1. Caractéristiques de Production Décentralisée

La production décentralisée, c'est une nouvelle manière de concevoir la production d'énergie, et notamment de chaleur. Les systèmes de production décentralisée peuvent se caractériser par le type de générateur ou d'interface utilisé. On distingue ainsi les catégories suivantes et leurs domaines d'applications actuels :

A. Systèmes à alternateurs classiques (machine synchrone): Ces systèmes sont dits classiques en raison de l'utilisation de générateurs synchrones comme dans les centrales thermiques à combustible fossile ou nucléaire, et dans les centrales hydrauliques, biomasse, solaire à bac parabolique et solaire à tour, et le vent [19].

B. Systèmes à générateurs asynchrone: Solaire réflecteur-moteur (à miroirs paraboliques et moteurs à cycle Stirling et Brayton), vent et houle.

C. Systèmes à interface avec convertisseur électronique: Vent (avec générateur synchrone ou asynchrone), Photovoltaïque, Stockage par batterie et piles à combustible.

I.3.2. Différentes technologies de la production décentralisée

La production d'électricité est tout simplement une conversion d'énergie mécanique (liée au mouvement) en énergie électrique. Dans les centrales, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique mais à plus grande échelle.

L'électricité est un facteur essentiel au développement économique, dans tous les pays du monde. Son importance relative s'accroît avec les progrès techniques, l'industrialisation et le besoin de confort moderne.

En effet, La production est la première étape de la chaîne de valeur de l'électricité. L'électricité peut être produite à partir de plusieurs sources, certaines ayant un impact plus important que d'autres sur l'environnement. Donc il existe plusieurs technologies de productions d'énergies électriques raccordées au réseau, celles-ci diffèrent cependant de par leur puissance ou encore de par le type de carburant qu'elles utilisent. On distingue ainsi les types suivants :

I.3.2.1. Energies primaires fossiles (Les énergies non renouvelables)

La production décentralisée traditionnelle est basée sur des technologies utilisant des énergies fossiles (gaz, charbon, pétrole) bien éprouvées, ce qui leur confère un grand intérêt économique. Les principales technologies utilisées sont : le thermique à flamme, les turbines à gaz, les moteurs diesel, ...etc. [20].

A. Thermique à flamme : Le thermique à flamme basé sur des turbines ou micro turbines à vapeur.

B. Moteurs à combustibles fossiles : Les turbines à gaz et les groupes diesel sont des moyens de productions utilisant une génératrice synchrone pour transformer l'énergie mécanique développée par celles-ci en énergie électrique. Ce type de production est le plus souvent envisagé pour des cogénérations de quelques mégawatts [20].

C. Piles à combustible (PAC) : Une pile à combustible est un générateur électrochimique d'énergie permettant de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène, hydrocarbures...) en énergie électrique sans passer par l'énergie thermique. A l'heure actuelle, on ne peut pas considérer ce type de source comme renouvelable étant donné que la plupart de l'hydrogène est produite à partir d'énergie fossile [15].

Ces piles produisent directement de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène par réaction inverse de l'électrolyse de l'eau(Figure. I.9).Donc la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air.

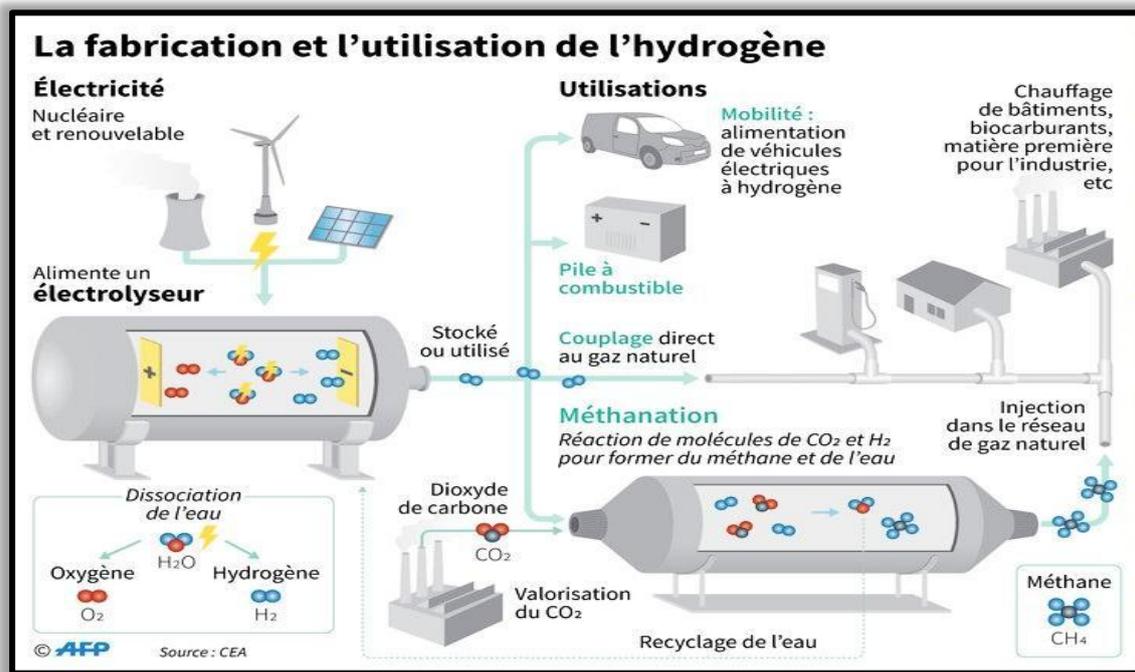


Fig.I.9 : Principe de fonctionnement de la pile à combustible et son utilisation de l'hydrogène [21]

D. Cogénération : La cogénération électricité – chaleur (Figure I.10) est une technique permettant de récupérer la chaleur produite par toute microcentrale électrique proche de bâtiments et fonctionnant à haute température, qu'il s'agisse de centrales thermiques classiques ou de certains types de piles à combustible [22].

Le principe de la cogénération consiste à produire, à partir d'une énergie primaire combustible, deux énergies secondaires utilisables, une énergie mécanique ou électrique et

une énergie thermique. L'énergie électrique est obtenue par conversion de l'énergie mécanique produite par une turbine à gaz, ou turbine à vapeur, en énergie électrique. L'idée de cogénération repose sur le fait que la production électrique dégage une grande quantité de chaleur à température moyenne. En réponse à une demande thermique (chauffage, eau chaude sanitaire...etc.), elle propose de valoriser la chaleur du cycle de génération électrique comme source thermique. Un avantage important de ce type de cogénération, dans le cas d'une mise en réseau, est que la production d'électricité se fait en hiver, en coïncidence avec la pointe de la demande.

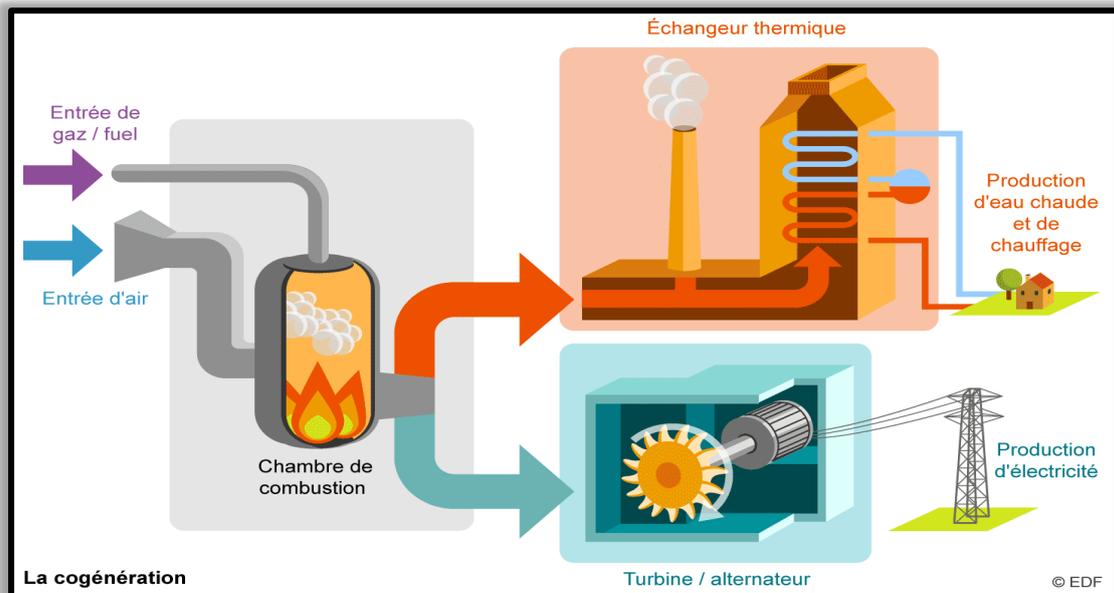


Fig.I.10 : Production de l'électricité à partir de la technique cogénération [23]

I.3.2.2. Energies renouvelables

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à échelle humaine de temps. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement, cycle d'évaporation, biocarburants...). Elles sont issues de l'activité du soleil, sous forme de rayonnement direct (énergie solaire), et par les cycles renouvelés de l'eau (énergie hydraulique), du vent (énergie éolienne) ou de la biomasse (bois, biogaz, biocarburants...). Ces énergies n'exercent que peu d'impacts négatifs sur l'environnement. En particulier, leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de gaz à effet de serre ou à des déchets dangereux.

La production d'électricité renouvelable au plus près de sa consommation limite les pertes d'acheminement sur le réseau. De plus, elle permet la vente d'électricité par les particuliers et/ ou la déduction d'une partie de la consommation électrique sur les factures.

Les techniques de captation et de transformation de l'énergie en électricité varient selon la source d'énergie renouvelable exploitée : énergie solaire, éolienne, hydraulique, biomasse...etc. [24]

I.3.2.2.1. Différents ressources des énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables.

La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. En effet, les principales sources d'énergies renouvelables ainsi que leurs principes sources d'énergie sont indiquées ci-dessous :

A. Energie solaire : Par définition, l'énergie solaire est l'énergie dont la matière première est le soleil. Elle est gratuite, inépuisable et en plus, disponible dans le monde entier. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

✓ Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire fait partie des nouvelles sources d'énergies renouvelables, elle désigne l'énergie récupérée par des panneaux solaires pour la transformer en électricité (Figure I.11). Cette énergie consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles. L'énergie photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir de l'irradiation solaire. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire.

La production d'électricité à partir de l'énergie solaire se fait au moyen de modules photovoltaïques intégrés ou posés sur la structure du bâtiment, ou installés au sol. Ils convertissent directement la lumière du soleil en électricité grâce à des matériaux semi-conducteurs [25].

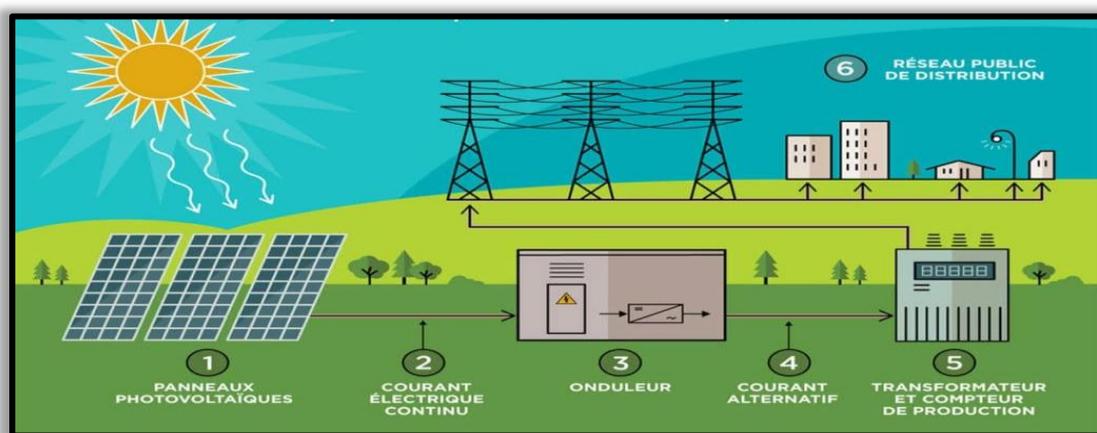


Fig. I.11 : Production d'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque

✓ **Energie solaire thermique**

L'énergie solaire thermique désigne l'énergie récupérée à partir de la lumière du soleil par des capteurs solaires thermiques vitrés pour assurer le chauffage direct de l'eau et des locaux. Elle consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres, cette chaleur concentrée par les panneaux est transférée à un fluide caloporteur. La chaleur est ensuite utilisée afin de produire de l'eau chaude sanitaire ou bien encore chauffer des locaux. Donc l'énergie thermique solaire ainsi obtenue peut être employée de différentes façons : chauffage solaire, chauffe-eau, cuisinières...

Nous pouvons aussi produire l'électricité (Figure I.12) avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité [25].

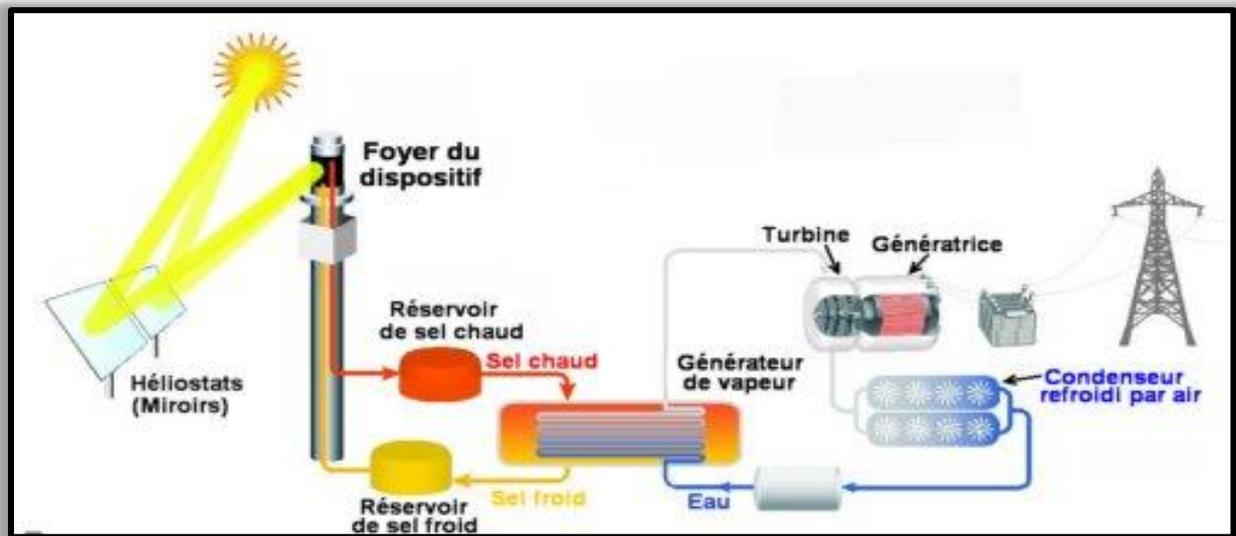


Fig. I.12 : Production d'électricité à partir de l'énergie solaire thermique

B. Energie hydraulique : Rappelons d'abord que l'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus mature et la plus développée. Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'eau est stockée dans un réservoir, quand la vanne s'ouvre, l'eau s'écoule dans la conduite forcée. Elle fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur, produisant ainsi de l'électricité (Figure I.13). Cette électricité est distribuée dans les habitations par les lignes à haute tension. L'eau rejoint la rivière par le canal de fuite [26].

Cette source d'énergie est essentiellement produite en contrebas des barrages hydrauliques et parfois à travers des cours d'eau. La puissance produite dépend de la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau. Il y a trois types principaux de centrales hydroélectriques :

✓ **Centrales gravitaires**

Les centrales dites gravitaires pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement issus du cours d'eau par gravitation.

✓ Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (S.T.E.P)

Aussi connues sous l'appellation centrale hydraulique à réserve pompée ou centrale de pompage turbinage, qui permettent de pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. Elles sont souvent utilisées comme une forme de stockage.

✓ Usines marémotrices

Au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées, des courants marins permanents ou du mouvement des vagues.

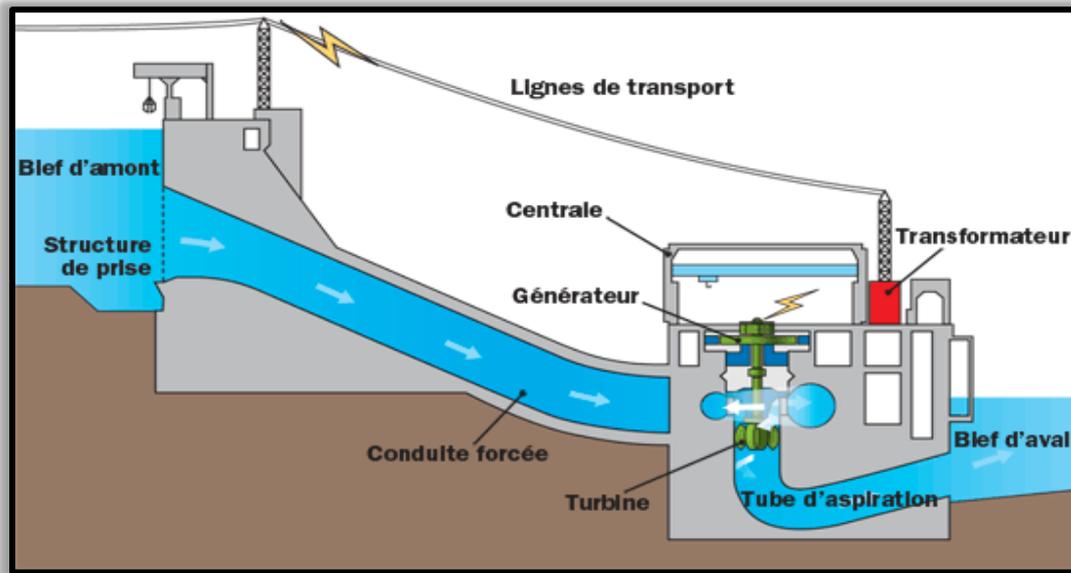


Fig. I.13 : Principe de fonctionnement d'une énergie hydraulique

C. Énergie éolienne : L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la terre, ce qui crée des zones de température et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Une éolienne est un dispositif formé de pales et de turbines qui fonctionne grâce à l'énergie cinétique du vent transformée en énergie mécanique, elle-même transformée en énergie électrique. L'avantage principal de cette source est son coût d'installation qui est moins cher par rapport à d'autres énergies renouvelables, cette source est non polluante.

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple : le vent fait tourner des pales qui font-elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne [27]. La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes :

- ✓ Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique ;

- ✓ Puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique. Le fonctionnement général est illustré par (Figure I.14).

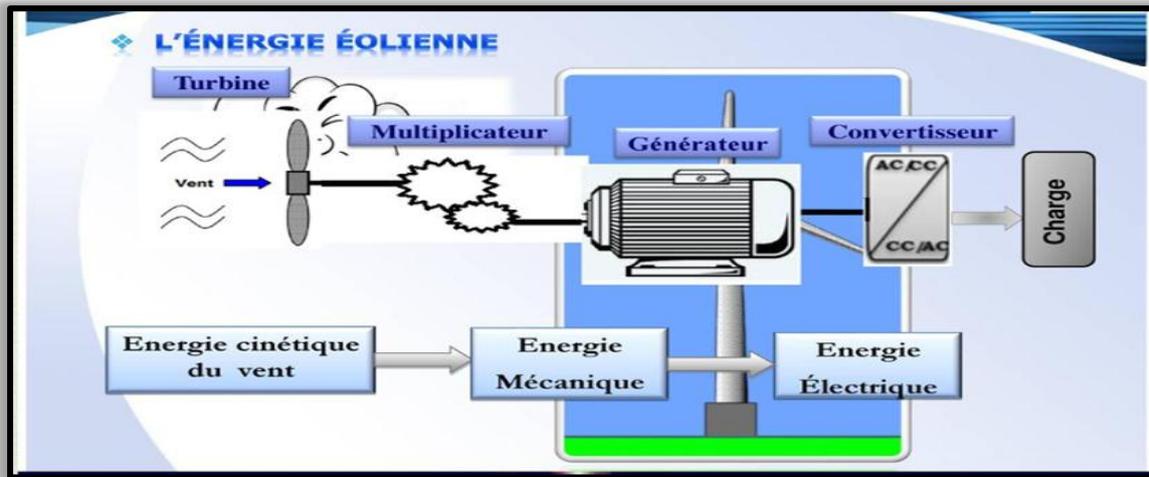


Fig. I.14 : Principe de la conversion d'énergie éolienne

D. Energie géothermique : C'est une énergie très propre et peu coûteuse, le terme géothermie provient du grec <Ge> et <thermos>, signifiant respectivement : la terre et la chaleur. La géothermie peut se définir comme étant la technique qui consiste à puiser dans le sous-sol ou dans les calories qui y sont contenues, afin de les rendre disponibles en surface pour des applications de chauffage ou de production d'électricité (Figure I.15).

Le principe consiste à exploiter les anomalies de températures existant dans le sous-sol à travers l'utilisation des eaux thermales pour le chauffage, ou la production d'électricité dans des centrales géothermiques à l'aide des turbines utilisant la vapeur d'eau qui sort en surface ou extraite du sous-sol par des forages [25].

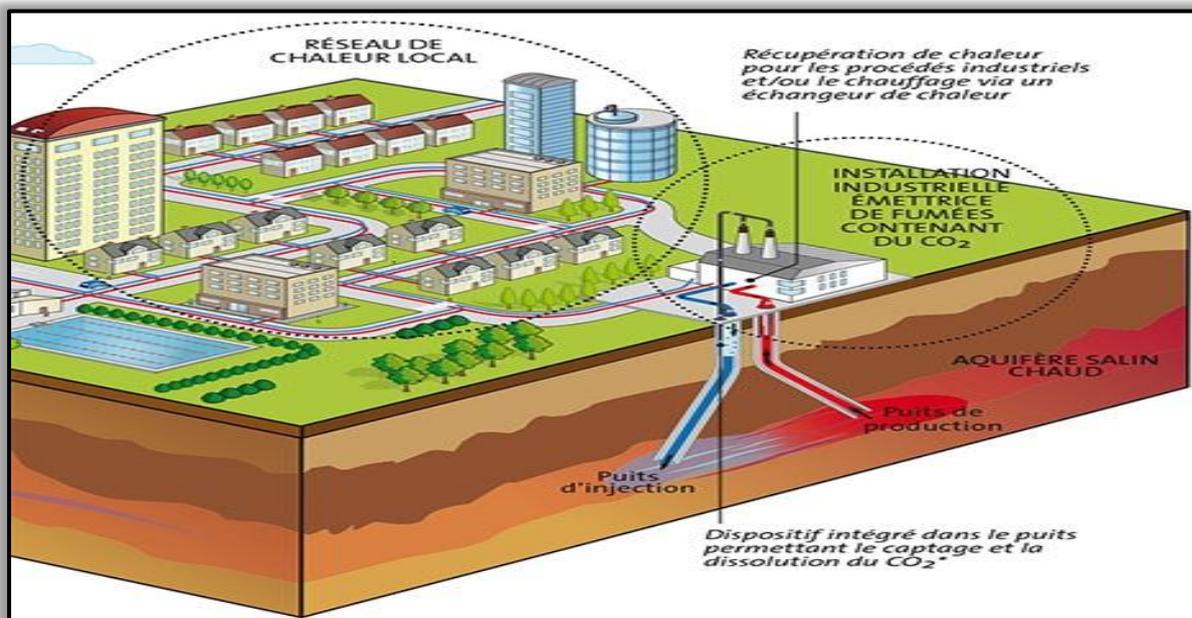


Fig. I.15 : Production d'électricité à partir de l'énergie géothermique [28]

D. Energie biomasse : La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- ✓ Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie ;
- ✓ La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans ces deux cas, cette énergie peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques. Ce principe consiste à transformer des déchets renouvelables en énergie électrique en les brûlant. Une centrale biomasse fonctionne grâce à la vapeur générée par la combustion des matières organiques, elle met en route une turbine reliée à un alternateur qui permet la production d'électricité.

I.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce premier chapitre d'une manière brève des généralités sur les réseaux électriques avec leurs rôles en présentant les réseaux de transport, de répartition et de distribution comme étant une structure représentative des réseaux électriques, et chacun possède un niveau de tension et une architecture adéquate pour une meilleure gestion de l'énergie. Les réglages de fréquence et de tension ont été bien présentés, cela pour garantir l'équilibre entre la production et la consommation. A la fin de ce chapitre nous avons cité les différentes sources d'énergie renouvelables et leurs différents types.



CHAPITRE II

Chapitre II : Production d'énergie décentralisée et moyens de contrôle de la puissance

II.1. Introduction

La production décentralisée devrait pouvoir donner de la souplesse au système de transport qui est dans certains cas congestionné. Ainsi, la solution contre les incidents majeurs passe par faire un système plus flexible et comme conséquence de cette flexibilité, plus robuste. La robustesse d'un système pourrait être améliorée en changeant quelques paramètres du plan journalier comme par exemple, l'augmentation des réserves ou l'incrément des délestages de charge en cas d'urgence [29].

On a parlé dans le chapitre 1 sur le contrôle ou le réglage de la fréquence donc dans le cas où la production est supérieure à la consommation, il se reflète ce qu'on appelle le phénomène de congestion, ce dernier peut être la cause de plusieurs problèmes tels que le black-out et la surcharge des lignes. Et pour faire face à ce genre de problèmes, des solutions ont été proposées pour rétablir l'équilibre production-consommation comme les dispositifs FACTS et les systèmes de stockage.

II.2. Problèmes de congestion dans les réseaux électriques

Lorsque le réseau de transport atteint la capacité limite d'utilisation, les limites encourant et les limites thermiques sont violées, il se traduit ce qu'on appelle le phénomène de congestion. La notion de « congestion » du transport électrique oppose deux critères ambivalents : d'un côté, la limitation des quantités d'énergie transportable, de l'autre, l'ambition de faire transiter davantage de puissance sur un même couloir de passage [30].

On injecte une production décentralisée dans un réseau classique, cette PD doit être diminué sinon les lignes du réseau vont dépasser leurs limites thermiques (phénomène de congestion) donc il aura un déclenchement des lignes [16].

II.2.1. Influence de la congestion sur le réseau de transport

La restructuration du secteur de l'électricité occasionne des transferts de puissance importants guidés par une logique essentiellement économique, engendrant à leur tour de nouvelles contraintes sur les réseaux de transport appelées congestions [30]. Cette partie du réseau électrique est sensible à un tel phénomène, donc il peut lui engendrer plusieurs problèmes qui peuvent être l'origine de son effacement. On peut citer comme conséquences :

- ✓ Anomalies sur les marchés de l'électricité ;
- ✓ Limitation des quantités d'énergies transportées ;
- ✓ Déclenchement des appareils de protections ;
- ✓ Ilotage intentionnel ;
- ✓ Effacement de tension qui peut mener à la perte du réseau (black-out).

II.2.2. Solutions pour traiter la congestion

Le traitement des congestions est le procédé grâce auquel on s'assure que le système est conduit dans le respect des limites de transits imposées [30]. Afin de mieux gérer la puissance installée dans le réseau et réduire le phénomène de congestion des lignes, plusieurs solutions ont été proposées telles que :

- Renforcement du réseau en construisant de nouvelles lignes avec des capacités plus grandes et modification de l'architecture du réseau;
- Intégration de capteurs aux lignes aériennes : consiste à mesurer la congestion, la température et de surveiller la charge 24h/24h ;
- Stockage : peut être une solution très efficace quand le réseau est congestionné en stockant le surplus d'énergie et l'utilisé dans les périodes de pics de consommation ;
- Intégration de la gestion de la congestion dans les marchés énergétiques pour maximiser ses avantages ;
- Redispatching : consiste à modifier le plan de production ou des charges de manière à modifier les flux sur le réseau de transport. C'est un échange réalisé entre deux gestionnaires de réseau de transport ;
- Les dispositifs FACTS : commandables, capables d'atténuer les congestions et d'améliorer la capacité et la stabilité du réseau électrique (la compensation série, la compensation shunt et la compensation hybride) [16].

II.3. Impacts de l'intégration des ressources renouvelables au réseau électrique

La croissance de la quantité d'énergie d'origine renouvelable injectée dans le système électrique, associée à l'installation d'autres technologies, représente un défi en raison des particularités de ce type de technologies. Des solutions innovantes peuvent s'avérer indispensables pour relever ce défi. Les réseaux doivent intégrer de nouvelles spécifications adaptées à ces technologies, et des stratégies de gestion de la demande doivent être intégrées aux centres de contrôle, de manière à maximiser la production d'électricité renouvelable tout en équilibrant le réseau et en maintenant la sécurité [31].

En raison de la nature intermittente de la source d'énergie et des fluctuations qui en résultent au niveau de la puissance produite par une unité de production, le raccordement de celle-ci à un système électrique quelconque a un impact non négligeable qui dépend de la technologie utilisée et aussi du type de réseau. De plus, le raccordement de production décentralisée aux réseaux de tension inférieure apporte des intérêts économiques et énergétiques.

Les PD sont pour la plupart raccordées au réseau de distribution qui sera le premier à être impacté par ce phénomène. Puis, comme on s'attend à voir prochainement une pénétration de production décentralisée à taux croissant, donc on peut dire que plus le taux de

pénétration est important, plus l'impact de l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux est significatif [32], [13]. La production décentralisée peut occasionner quelques impacts sur le système électrique. Ces impacts peuvent être classés en deux groupes : les impacts sur la distribution et les impacts sur le transport.

II.3.1. Impacts de la production décentralisée sur le réseau de transport

L'intérêt de l'étude des impacts de l'insertion massive de production décentralisée sur le réseau de transport est apparu récemment lorsque certaines technologies utilisées sont arrivées à une certaine maturité (le cas de l'éolien). Cependant, ce type d'étude devenait un véritable besoin notamment après des incidents majeurs qui se sont passés au cours des dernières années dans le monde où la stratégie d'exploitation inadéquate des PD a contribué à des causes décisives de l'écroulement total du réseau.

D'un autre côté, les principaux impacts qu'une grande quantité d'insertion de la production décentralisée peut provoquer dans le système de transport, sont les suivants :

i. Incertitude sur la phase de planification

Comme on l'a mentionné dans le paragraphe précédent, parmi les productions décentralisées à base d'énergie renouvelable et nouvelles intégrées au réseau, les éoliennes et les petites centrales hydroélectriques sont les plus exploitées à grande échelle. Elles sont normalement localisées dans les zones où les conditions climatiques sont les plus appropriées.

Pourtant, l'exploitation de ces sources proprement dites est basée sur la prévision météorologique qui porte en elle l'aspect aléatoire et incertain. Pour l'éolien, compte tenu des conditions géographiques diverses, ce n'est pas évident d'établir un lien entre la production et la capacité installée. Car, certaines périodes de l'année sont favorables en production éolienne, mais faibles en consommation, ou inversement. Par exemple, dans le cas du Danemark, une prévision non fiable a conduit à un surdimensionnement en moyenne de 30% pour des parcs éoliens situés à l'ouest. Le record d'erreur a été constaté à 60% [33]. En plus des raisons économiques et d'efficacité d'exploitation de ces parcs, une surestimation de la puissance installée peut conduire à des erreurs de planification des moyens de production à moyen et long terme.

ii. Incertitude sur la marge de réserve d'opération

Les PD de type intermittent provoquent également une incertitude dans le système en termes de quantité d'énergie générée, de la localisation de l'injection et d'estimation du volume de réserve de puissance active et réactive pour faire face aux aléas. Traditionnellement, l'exploitation du réseau repose sur des principes de réaction rapide et sécurisée des moyens de grande production face à des aléas de consommation. Donc le réseau électrique doit être prêt à accueillir un nombre important de producteurs sans connaître à priori ni la position, ni la puissance qu'ils vont débiter [34].

L'augmentation de la production décentralisée impose de disposer de plus de réserve car on peut être en déficit de puissance de régulation pendant les périodes où l'éolien n'est pas disponible, et on peut avoir un surplus de réserve lorsque le vent est favorable [34]. Par conséquent, l'opérateur du réseau doit être très flexible au niveau de l'estimation des marges de réserve afin de suivre non seulement l'évolution des charges mais aussi l'intermittence des sources.

iii. Sensibilité liée à la gestion du réactif

Plusieurs systèmes à base des PD utilisent plutôt des générateurs de type à induction que des générateurs synchrones. Ces groupes consomment de la puissance réactive et contribuent à la chute de tension pendant la période de pointe.

D'ailleurs, pour des raisons de sécurité du groupe, la stratégie d'exploitation actuelle implique que ce type de PD, étant très sensible à des perturbations du réseau même légères (court-circuit lointain, creux de tension...etc.), devrait être déconnecté du réseau en cas d'incident. Ce phénomène pourrait dans certains cas déstabiliser le réseau jusqu'à l'écroulement de tension du réseau et contribuer ainsi à l'initiation d'un black-out [34].

iv. Sensibilité liée au déclenchement intempestif des productions décentralisées

Malgré que le taux de pénétration des PD devienne significatif dans certains systèmes, l'opérateur du réseau considère, en général, ces sources comme des charges négatives qui devraient être déconnectées lors de l'incident arrivant au réseau. Les normes actuelles sur les conditions de raccordement des PD au réseau imposent des seuils assez stricts sur les variations de fréquence et de tension admissibles qui sont détaillées dans les conditions techniques spécifiques de raccordement qui sont données dans des textes législatifs, dans les référentiels techniques des différents gestionnaires de réseau [35].

Parmi ces conditions techniques, on cite les suivantes :

- ✚ **Conditions sur la tension :** par exemple en France, les PD doivent être déconnectées si la tension dépasse la fourchette de 85% à 115% de la tension nominale. Et en Espagne, dès que la tension est inférieure à 10% de sa valeur nominale, les PD doivent fournir 2% du courant nominal.
- ✚ **Condition sur le courant :** les valeurs des courants en régime permanent ne doivent pas dépasser les valeurs maximales admissibles pour les différents équipements du réseau, quel que soit la configuration et le point de raccordement de la PD.
- ✚ **Conditions sur la fréquence :** par exemple En France, Les PD doivent être déconnectées si la fréquence dépasse la fourchette de 49.5 à 50.5Hz (lorsque la puissance installée 'P_{inst}' est inférieure à 1MW) ou de 47.5 à 51.5Hz (lorsque P_{inst} est supérieure à 1MW).

v. Capacité de transport

L'impact de l'intégration des énergies renouvelables sur les capacités de transport dépend de la situation géographique de la production renouvelable par rapport à la demande, de la corrélation entre cette production et la puissance du réseau initial. La production d'énergie renouvelable affecte le transit de puissance dans le réseau : elle peut changer le sens des flux, augmenter ou réduire les pertes. L'analyse des capacités de transport nécessite à la fois des études statiques (calcul de la répartition des flux de puissance) et dynamiques (analyse de stabilité). Donc l'apparition des flux d'énergie réactive inattendus dans le système de transport lorsque le flux de puissance active est inférieur à la puissance naturelle de la ligne [13].

vi. Congestion des lignes de transport

L'insertion des sources à base d'énergies renouvelables de types intermittentes est normalement localisée dans des zones où les conditions climatiques sont plus appropriées. Ceci provoque le besoin d'un renforcement local du réseau vu les possibilités de congestions locales [32]. De plus, la modification des transits de puissance due à l'introduction des PD peut provoquer des problèmes de congestions locales. Plus la puissance produite par ces PD est grande, plus le risque de congestions dans les zones spécifiques est important.

II.3.2. Impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution

Le phénomène d'insertion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution ne présente pas que des avantages. Des études ont montré que de nombreux problèmes sont susceptibles d'apparaître. Pour cela, on va présenter les problèmes sensibles qui puissent influencer négativement le comportement de ce type de réseau.

De plus, une partie de ces PD à, de plus, des sources d'énergie primaire intermittente (éolienne, solaire) qui ne permettent pas de prévoir aisément la production disponible à court terme. Elles ne peuvent donc pas garantir une puissance de sortie et proposer toute la puissance disponible sur le marché. D'autre part, ces nombreuses sources sont trop petites pour être observables et dispatchables par les gestionnaires de réseaux de distribution et ne participent donc pas, aujourd'hui, aux services système. Cela peut poser des problèmes en cas de fort taux de pénétration si les moyens de réglage classiques de la distribution deviennent inaptes à assurer la tenue en tension. [35], [36].

Les différents impacts de l'insertion de la PD dans les réseaux de distribution à rappeler sont les suivants :

i. Impacts sur le sens de transit de puissance

Impacts sur le sens traditionnel d'écoulement de l'énergie, le système électrique a été dimensionné pour recevoir les flux de puissance du système de transport vers le système de distribution dans une dynamique top-down. Ainsi, il est possible que l'énergie soit injectée à

partir du système de distribution dans le système de répartition et de transport. Ceci implique un besoin de bidirectionnalité dans l'équipement mis en jeu [37].

En effet, l'un des premiers impacts liés à l'introduction de la PD dans un réseau de distribution qui vient à l'esprit concerne la modification des transits de puissance. Sur la figure(II.1), la représentation du transit de puissance active est donnée pour un réseau de distribution sans PD. Pour ce réseau, la puissance totale consommée est égale à P_0 . Cette puissance provient du réseau de répartition et se répartie sur les différents départs du réseau de distribution. Quand la PD est introduite (figure II.1), la puissance qui transite à travers du poste source diminue et devient égale à P_0' . En même temps, la puissance P_1 change de sens (si la puissance de la PD est supérieure à la puissance de la charge CH_1). La puissance qui transite dans cette branche ne provient plus du poste source mais de la PD [38].

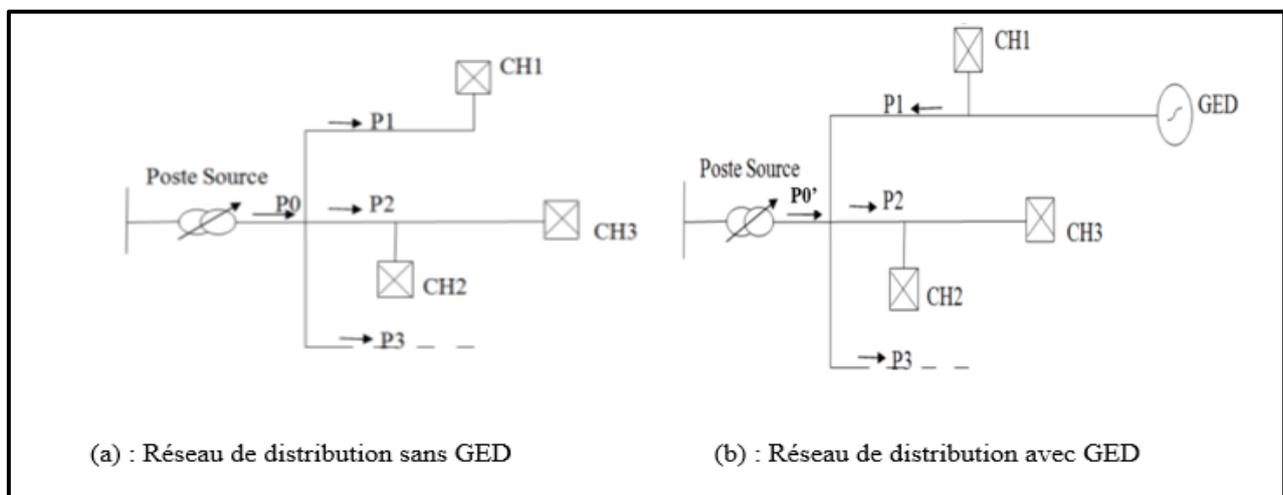


Fig. II.1 : Réseaux de distributions avec PD et sans PD

ii. Impacts sur la stabilité du système

La connexion de la PD sur le réseau provoque des problèmes de stabilité du réseau. Les génératrices de productions décentralisées peuvent être de type synchrone ou asynchrone. L'insertion de générateurs synchrones dans le réseau va changer le temps critique d'élimination de défaut du système (correspondant à la durée maximale d'une perturbation à laquelle le système peut résister sans perte de stabilité). Ceci influencera directement la limite de la stabilité dynamique du système en considération [39]. On constate que l'insertion de ces productions modifie le nombre et l'emplacement des pôles de la matrice d'état du réseau concernant la stabilité transitoire des PD.

iii. Impacts sur la continuité de service

Pour la même raison concernant la caractéristique d'intermittence, l'indisponibilité des PD lors que le système les sollicite peut occasionner la rupture d'électricité par manque de puissance.

iv. Impacts sur l'observabilité et la contrôlabilité du système

Les PD, notamment celles à type d'énergie renouvelable, sont caractérisées par l'intermittence des sources primaires. Cela sera difficile pour l'opérateur d'estimer la puissance de sortie de ces producteurs, donc la puissance fournie du système, par conséquent la contrôlabilité du système est très difficile. Les impacts sur la planification du réseau, son contrôle et son exploitation implique une nouvelle observabilité des réseaux de distribution car ils ont été conçus comme un élément passif. Avec la production décentralisée, ces réseaux deviennent actifs. La production décentralisée devrait être, dans l'idéal, contrôlable par les compagnies électriques et les opérateurs de la distribution [40].

v. Impact sur la fréquence

En fonctionnement normal la fréquence d'un système d'énergie électrique est identique à un instant donné sur l'ensemble du réseau. Une variation de production à cause de la variabilité des sources primaires des groupes de production a pour effet de modifier la fréquence du système. Les groupes de production sont donc régulés pour garantir la stabilité de la fréquence et son maintien à une valeur nominale de référence [41].

De plus, les principaux problèmes apparaissant en cas d'excursion non maîtrisée de la fréquence sont les suivants:

- Rupture de synchronisme des alternateurs pouvant entraîner la perte de groupes en cascade ;
- Limite de fonctionnement des auxiliaires de centrales ;
- En cas de baisse de fréquence : saturation des circuits magnétiques de transformateurs ou compensateurs bobinés d'énergie réactive entraînant un fonctionnement dégradé et des pertes fer .

✚ Exemple de Black-out Italie (Déclenchement en cascade

Si les perturbations sont importantes de manière de forcer à déconnecter une grande quantité de puissance produite par les PD, l'ensemble des charges alimentées par les PD sera transféré au réseau principal, ce qui créera donc une augmentation brutale de charges vues du transport. Ceci peut être un événement déclenchant qui contribue à des combinaisons d'événements conduisant finalement à un black-out (cascade de surcharge ou effondrement de tension). Plus le taux de pénétration de PD est grand, plus le risque est important (fig. II.2).

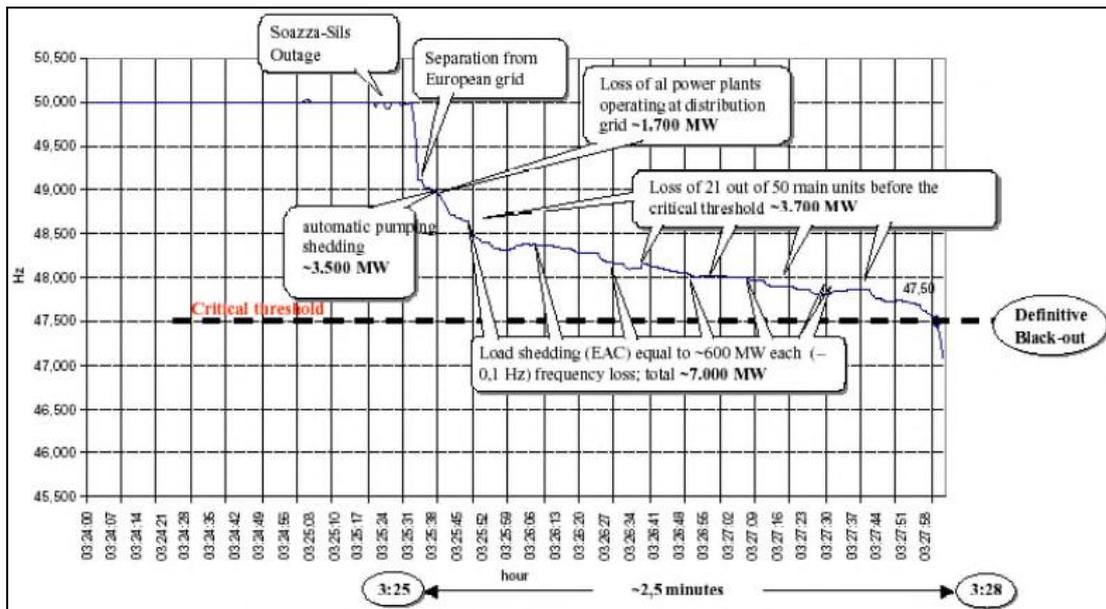


Fig. II.2: Evolution de la fréquence lors du black-out Italien [16]

Actuellement, les seuils de délestage de charges sont de 49, 48.5, 48 et 47.5 Hz. Le seuil de déclenchement rapide des productions centralisées est de 47 Hz tandis que celui des productions décentralisées est, pour la majorité des cas, de 49.5 Hz ou de 49 Hz dans le cas de l'Italie. Ceci remet alors en question les seuils de délestage des charges du système de transport. En effet, le seuil de déclenchement des PD est tellement élevée que les PD sont déconnectées du réseau avant les premiers seuils de délestage de charge, l'opération de délestage automatique de charges est alors inefficace et le réseau devient trop sensible vis - à - vis à des perturbations [16].

vi. Impacts sur le plan de protection

La connexion de nouveaux générateurs au réseau modifiera également les courants de courts-circuits et donc le réglage des seuils des protections. D'ailleurs, ce changement peut provoquer une mauvaise sélectivité, des déclenchements intempestifs ou l'aveuglement du système de protection [42].

✚ **Courant de court-circuit** : En matière de protection, il faut tenir compte de ce que les générateurs décentralisés contribuent à une augmentation du courant de court-circuit dans le réseau. Donc la connexion d'un générateur (asynchrone ou synchrone) au réseau provoque, en cas de défaut, une modification des courants qui peut affecter la sélectivité entre les appareils de protection.

✚ **Aveuglement de protection** : le problème d'aveuglement des protections se produit à cause d'une production décentralisée qui se trouve entre la source et le défaut, dans ce cas, si le courant de court-circuit de cette production est important, donc celui vue par la protection en tête de départ peut être inférieur au seuil de déclenchement. Ce cas peut se rencontrer lorsque le défaut se situe en aval de la PD [41].

✚ **Déclenchements intempestifs** : le problème de déclenchement intempestif se produit lorsqu'un défaut apparaît sur un départ adjacent au départ possédant une production décentralisée. L'apport du courant de court-circuit d'une PD n'est pas négligeable, parce qu'il peut modifier le sens de circulation de ce courant, voire augmenter sa valeur et ainsi faire fonctionner intempestivement les protections présentes en tête de départ [41].

vii. Sur la qualité de service et qualité de tension

Lors de la connexion des productions décentralisées de type asynchrone au réseau, elles appellent un courant fort, ce qui contribue au creux de tension (fig. II.3). D'ailleurs, la présence d'interfaces d'électronique de puissance peut faire augmenter le taux des harmoniques qui nuisent gravement à la qualité de service fournie [32].

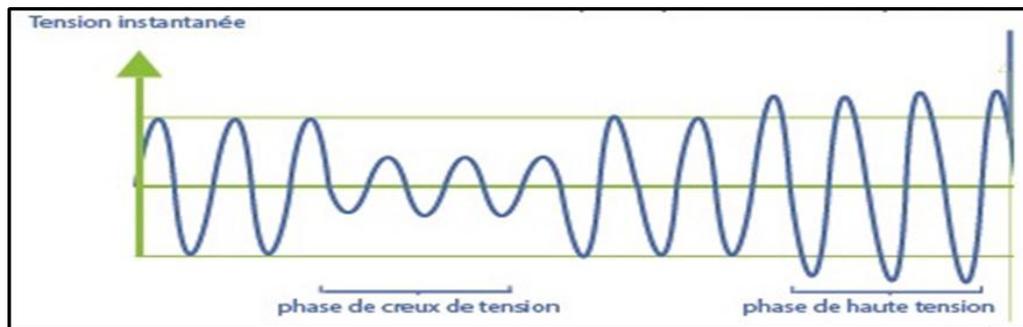


Fig. II.3 : Creux de tension

On sait que les nœuds proches d'une source ont une tension plus élevée, la tension diminuant au fur et à mesure que l'on s'en éloigne. La connexion de sources de PD à proximité des charges modifiera donc naturellement le profil de tension sur le réseau. De plus, la nature de l'énergie primaire des productions décentralisées et les technologies utilisées lors de leurs intégrations au réseau électrique sont particulièrement susceptibles d'affecter la qualité de tension. L'impact de cette insertion dépend généralement de la puissance de court-circuit : plus celle-ci est faible au point de raccordement plus la qualité de tension peut être dégradée. Les différents impacts venant perturbés la qualité de l'onde de tension sont présentés dans ce qui suit :

✚ **Papillotement (flicker en anglais)** : c'est une fluctuation de tension électrique de courte durée (en millisecondes) causée par des perturbations électromagnétiques ou par des variations de puissance sur le réseau porteur de cette tension.

✚ **Emission d'harmonique** : les harmoniques de tension et de courant sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fondamentale (50 Hz), qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale. Ces harmoniques sont toujours présents dans un réseau de distribution [43].

viii. Sur l'aspect économique

Des associations et accords entre producteurs décentralisés pourraient favoriser la concurrence et, au final, une baisse du prix de l'énergie (marché journalier, mécanismes de compensations des équilibres, services systèmes). En effet, l'intégration massive des PD génèrent des coûts supplémentaires à plusieurs niveaux, pour faire face à la demande de pointe (sécurité du système) du fait d'un accroissement de la production des sources intermittentes.

II.4. Moyens et solutions utilisés pour atténuer la congestion dans les réseaux ainsi pour le contrôle de la puissance

II.4.1. Îlotage

L'îlotage ou la perte du réseau se produit lorsque une partie du système de distribution devient électriquement isolé, mais continue à être alimenté par des générateurs distribués connectés au sous-système îloté. Il se produit en cas d'incident, ou une déconnexion planifiée [44]. Le réseau électrique est une entité fortement connexe. S'il y a des problèmes, il est possible de le séparer en plusieurs sous-réseaux. Si l'action de séparation du réseau est contrôlée selon un plan bien défini, on dit que l'action est intentionnelle. Sinon, c'est une séparation non-intentionnelle [32].

On peut en compter trois types pour l'îlotage intentionnel :

- ✓ Îlotage intentionnel sur le réseau de transport ;
- ✓ Îlotage intentionnel sur le réseau de distribution ;
- ✓ Îlotage intentionnel sur le réseau bas tension.
- ❖ **Îlotage intentionnel au niveau du réseau de transport**

On peut envisager la séparation du système en plusieurs sous - réseaux fonctionnant en îlotage maintenu selon un plan prédéfini. Le but est d'éviter, si possible, d'accélérer la reconstruction du réseau d'une part et la propagation de l'incident d'autre part. Ce mode d'opération exceptionnel est surveillé depuis le centre de dispatching national par un système de téléconduite et de télécommunication de plus en plus performant [32]. La figure. II.4 donne un exemple de séparation d'un réseau de transport (IEEE 39 nœuds) en plusieurs zones îlotées suite à un black-out.

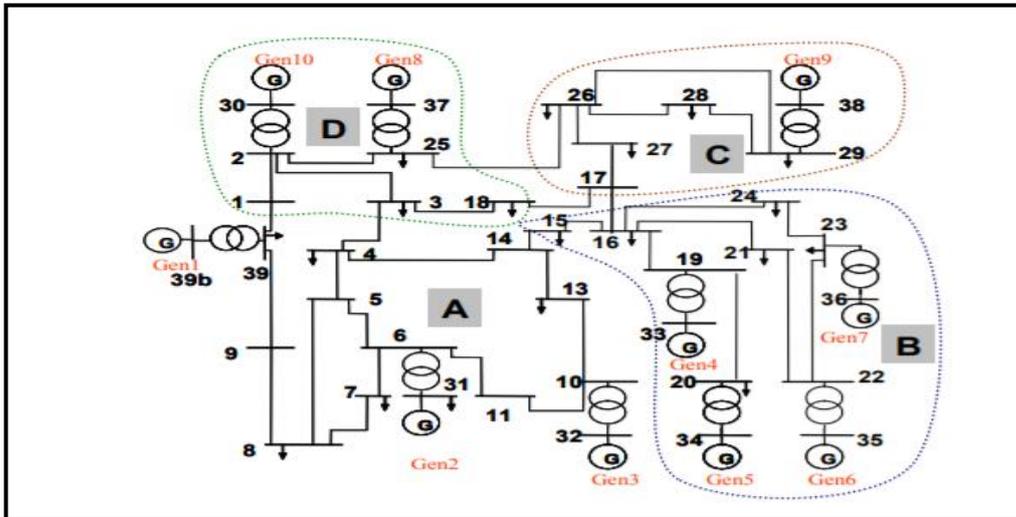


Fig. II.4 : Séparation du réseau de transport en plusieurs sous – réseaux [16]

❖ **Îlotage intentionnel au niveau du réseau de distribution**

Lorsqu'un incident affecte le réseau, l'idée est de continuer localement l'alimentation d'une partie des consommateurs raccordés au réseau de distribution possédant une insertion de production décentralisée à un taux non négligeable. L'îlotage sur une partie du réseau de distribution se fait donc par l'ouverture du disjoncteur de départ et de certains interrupteurs tout au long du départ (figure II.5). L'alimentation de la cellule est assurée par les productions décentralisées ou générations d'énergie dispersée (GED) [32].

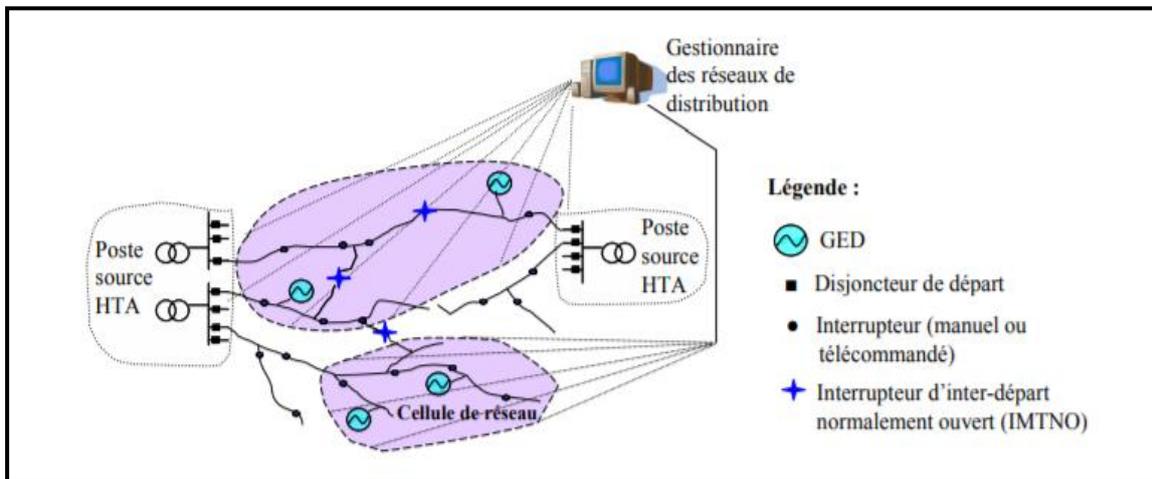


Fig. II.5 : Exemple de cellules de réseau de distribution [16]

❖ **Îlotage intentionnel au niveau des réseaux bas tension**

L'îlotage intentionnel au niveau des réseaux bas tension est un mode de fonctionnement que l'on voit actuellement sous plusieurs formes. Nous avons vu que les clients prioritaires tels que les hôpitaux, certaines industries, doivent toujours disposer de sources de secours sur leur sites afin d'assurer la continuité des services vitaux lors des défauts sur le réseau

principal. Des consommateurs situés sur les sites isolés et difficiles d'accès au réseau principal (refuges de montagne, etc.) ont également recours à un mode de fonctionnement îloté en s'équipant de petites sources d'alimentation autonomes. Les principales sources de secours utilisées peuvent être énumérées comme : groupe diesel, micro-turbine à gaz, petites centrales hydroélectriques, panneaux photovoltaïques, éolien, moyens de stockage (batterie, pile à combustible) [32].

II.4.2. Dispositifs FACTS

Les dispositifs FACTS ont deux grandes façons de remplir ces objectifs : la compensation parallèle (shunt) et la compensation série. Ces dispositifs contribuent au traitement de la congestion dans le réseau de transport [45].

A. Compensateurs shunt

Ce sont le plus souvent des éléments statiques qui génèrent ou absorbent de l'énergie réactive. Ce contrôle de l'énergie réactive injectée permet de maintenir le niveau de tension à une valeur consigne. Ils sont aussi le plus souvent utilisés pour résoudre les problèmes d'instabilité dynamique ou transitoire de la tension. Dans cette famille on compte plusieurs dispositifs les plus utilisés sont les compensateurs statiques d'énergie réactive ou 'SVC' (Static Var Compensator), et les compensateurs statiques synchrones ou 'STATCOM' (Static Synchronous Compensator) [13].

A.1. Compensateurs statiques synchrones « STATCOM »

C'est un convertisseur à source de tension. Très performant, ce dispositif se caractérise par : un soutien robuste de la tension en présence de fortes perturbations ; l'équilibrage des charges asymétriques et fluctuantes ; l'amortissement des oscillations de puissance et le filtrage actif des harmoniques de courant. Il est composé d'un convertisseur de tension continue triphasée avec une capacité connectée du côté continu (figure II.6), et il est connecté au réseau via un transformateur [45].

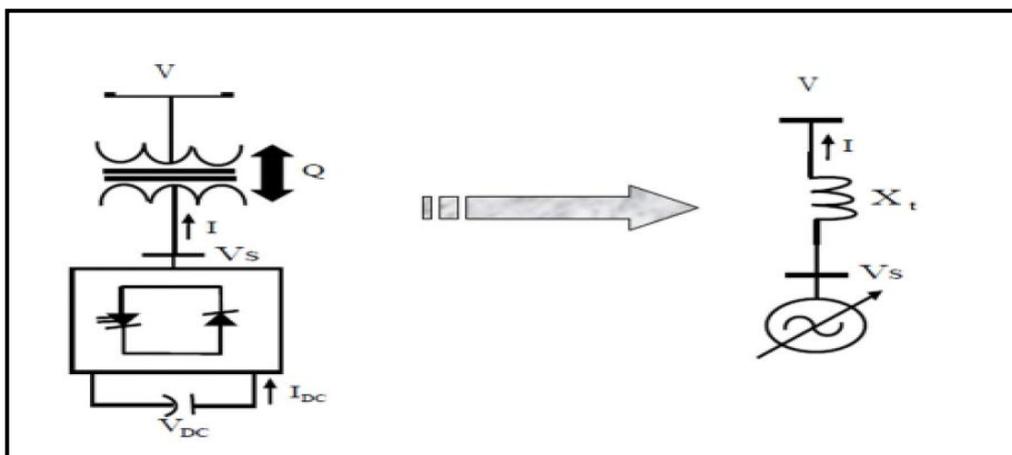


Fig. II.6 : Schéma d'un STATCOM [47]

A.2. Compensateurs statiques d'énergie réactive « SVC »

Le SVC est un dispositif FACTS de première génération connecté en shunt à la ligne et qui permet la génération ou l'absorption de l'énergie réactive et cela pour maintenir un niveau de tension désiré. Il est constitué d'un condensateur C en parallèle avec un TCR (Thyristor Controlled Reactor). Le TCR est une réactance inductive X_L couplée au jeu de barre via un variateur de tension (gradateur). [46]

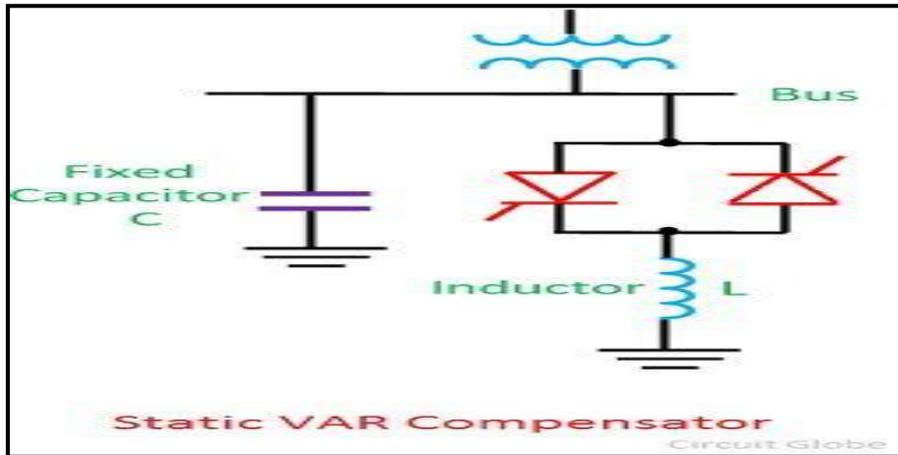


Fig. II.7 : Schéma d'un SVC [47]

B. Compensateurs séries

D'autres FACTS peuvent aussi agir sur les transits de puissance active, même sans stockage d'énergie. C'est le cas des compensateurs série [45].

B.1. Compensateur série contrôlée par thyristors « TCSC »

La compensation série contrôlée par thyristors ou « TCSC » (Thyristor Controlled Series Capacitor) est composée d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur comme montré sur la figure. II.8. Il est employé pour réduire la longueur électrique des lignes de transmission, de transferts croissants de puissance et de marges de stabilité [13].

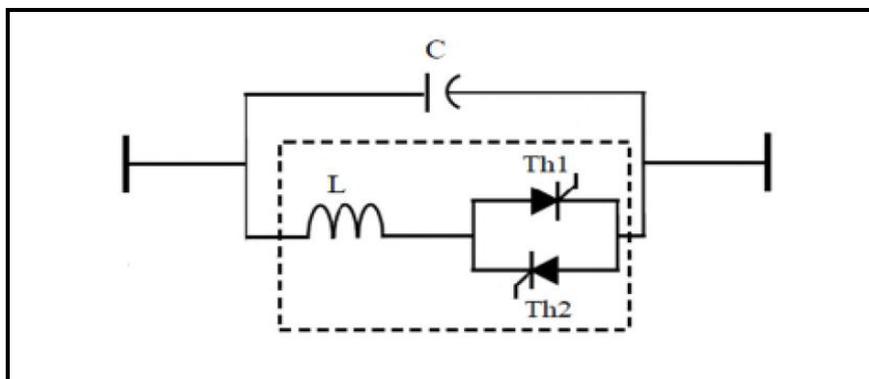


Fig. II.8 : Schéma de base d'un TCSC

B.2. Compensateur série synchrone « SSSC »

Le SSSC (Static Synchronous Series Compensator) est un générateur synchrone statique fonctionnant sans source d'énergie électrique extérieure, dont la tension de sortie est contrôlable indépendamment du courant de ligne afin d'augmenter ou de diminuer la chute de tension globale, et ainsi contrôler la puissance transmise. Il est composé d'un convertisseur de tension inséré en série dans la ligne par l'intermédiaire d'un transformateur [48].

C. Compensateurs hybrides

Ce sont des éléments qui combinent des convertisseurs shunt et série et qui permettent un contrôle avancé du transit de puissances. Les plus connus des éléments de cette famille sont TCPAR, l'UPFC, l'IPFC et l'IPC [13].

C.1. Contrôleur universel de transit de puissance UPFC

L'UPFC (Universal Power Flow Controller) est un élément FACTS qui utilise les SVS (Synchronous Voltage Source) pour offrir un contrôle performant du transit de puissance. Il s'agit en fait de la combinaison d'un STATCOM (shunt) et d'un SSSC (série) reliés entre eux par une liaison en courant continu formée par un condensateur. Son principe consiste à dériver une partie du courant circulant dans la ligne et de le réinjecter avec une phase appropriée [35]. Il est constitué de deux onduleurs de tension triphasés, l'un est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur et l'autre est connecté en série à travers un deuxième transformateur comme elle montre la figure (II.9) [49].

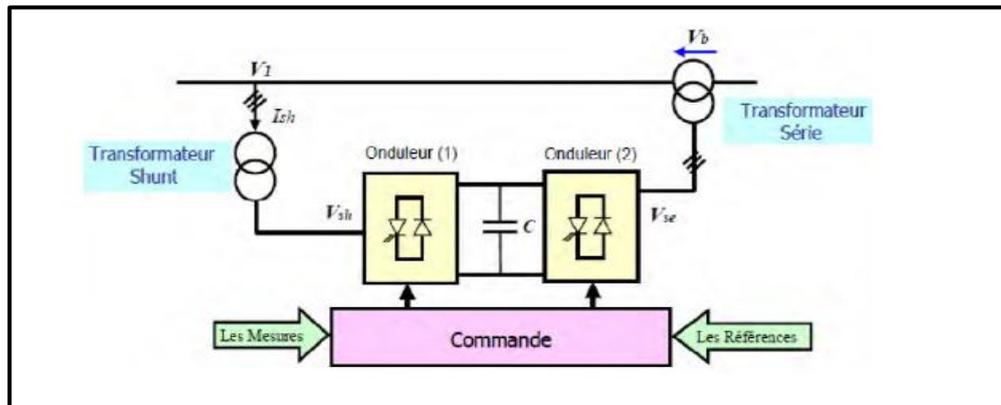


Fig.II.9: Schéma d'un UPFC

C.2. TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)

C'est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs ou régulateurs en charge qui sont commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle comme montré sur la figure II.10. Son rôle est d'injecter sur les trois phases de la ligne de transmission une tension en quadrature avec la tension à déphaser. Cette tension injectée peut modifier l'angle de phase de la tension de la ligne et aussi le contrôle de l'écoulement de puissance [49].

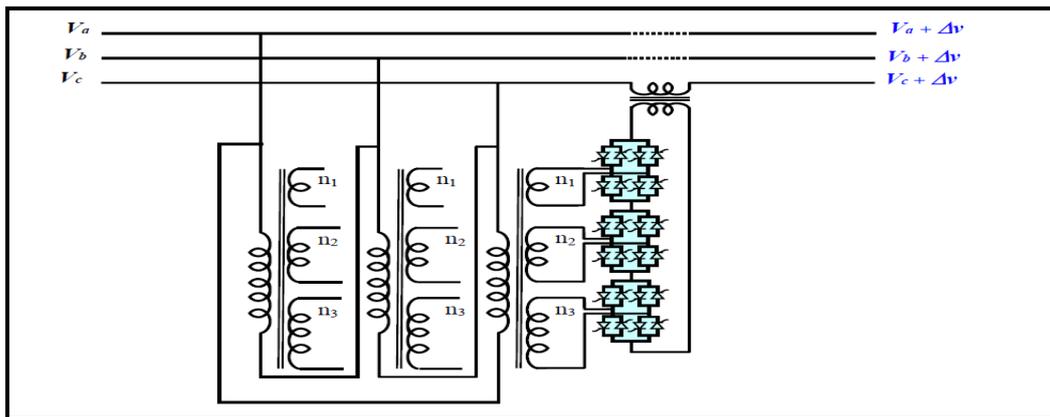


Fig. II.10 : Schéma de base d'un TCPAR

II.4.3. Stockage d'énergie électrique

Le stockage de l'énergie consiste à mettre en réserve une quantité d'énergie provenant d'une source en un lieu donné, sous une forme aisément utilisable, pour une utilisation ultérieure. De plus, le stockage représente donc la clé de la pénétration des énergies renouvelables sur le réseau électrique. Il fournit non seulement une solution technique au gestionnaire du réseau pour assurer en temps réel l'équilibre production consommation mais il permet également d'utiliser au mieux les ressources renouvelables en évitant un délestage en cas de surproduction.

Les systèmes de stockage de l'énergie électrique sont capables de compléter la charge durant les faibles demandes et la réduire pendant les fortes consommations. Certains systèmes de stockage peuvent permettre l'intégration des sources d'énergie renouvelable, à haut niveau, bien que leur introduction doit procurer plus d'avantages que le système traditionnel. Les systèmes de stockage, permettent à des coûts acceptables de stocker et déstocker l'énergie électrique, et donc d'intégrer une plus grande part d'énergies renouvelables aux réseaux électriques. Ils répondent à des commandes simples venant du gestionnaire du réseau de distribution qui utilise cette énergie pour mieux équilibrer la demande et la production [38].

A. Services de stockage

Le stockage peut rendre de multiples services pour la gestion du réseau électrique [50]:

- Participer à l'équilibre production/consommation ;
- Éviter l'investissement dans de nouvelles centrales de pointes ou d'extrêmes pointes ;
- Limiter les arrêts/démarrages des groupes et améliorer le rendement des centrales thermiques ;
- Permettre le développement des énergies renouvelables au-delà des 30 % dans les zones non interconnectées ;
- Contribuer au service systèmes ;

➤ Améliorer la qualité de la tension.

B. Moyens de stockage

Le stockage direct de l'énergie électrique est pratiquement impossible, donc il est nécessaire de la convertir en d'autres formes afin de la stocker. Les solutions de stockage d'énergie se divisent en plusieurs catégories, on s'intéresse aux plus utilisés :

B.1. Stockage mécanique

L'énergie est stockée sous forme cinétique ou potentiel. Ce type inclut plusieurs moyens, et on peut la retrouver dans les différentes centrales de production d'énergie électrique, comme celle de l'hydraulique et à gaz.

✓ **Station de pompage :** Les stations de pompage (fig. II.11) sont des technologies de stockage par gravitation. Elles sont composées de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes reliées par un système de canalisations. Elles sont équipées d'un système de pompage permettant de transférer l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur en heures creuses. En heures pleines, la station fonctionne comme une centrale hydroélectrique classique [50].

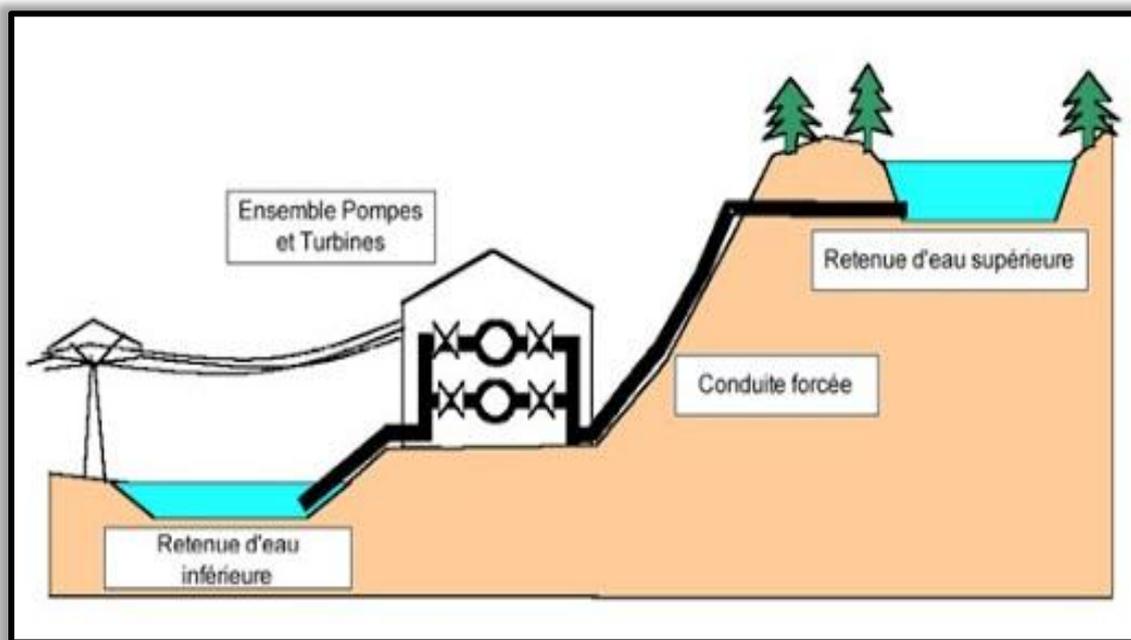


Fig. II.11 : Fonctionnement d'une installation de stockage gravitaire

✓ **Stockage d'énergie par air comprimé :** Le stockage de l'énergie par air comprimé est un système qui permet de récupérer et de restituer de l'énergie à partir d'un mécanisme de compression d'air. Aussi appelé CAES ("Compressed Air Energy Storage") ce système utilise l'énergie à stocker pour comprimer de l'air, et au moment où l'on veut récupérer cette énergie, il suffit de relâcher l'air comprimé (figure II.12).

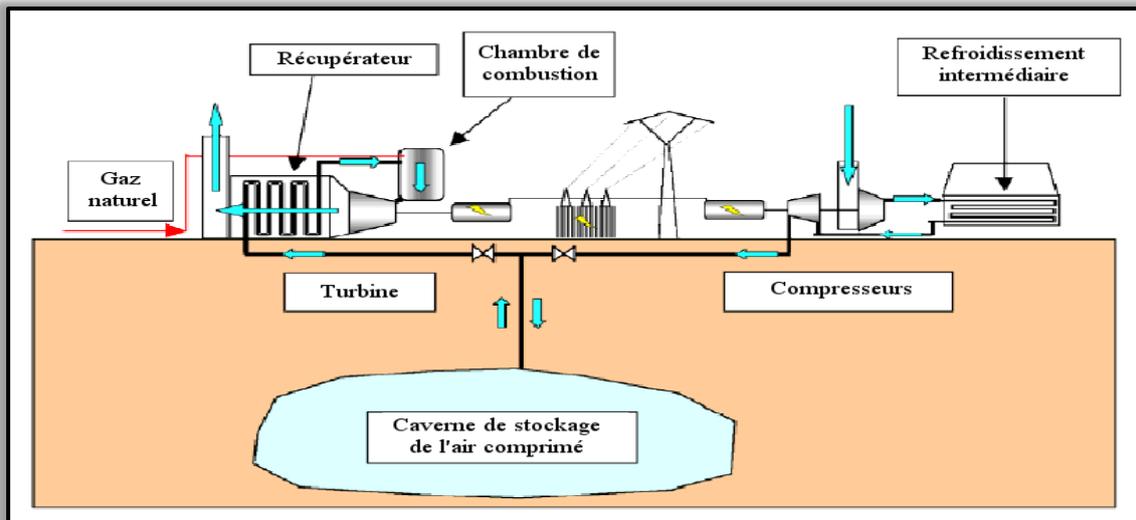


Fig. II.12 : Schémas de principe d'une installation de stockage air comprimé

B.2. Stockage électrochimique

Le stockage électrochimique (figure II.13) de l'énergie est un moyen de conserver l'énergie électrique sous forme chimique. Cette forme de stockage profite du fait que les énergies électrique et chimique partagent le même vecteur, l'électron. Cet avantage permet de limiter les pertes liées à la conversion de l'énergie d'une forme à une autre. L'énergie est stockée sous forme électrochimique, on peut mentionner, comme exemple, les batteries qui sont composées de deux électrodes séparées par un électrolyte et des interfaces dans lesquelles interviennent des réactions d'oxydation ou de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons [50].

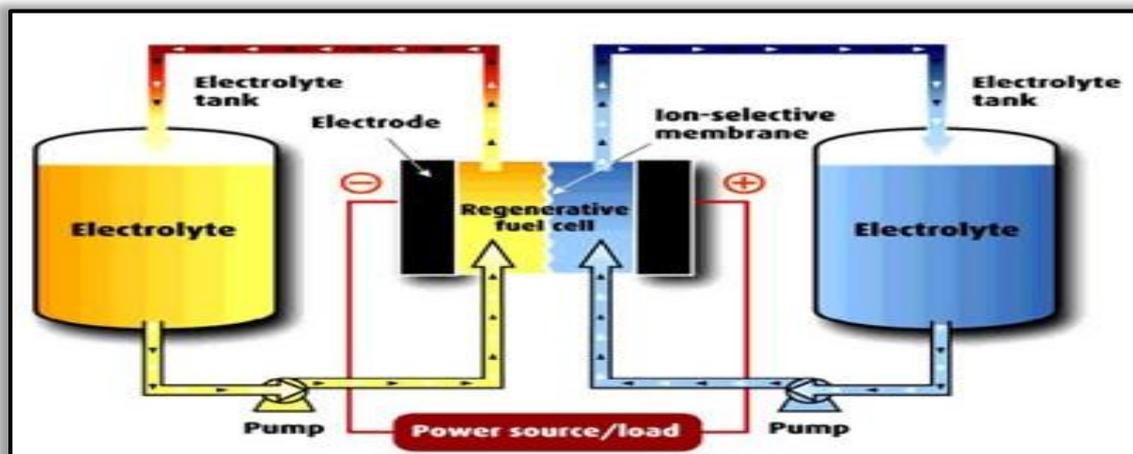


Fig. II.13 : Schéma d'une batterie à circulation

B.3. Stockage électromagnétique

Le principe des super capacités repose sur la création d'une double couche électrochimique par l'accumulation de charges électriques à l'interface entre une solution ionique (électrolyte) et un conducteur électronique (électrode). A la différence des batteries, il

n'y a pas de réaction d'oxydo-réduction. L'interface entre les charges joue le rôle d'un diélectrique. L'électrode contient du charbon actif de surface spécifique très élevée. La combinaison d'une surface conductrice élevée et d'une épaisseur de diélectrique très faible permet d'atteindre des valeurs de capacité extrêmement élevées en comparaison des condensateurs traditionnels. L'électrolyte limite la tension des éléments à quelques volts.

B.4. Stockage thermique (chaleur et froid)

Les installations de stockage thermique (chaleur et froid) concernent majoritairement les marchés industriels et tertiaires avec des réalisations de l'ordre de 1 à 10 MW. Ces installations ont un potentiel important en termes de compétitivité pour les activités tertiaires et industrielles et en matière d'impact sur la demande en électricité à la pointe.

En effet, en stockant la chaleur ou le froid en période de faible demande d'électricité, le potentiel de décalage des appels de puissance est important. Le stockage de chaleur permet d'optimiser le dimensionnement des installations, notamment dans le cadre d'extension de réseaux existants (fig. II.14).

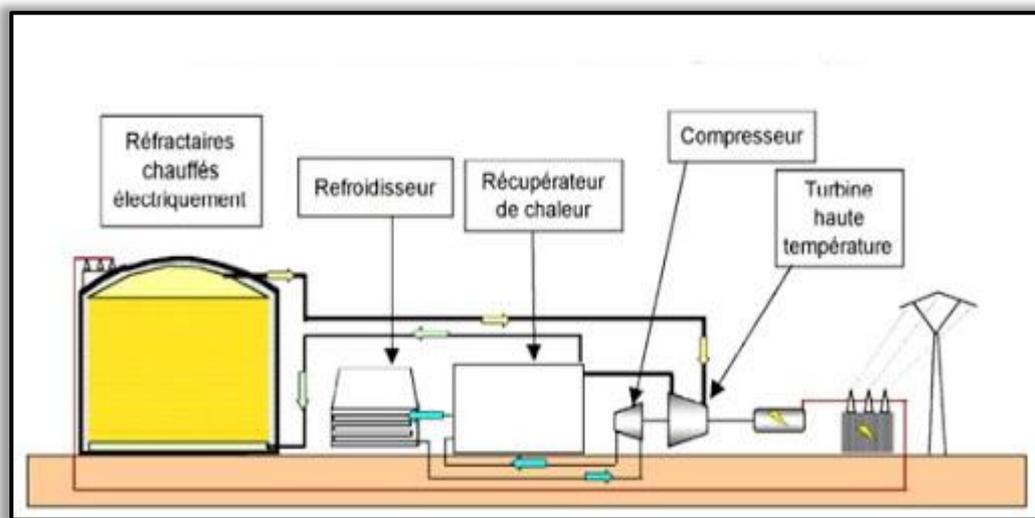


Fig. II.14 : Schémas d'une installation de stockage thermique

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude des problèmes qui peuvent toucher le transit de puissance dans les réseaux électriques. Nous avons commencé par présenter les différents réglages de la fréquence (primaire, secondaire et tertiaire) par le contrôle de la puissance active afin de garantir l'équilibre entre la production et la consommation. Nous avons aussi montré l'intérêt de l'utilisation des dispositifs FACTS comme solutions très efficaces pour contrôler les flux de puissances transités, et leur association avec un système de stockage, lors de la présence des productions décentralisées sur le réseau, pourra garantir l'équilibre en cas de pic ou de manque de puissance. Nous avons exposé une autre solution, à savoir « l'îlotage », qui peut être adoptée pour soulager le réseau

en cas de problème de congestion. Enfin, nous avons montré que l'insertion des productions décentralisées à base des ressources renouvelables dans les réseaux de transports et de distributions présente des problèmes aux différents niveaux. Des impacts qui doivent être traités de manière prioritaire pour permettre l'introduction de ces types de production à des taux d'intégration plus élevés, en respectant les contraintes légales qui sont fixées par les gestionnaires des réseaux pour mieux éviter le déséquilibre du réseau.



CHAPITRE III

Chapitre III : Calcul de l'écoulement de puissance avec insertion de la PD

III.1. Introduction

L'écoulement de puissance dans les réseaux électriques est d'une importance capitale, il sert à déterminer les tensions du réseau de façon à avoir un équilibre entre la génération et la charge. Il nous permet donc de déterminer l'amplitude et l'angle de phase des tensions sur chaque jeu de barres ainsi que les puissances actives et réactives qui transitent d'un jeu de barres à un autre et d'évaluer aussi les pertes de puissances totales dans le réseau.

La modélisation mathématique des systèmes non linéaires à résoudre pour l'étude de la répartition de charges, consiste à faire appel aux outils mathématiques et techniques numériques de calcul de l'écoulement de puissance, à savoir, la méthode itérative de Newton Raphson qui est programmée dans l'environnement MATLAB. Cette méthode est développée en détails dans l'annexe.

Afin de tester le comportement du réseau vis-à-vis d'une intégration des productions décentralisées à base de ressources renouvelables, une simulation numérique sur leur insertion dans un réseau à structure maillée est effectuée. La simulation permet d'établir l'état du réseau, à savoir, les tensions aux jeux de barres, leurs déphasages ainsi que les puissances transitées à travers les lignes, avant et après l'insertion de la PD à un nœud qui constitue une interconnexion entre plusieurs productions centralisées. Les résultats de simulation obtenus et leurs interprétations seront exposés aussi.

III.2. Réseau de transport et d'interconnexion étudié

Le réseau étudié est montré sur la figure (III.1), qui représente un diagramme en ligne simple d'un réseau de transport et d'interconnexion Algérien, de tension 220kV et d'une puissance de court-circuit de 500MVA, situé au Nord-Est du pays, il est constitué de neuf (9) jeux de barres et onze (11) lignes. Il est alimenté en puissance majoritairement par des énergies fossiles (gaz) au niveau des jeux de barres 'Amizour' et 'Jijel' et par l'énergie hydraulique au jeu de barres 'Mansouria'.

Les générateurs sont indiqués par des symboles 'G', tandis que les charges sont représentées par des flèches. En pratique, ces charges sont de grosses sous stations qui dirigent la puissance vers les réseaux de distribution 60kV et 30kV.

Le site de Darguina qui constitue un jeu de barres d'interconnexion entre les centrales de production déjà citées va comprendre l'insertion d'une production décentralisée d'une puissance à caractère intermittent dont le taux d'intégration est pris variable entre 20% à 40%.

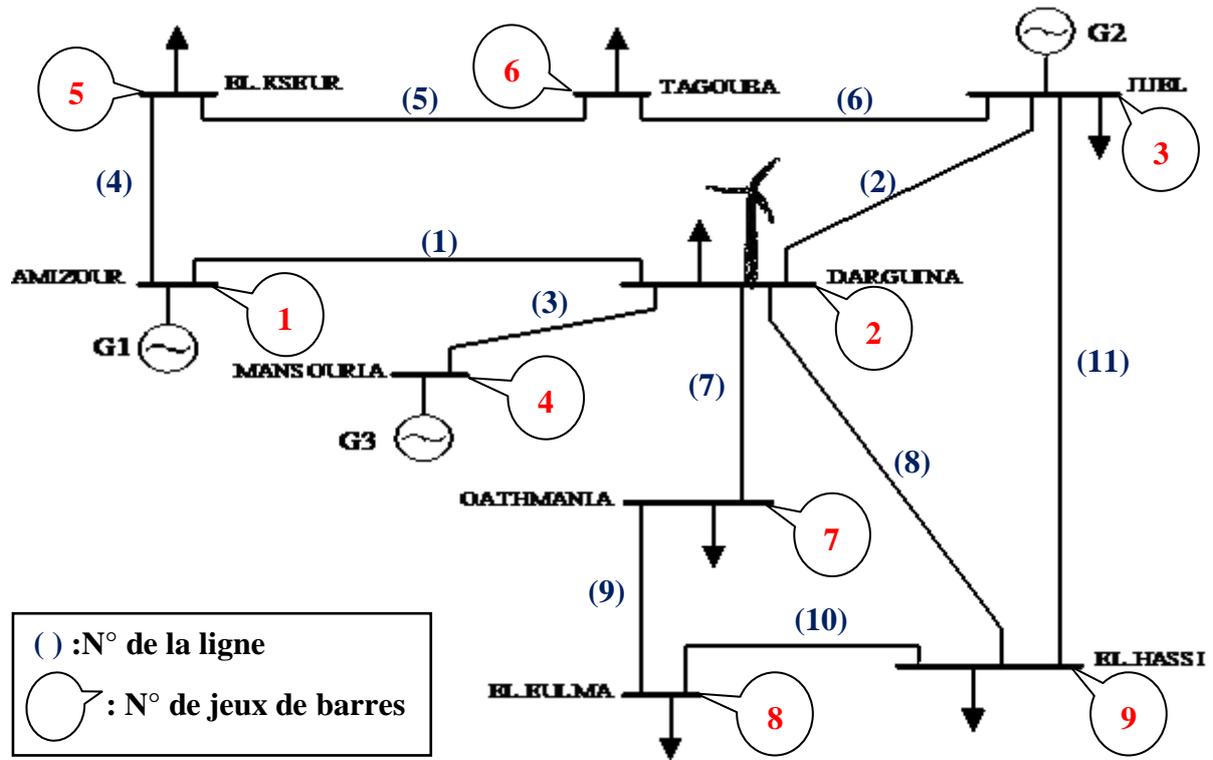


Fig.III.1 : Topologie du réseau électrique étudié

III.2.1. Données du réseau étudié

Les tableaux III.1 et III.2 donnent la nature des jeux de barres ainsi que les caractéristiques des lignes d'interconnexion entre ces jeux de barres [51].

Tab.III.1 : Données des lignes

N° de la ligne	Départ-Arrivée	R (pu)	X (pu)
1	Amizour-Darguina	0.04399	0.43997
2	Darguina-Jijel	0.05013	0.50134
3	Darguina-Mansouria	0.02252	0.22520
4	Amizour-El.Kseur	0.00299	0.02995
5	El.Kseur-Tagouba	0.03392	0.33925
6	Jijel-Tagouba	0.04094	0.40940
7	Darguina-Oathmania	0.10971	1.09710
8	Darguina- El.Hassi	0.05826	0.58264
9	Oathmania-El.Eulma	0.03987	0.39876
10	El.Eulma -El.Hassi	0.02086	0.20867
11	Jijel-El.Hassi	0.07148	0.71487

Tab.III.2 : Données aux jeux de barres

Jeux de barres		Tension	Angle	Générateur		Charge			
N°	Nature	Module (pu)	Phase (rad)	PGen (pu)	QGen (pu)	Pch (pu)	Qch (pu)	Qmin (pu)	Qmax (pu)
1	bilan	1.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.500	0.500
2	charge	1.000	0	0.000	0.000	0.25	0.042	0.000	0.000
3	générateur	1.000	0	0.400	0.000	0.29	0.032	-0.500	0.500
4	générateur	1.000	0	0.080	0.000	0.000	0.000	-0.500	0.500
5	charge	1.000	0	0.000	0.000	0.138	0.034	0.000	0.000
6	charge	1.000	0	0.000	0.000	0.24	0.094	0.000	0.000
7	charge	1.000	0	0.000	0.000	0.27	0.086	0.000	0.000
8	charge	1.000	0	0.000	0.000	0.28	0.064	0.000	0.000
9	charge	1.000	0	0.000	0.000	0.24	0.032	0.000	0.000

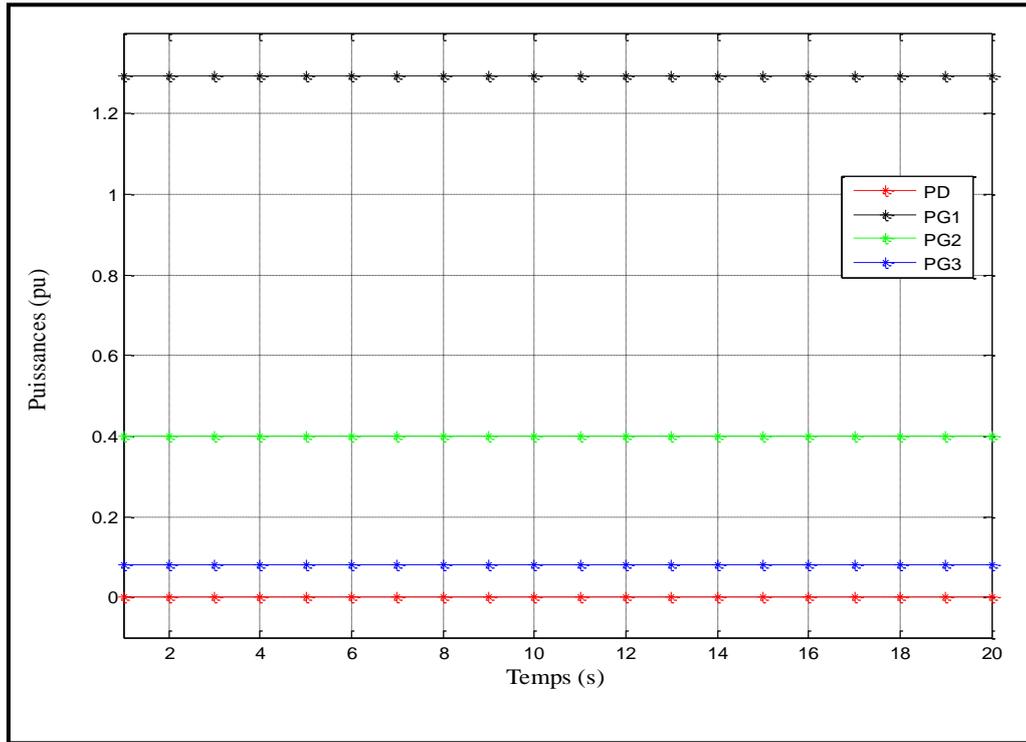
III.2.2. Résultats de simulation

Afin de montrer l'influence de l'insertion de la PD sur le transit de puissances, cette partie du travail est basée sur la simulation du réseau étudié sans et avec la présence de cette PD en premier lieu, les valeurs des puissances actives demandées ont été augmenté de tel sorte à créer la surcharge du nœud bilan. Par la suite, nous proposons de procéder à la compensation série des lignes qui présentent une réactance inductive assez importante et aussi de modifier les caractéristique des lignes dont les pertes actives sont très importantes. Sur ce, cette partie est organisée comme suit :

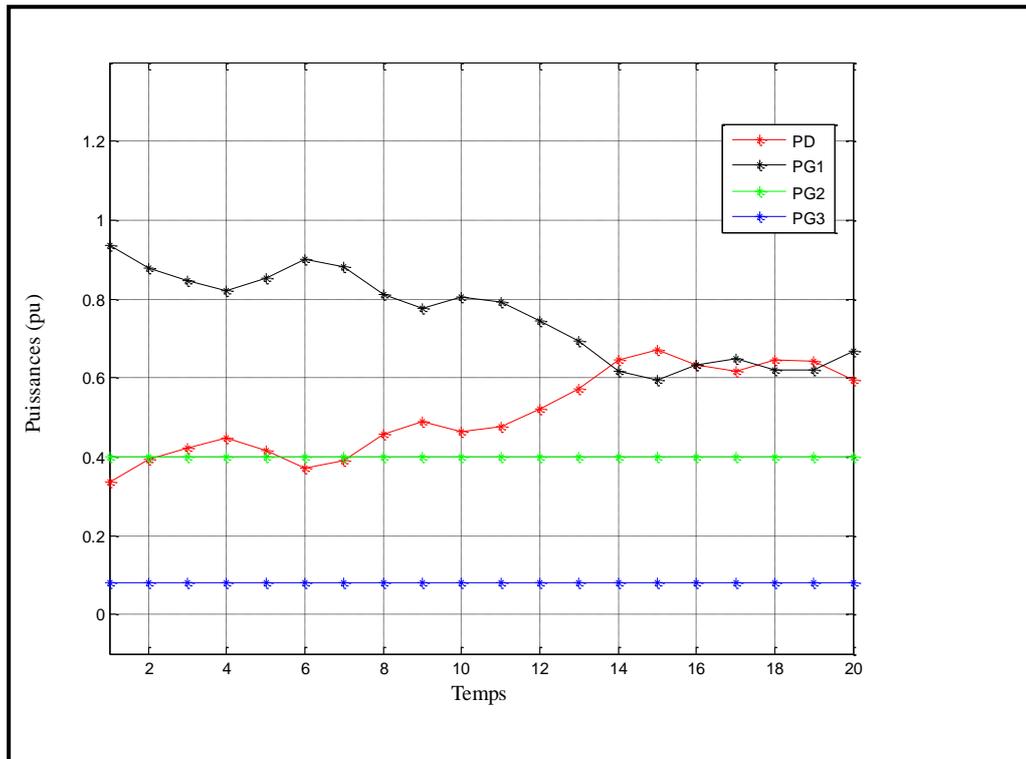
- ✓ Etudier l'état du réseau avant l'insertion de la PD et après son insertion, c'est-à-dire, évaluer l'amplitude des tensions et le transit des puissances actives et réactives ;
- ✓ Evaluer les pertes actives totales dans les lignes sans et avec présence de la PD, dans le cas de la compensation des lignes et dans le cas de la mise en parallèle des lignes.

A. Etude du réseau sans et avec présence de la PD

La topologie du réseau étudié est modifiée par l'insertion d'une production décentralisée au niveau de JB2. Les résultats de simulation sont mentionnés sur les figures (III.2), (III.3), (III.4), (III.5), (III.6), ((III.7), (III.8) et (III.9) pour les puissances délivrées par les générateurs, les tensions aux JB, les puissances transitées et les pertes de puissances.

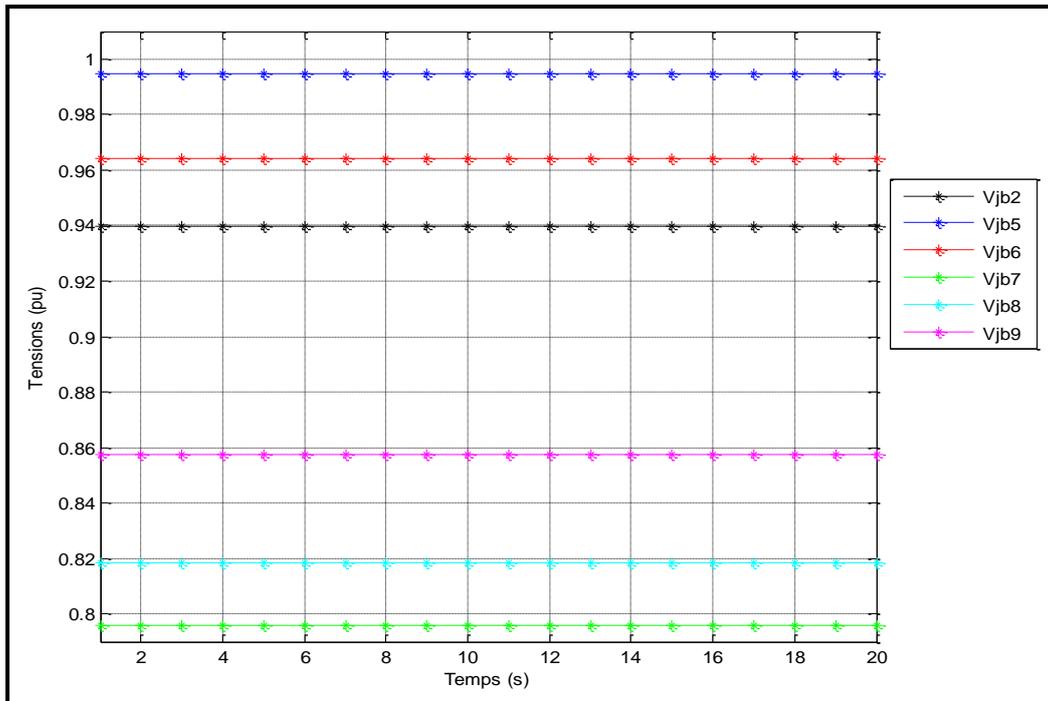


Avant l'insertion de la PD

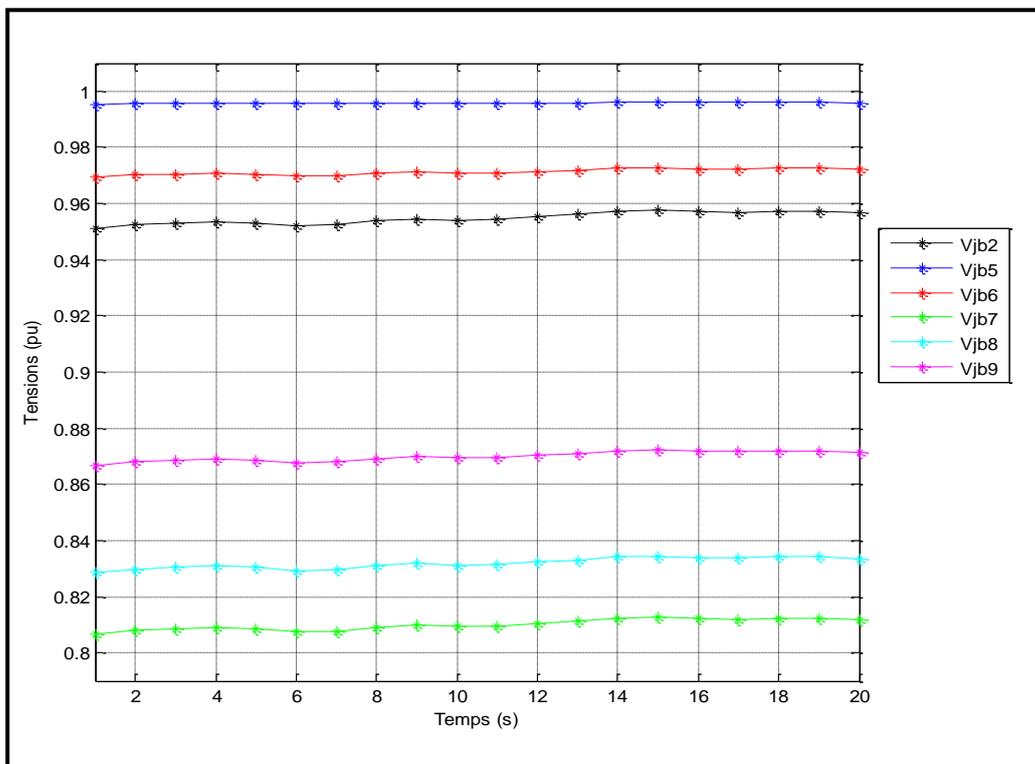


Après l'insertion de la PD

Fig. III.2 : Puissances délivrées par les générateurs et la PD

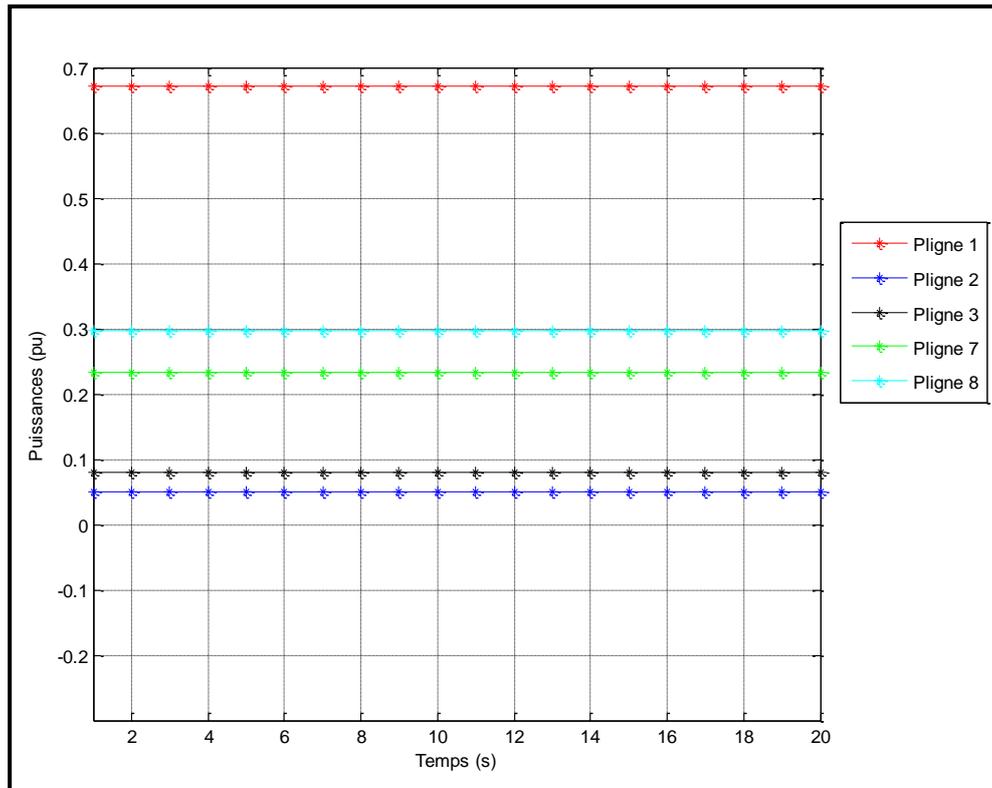


Avant l'insertion de la PD

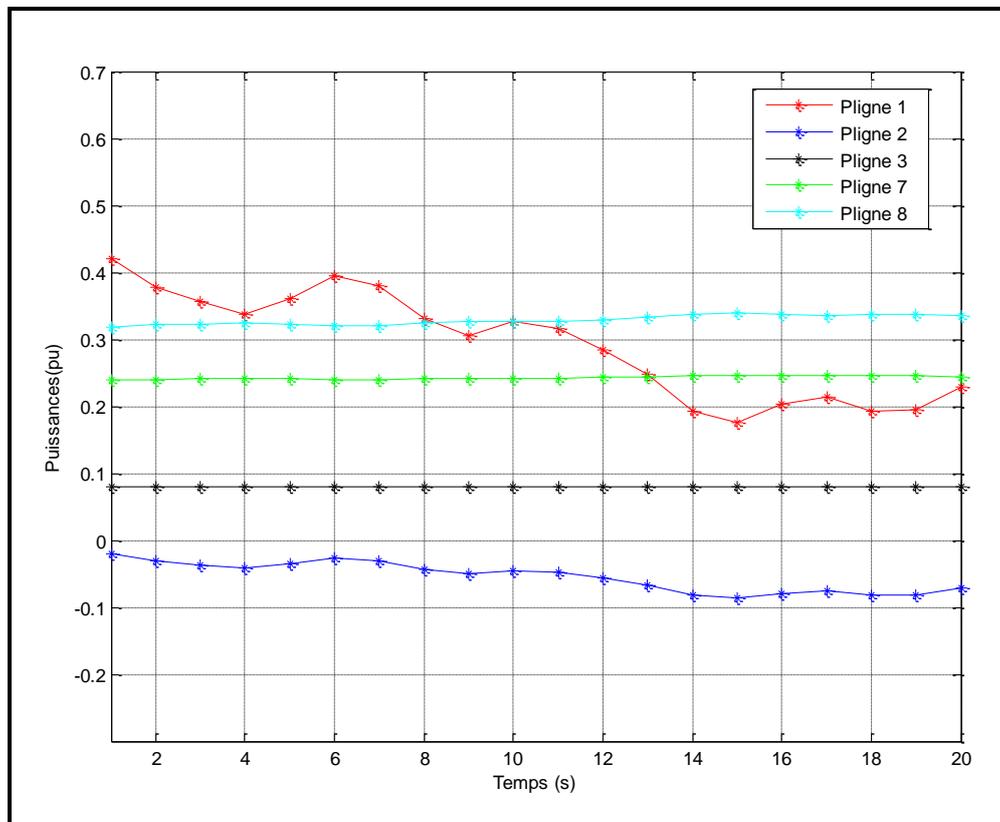


Après l'insertion de la PD

Fig. III.3 : Tensions aux niveaux des jeux de barres

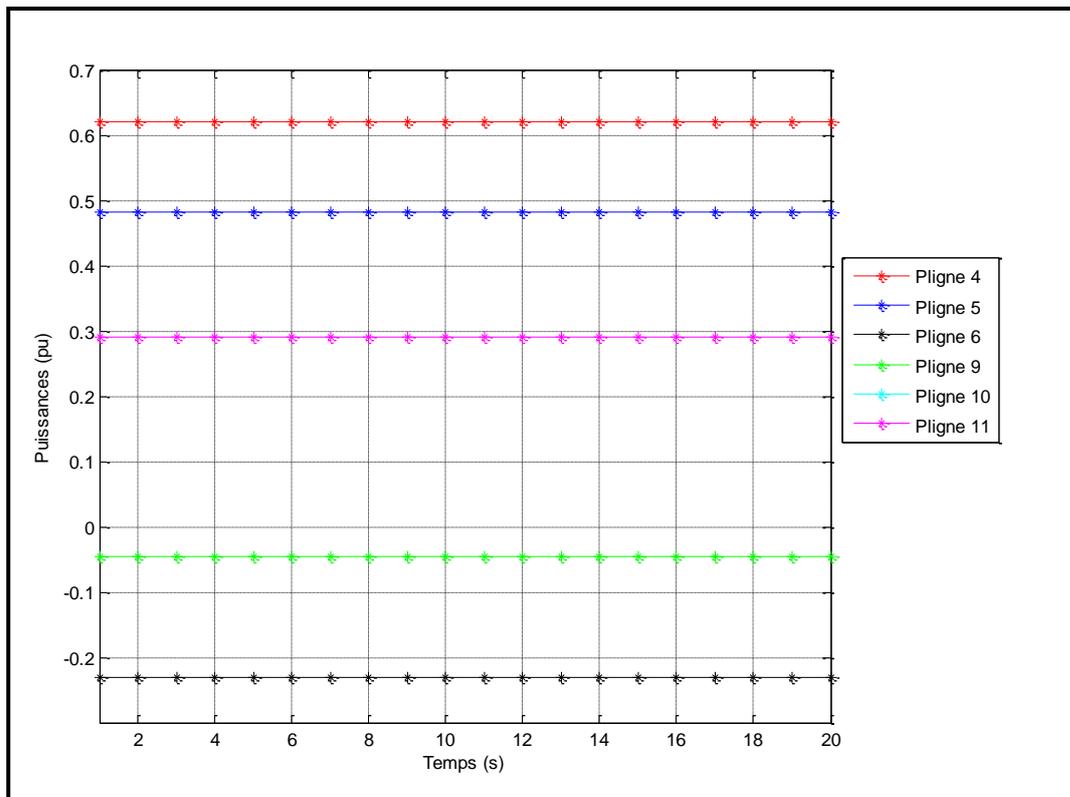


Avant l'insertion de la PD

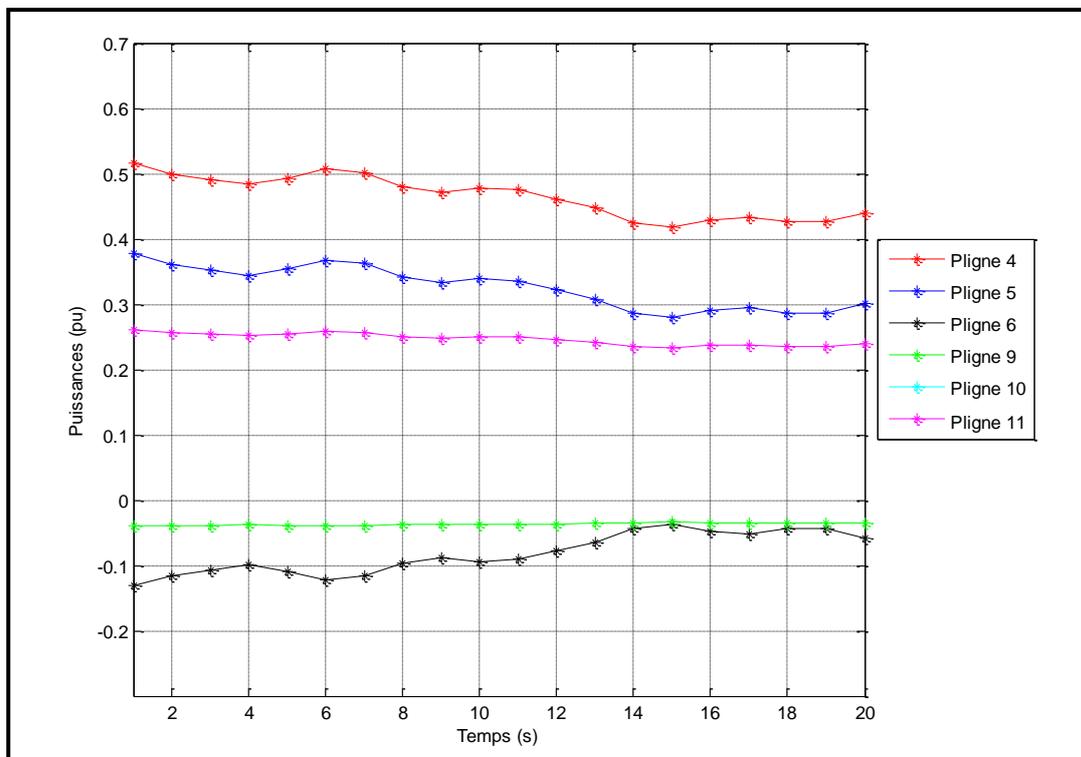


Après l'insertion de la PD

Fig.III.4 : Puissances actives transportées par les lignes reliées au JB Darguina

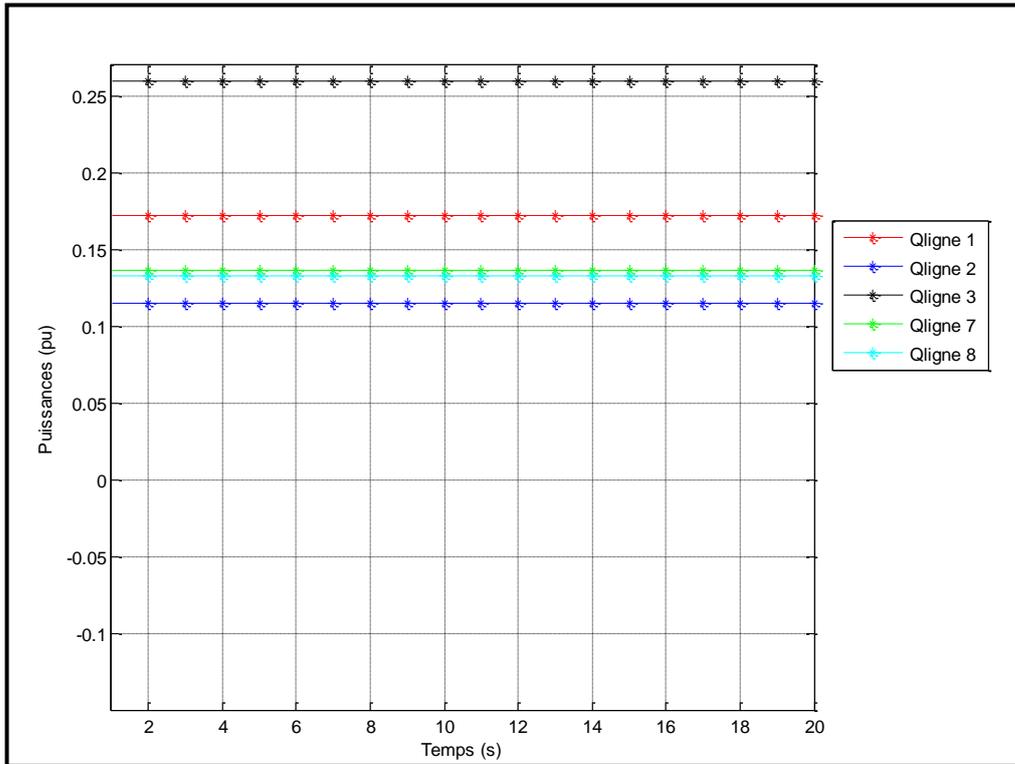


Avant l'insertion de la PD

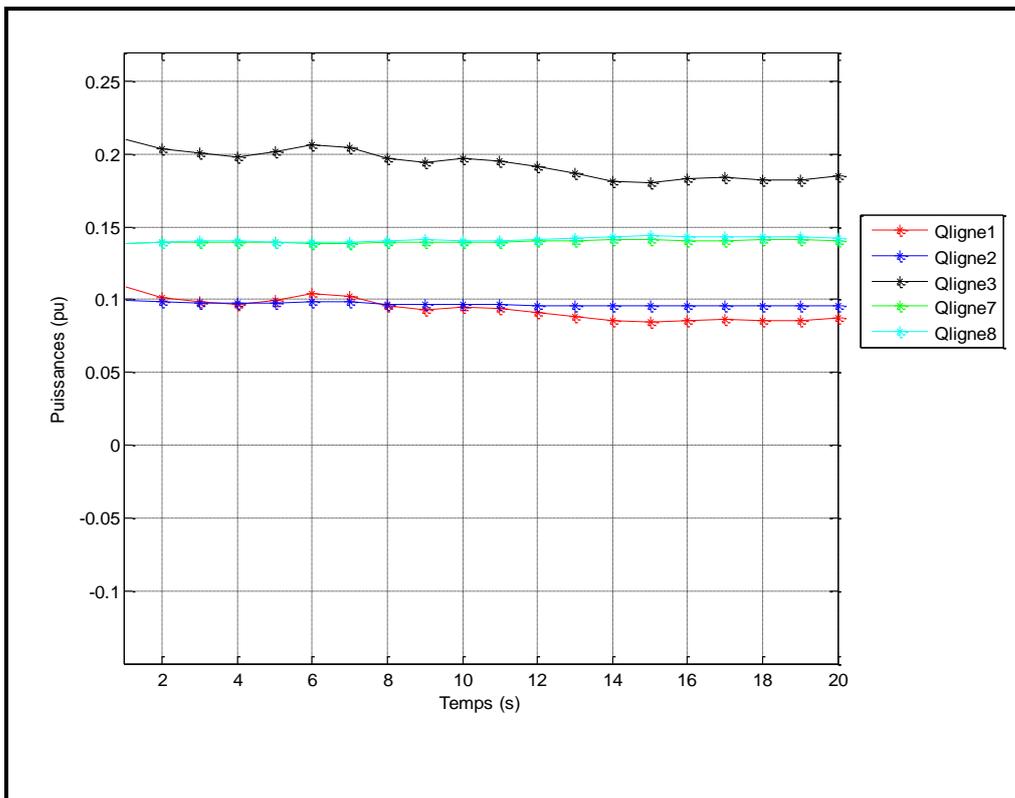


Après l'insertion de la PD

Fig.III.5 : Puissances actives transportées par les lignes non reliées au JB Darguina

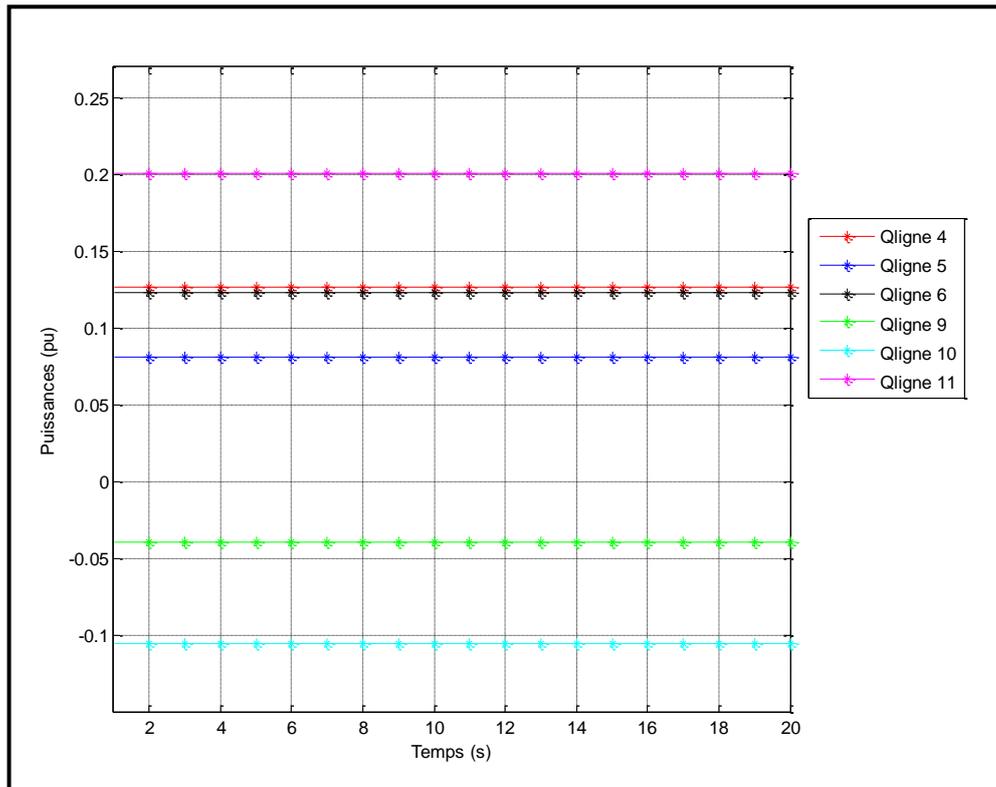


Avant l'insertion de la PD

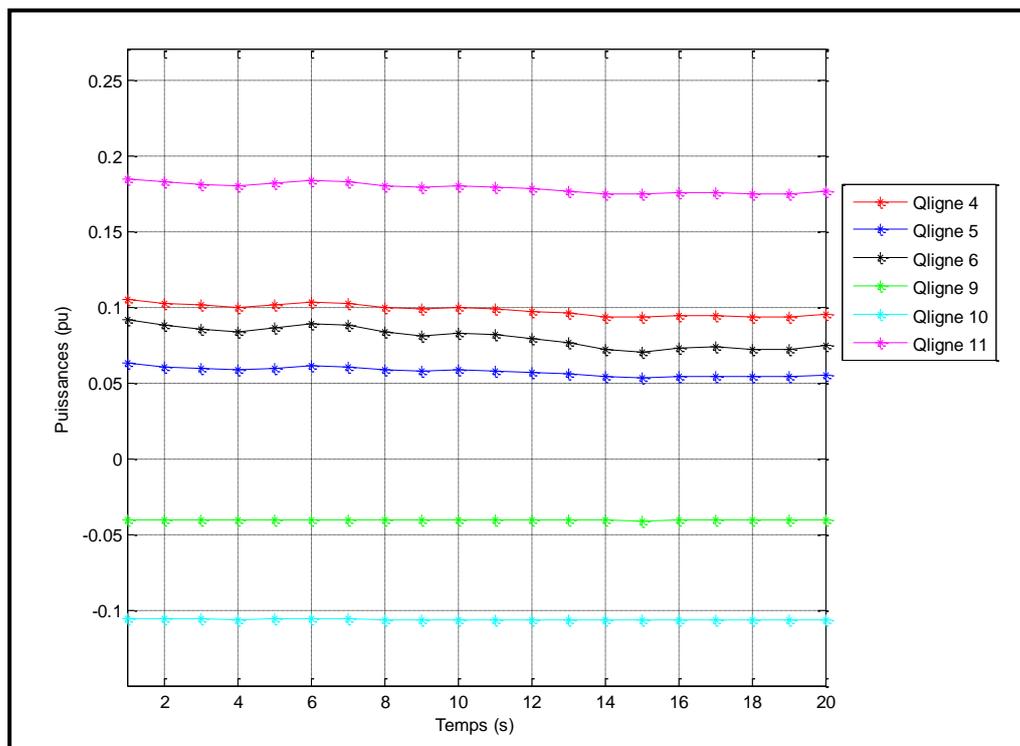


Après l'insertion de la PD

Fig.III.6 : Puissances réactives transportées par les lignes reliées au JB Darguina

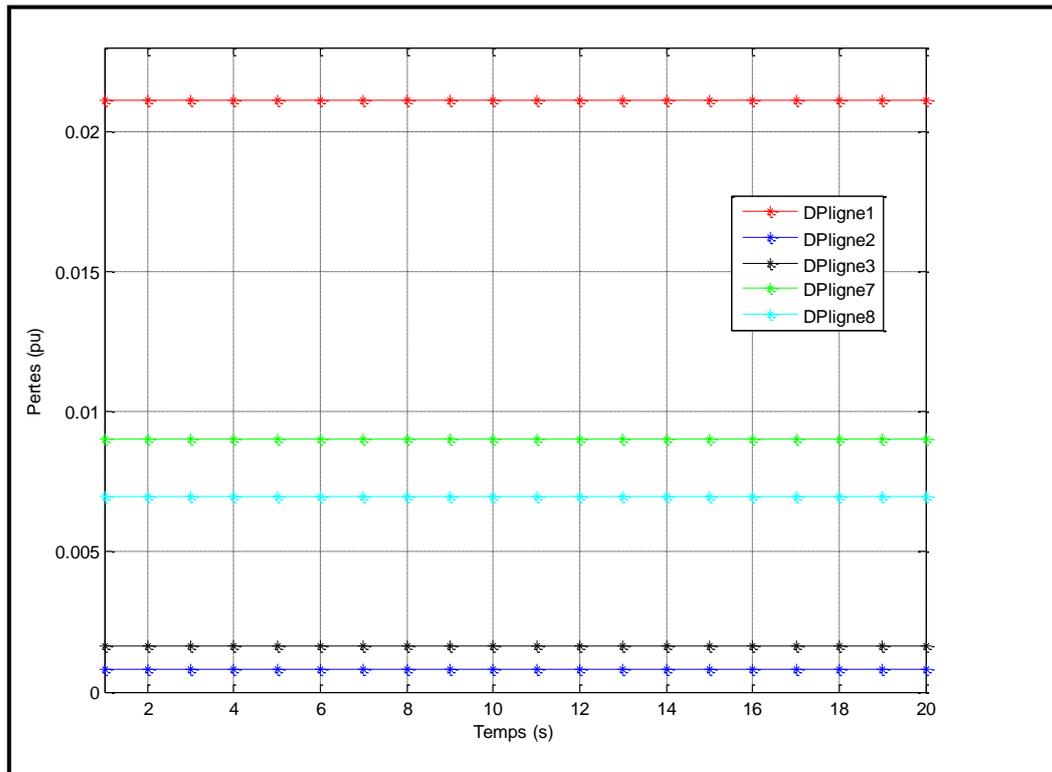


Avant l'insertion de la PD

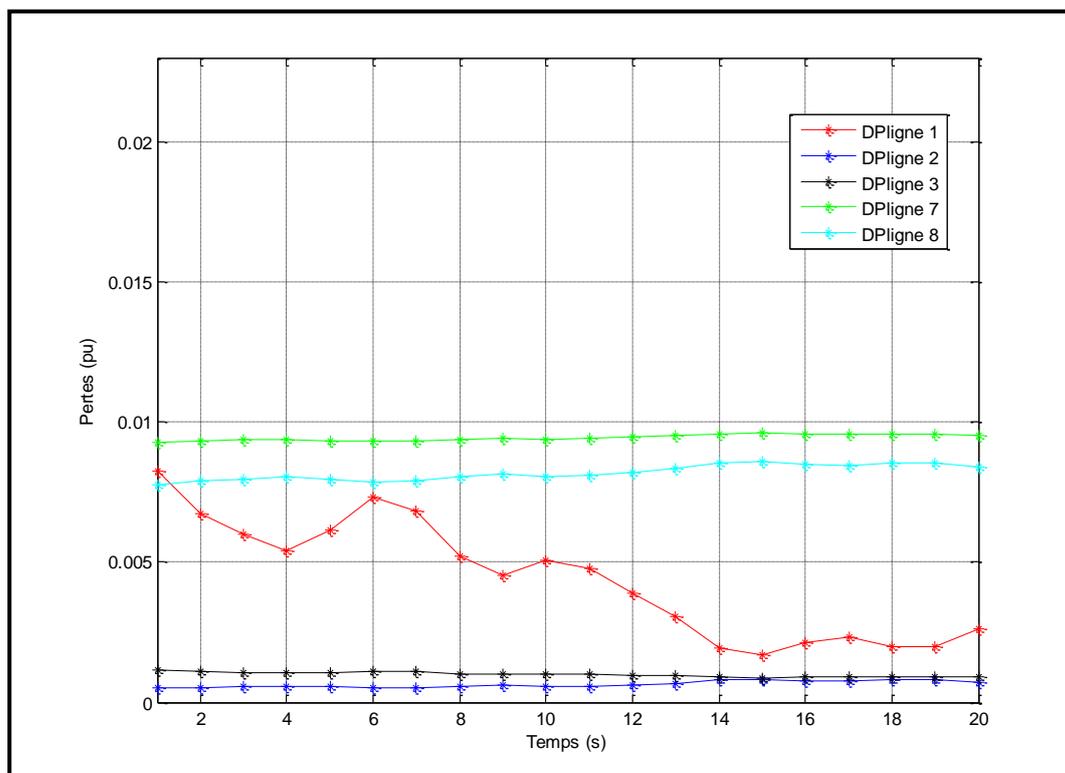


Après l'insertion de la PD

Fig.III.7 : Puissances réactives transportées par les lignes non reliées au JB Darguina

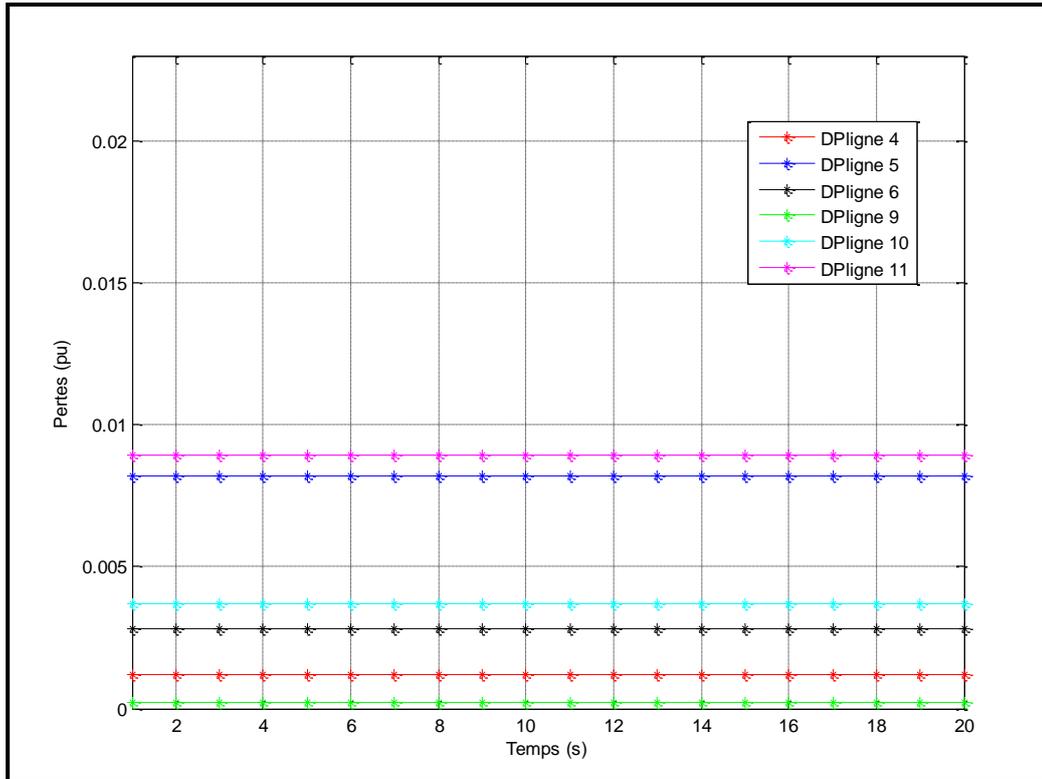


Avant l'insertion de la PD

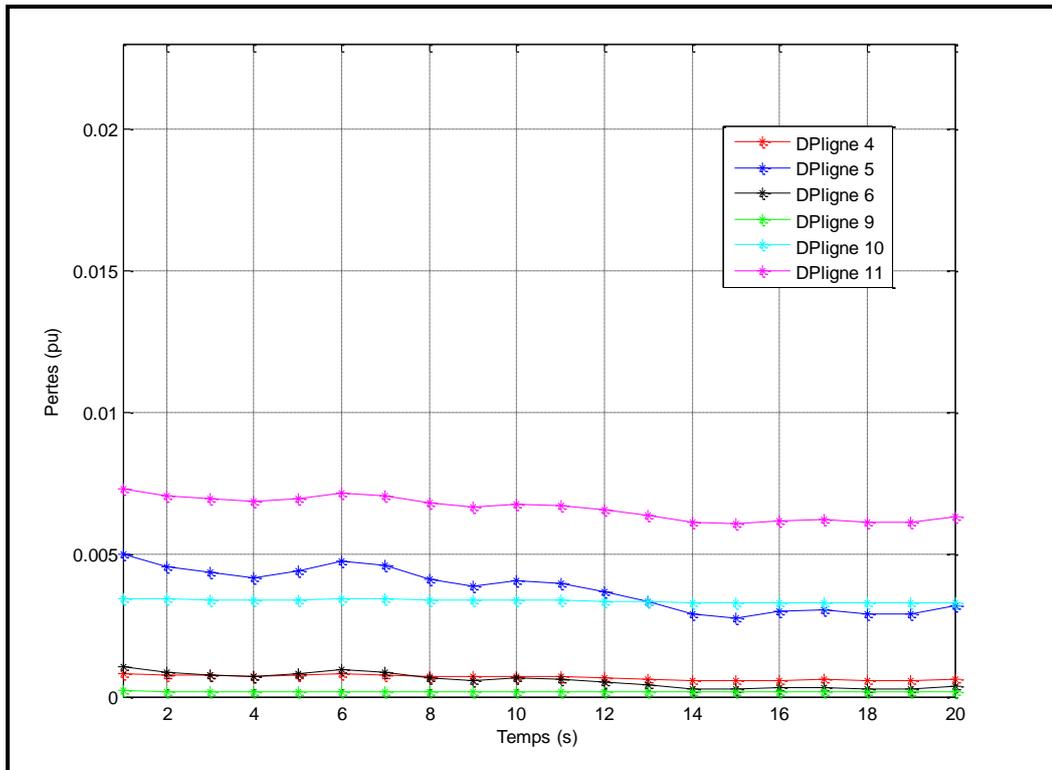


Après l'insertion de la PD

Fig.III.8 : Pertes actives dans les lignes reliées au JB Darguina



Avant l'insertion de la PD



Après l'insertion de la PD

Fig.III.9 : Pertes actives dans les lignes non reliées au JB Darguina

Interprétation des résultats

➤ **Influence sur les générateurs :** Les résultats représentés sur la figure (III.2), montrent l'évolution des puissances générées par le générateur bilan G1 et les deux générateurs G2 et G3 ainsi que l'allure de la puissance fournie par la production décentralisée, avant et après l'intégration de cette dernière au jeu de barres d'interconnexion à Darguina.

Le premier impact à observer, lors de cette insertion, est la réduction dans la puissance délivrée par le générateur G1 (qui est un jeu de barres de référence), car il est soulagé et suit en inverse l'évolution de la puissance fournie par la PD (en fonction du taux d'intégration).

Quand la puissance de la PD augmente le générateur G1 diminue sa production, par contre en inverse, le générateur augmente sa production lorsque la puissance de la PD diminue de tel sorte que la somme totale des puissances générées égale à la somme des puissances consommées, afin de garantir l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie électrique et éviter ainsi les problèmes de congestion des lignes ou la surcharge dans le réseau.

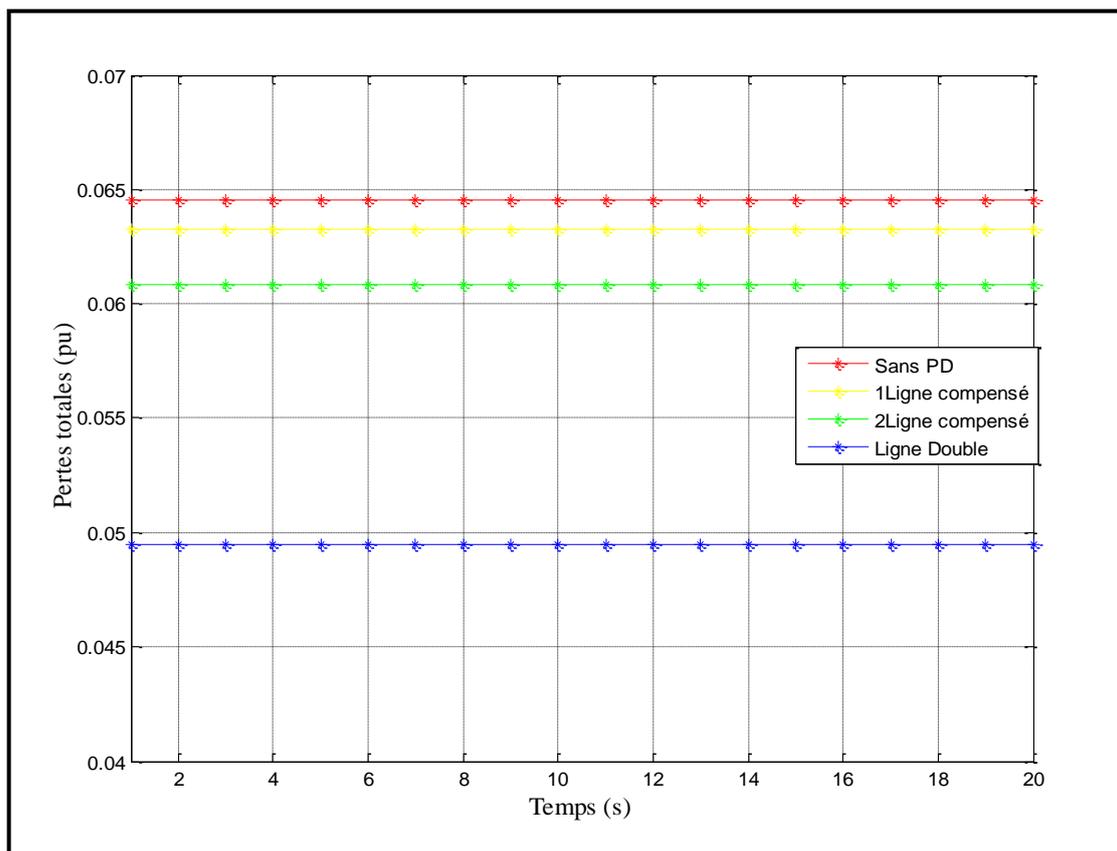
➤ **Influence sur les tensions:** La figure (III.3) illustre les allures de l'amplitude des tensions au niveau des jeux de barres avant et après l'insertion de la PD. En comparant les courbes obtenues, on constate que la présence de la PD dans le réseau a une influence remarquable sur la tension du nœud de connexion, qui subit la plus grande variation, ainsi que sur les nœuds voisins à celui-ci, qui sont également affectés par ces variations. Les tensions aux nœuds générateurs restent constantes car elles sont imposées par le réseau.

➤ **Influence sur les puissances transitées:** Les figures de (III.4) à (III.6) montre l'évolution des puissances actives et réactives transitées dans les lignes avant et après l'insertion de la production décentralisée dans le réseau. Il apparait clair que la présence de cette dernière a permis de réduire la puissance transitée à travers les lignes à partir du jeu de barres de référence et générateur, surtout celle transitées vers le jeu de barres d'interconnexion. Donc on enregistre un soulagement des lignes (de même pour le générateur de référence qui est soulagé), plus le taux d'intégration est élevé, plus le transit de puissances dans les lignes reliées au jeu de barres d'insertion de la PD sera plus faible (les lignes moins chargées).

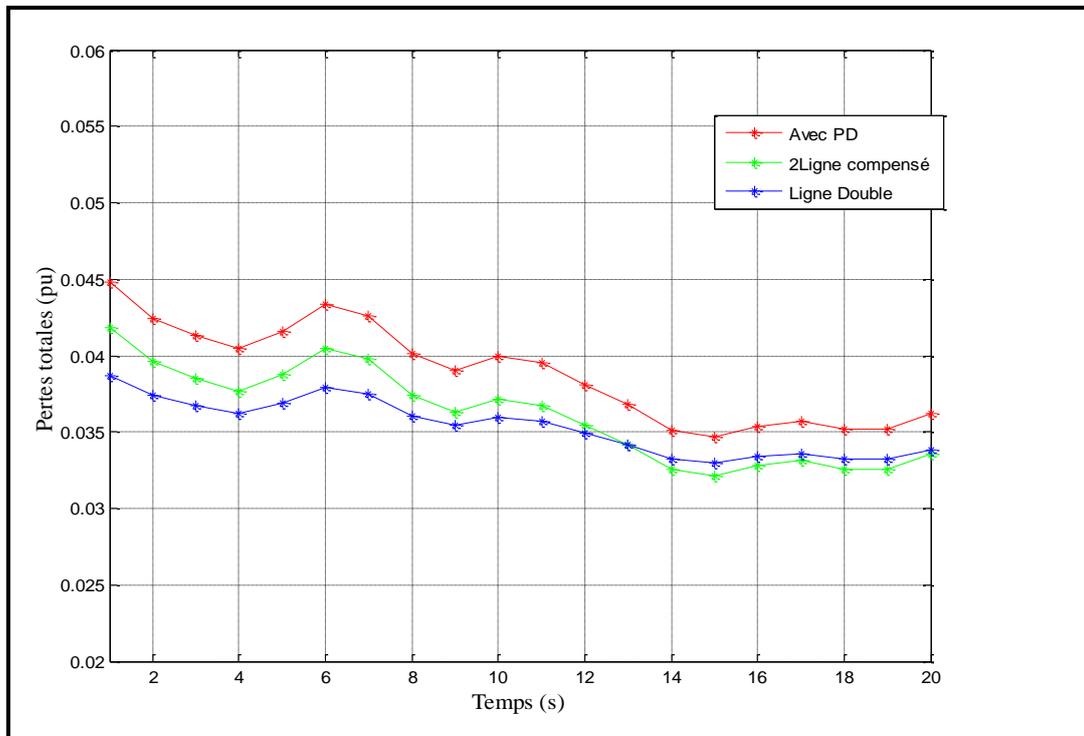
➤ **Influence sur les pertes de puissances :** Une comparaison des pertes de puissances obtenues dans les lignes représentées sur la figure (III.8) montre que les allures des pertes diminuent avec l'augmentation de la puissance active générée par La PD. La plus grande diminution est enregistrée au niveau de la ligne reliant Amizour à Darguina, cela s'explique par le courant transité à travers cette ligne qui devient plus faible.

B. Evaluation des pertes actives totales

Dans cette partie du travail, nous avons procédé à des modifications au niveau des paramètres des lignes qui possèdent une réactance très élevées ou des pertes actives importantes. Des compensations séries de 50% sur l'admittance de la ligne 7 en premier lieu, par la suite de la ligne 11 ont été effectuées. En deuxième lieu, une insertion d'une deuxième ligne en parallèle à celle qui raccorde Amizour et Darguina, car elle représente des pertes de puissances actives les plus élevées dans le réseau. Nous avons évalué les pertes actives totales, avant et après l'insertion de la PD, pour les différents cas cités. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (III.10).



Avant l'insertion de la PD



Après insertion de la PD

Fig.III.10 : Pertes totales pour les différents cas étudiés

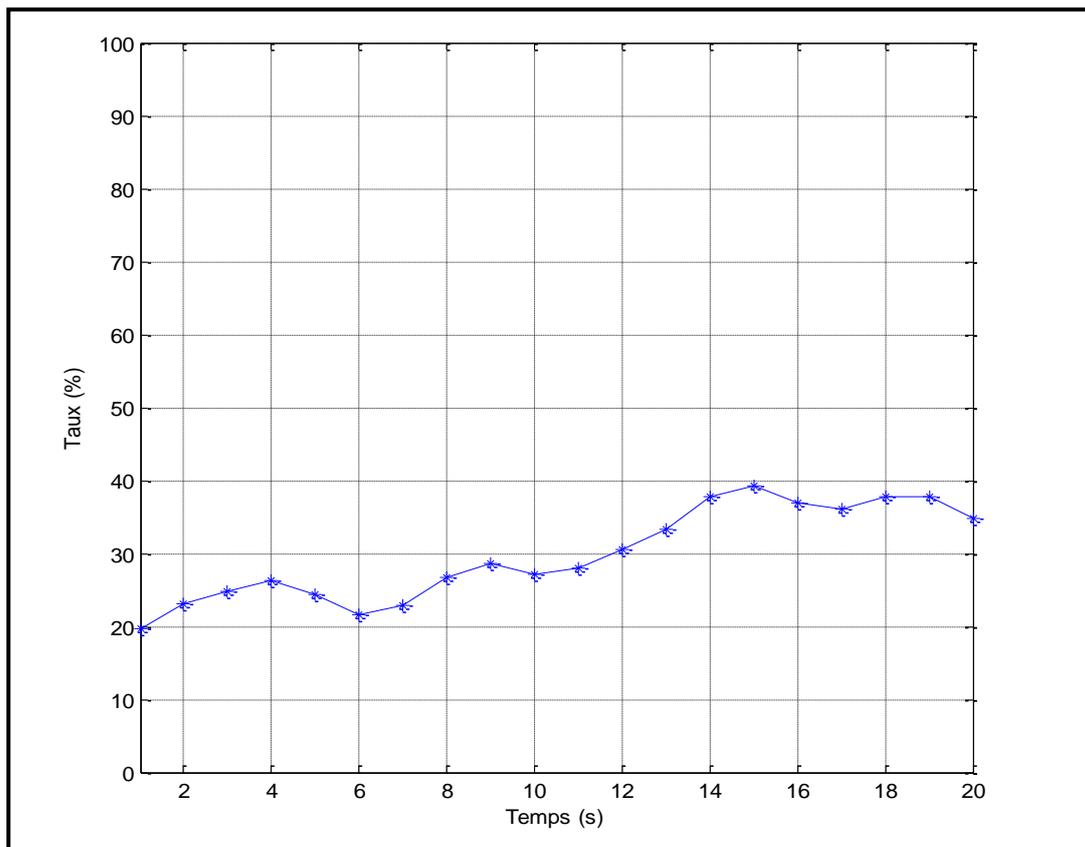


Fig.III.11 : Variation du taux d'intégration

Interprétation des résultats

La figure (III.10) représente l'évolution des pertes avant et après l'insertion de la PD pour les cas étudiés : compensation de la ligne 7, compensation de deux lignes 7 et 11, et enfin, la mise en parallèle de la ligne reliant Amizour à Darguina. Il est bien clair que les pertes actives totales diminuent dans tous les cas traités, la diminution la plus importante est enregistrée dans les cas avec présence de la PD et où la ligne a été mise en parallèle avec celle déjà existante entre Amizour et Darguina.

En comparant les résultats montrés sur la figure (III.10) et la figure (III.11), qui représente l'évolution du taux d'intégration dans le réseau, on remarque que ces pertes diminuent au fur et à mesure que le taux d'intégration augmente. En revanche, au-delà d'une valeur de 35% (équivalente au temps 13s), les pertes ne varient plus et gardent la même valeur, ce qui nous pousse à conclure que le taux optimal pour le réseau maillé que nous avons étudié et de cette valeur limite c'est-à-dire 35%.

III.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué un calcul d'écoulement de puissance dans un réseau maillé, sans et avec présence d'une production décentralisée à base de ressources renouvelables. Ce calcul nous a permis d'évaluer l'état du réseau dans les deux cas, à savoir, évaluer les tensions aux jeux de barres ainsi que les puissances actives et réactives transitées à travers les lignes. Par la suite, nous avons évalué les pertes actives totales pour quatre états du réseau : sans insertion de la PD, avec son insertion et enfin avec modification des paramètres des lignes qui présentaient des pertes actives importantes et cela soit en mettant des lignes en parallèles, soit par la compensation série, ce qui a permis d'obtenir des pertes de plus en plus faibles. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et prometteurs.



**CONCLUSION
GENERALE**

Conclusion générale

Le défi majeur pour les opérateurs du réseau est de maintenir l'équilibre entre la production et la consommation en temps réel. Par conséquent, la production décentralisée intégrée au réseau peut perturber à la fois les lignes conduisant aux charges et les tensions aux jeux de barres. Le fait de combiner cette production décentralisée à base de ressources renouvelables avec les productions classiques permet de fournir de l'énergie à un faible coût marginal et de réduire les pertes actives totales dans le réseau. Cependant, ils doivent toujours avoir de bonnes stratégies pour une meilleure gestion de l'énergie électrique. Les principes de compensation série et de reconfiguration dans le réseau ont été mis en place comme solutions car elles ont permis d'augmenter la capacité de transfert de puissance ainsi que d'améliorer la distribution des transits de puissance dans le réseau en diminuant les pertes actives totales.

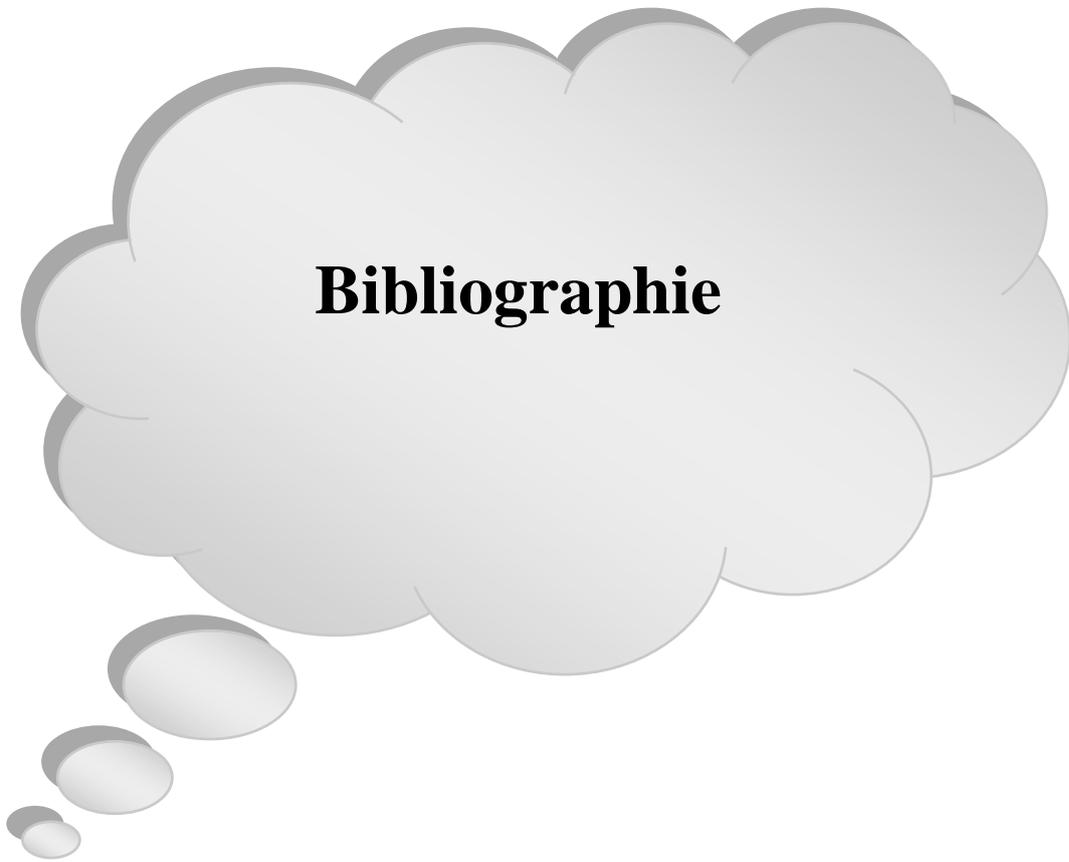
En premier lieu, nous avons présenté des généralités sur les réseaux électriques et leur topologie. On a donné un aperçu sur les services système.

En deuxième lieu, on s'est intéressé à l'intérêt du stockage dans les réseaux électriques pour le traitement du phénomène de congestion des lignes et les dispositifs FACTS qui sont des solutions prometteuses au traitement de plusieurs problèmes, à savoir, la régulation de la tension et le contrôle du flux de puissance.

Le dernier chapitre s'est porté sur la simulation d'un réseau de transport et d'interconnexion Algérien, de 220 kV, à structure maillée et possédant neuf jeux de barres. Les résultats de simulation montrent que la Production Décentralisée placée aux jeux de barres d'interconnexion « Darguina », offre de nombreux avantages tel le soulagement des sources centralisées (le générateur bilan situé à Amizour), amélioration du plan de tension, diminution des pertes actives à travers les lignes ainsi que les pertes actives totales dans le réseau. Nous avons aussi montré qu'en faisant la compensation série et en modifiant les paramètres des lignes en les mettant en parallèles, a permis de diminuer de plus en plus les pertes totales, donc d'augmenter la capacité de transport des lignes.

Pour améliorer mieux ce travail, nous proposons l'insertion des dispositifs FACTS qui sont des compensateurs qui permettent au réseau d'être plus flexible. La compensation série peut être utilisée pour réduire l'impédance des lignes et donc pour augmenter la capacité de transfert de puissance ainsi que pour améliorer la distribution des transits de puissance dans le réseau.

La combinaison des systèmes de stockage avec les productions décentralisées à base de ressources renouvelables permettent de maintenir l'équilibre entre la production et la consommation et donc d'éviter les congestions des lignes, grâce à leur fonction de stockage, tout en limitant les coûts de production lors des pics de consommation.



Bibliographie

A decorative banner with a blue gradient and a ribbon-like shape, containing the word "Bibliographie" in a black, cursive font.

Bibliographie

- [1] J.F. Canard, « Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution », thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2000 ;
- [2] R. Caire, « Gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution », thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2004 ;
- [3] Site Internet: <http://fr.scribd.com/document/160286876/4597291>.
- [4] G. NAUDET et P.REUSS, « Energie, électricité et nucléaire », EDP Sciences, 2008 ;
- [5] Site Internet : www.cre.fr/réseaux/réseaux-publics, «Description générale des réseaux d'électricité», Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) ;
- [6] Site Internet : <https://www.exoco-lmd.com/réseaux-électriques/architectures-des-réseaux-électriques-power-system-design>.
- [7] J.C. Sabonnadière, N. Hadj Saïd, « Lignes et réseau électriques 1 : Lignes d'énergie électrique », Lavoisier, 2007 ;
- [8] P. Kundur, «Power System Stability and Control», McGraw-Hill, 1994;
- [9] Site Internet : <https://www.powerelectrique.com/appareillages-boites-et-conduits/>.
- [10] Site Internet : <https://www.exoco-lmd.com/réseaux-électriques/cours-réseau-électrique>.
- [11] B. Berseneff, « Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur », Thèse de doctorat de L'université de Grenoble, 2010 ;
- [12] J.C. SABONNADIERRE, N. HADJ-SAÏD, « ligne et réseaux électrique », Lavoisier, 2003 ;
- [13] N. Lahaçani AOUZELLAG, « Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens », Thèse de doctorat de l'université A.MIRA de Bejaïa, 2011 ;
- [14] I. Noui, «Réduction des pertes dans les réseaux électriques par la compensation série TCSC », mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2015 ;
- [15] O. Richardot « Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée » Thèse de doctorat INPG, 2000 ;
- [16] N. Lahaçani AOUZELLAG, « Intégration des ressources renouvelables aux réseaux électrique », cours MASTER 2, Dpt Electrotechnique, Université A. Mira, Bejaia, 2019/2020 ;

- [17] A. BOUZIDI, "conduite des réseaux électrique", cours MASTER 2, Dpt Electrotechnique, Université A. Mira, Bejaia, 2019/2020 ;
- [18] Commission AMPERE, « évaluation de la production décentralisée effets sur le réseau » Rapport de synthèse de la commission, Octobre 2000 ;
- [19] K. Foued << Etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau MT >>, Mémoire de magister, Université de Mentouri de Constantine, 2010.
- [20] G. RAMI « contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution », Thèse de doctorat, INPG, 2006 ;
- [21] Site Internet : <https://www.capital.fr/auto/automobile-la-pile-a-combustible-marche-prometteur-a-long-terme->
- [22] Site Internet : <http://infoenergie-auvergnerhonealpes.fr/l-essentiel-sur-energie/produire-de-l-electricite.>
- [23] Site Internet : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/la-cogeneration.>
- [24] A. ATTAR, « Les énergies nouvelles ou renouvelables », ancien PDG de Sonatrach et ancien ministre des ressources en eau thèse de doctorat, Alegria 2012;
- [25] Site Internet : <https://www.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/comment-fonctionne-une-centrale-hydroelectrique.>
- [26] Site Internet: <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/principe-fonctionnement-eolienne.>
- [27] Site Internet: <https://eolienne.ooreka.fr/comprendre.>
- [28] Site Internet: <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/coupler-stockage-de-co2-et-geothermie-33438.>
- [29] M. Angel, F. Garcia, « Interaction des réseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisée », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2008 ;
- [30] Vincent MANZO, « Traitement des congestions dans les réseaux de transport et dans un environnement dérégulé » 2009 ;
- [31] Site Internet : <https://www.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement1-2013.>
- [32] T.T. PAHAM, « Influences de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissance », Thèse doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2006 ;

- [33] K. Sun, D.Z. Zheng, Q. Lu. « Splitting Strategies for Islanding Operation of Large Scale Power System Using OBDD - Based Methods», IEEE Transactions on Power System, Vol.18, No.2, 2003;
- [34] Arrêté et ses annexes: « Prescriptions techniques de conception et fonctionnement pour le raccordement a un réseau public de distribution d'une installation de production d'énergie électrique ». Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, France, Mars 17, 2003. <http://www.legifrance.gouv.fr>.
- [35] G. Rami « contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution», Thèse de doctorat INPG, 2006 ;
- [36] M. Eremia, J. Treca, A. Germond, "Réseaux électriques, aspects actuels", Editura Tehnica, Bucarest, Roumanie, 2000 ;
- [37] R. Caire. «Gestion et Stratégies de conduite de la Production Décentralisée», thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004 ;
- [38] L. FRERIS, D. INFIELD, « Les énergies renouvelables pour la production d'électricité », Edition : HERMES, 2009 ;
- [39] T.T.PHAM, « Influences De La Production Décentralisée Sur La Gestion des Infrastructures Critiques Des Réseaux De Puissance », thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006 ;
- [40] Thi Thu Hà Pham. INFLUENCES DE LA PRODUCTION DECENTRALISEE SUR LA GESTION DES INFRASTRUCTURES CRITIQUES DES RESEAUX DE PUISSANCE. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006. Français ;
- [41] N.HADJSAID, « Les réseaux électriques de distribution : de la production décentralisée aux Smart Grids », © 2020 LAVOISIER S.A.S ,2010 ;
- [42] Sellé Touré. «Optimisation des réseaux : réseau actif et flexible». Energie électrique. Université de Grenoble, 2014. Français ;
- [43] J. C. SABONNADIÈRE, « Nouvelles technologies de l'énergie 1 : les énergies renouvelables », Edition : LAVOISIER, 2006 ;
- [44] F.SALHA, « Micro-réseaux Îlotables : Etude et Coordination des Protections des Générateurs et du Réseau », Thèse doctorat, Ecole centrale de Lille, 2010 ;
- [45] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, «Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems», IEEE Press, A JOHN WILEY & SONS, INC. PUBLICATION 2002;
- [46] F. HAMOUDI, « Réseaux de Transport et de Distribution Electrique», Cours master 1, université de Bejaia, 2017 ;

[47] M. TOUAFEK, M. YAAKOUB, « Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par un contrôle neuro-flou des systèmes FACTS », Mémoire de magister, université Ferhat Abbas Sétif, 2012 ;

[48] R. BENABID, « Optimisation Multi-objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques », Mémoire de magister, l'université de Jijel, 2007 ;

[49] M. MEZAACHE, « Analyse et traitement de la qualité d'énergie électrique en utilisant des dispositifs de contrôle des réseaux électriques à UPFC dans le cas de la stabilité de la tension » Mémoire de magister, université de Batna, 2011 ;

[50] Site Internet : <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage-technologies>.

[51] Guide SONELGAZ (SPE Amizour),2015.



ANNEXES

✚ Méthode de Newton Raphson pour le calcul de l'écoulement de puissance

Soit le système a deux jeux de barres 'JB' représenté sur la figure A.1

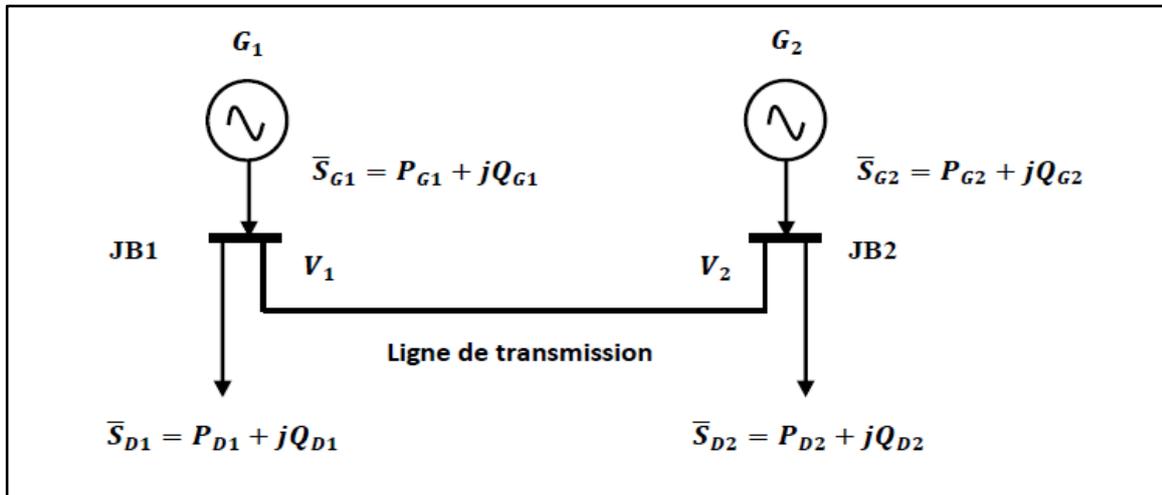


Fig A.1: Système électrique à deux jeux de barres

On combine les puissances générées et demandées à chaque jeu de barre pour obtenir une puissance nette S , définie comme la différence entre la production et la consommation de puissance du jeu de barre.

Pour le JB 1 :

$$\bar{S}_1 = P_1 + jQ_1 \quad (\text{A-1})$$

Tel que:

$$P_1 = P_{G1} - P_{D1} \quad (\text{A-2})$$

$$Q_1 = P_{G1} - Q_{D1} \quad (\text{A-3})$$

D'où,

$$\bar{S}_1 = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \quad (\text{A-4})$$

Pour le JB 2:

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 \quad (\text{A-5})$$

Avec,

$$P_2 = P_{G2} - P_{D2} \quad (\text{A-6})$$

$$Q_2 = Q_{G2} - Q_{D2} \quad (\text{A-7})$$

D'où,

$$\bar{S}_2 = (P_{G2} - P_{D2}) + j(Q_{G2} - Q_{D2}) \quad (\text{A-8})$$

D'une manière générale:

$$\bar{S}_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \quad (\text{A-9})$$

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (\text{A-10})$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (\text{A-11})$$

Avec,

P_G, Q_G : Puissances actives et réactives générées.

P_D, Q_D : Puissances actives et réactives demandées.

P_i, Q_i : Puissances actives et réactives nettes.

La puissance apparente (S) à l'accès (i) est donnée par la relation :

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^* \text{ Pour } i=1, n \quad (\text{A-12})$$

$$\bar{S}_i^* = P_i - jQ_i = \bar{V}_i^* \bar{I}_i \quad (\text{A-13})$$

Alors,

$$\bar{S}_i^* = \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (\text{A-14})$$

On coordonnées polaires:

$$\bar{V}_i = |V_i| e^{j\theta_i} \quad (\text{A-15})$$

$$\bar{V}_j = |V_j| e^{j\theta_j} \quad (\text{A-16})$$

$$\bar{Y}_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\Psi_{ij}} \quad (\text{A-17})$$

Donc:

$$\bar{S}_i^* = P_i - jQ_i = \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot e^{(\Psi_{ij} - \theta_i + \theta_j)} \quad (\text{A-18})$$

D'où:

$$P_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\Psi_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad (\text{A-19})$$

$$Q_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\Psi_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad (\text{A-20})$$

Les relations (III-18), (III-19), (III-20) représentent les équations de calcul de l'écoulement de puissance.

Méthodes de calcul du transit de puissance

Le problème de calcul du transit de puissance consiste à résoudre un système de (2n) équations algébriques non linéaires pour lesquelles il n'existe, aucune solution générale, à (n)

accès, d'où la nécessité d'utilisation des techniques de calcul numérique adoptées pour les résoudre.

Au cours des années plusieurs méthodes numériques sont utilisées pour le calcul d'écoulement de puissance ont vu le jour (figure A.2). Actuellement, on reconnaît deux méthodes très utilisées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance ces deux méthodes sont :

- ▶ La méthode de Newton-Raphson (N.R)
- ▶ La méthode de Gauss-Seidel (G.S)

Dans notre travail on utilisera la méthode de Newton-Raphson qui sera définie par la suite :

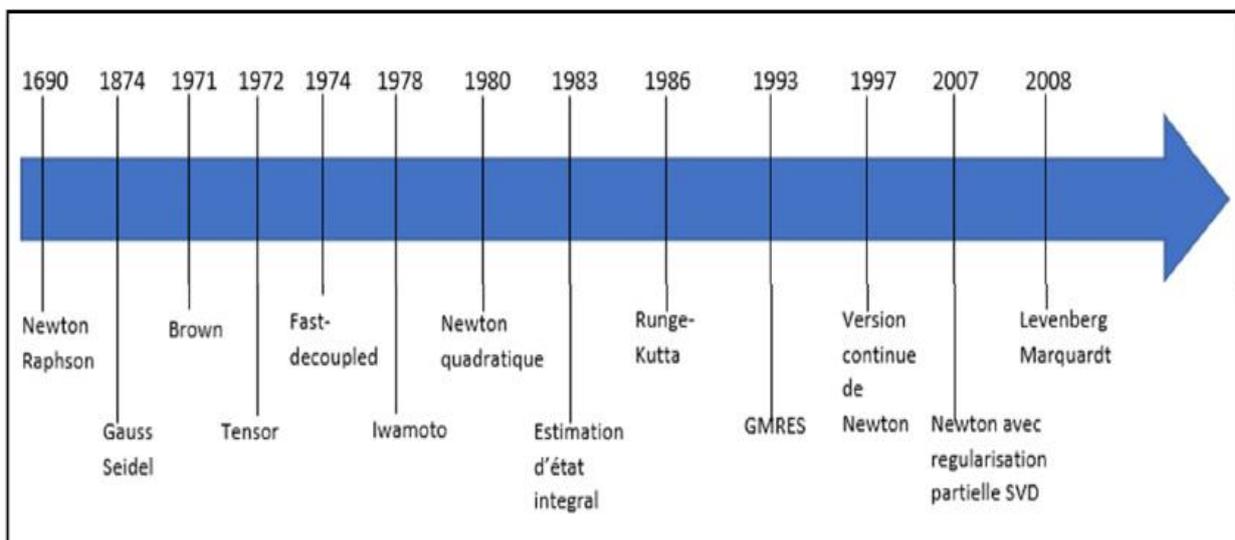


Fig. A.2: Évolution des méthodes de l'écoulement de puissance

✚ Méthode de Newton-Raphson

Cette méthode consomme plus de temps de calcul par itération que celle de Gauss-Seidel, en revanche elle demande moins d'itération. Par conséquent elle est plus rapide surtout pour les réseaux de grande dimension.

Le calcul des tensions aux différents accès peut s'effectuer à l'aide d'un système d'équations non linéaires exprimant les puissances actives et réactives en fonction des tensions.

La méthode de Newton-Raphson à plusieurs variantes selon qu'on l'exprime les éléments de la matrice nodale et tensions aux accès en coordonnées cartésiennes, polaires ou hybrides.

A. forme générale

On a:

$$I = [Y_{bus}] * [V] \tag{A-21}$$

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (\text{A-22})$$

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^* \quad (\text{A-23})$$

$$\bar{S}_i = \bar{V}_i \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^* \bar{V}_j \quad (\text{A-24})$$

B. Forme polaire

$$\bar{V}_i = |V_i| e^{j\theta_i} \quad (\text{A-25})$$

$$\bar{V}_j = |V_j| e^{j\theta_j} \quad (\text{A-26})$$

$$\bar{Y}_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\Psi_{ij}} \quad (\text{A-27})$$

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{V}_i \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^* \bar{V}_j = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot e^{j(\theta_i - \Psi_{ij} - \theta_j)} \quad (\text{A-28})$$

D'où,

$$\begin{cases} P_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\theta_i - \Psi_{ij} - \theta_j) \\ Q_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\theta_i - \Psi_{ij} - \theta_j) \end{cases} \quad \text{Pour } i=1, n \quad (\text{A-29})$$

C. Forme cartésienne

On a:

$$\bar{V}_i = e_i + jf_i \quad (\text{A-30})$$

$$\bar{V}_j = e_j + jf_j \quad (\text{A-31})$$

$$\bar{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (\text{A-32})$$

$$P_i - Q_i = \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (\text{A-33})$$

D'où,

$$\begin{cases} P_i = e_i \cdot \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \cdot \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ Q_i = f_i \cdot \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \cdot \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \end{cases} \quad (\text{A-34})$$

D. Forme hybride

On a:

$$\bar{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (\text{A-35})$$

$$\bar{V}_i = |V_i| e^{j\theta_i} \quad (\text{A-36})$$

$$\bar{V}_j = |V_j| e^{j\theta_j} \quad (\text{A-37})$$

$$\bar{S}_i^* = P_i - jQ_i = \bar{V}_i^* \cdot \bar{I}_i = \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (\text{A-38})$$

Remplaçant les expressions (A-35), (A-36), (A-37) dans (A-38), on aura:

$$\begin{cases} P_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)] \\ Q_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j)] \end{cases} \quad (A-39)$$

➤ **Calcul de l'écoulement de puissance par la forme hybride**

D'après la forme hybride donnée par la relation (A-39), on pose:

$$P_i = F_{ip} = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (A-40)$$

$$Q_i = F_{iq} = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (A-41)$$

Avec :

F_{ip} et F_{iq} sont des fonctions de tension et de phase.

Après développement de F_{ip} et F_{iq} en série de TAYLOR autour de la première approximation et l'élimination des éléments d'ordre supérieur on aura les deux fonctions P_i et Q_i sous la forme suivante :

$$\begin{cases} P_i = F_{ip}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \theta_1}\right)^{(0)} \cdot \Delta\theta_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \theta_n}\right)^{(0)} \cdot \Delta\theta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_1|}\right)^{(0)} \cdot \Delta V_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \cdot \Delta V_n^{(0)} \\ Q_i = F_{iq}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \theta_1}\right)^{(0)} \cdot \Delta\theta_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \theta_n}\right)^{(0)} \cdot \Delta\theta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_1|}\right)^{(0)} \cdot \Delta V_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \cdot \Delta V_n^{(0)} \end{cases} \quad (A-42)$$

Se rappelant que la barre de référence a son amplitude et sa phase connues, le développement doit donner $2(n-1)$ équations linéaires.

Sous forme matricielle on a :

$$\begin{bmatrix} P_2 - F_{2p}^{(0)} \\ \vdots \\ P_n - F_{np}^{(0)} \\ Q_2 - F_{2q}^{(0)} \\ \vdots \\ Q_n - F_{nq}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial F_{2p}}{\partial \theta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{2p}}{\partial \theta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial F_{2p}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{2p}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & & \ddots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial F_{np}}{\partial \theta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{np}}{\partial \theta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial F_{np}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{np}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial F_{2q}}{\partial \theta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{2q}}{\partial \theta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial F_{2q}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{2q}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial F_{nq}}{\partial \theta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{nq}}{\partial \theta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial F_{nq}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{nq}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta\theta_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta\theta_n^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (A-43)$$

$$\text{Avec: } \begin{bmatrix} P_2 - F_{2p}^{(0)} \\ \vdots \\ P_n - F_{np}^{(0)} \\ Q_2 - F_{2q}^{(0)} \\ \vdots \\ Q_n - F_{nq}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{A-44})$$

On peut écrire le système comme suit:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] * \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} = [J]^{-1^{(0)}} * \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{A-45})$$

On rappelle que:

$$\Delta \theta^{(k)} = \theta^{(k+1)} - \theta^{(k)}$$

Alors,

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} + \Delta \theta^{(k)} \quad (\text{A-46})$$

$$\text{Et que: } \Delta |V|^{(k)} = |V|^{(k+1)} - |V|^{(k)}$$

Alors,

$$|V|^{(k+1)} = |V|^{(k)} + \Delta |V|^{(k)} \quad (\text{A-47})$$

Remplaçant (A-46) et A-47) dans (A-45), on aura:

$$\begin{bmatrix} \theta^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + [J^{(k)}]^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{A-48})$$

D'une manière générale :

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = [J]^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (\text{A-49})$$

Avec, [J]: Matrice Jacobien exprimée comme :

$$[J] = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$$

Avec, J_1, J_2, J_3 et J_4 : Sont les sous matrices de la matrice Jacobienne, où :

$$J_1 = \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad J_2 = \frac{\partial P}{\partial |V|} \quad J_3 = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \quad J_4 = \frac{\partial Q}{\partial |V|} \quad (\text{A-50})$$

Détermination des éléments du Jacobien

On va dériver les équations de puissance active et réactive par rapport à θ et $|V|$, on aura :

a) **Eléments de J_1 :**

- **Eléments de la diagonale :**

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot [-G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (A-51)$$

- **Eléments hors de la diagonale :**

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (A-52)$$

b) **Eléments de J_2 :**

- **Eléments de la diagonale :**

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = \sum_{j=1}^n |V_j| \cdot [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (A-53)$$

- **Eléments hors de la diagonale :**

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (A-54)$$

c) **Eléments de J_3 :**

- **Eléments de la diagonale :**

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (A-55)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = - \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (A-56)$$

d) **Eléments de J_4 :**

- **Eléments de la diagonale :**

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = \sum_{j=1}^n |V_j| \cdot [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (A-57)$$

- **Eléments hors de la diagonale :**

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (A-58)$$

Pour les accès (P, |V|) où le module de la tension est spécifié et la puissance réactive est inconnue. Les équations de ΔQ dans les systèmes d'équations précédents doivent être

Remplacées par les équations régissant le module de la tension soit $|\Delta V|^2$ en fonction de

$|\Delta V|$ et de. Par conséquent, les éléments de la ligne correspondants à chaque accès (P, |V|) dans J_3 et J_4 doivent être remplacés par :

$$\frac{\partial |V_i|^2}{\partial \theta_j} = 0 \quad (A-59)$$

$$\frac{\partial |V_i|^2}{\partial v_i} = \begin{cases} 2|V_i| & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (A-60)$$

Avec,

$$\Delta|V_i^K|^2 = (V_{i\text{spécifié}}) - (|V_i^K|)^2 \quad (\text{A-61})$$

En résumé :

✓ Pour l'accès (P, Q), on calcul :

$$\begin{cases} \Delta P_i^K = P_{i\text{spécifié}} - P_i^K \\ \Delta Q_i^K = Q_{i\text{spécifié}} - Q_i^K \end{cases} \quad (\text{A-62})$$

✓ Pour l'accès (P, |V|), on calcul :

$$\begin{cases} \Delta P_i^K = P_{i\text{spécifié}} - P_i^K \\ \Delta|V_i^K|^2 = |V_{i\text{spécifié}}|^2 - (|V_i^K|)^2 \end{cases} \quad (\text{A-63})$$

➤ **Algorithme de la méthode de Newton-Raphson :**

1- Lire les données du réseau (données des lignes et accès).

2- Définir le critère de convergence.

3- Prendre les valeurs initiales des tensions aux accès :

$V_i = (|V_{i\text{spé}}|, 0)$ Avec, $i=1$ Pour l'accès bilan.

$V_i = (|V_{i\text{spé}}|, P_{i\text{sp}})$ Avec, $i=2, \dots, n$ Pour les accès générateur.

4- Former la matrice admittance nodale du réseau.

5- Mettre le compteur d'itération à zéro ($k=0$).

6- Mettre le compteur d'accès à 1 ($I=1$).

7- Si I est un accès bilan, aller à l'étape 13.

8- Calculer P_i^K et Q_i^K d'après les équations (A-39).

9- Calculer $\Delta P_i^K = P_{i\text{spé}} - P_i^K$.

10- Si I est un accès (P, Q), aller à l'étape 12.

11- Comparer Q_i^K avec ses limites.

Si Q_i^K viole ses limites, fixer Q_i^K à la limite violée et aller à l'étape 12.

Sinon, calculer le résidu $\Delta|V_i^K|^2 = |V_{i\text{spé}}|^2 - (|V_i^K|)^2$ et aller à l'étape 13.

12- Calculer $\Delta Q_i^K = Q_{i\text{spé}} - Q_i^K$.

13- Mettre $I=I+1$.

14- Si $I \leq n$ aller à l'étape 7.

15- Déterminer le max de $|\Delta P_i^K|$ et $|\Delta Q_i^K|$.

16- Si $|\Delta P_i^K| \leq \varepsilon$ et $|\Delta Q_i^K| \leq \varepsilon$, aller à l'étape 21.

17- Calculer les éléments du Jacobien.

18- Résoudre le système d'équation (A-49).

19- calculer les nouvelles valeurs de $\theta_i^{(k+1)}$ et $|V_i|^{(k+1)}$ d'après les équations (A-46) et (A-47).

20- Incrémenter le compteur $k=k+1$ et aller à l'étape 6.

21- Imprimer les résultats.