

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



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de la Technologie
Département d'Electrotechnique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé:

**Analyse de la stabilité de tension
avec la pénétration des DG.**

Présenté par

**Bouais Mohammed Amin
Cherifi Mohamed Dirar**

Devant le jury composé de :

**Dr. Bouazza Saad
Dr. BEKRI.O.Loubaba
Dr.Yahiaoui Merzoug**

**Président
Encadreur
Examineur**

Promotion 2019-2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Avant toutes choses, Nous tenons à remercier **Dr. Bouazza Saad** et **Dr.Yahiaoui Merzoug** d'avoir accepté de faire partie de notre jury de mémoire de fin d'études. Sans eux ces travaux n'auraient aucune valeur.

Nos remerciements les plus respectueuses vont au Dr. **O.L.Bekri** d'avoir efficacement dirigé nos travaux de mémoire de fin d'études. Nous la remercions aussi pour les bonnes conditions de travail qu'elle nous a assurées et les conseils qu'elle nous a prodigués tout au long de ce travail.

Nous voulons aussi dire un mot à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont soutenus pour réaliser ce travail, et nous ont permis de le finaliser : Merci !

Je dédie ce travail à :

Mes parents vous vous êtes dépensés pour moi sans compter.

*En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous et
chacun pour me permettre d'attendre cette étape de ma vie.*

Avec toute ma tendresse à mes frères et ma sœur.

*Spécial dédicace à toute la famille Bouais et Azbar et à tous
mes amis sans exception*

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour,
leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de
mes études*

*A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents,
et leur soutien moral,*

Une dédicace à toute la famille de Cherifi

À tous mes amis qui m'ont soutenu et aidé tout le temps

La production dispersée est considérée comme une nouvelle approche dans le domaine de la production d'électricité. En fait, il n'existe pas de norme ou un terme standard approuvé pour ce type de production d'électricité à l'heure actuelle. Toutefois, divers termes et définitions de la production distribuée ont été utilisés dans les précédents types de recherche. Par exemple, les pays nord-américains utilisent le terme de "génération dispersée", les anglo-américains utilisent le terme de "production intégrée", et certaines parties de l'Asie comme dans les pays européens, le terme "production décentralisée" est utilisé pour ce type de production. En général, la production décentralisée peut être définie comme la production d'électricité à petite échelle qui est connectée au système de distribution. Le terme DG désigne l'utilisation d'une technologie modulaire qui se trouve dans toute la région desservie par le service public. Les unités de production distribuées sont alimentées en énergie par le soleil, le vent et la pile à combustible. Il existe un ensemble de technologies de production dispersées sur le marché, telles que l'éolien, les piles à combustible et l'énergie solaire qui ont commencé à dominer les marchés locaux de l'électricité en raison de la disponibilité de ces ressources et de la gratuité des émissions caractéristiques. Il convient de mentionner que l'intégration de la production dispersée dans les réseaux actuels a modifié le flux d'énergie de l'écoulement de puissance traditionnel vertical à bidirectionnel, ce qui a contribué à améliorer la stabilité de la tension et à réduire les pertes de puissance de l'ensemble du système. Cependant, l'intégration arbitraire des unités de la DG dans le système peut causer certains problèmes techniques.

Le système IEEE 14 noeuds a été sélectionné pour mettre en œuvre cette approche en utilisant un logiciel sous l'environnement MATLAB.

Mots clés: Production DG - Stabilité de la tension –Méthode du CPF.

Abstract

Dispersed generation is considered as a novel approach in the field of electricity production. In fact, there are no standard definitions, or a standard term has been approved for this type of power generation right now. However, various terms and definitions about distributed generation have been employed in the previous kinds of research. For instance, North American countries use the term 'dispersed generation,' Anglo-American countries the term 'embedded generation,' and some parts of Asia as well as Europe countries, the term 'decentralized generation' is used for this kind of production. In general, distributed generation can be defined as small-scale electric power generation that is connected to the distribution system. DG term refers to using modular technology which is located throughout utility's service region. Distributed generation units are energized by solar, the wind, and fuel

cell. There are a set of dispersed generation technologies in the market such as the wind and solar that started dominating on the local electricity markets due to their availability of such resources and free emission characteristics. It is worth mentioning that integrating dispersed generation into current networks has altered power flow pattern from traditional vertical to bi-directional power flow which contributed to enhancing voltage stability and minimizing power losses of the whole system. However, arbitrary integration of DG units in the system may cause some technical issues. The 14 IEEE system has been selected to implement this approach by using a software in the MATLAB environment.

Keywords: DG production-Voltage stability – CPF method.

Introduction Générale	01
Chapitre I : Réseaux électriques et la production DG	
I.1-Introduction.....	05
I.2-Généralités sur les réseaux électriques	05
I.2.1-Le réseau de Production	05
I.2.1.1-Production centralisée (classique).....	05
I.2.2-Le réseau de transport	06
I.2.3-Les réseaux de répartition.....	06
I.2.4-Le réseau de distribution.....	06
I.3-Structure du réseau électrique et son rôle.....	06
I.3.1-Topologies des réseaux électriques	06
I.3.1.1-Réseau maillé.....	07
I.3.1.2-Réseau bouclé	07
I.3.1.3-Réseau arborescent.....	08
I.4-Matériels utilisés dans les réseaux électriques	08
A. Les lignes aériennes.....	08
B. Les lignes souterraines	09
C. Les transformateurs de puissance.....	10
D. Les postes électriques.....	10
I.5-La production décentralisée	11
I.5.1-Introduction.....	11
I.5.2-Caractéristiques de production décentralisée.....	12
I.5.2.1-Systèmes à alternateurs classiques (machine synchrone).....	12
I.5.2.2-Systèmes à générateurs asynchrones	12
I.5.2.3-Systèmes à interface avec convertisseur électronique.....	12
I.5.3Différents types de production décentralisée.....	13
A. Les moyens de productions d'énergie.....	13
a. La cogénération.....	14
B. Les énergies non renouvelables.....	14
B.1-Ressources énergétiques renouvelables.....	15
a. L'énergie solaire.....	15
a.1 Principe de fonctionnement des cellules solaire.....	15
b. L'énergie éolienne.....	16

b.2 composition d'une éolienne	17
c. L'énergie biomasse.....	18
d. L'énergie géothermique.....	19
d.1 Le principe de la pompe à chaleur géothermique.....	19
e. L'énergie hydraulique.....	20
f. les piles à combustible(PAC).....	20
I.6-Conclusion.....	22
CHAPITRE II : Le raccordement des productions décentralisées et leurs impacts sur le réseau	
II.1. Introduction.	24
II.2.Politique et dynamique de croissance des ER.	24
II.3. Les politiques d'incitation pour la promotion des énergies renouvelables	25
II.4. Les problématiques de l'intégration et du raccordement des nouveaux producteurs EnR au réseau.	26
II.4.1. Les coûts de raccordement.	26
II.4.2. L'allocation des coûts de raccordement entre les différents opérateurs	27
II.5. L'insertion des énergies renouvelables dans le marché électrique	27
II.6.Les impacts de la production décentralisée sur le réseau électrique.	28
II.6.1. Impacts sur le profil de tension.	28
II.6.2. Impacts sur la stabilité du système.	29
II.6.3. Impacts sur le plan de protection	30
II.6.4. Impacts sur la continuité de service.	30
II.6.5. Impacts sur la qualité de service.	31
II.7.Productions décentralisées en Algérie.	31
II.7.1 Energie solaire.	31
II.7.2.Energie éolienne.	32
II.7.3.Energie Géothermique.	32
II.7.4.Energie de la biomasse.	33
II.7.5.Energie Hydraulique.	33
II.8.Conclusion.	33
CHAPITRE III : Amélioration de la stabilité de la tension par l'intégration des DG	
III-1.Introduction	35
III-2. Présentation de la production distribuée	35
III-3.Impact des DG sur le système de distribution	36
III-3.1. Amélioration de la stabilité de tension	36

Table des matières

III-3.2. Minimisation des pertes de puissance	36
III-4 Technologies des DG	37
III-4.1 L'énergie solaire	37
III-4.2 L'énergie éolienne	38
III-4.3 Système hybride éolien-solaire	38
III-5 Calcul Continu de l'écoulement de puissance (Continuation power flow- CPF)	39
III-6 Simulations relatives au réseau standard IEEE 14 nœuds	42
III-6.1.Présentation du réseau	42
III-6.2.Emplacement des DG	43
III-6.2.1.Emplacement d'un générateur décentralisé au nœud 9	44
III-6.3.Scénario 1 : l'intégration d'un DG à base éolien au nœud 14	45
III-6.4.scénario 2 : l'intégration d'une éolienne aux nœuds 14&10	46
III-6.5. Scénario 3 : l'intégration d'un DG type PV au nœud 14	47
III-6.6.Scénario 4: l'intégration de deux DG type PV aux nœuds 14&10	48
III-6.7.scénario 5 : l'intégration d'un système hybride (éolien / PV) aux nœuds 14&10	49
III.7- conclusion	53
CONCLUSION GENERALE	54
BIBLIOGRAPHIE	56
ANNEXES	59

Chapitre I : Réseaux électriques et la production DG	
Figure I.1 : Structure de réseau maillé	07
Figure I.2 : Structure de réseau bouclé	07
Figure I.3 : Structure de réseau arborescent	08
Figure I.4 : Les lignes aériennes	09
Figure I.5 : Les lignes souterraines	09
Figure I.6 : transformateur de puissance	10
Figure I.7 : Poste électrique	11
Figure I.8 : L'électricité de la production vers la consommation	13
Figure I.9 : exemples de cogénération	14
Figure I.10 : Energie solaire	15
Figure I.11 : Principe de fonctionnement des cellules solaires	16
Figure I.12 : parc éolien	17
Figure I.13 : Les compositions d'une éolienne	18
Figure I.14 : Fonctionnement d'une centrale biomasse	19
Figure I.15 : Le principe de la pompe à chaleur géothermique	20
CHAPITRE II : Le raccordement des productions décentralisées et leurs impacts sur le réseau	
Figure II.1 : Plan de tension avec et sans GED au nœud 6	29
Figure II.2 : Plan de tension avec et sans GED au nœud 5	29
Figure II.3 : Stabilité du système	30
Figure II.4 : La continuité de service	30
Figure II.5 : Carte des vents en Algérie.	32
CHAPITRE III : Amélioration de la stabilité de la tension par l'intégration des DG	
Figure (III.1) : Calcul continu de l'écoulement de puissance : pas prédicteur obtenu par les moyens de la tangente	40
Figure (III.2) : Calcul continu de l'écoulement de puissance : pas correcteur obtenu par les moyens d'intersection perpendiculaire	41
Figure (III.3) : Calcul continu de l'écoulement de puissance : pas correcteur obtenu par les moyens de la part métrisation locale	42
Figure (III. 4) : Système test d'IEEE 14 nœuds	43
Figure (III.5) : Profil de la tension du système IEEE 14 nœuds	43
Figure (III.6) : Courbe V(P) du système 14 nœuds sans les DG	44
Figure (III.7) : Courbe V(p) avec le générateur décentralisé au nœud 9	45

Liste des figures

Figure (III.8) : Profil de tension avec DG de type éolien au nœud 14	45
Figure (III.9) : Courbe V(p) avec DG de Type éolien au nœud 14	46
Figure (III.10): Profil de tension avec DG éolien aux nœuds 14&10	46
Figure (III.11): Courbe V(p) avec DG éolien aux nœuds 14&10	47
Figure (III.12): Profil de tension avec DG PV au nœud 14	47
Figure (III.13): Courbe V(P) avec DG PV au nœud 14	48
Figure (III.14): Profil de tension avec DG type PV aux nœuds 14&10	48
Figure (III.15): Courbe V(P) avec DG type PV aux nœuds 14 &10	49
Figure (III.16) : profil de tension avec un système hybride aux niveaux des nœuds 14&10	49
Figure (III.17) : profil de tension avec un système hybride aux niveaux des nœuds 14&10	50
Figure (III.18) : pertes de puissance du système IEEE-14 noeuds	52
Figure (III.19) : Facteurs de charge du système IEEE-14 noeuds	52

Liste des tableaux

Tableaux	
Tableau 1 : État d'avancement des PAC	21
Tableau III.1: Tension, pertes de puissances, paramètre de charge du système IEEE 14 nœuds sans et avec les unités DG.	51

A. Acronymes :

THT	Très haute tension
HTA	Haute tension A
HTB	Haute tension B
HT	Haute tension
MT	Moyenne tension
BT	Basse tension
MT/BT	MoyenneTensio/Basse Tension
PDE	Production décentralisée
An	Durée
MW	Méga watts
KW	Kilo watts
KV	Kilo volts
V	Volts
MVA	Méga volts ampère
CO2	Oxyde de carbone
PAC	Piles à combustibles
° C	Degré Celsius
AIE	Agence internationale de l'énergie
ENR	Energie renouvelable
P.U	Per-unit
DG	Distributedgeneration
FACTS	Flexible alternative current transmission system
CPF	Continuation power flow

B. symboles :

η	Le rendement
n_1 et n_2	Respectivement, les facteurs de pureté des diodes d1 et d2 du panneau
Δt	Le pas de temps
$\begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{bmatrix}$	Les variables d'état d'incrément
x et y	Les variables d'état
Les autres Symboles sont expliqués dans le texte	

Introduction générale

Depuis quelques années, la consommation mondiale de l'énergie ne cesse d'augmenter et ce pour plusieurs raisons, mais principalement à l'augmentation exponentielle de la population mondiale qui peut atteindre les dix milliards d'ici 2050. Actuellement, la partie majeure de l'énergie consommée est d'origine fossiles (le charbon, le pétrole et le gaz naturel) qui est limitée dans le temps vu qu'elle est polluante. Pour remédier à cela, plusieurs pays à travers le monde sont retournés vers la production décentralisée de l'énergie. En exploitant; les énergies renouvelables comme le photovoltaïque, éolienne, la géothermie, la biomasse ou encore l'énergie hydraulique qui sont des énergies propres sûres, mais malheureusement intermittentes ce qui nécessite des systèmes de stockage comme les batteries ou l'injection directe de cette énergie dans les réseaux de distribution.

Le dérèglement du marché mondial de l'énergie et l'évolution technologique des moyens de production de petites puissances a accéléré le développement et l'exploitation de ces nouvelles sources d'énergie décentralisées. Généralement, cette production de l'énergie est exploitée localement dans de petites unités au plus près du consommateur puis transportée et distribuée sur de courtes et moyennes distances d'où son insertion directe dans le réseau de distribution.

L'introduction de cette production décentralisée a conduit à des changements dans la génération, le traitement et la distribution de l'énergie électrique, ce qui peut remettre en cause la planification, la conception, le fonctionnement et l'exploitation de ces réseaux.

En effet, les réseaux de transport et de distribution n'ont pas été conçus pour accueillir ce type d'énergie, puisque l'insertion de cette dernière dans ces réseaux peut avoir des conséquences importantes sur la circulation des flux énergétiques et donc sur la philosophie et l'implémentation du système de gestion et de protection du réseau. Comme le mode classique de l'écoulement de puissance dépend beaucoup du réseau de transport qui est considéré comme le maillon faible de la chaîne, une bonne pénétration de la production décentralisée permettra au réseau de distribution tout entier de moins dépendre du réseau de transport, donc une meilleure sécurité pour infrastructures.

Cependant, l'interconnexion à grande échelle de ces systèmes aux réseaux électriques pourrait conduire à des nombreux problèmes techniques tels que: la modification du transit

de puissance, la variation de la tension, la perte de la stabilité du réseau, le déséquilibre de tension et les pertes de puissance.

La résolution de ces problèmes passe par l'intégration optimale des DG, donc l'objectif qu'on s'est assigné est la détermination optimale de la taille et l'emplacement de l'unité de la production décentralisée pour réduire au mieux les pertes de puissances, améliorer le profil de tension et par là augmenter la capacité de transmission des lignes.

Dans ce contexte, cette étude constitue une contribution pour une meilleure intégration des sources d'énergie renouvelable dans les réseaux électriques.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en trois chapitre en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

- ✓ Le premier chapitre sera consacré aux réseaux électriques et la production DG, nous montrons les différentes sources de production centralisée (classique) et la production décentralisée avec leurs principes de fonctionnement.
- ✓ Le deuxième chapitre sera consacré au raccordement des productions décentralisées et leurs impacts sur le réseau, les politiques et dynamiques des énergies renouvelables et les coûts des raccordements et la production décentralisée en Algérie.
- ✓ Dans le troisième chapitre, nous présenterons l'impact des DG sur le système de distribution, les technologies des DG, ensuite les résultats des simulations de l'intégration d'une source photovoltaïque et une source éolienne et la source hybride éolienne /photovoltaïque. Nous analyserons dans ce chapitre, l'intégration des sources présentées (PV et éolien et éolien/PV); nos simulations ont été développé avec le PSAT sous l'environnement MATLAB.

Enfin, une conclusion et des annexes terminent ce mémoire.

Chapitre I:
Réseaux électriques et la
production DG

I.1. Introduction

Ce chapitre introductif a pour objet de présenter la chaîne de fourniture d'électricité, et en particulier la production d'énergie électrique. Les systèmes électriques présentent des caractéristiques spécifiques de fonctionnement, qui les différencient des autres types d'industrie. La prise en compte de ces caractéristiques et la coordination entre les différents acteurs du système est essentielle pour garantir un système électrique fiable en permanence.

I.2.Généralités sur les réseaux électriques

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution [01].

I.2.1.Le réseau de production

La production de l'électricité constitue entre 35 et 50% du coût total de l'électricité fournie aux consommateurs, elle fait appel à différents types de principes. Le principe de conversion où la centrale de production de l'électricité convertit une source d'énergie primaire en énergie électrique. La source d'énergie primaire est un élément déterminant qui permet de distinguer entre les différentes centrales de production. Ces principes varient aussi selon leurs structures de coût, leurs économies d'échelle et leurs capacités à réaliser leurs fonctions. Il est à noter que l'énergie électrique n'est pas stockable. Nous distinguons les centrales nucléaires, les centrales thermiques, les centrales hydrauliques, les centrales éoliennes et les centrales solaires. Deux types existent: production centralisée dite classique et décentralisée [02].

I.2.1.1.Production centralisée (classique)

La production dite réalisée au moyen de grosses centrales thermiques (nucléaire ou conventionnelle) ou hydraulique ou fossile, Thermique, connectées à un réseau de transport et de distribution de grande valeur, faisant le plus souvent intervenir différentes acteurs au long de la chaîne de valeur.

A. Exemples de la production centralisée [03].

- Energies fossiles
- Energie hydraulique
- Energie thermique

I.2.2.Le réseau de transport

Les réseaux de transport sont à haute tension (HTB) (de 50 kV à 400 kV) et ont pour but de transporter l'énergie des grands centres de production vers les régions consommatrice d'électricité. Les grandes puissances transitées imposent des lignes électriques de forte capacité de transit, ainsi qu'une structure maillée [04].

I.2.3.Les réseaux de répartition

Les réseaux de répartition sont à haute tension (de l'ordre de 30 à 150 kV) et ont pour but d'assurer à l'échelle régionale la fourniture d'électricité. L'énergie y est injectée essentiellement par le réseau de transport via des transformateurs, mais également par des centrales électriques de moyennes puissances (inférieures à environ 100 MW). Les réseaux de répartition sont distribués de manière assez homogène sur le territoire d'une région.

Ils ont une structure à la fois maillée et bouclée suivant les régions considérées. Contrairement aux réseaux de transport qui sont toujours bouclés, les réseaux de répartition peuvent être exploités bouclés ou débouclés selon les transits sur le réseau. Les problèmes de report de charge se posent également pour le réseau de répartition, sa conduite est donc assurée en coordination avec celle du réseau de transport et nécessite également des moyens de simulation en temps réel [04].

I.2.4.Le réseau de distribution

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

- les réseaux moyenne tension (anciennement MT devenu HTA de 1 à 50 kV)
- les réseaux basse tension (BT de 50 à 1000V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs (entreprises et locaux d'habitations)

Contrairement aux réseaux de transport et répartition, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solutions techniques à la fois selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population [04].

I.3.Structure du réseau électrique et son rôle

I.3.1.Topologies des réseaux électriques

Les topologies diffèrent d'un type de réseau à un autre. Cette topologie est dictée par: le niveau fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation [04].

I.3.1.1. Réseau maillé

La figure I.1 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 [01].

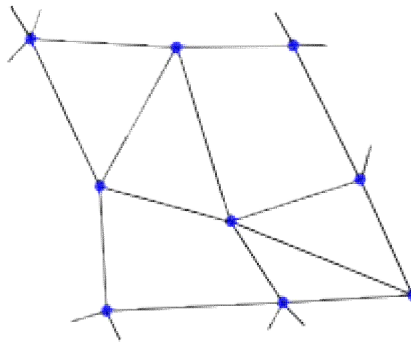


Figure I.1: Structure de réseau maillé

I.3.1.2. Réseau bouclé

Cette topologie représentée par la figure I. 2 est surtout utilisée dans 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 [01].

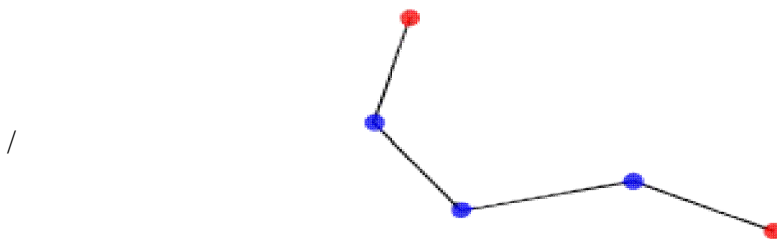


Figure I.2: Structure de réseau bouclé

I.3.1.3. Réseau arborescent

Cette figure (I.3) de la topologie arborescente qui 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 [01].

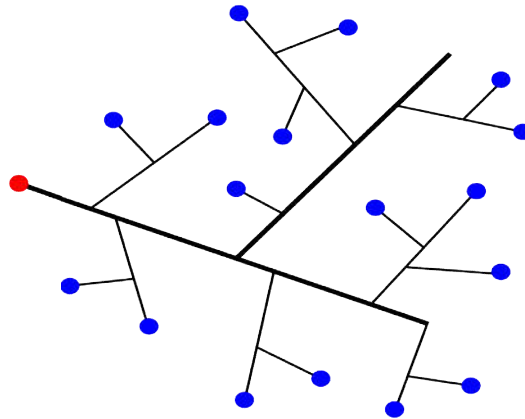


Figure I.3: Structure de réseau arborescent

I.4. Matériels utilisés dans les réseaux électriques

Les lignes électriques relient les postes entre eux. À l'intérieur d'un poste, on trouve pour chaque niveau de tension un jeu de barre qui relie les départs lignes et les départs transformateurs [04].

A) Les lignes aériennes

Les lignes de la **figure I.4** assurent la fonction « transport de l'énergie » sur les longues distances. Elles sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en lignes, différentes des pertes Joule. L'ensemble de ces 3 phases électriques constitue interne [05].



Figure I.4: Les lignes aériennes

B) Les lignes souterraines

L'expression est un terme générique employé par l'industrie de télécommunications et d'électricité. ... Par extension, un câble souterrain est un accessoire de raccordement pour réseau électrique placé sous la terre, constitué de conducteurs réunis et protégé par une canalisation destinée à cet effet [06]. Les câbles souterrains (figure I.5) sont généralement placés sous la terre pour protéger les lignes des vents violents, de la glace et d'autres éléments dommageables. L'installation souterraine améliore également le rendement mais elle est plus coûteuse [07].



Figure I.5: Les lignes souterraines

C) Les transformateurs de puissance

Dans la figure I.6 on voit un transformateur de puissance fixé dans la terre.

On trouve sur les réseaux électriques deux types de transformateurs de puissance :

- les autotransformateurs qui n'ont pas d'isolement entre le primaire et le secondaire. Ils ont un rapport de transformation fixe quand ils sont en service, mais qui peut être changé si l'autotransformateur est mis hors service.
- les transformateurs avec régleurs en charge sont capables de changer leur rapport de transformation quand ils sont en service. Ils sont utilisés pour maintenir une tension constante au secondaire (la tension la plus basse) et jouent un rôle important dans le maintien de la tension [04].

Les transformateurs étant des matériels particulièrement coûteux, leur protection est assurée par différents mécanismes redondants [04].



Figure I.6: transformateur de puissance

D) Les postes électriques

Les postes électriques sont les nœuds du réseau électrique comme nous voyons dans la figure I.7. Ce sont les points de connexion des lignes électriques. Les postes des réseaux électriques peuvent avoir 2 finalités :

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

- la transformation de l'énergie: les transformateurs permettent de passer d'un niveau de tension à un autre [04].



Figure I.7: poste électrique

I.5. Production décentralisée

I.5.1. Introduction

Les réseaux de distribution électrique n'ont cessé d'évoluer, tant du point de vue des techniques utilisées que de celui de l'exploitation et des protections. La phase d'évolution de ces dernières années, compte parmi les plus radicales puisqu'elle introduit la production décentralisée d'énergie électrique au sein même des réseaux de distribution en aval des postes sources. Cela n'est pas sans conséquences sur la sécurité et l'exploitation des réseaux, ainsi que sur la qualité de l'onde de tension délivrée aux clients.

Cette évolution, que l'on s'attend à voir s'accélérer au cours des prochaines décennies, conduit à repenser les principes de fonctionnement, voire la structure même des réseaux de distribution afin de préparer l'insertion prochaine de production décentralisée avec des taux de pénétration très importants [05].

Les Productions Décentralisées se distinguent des unités de production centralisées par le fait qu'elles sont le plus souvent raccordées au réseau de distribution, et par leur "petite taille", bien qu'il n'y ait à l'heure actuelle pas de limite clairement définie entre les catégories centralisées et décentralisée. Cependant, la norme IEEE 1547 sur l'interconnexion des ressources dispersées au réseau électrique ne s'applique qu'aux sources d'une puissance inférieure à 10MVA.

Dans ce chapitre on va donner une idée sur ces unités de production dites décentralisées (PD) et brosse une liste des principaux moyens et technologies de production d'électricité à base d'énergies renouvelables.

De nombreux types de PD existent qui utilisent des technologies matures ou en phase de développement. Les énergies primaires utilisées sont également très variées, d'origine renouvelable ou fossile. Un panel des principales technologies mises en œuvre est proposé ci-dessous [05].

I.5.2.Caractéristiques de Production Décentralisée

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, avec quelques empiètements entre catégories [01].

I.5.2.1.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 [01]:

- Biomasse
- Energie géothermique
- Diesel
- Solaire à bac parabolique et tour
- Turbine à gaz à cycle simple
- Vent
- Turbine à gaz à cycle combiné

I.5.2.2.Systèmes à générateurs asynchrones

- Solaire réflecteur-moteur (à miroirs paraboliques et moteurs à cycle) [01]
- Vent
- Houle

I.5.2.3.Systèmes à interface avec convertisseur électronique

- Vent (avec générateur synchrone ou asynchrone)
- Photovoltaïque
- Stockage par batterie
- Stockage par bobine supraconductrice et Piles à combustible

I.5.3. Différents types de production décentralisée

A) Les moyens de productions d'énergie

Le réseau électrique se compose d'un ensemble d'ouvrages de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique. Pour assurer sa stabilité, une bonne surveillance et un contrôle en temps réel de son fonctionnement est nécessaire.

La production d'électricité est tout simplement une conversion, une transformation 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 également de l'énergie thermique, hydraulique ou encore éolienne en énergie électrique [08].

On voit dans la figure I.8 qu'il existe plusieurs technologies de productions d'énergies électriques raccordées au réseau de distribution. Celles-ci diffèrent cependant de par leur puissance ou encore de par le type de carburant qu'elles utilisent comme le gaz naturel, l'hydrogène, le diesel ou encore des énergies dites renouvelables comme le soleil ou le vent.

Ces technologies de productions se différencient également par leur méthode de raccordement au réseau. D'une part, il y a les PDE utilisant un alternateur synchrone ou asynchrone directement connecté au réseau, d'autre part celles utilisant un interfaçage d'électronique de puissance, comme dans le cas des piles à combustibles ou des panneaux solaires [08].

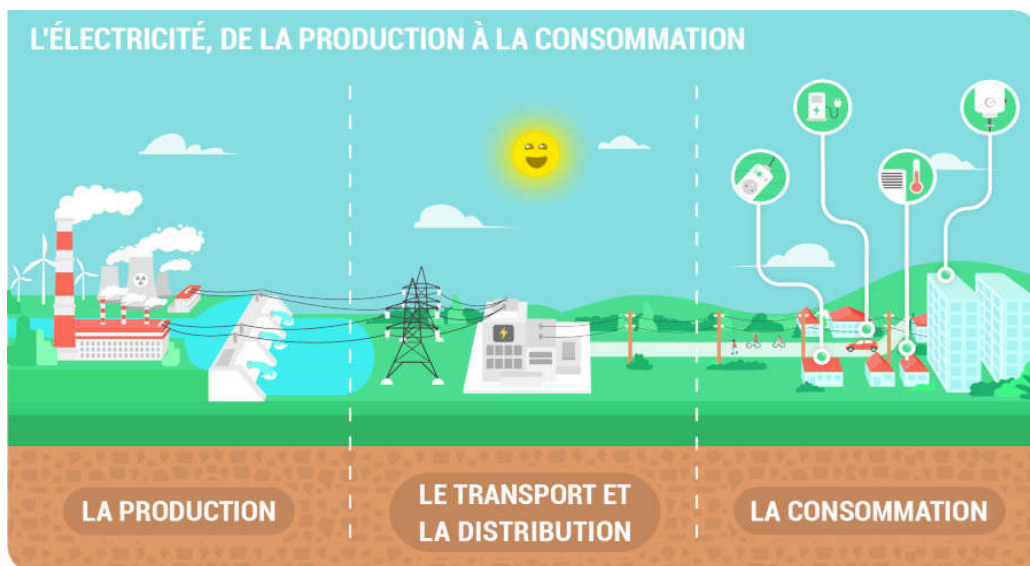


Figure I.8: L'électricité de la production vers la consommation.

On distingue les types suivants :

a. La cogénération

La cogénération d'électricité –chaleur présentée par la figure I.9 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. Le rendement énergétique global d'une telle installation peut atteindre 90% l'utilisation locale de la chaleur produite permet d'éviter une consommation supplémentaire d'énergie pour le chauffage des bâtiments [01].

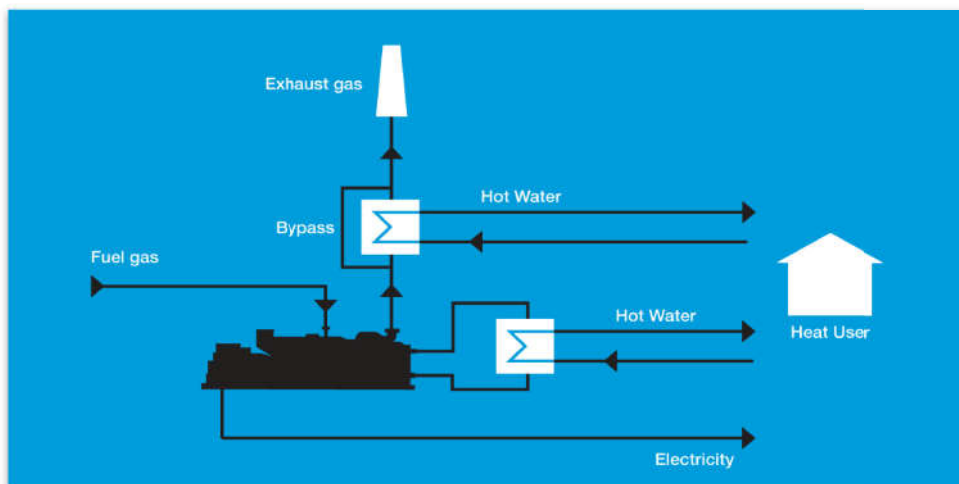


Figure I.9: Exemple de la cogénération électrique.

B) Les énergies non renouvelables

Energies fossiles (gaz, charbon, pétrole): les technologies utilisant ces énergies primaires sont nombreuses et bien éprouvées, ce qui leur confère un grand intérêt économique. Les principales technologies sont:

- Le thermique à flamme, basé sur des turbines ou micro turbines à vapeur.
- Les 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 [09].
- Hydrogène: Les piles à combustible produisent directement de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène par réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. C'est une énergie sur

laquelle beaucoup d'espoirs sont fondés, bien que l'hydrogène ne se trouve pas sous forme directement exploitable dans la nature; il faut en effet de l'énergie pour le produire.

B.1.Ressources énergétiques renouvelables

a. L'énergie solaire

La figure I.10 présente l'énergie solaire photovoltaïque, elle désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée [09].



Figure I.10: Energie solaire

a). 1.Principe de fonctionnement des cellules solaire

La figure I.11 montre comment l'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p

chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone P. Une jonction PN a été formé.

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés / décrochés": si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique [10].

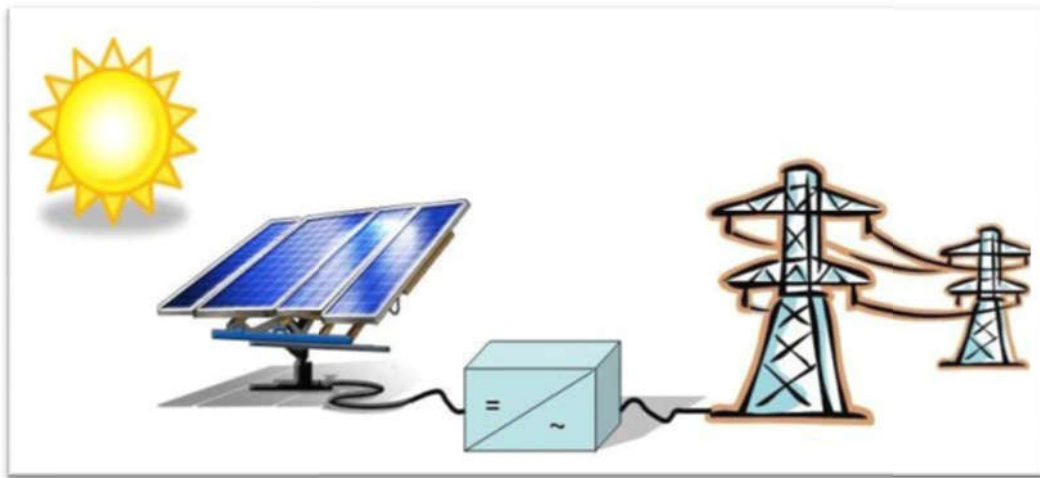


Figure I.11: Principe de fonctionnement des cellules solaires

b) L'énergie éolienne

Une éolienne est une machine permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de type éolienne. Cette énergie mécanique éolienne a été utilisée au cours des âges pour pomper l'eau ou moudre le grain.

Les machines actuelles sont utilisées pour produire de l'électricité de type éolienne qui est consommée localement (sites isolés), ou injectée sur le réseau électrique (éoliennes connectées au réseau). La figure I.12 montre un exemple d'un parc éolien [02].



Figure I.12: Parc éolien

b).2 Composition d'une éolienne

1. Ailes ou pales d'une éolienne

Les éoliennes modernes sont composées (figure I.13) de 2 à 3 ailes, tournant autour d'un rotor à axe horizontal. Les pales de l'hélice d'une éolienne peuvent être en bois lamellé-collé, en plastique renforcé de fibre de verre, ou en métal... Le diamètre qu'elles balaient varie de 40 m à 120m.

2. La tour ou le mât d'une éolienne

L'hélice de l'éolienne est située en haut d'une tour de 50 m à 110 m. le mât peut être des assemblages de croisillons métalliques, en béton ou en métal.

3. La partie électrique d'une éolienne

Dans les éoliennes destinées à produire de l'électricité, l'hélice fait tourner un générateur électrique situé en haut de la tour, dans le prolongement de l'axe de l'hélice de l'éolienne.

Entre l'hélice et le générateur électrique de l'éolienne se trouve en général un multiplicateur de vitesse, car l'hélice de l'éolienne tourne à des vitesses d'environ 100 à 650 tours/min alors qu'un générateur électrique doit être entraîné à environ 1500 à 3000tours/min [11].

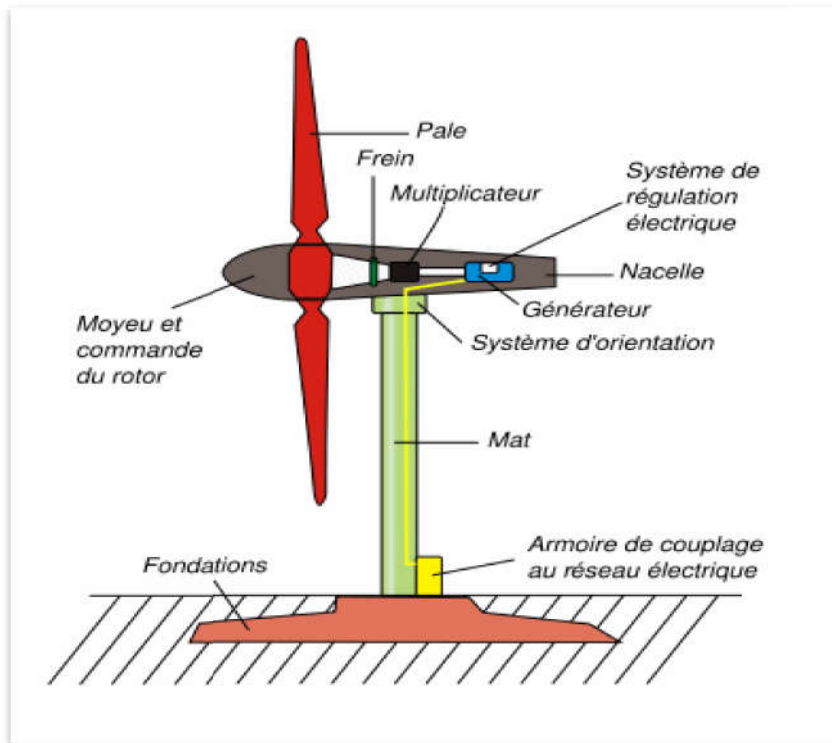


Figure I.13: Les compositions d'une éolienne

c) L'énergie biomasse

Une centrale électrique à biomasse produit de l'électricité et de la chaleur par combustion de la biomasse dans une chaudière. Les types les plus communs de chaudières sont des chaudières à eau chaude et des chaudières à vapeur.

La biomasse permet en général de réduire les émissions de CO₂ de plus de 80 %. La production, le traitement et le transport de la biomasse génèrent des émissions de CO₂ dans la chaîne d'approvisionnement. La production d'électricité par la biomasse produit des gaz de combustion qui doivent être nettoyés avant d'être émis dans l'atmosphère. Ceci est fait en utilisant des techniques bien établies telles que le lavage des gaz de combustion et les filtres à particules [01].

Il existe trois familles pour la biomasse :

- ✓ La biomasse ou lignine comprenant principalement le bois, les résidus verts, ainsi que la paille. Leur utilisation est faite à partir d'une combustion, ou conversions thermochimiques.

La biomasse à glucide, utilisant la canne à sucre, les céréales et les betteraves sucrières. On

favorise ces constituants par une méthanisation (c'est un processus naturel biologique de dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène), ou encore par distillation, conversions biologiques.

- ✓ La biomasse oléagineuse, qui est riche en lipide. Ses composants sont le colza, ainsi que le palmier à huile. Cette catégorie de biomasse est appelé "Biocarburants". Ces carburants sont récoltés suite à de nouvelles transformations chimiques, et en ressort sous deux formes: Les esters d'huile végétale, et sous la forme de l'éthanol (figure I.14) [10].

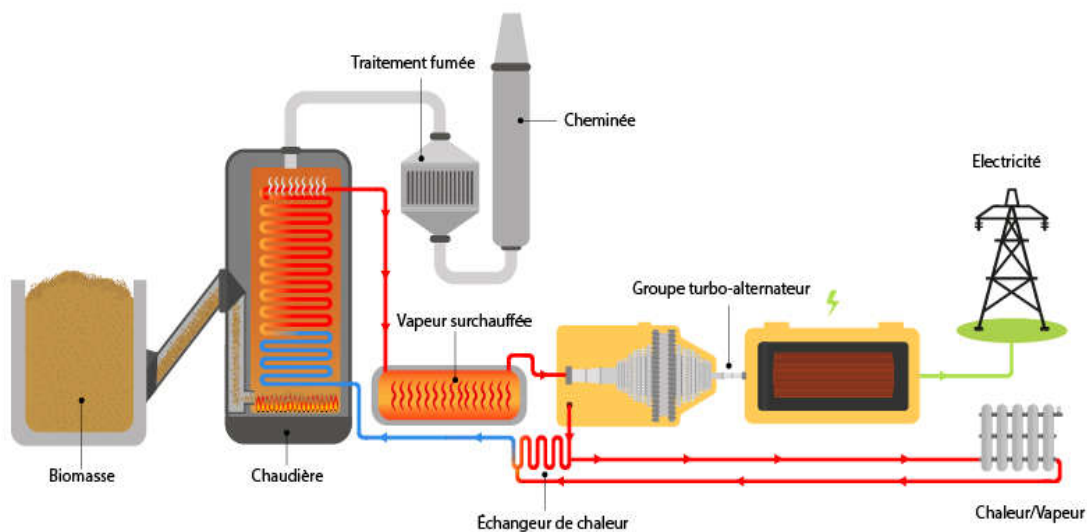


Figure I.14: Fonctionnement d'une centrale biomasse

d) L'énergie géothermique

La géothermie a pour étymologie grecque "géo" signifiant "la Terre" et "thermos" veut dire "chaleur". La géothermie puise donc son énergie dans la chaleur provenant des profondeurs de la Terre. C'est une énergie entièrement renouvelable et gratuite s'inscrivant dans le cadre de la dynamique de développement durable [09].

d).1. Le principe de la pompe à chaleur géothermique

Alors que l'aérotherme capte l'énergie de l'air, la géothermie récupère les calories présentes naturellement dans le sol. Exemple dans la figure I.15 celles-ci sont prélevées dans votre terrain grâce à des capteurs souterrains, puis transmises au logement via une pompe à chaleur.

Tout simplement une centrale géothermique produit de l'électricité grâce à la chaleur de la Terre qui transforme l'eau contenue dans les nappes souterraines en vapeur et permet de faire tourner une turbine et un alternateur [11].

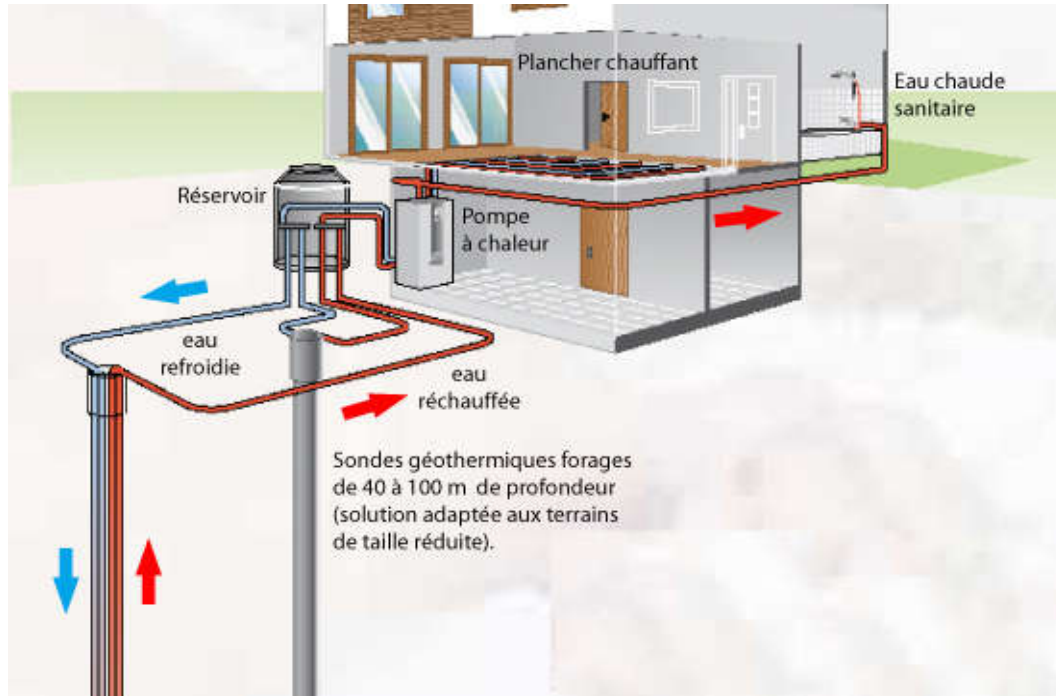


Figure I.15: Le principe de la pompe à chaleur géothermique

e) L'énergie hydraulique

Un barrage est un ouvrage installé sur un cours d'eau. Le barrage bloque son flux naturel continu et forme ainsi un lac de retenue. L'eau de ce lac de retenue, plus ou moins grand selon les cas, est utilisée par la suite pour produire de l'électricité. En cas de besoin d'électricité, des vannes sont ouvertes et l'eau s'engouffre dans un tuyau appelé "conduite forcée", ou dans un trou creusé dans la roche, dont le départ se trouve le plus profondément possible sous la surface du lac pour bénéficier d'une pression maximale. La conduite forcée débouche dans une centrale hydraulique et, grâce à la pression et à la vitesse de l'eau, une turbine couplée à un alternateur est entraînée afin de produire de l'électricité [12].

f) Les piles combustibles

La pile à combustible (PAC) est un système de production permettant de convertir de l'énergie chimique en énergie électrique. Aucune masse tournante n'est présente

dans ce système. En effet, l'énergie est produite grâce à une réaction électrochimique comme dans le cas d'une pile classique. Cependant une PAC, comme son nom l'indique, nécessite l'apport d'un combustible pour fonctionner, l'hydrogène. Elle réalise donc une oxydation entre son carburant l'hydrogène et son comburant l'oxygène [02].

	PAFC	MCFC	SOFC
Température	200 °C	650 °C	1000 °C
Rendement	36 - 45 %	50 - 60 %	50 - 55 %
Puissance	1-300 kW	10kW-100MW	1 kW-500MW
Etat d'avancement	Aboutie	pas encore mature	Encore expérimentale

Tableau I.1 - Etat d'avancement des PAC [01]

La PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) est la technologie mature (la seule à être au stade commercial). Elle semble néanmoins avoir trop d'inconvénients pour s'imposer (pureté du combustible, corrosion). La SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) n'est pas encore au point mais fait l'objet de recherches intensives, notamment aux Etats-Unis. La MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) comporte de nombreux écueils techniques (corrosion) mais fait l'objet d'un développement soutenu au Japon (public et privé) car en matière de rendement, c'est la plus performante.

I.6. Conclusion

Le bon fonctionnement du système électro énergétique est essentiellement basé sur le bon fonctionnement du premier maillon de départ à savoir le système de production d'énergie ou centrale électrique. Quoique ces centrales diffèrent dans leur principe, l'objectif reste le même, celui de produire l'énergie électrique à partir d'une énergie primaire. Le choix entre les différents types était auparavant dirigé par la disponibilité de l'énergie primaire. Les préoccupations environnementales et les accords signés au niveau mondial tel que le protocole de Kyoto pour la réduction des gaz à effet de serre d'une part, de l'autre, les accidents

Chapitre I : Réseaux électriques et la production DG

graves tels que celui de la centrale nucléaire du Japon ont forcé les décideurs politique à choisir les solutions visant à satisfaire l'opinion public par une orientation vers les énergies renouvelables (COP 21). Dans notre pays ayant une situation géographique sur une zone d'ensoleillement privilégiée, les centrales solaires sont une solution inégalée. En occurrence, la présence continue du soleil ne peut satisfaire la consommation de manière continue. Pour surmonter ce problème, les centrales hybrides offrent un meilleur compromis entre continuité de production et préservation d'environnement. Dans ces conditions la centrale hybride gaz-solaire de Laghouat est un bon début pour l'application des énergies renouvelables en Algérie. Le chapitre suivant entame de manière progressive le raccordement des productions décentralisées et leurs impacts sur le réseau.

Chapitre II:
Le raccordement des
productions
décentralisées et leurs
impacts sur le réseau

II.1. Introduction

Le développement de la production décentralisée sur les réseaux de distribution a connu un essor à partir du début des années 1990 en raison de la politique énergétique mise en place pour atteindre les objectifs EnR de la Directive européenne. Les productions décentralisées utilisant les EnR présentent deux caractéristiques nouvelles bien différentes de celles de la production centralisée raccordée au réseau de transport: d'une part les installations sont nombreuses, de petite puissance et principalement raccordées au réseau de distribution, d'autre part elles sont intermittentes et ne sont pas pilotables.

II.2. Politique et dynamique de croissance des ER

Les énergies renouvelables vont se développer plus vite que prévu d'ici 2021 mais cette accélération de la transition énergétique dans le monde masque des différences régionales et reste conditionnée à des politiques publiques favorables, estime l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

Après des années de prévisions prudentes et parfois critiquées, l'AIE a revu à la hausse ses prévisions de développement à cinq ans des énergies vertes utilisées pour la production d'électricité, selon son rapport annuel de moyen terme sur les renouvelables.

Elle évalue désormais à 825 gigawatts les nouvelles capacités électriques renouvelables (solaire, éolien, hydroélectricité, etc.) qui devraient être installées d'ici 2021, soit une progression de 42% par rapport à leur niveau de 2015, et 13% de plus que ce qu'elle envisageait dans ses précédentes estimations [13].

D'après le bilan mondial d'ici 2022, les deux tiers des nouvelles sources d'énergies renouvelables seront installées dans trois pays : la Chine, les États-Unis et l'Inde.

*Commençons par la Chine, leader mondial du renouvelable, et de loin. Elle est à elle seule responsable de 40% de l'augmentation mondiale du parc d'énergies renouvelables : le gouvernement chinois a encore accéléré la transition énergétique du pays, en constatant les taux catastrophiques de pollution atmosphérique: lancé en 2015, le 13ème plan quinquennal était particulièrement ambitieux en termes de capacités visées pour 2020.

*Les États-Unis devraient rester, d'ici 2022, le deuxième plus grand marché de croissance pour les énergies renouvelables, et ce malgré les prises de position du gouvernement Trump contre l'accord de Paris et le principe de la transition énergétique [14].

Chapitre II : le raccordement des productions décentralisées et leurs impacts sur le réseau

En effet, les mécanismes sur lesquels s'appuie la croissance du photovoltaïque et de l'éolien aux États-Unis sont toujours actifs, qu'il s'agisse des incitations fiscales pluriannuelles, des aides de l'État pour l'achat des panneaux photovoltaïque ou du principe des qui obligent les compagnies d'électricité à atteindre un certain pourcentage d'énergies renouvelables dans leur production globale.

*En revanche, l'Inde devrait poursuivre sans encombre sa révolution énergétique. D'ici 2022, le pays devrait plus que doubler sa production actuelle d'énergie renouvelable, une croissance supérieure sur la période à l'Union Européenne. Photovoltaïque et éolien représentent 90% de l'augmentation de capacité électrique de l'Inde d'ici 2022 : les enchères pour les nouveaux parcs éoliens et photovoltaïques ont donné les prix les plus bas du monde; dans certains États d'Inde, les prix contractuels sont désormais équivalents au charbon.

De plus, le pays s'est lancé dans une modernisation de son réseau électrique, avec pour objectif de le rendre intelligent au plus vite dans un maximum d'État, afin de résoudre les problèmes d'intégration des énergies renouvelables au réseau. De quoi être plus que raisonnablement optimiste [14].

II.3. Les politiques d'incitation pour la promotion des énergies renouvelables

La dynamique de croissance favorable dont bénéficient certaines sources d'énergie renouvelable pour la production d'électricité (éolien, photovoltaïque notamment) dépend dans une très large mesure des dispositifs de soutien mis en place par les pouvoirs publics. Pour différentes raisons, les conditions économiques qui prévalent sur le marché de l'électricité ne permettent pas aujourd'hui un développement spontané de ces technologies. L'insuffisante prise en compte des externalités environnementales associées aux sources d'énergie conventionnelles, l'absence d'économies d'échelle pour la production distribuée, le caractère non programmable ou intermittent de ces énergies expliquent notamment que les acteurs du marché de l'électricité choisissent des technologies matures plus performantes sur le plan économique la mise en œuvre de politiques de soutien est donc nécessaire à l'émergence et au développement de ces nouvelles filières [15].

Parmi les dispositifs de soutien aux énergies renouvelables, on distingue classiquement les incitations directs et les incitations indirects (aides à l'investissement versus taxes CO²), les approches réglementaires et les approches volontaires (quotas de production versus accords volontaires) ou les instruments basés soit sur les prix, soit sur les quantités. Nous retiendrons ici

Chapitre II : le raccordement des productions décentralisées et leurs impacts sur le réseau

cette dernière classification qui distingue les instruments qui fixent les tarifs d'achat du KWh d'origine renouvelables et les instruments qui imposent des quantités de production (les quotas).

Dans la première catégorie se trouvent les prix d'achat garantis (Fed in tariffs) ou les dispositifs de primes (premiums) et dans la seconde les enchères concurrentielles et les certificats verts. Ces deux catégories d'instruments visent à soutenir la production d'électricité d'origine renouvelable, par opposition aux aides telles que les crédits d'impôts ou détaxations qui ciblent les investissements sur ces mêmes filières [15].

Les instruments utilisés aujourd'hui en Europe pour soutenir le développement de la production d'électricité d'origine renouvelable appartiennent aux deux catégories évoquées ci-dessus :

-Instrument prix: les prix garantis et primes sont utilisés en particulier en Allemagne, en France et en Espagne.

-Instruments quantités: les dispositifs de quotas échangeables (certificats verts) sont utilisés notamment en grande Bretagne, en Belgique, en Italie et en Suède. Les enchères concurrentielles sont utilisées en complément d'autres dispositifs, en Irlande et en France en particulier [15].

Le débat de Kyoto a montré ce dont l'Europe est capable, quand elle agit sur la base d'un consensus, à la tête de coalitions soigneusement assemblées, dans le cadre de manœuvres bien préparées. Les pays membres, la Commission européenne et le Parlement européen doivent maintenant se hisser à la hauteur de l'intuition de leurs prédécesseurs historiques: une politique énergétique commune, adaptée aux exigences de notre temps, serait le vecteur d'une plus forte intégration de l'Europe [16].

II.4. Les problématiques de l'intégration et du raccordement des nouveaux producteurs EnR au réseau

II.4.1. Les coûts de raccordement

Les coûts de raccordement rassemblent l'ensemble des coûts d'investissement associés à l'intégration sur le réseau d'un nouveau producteur d'électricité d'origine renouvelable. Trois catégories de coûts sont différenciées dans la littérature.

- Les coûts correspondants à la construction de l'unité de production EnR; lorsque les coûts de raccordement n'intègrent que les seuls coûts de construction.
- Les coûts de construction de l'unité de production EnR auxquels s'ajoutent les coûts d'extension vers le réseau existant.

Les deux raccordements complets de la production renouvelable, comprenant la construction, l'extension et le renforcement éventuel de l'infrastructure existante [15].

II.4.2. L'allocation des coûts de raccordement entre les différents opérateurs

Dans l'hypothèse d'une intégration massive des énergies renouvelables au système électrique, l'allocation des coûts induits par le raccordement de la production distribuée entre les différents acteurs du marché est une question cruciale et une des barrières à surmonter vis-à-vis des investisseurs. Les coûts de raccordement représentent entre 4 et 14 % du coût total d'investissement pour un producteur éolien et de l'ordre de 5% pour une installation photovoltaïque. Selon que les principes d'allocation des coûts mutualisent en partie les investissements d'extension et de renforcement de réseau ou au contraire les affectent en totalité aux producteurs d'électricité renouvelables, la décision d'investissement peut en être largement modifiée.

Dans le premier, ni le producteur d'électricité d'origine renouvelable, ni l'opérateur du réseau ne prennent en charge directement les coûts d'expansion de l'infrastructure réseau. Les charges sont introduites dans le prix de l'électricité et imputées aux consommateurs finals. Néanmoins, dans la plupart des états membres de l'union européenne, les coûts d'intégration des EnR sont encore pris en charge par le constructeur des moyens de production EnR.

Dans le second modèle le producteur d'électricité d'origines renouvelables supporte la totalité des coûts d'infrastructure réseau liés à l'insertion de sa production. Les constructeurs sont alors incités à trouver la meilleure localisation possible pour leurs unités de production afin d'éviter des coûts de raccordement /renforcement trop importants. L'incitation à construire de nouveaux moyens de production EnR est cependant plus réduite que dans le dispositif précédent car l'exposition aux coûts peut être plus importante. Si les producteurs d'électricité renouvelable doivent prendre en charge l'intégralité des coûts de raccordement, la diffusion de la production distribuée en sera nécessairement réduite. Incontestablement, la répartition des coûts de raccordement sur l'ensemble des acteurs constitue une meilleure allocation pour promouvoir les investissements [15].

II.5. L'insertion des énergies renouvelables dans le marché électrique

L'insertion des EnR dans les marchés pose comme nous l'avons évoqué plusieurs problèmes, notamment en termes de gestion de l'intermittence. En effet, les producteurs doivent annoncer leurs prévisions d'injection pour le lendemain avant la fermeture des ordres aux marchés. Cette obligation nécessite de connaître la production prévue du lendemain et de la respecter pour ne pas subir de pénalités de déséquilibre. Ces règles peuvent en conséquence pénaliser fortement les producteurs d'énergie intermittente.

Dans le marché actuellement libéralisé, il apparait un problème de coordination entre une production inflexible et soumise aux aléas météorologiques (levent, l'ensoleillement, les précipitations) et la gestion d'une demande aléatoire. Dans certains cas particuliers, les EnR, malgré leur intermittence, peuvent avoir un impact positif sur le réseau en allégeant la demande qui lui est adressée. Le photovoltaïque par exemple produit d'avantage en été et peut assurer une partie de l'approvisionnement des climatiseurs ; il joue alors le rôle d'une centrale de pointe.

Cependant, dans la plupart des cas, l'intermittence reste un vrai problème du fait de la difficulté à anticiper précisément les injections. Les prix de l'électricité sont doublement affectés par cet effet en raison d'une part de l'insertion des productions EnR, et d'autre part de leur impact sur le marché d'équilibrage et sur les réserves nécessaires pour assurer l'équilibre offre /demande [15].

II.6.Les impacts de la production décentralisée sur le réseau électrique

II.6.1. Impacts sur le profil 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 GED à proximité des charges modifiera donc naturellement le profil de tension sur le réseau.

On peut constater sur la figure II.1 qu'au nœud 2 la tension est de 1,02 pu. Cela correspond à la tension de consigne du régleur en charge.

En connectant une GED de 2 MW au nœud 6, l'énergie est consommée plus localement que dans le cas sans GED. La puissance active injectée étant moins importante au nœud 3, 4, 5, la chute de tension est moins importante. Le plan de tension avec une GED connectée permet dans ce cas de remonter la tension tout en restant dans les limites admissibles. Ceci est bénéfique pour le réseau car cela permet de diminuer les pertes.

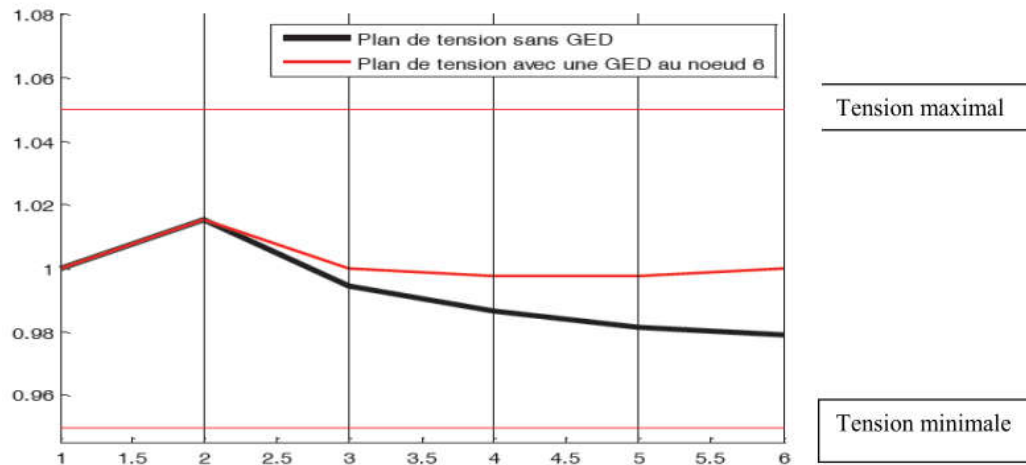


Figure II.1 : le profil de tension sur le réseau avec et sans GED au nœud 6

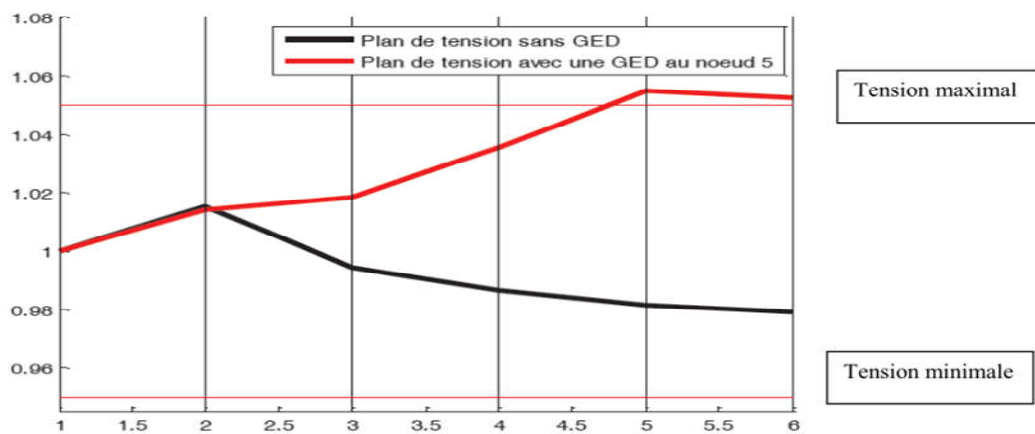


Figure II.2: le profil de tension sur le réseau avec et sans GED au nœud 5

En revanche, l'insertion de GED peut provoquer des surtensions comme l'illustre la Figure ci-dessus (figure II.2). Une GED de 10 MW est connectée au nœud 5. L'export de puissance provoque une augmentation de la tension qui dépasse la limite supérieure admissible (plus au moins 5%) [15].

II.6.2. Impacts sur la stabilité du système

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 (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 [16].

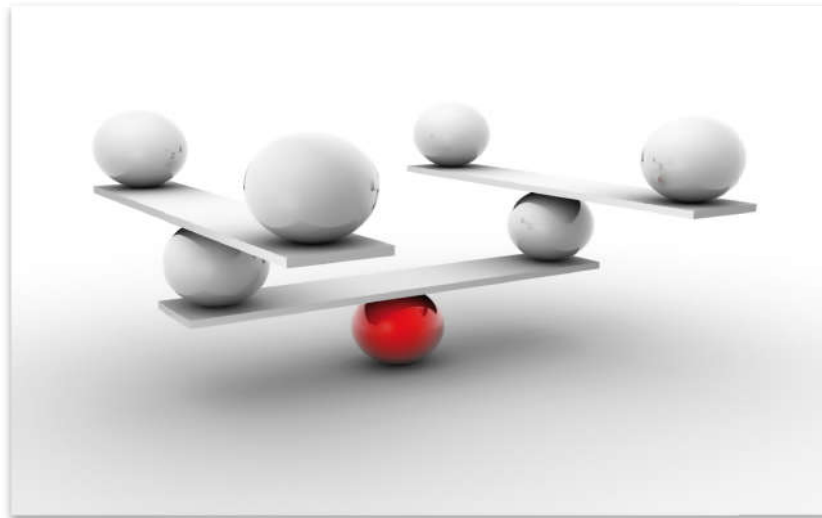


Figure II.3 : la stabilité du système

II.6.3. Impacts sur le plan de protection

La connexion de nouveaux générateurs au réseau modifiera également les courants de court-circuit 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 [17].

II.6.4. Impacts sur la continuité de service

Les PD, notamment celles à type énergie nouvelle et renouvelable, sont caractérisées par l'intermittence des sources primaires, l'indisponibilité des PD lorsque le système les sollicite peut occasionner la rupture d'électricité par manque de puissance (figure II.4) [18].



Figure II.4: la continuité de service

II.6.5. Impacts sur la qualité de service

Les PD de type asynchrone consomment de la puissance réactive afin de magnétiser leur circuit magnétique. Lors de la connexion au réseau, elles appellent un courant fort, ce qui contribue au creux de tension (en profondeur). 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 [18].

II.7. Productions décentralisées en Algérie

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable.

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

Le programme de l'efficacité énergétique permettra de réduire les émissions de CO₂ de 193 millions de tonnes [19].

Ce programme serait mené dans le but de produire 22 000 MW à l'horizon 2030, dont 10000 MW pourraient être dédiés à l'exportation. En matière d'emploi, la réalisation du programme des énergies renouvelables prévoit la création de plus de 200 000 emplois directs et indirects [20].

II.7.1 Énergie solaire

Vue de sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/m au Grand Sud [19].

II.7.2.Énergie éolienne

L'Algérie à l'instar des autres pays essaie de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier. Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs: le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays.

La carte représentée par la figure (II.5) montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar.

Concernant le nord, la vitesse moyenne est globalement peu élevée. Il est noté cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée Bejaia au nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qui ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La réalisation d'une carte saisonnière a montré clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventées. Néanmoins, il faut remarquer que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver [20].

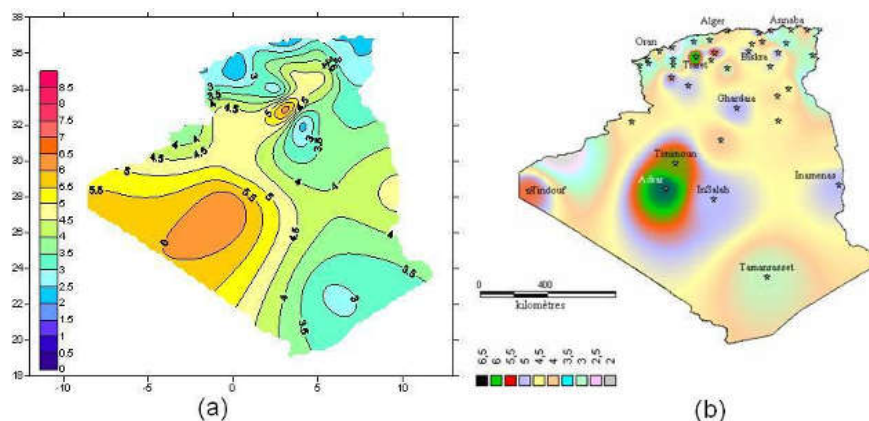


Figure II.5: Carte des vents en Algérie.

II.7.3.Énergie Géothermique

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis d'identifier plus de deux cent (200) sources chaudes qui ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers

Chapitre II : le raccordement des productions décentralisées et leurs impacts sur le réseau

environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra.

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5°C/100m [19].

- Zone de Relizane et Mascara
- Zone de Aïne Boucif et Sidi Aïssa
- Zone de Guelma et Djebel El Onk

II.7.4.Energie de la biomasse

Potentiel de la forêt: le potentiel actuel est évalué à environ 37 Mtep (tonnes équivalent pétrole).

Le potentiel récupérable est de l'ordre de 10 % ; Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles: 5 M de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1,33 Mtep/an [21].

II.7.5.Energie Hydraulique

Les quantités globales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³, mais finalement profitent peu au pays: nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer.

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface [19].

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le raccordement des productions décentralisées ainsi différents impacts de la production décentralisée sur le réseau électrique de distribution. Les GED, tant qu'elles restent des sources marginales, n'ont pas de grandes influences, ni sur le fonctionnement, ni sur la qualité de service du réseau. Si on prévoit une introduction massive des GED dans le réseau dans les années à venir, un des grands enjeux sera celui de la gestion des situations critiques.

Le chapitre suivant sera dédié à l'amélioration de la stabilité de la tension par l'intégration de différents types des DG.

Chapitre III:
Amélioration de la
stabilité de la tension par
l'intégration des DG

III.1. Introduction

Dans les systèmes de production d'électricité centralisés, les centrales électriques traditionnelles qui sont généralement situées à proximité des sources d'énergie primaires telles que le charbon, le pétrole et les rivières sont principalement utilisées pour produire de l'électricité. Ensuite, l'électricité produite est transmise aux consommateurs connectés au réseau de distribution électrique par de longues lignes de transmission. Cependant, la récente croissance de la demande d'électricité, les dépenses élevées de transport et les appréhensions écologiques ont conduit à la nécessité croissante de changer le paradigme de production actuel. Par conséquent, les producteurs d'électricité et les services publics sont très intéressés par la production et la commercialisation d'électricité à partir de ressources disponibles à proximité au niveau du système de distribution d'électricité afin de minimiser les dépenses et les pertes de transmission et d'atteindre les objectifs obligatoires en matière d'énergie renouvelable fixés de plusieurs siècles à l'échelle mondiale. À cet égard, les petites unités de production, notamment l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et la cogénération, sont considérées comme les technologies de production distribuée actuelles qui peuvent être intégrées dans les réseaux de distribution pour en améliorer la fiabilité. Cependant, l'utilisation de ces sources dans les réseaux de distribution faibles présente de nouveaux problèmes pour le contrôle de la tension et la compensation de la puissance réactive et nécessite de nouveaux dispositifs de compensation et des dispositifs de contrôle modernes pour améliorer la performance dynamique du système. C'est pourquoi ce chapitre explique l'impact de la production distribuée sur le réseau qui est causé par l'intégration arbitraire de cette DG dans le système et les méthodes proposées pour surmonter ces problèmes [22].

III.2. Présentation de la production distribuée

Les unités de production distribuée (DG) peuvent être définies comme de petites unités qui produisent de l'électricité à proximité des clients en utilisant les techniques d'énergie renouvelable, notamment l'énergie éolienne, l'énergie solaire et l'énergie géothermique. Les technologies de la production distribuée présentent divers avantages pour les réseaux électriques, nous pouvons citer :

- Améliorer la fiabilité des réseaux électriques
- Réduire les pertes d'énergie
- Améliorer le profil de tension des réseaux électriques.
- Améliorer la qualité de l'énergie
- Diminuer les émissions de gaz à effet de serre pour un meilleur environnement

Il convient de mentionner que les unités DG sont considérées dans ce travail uniquement par rapport aux dispositifs FACTS qui sont également utilisés pour améliorer la stabilité de la tension dans les réseaux électriques pour diverses raisons, notamment le faible coût de maintenance, le faible coût d'installation et les améliorations techniques par rapport aux dispositifs FACTS [22].

III.3.Impact des DG sur le système de distribution

La production dispersée qui a été introduite dans le système radial et maillé est conçue sans aucune production d'électricité dans le système de distribution ou aux charges locales. Cette introduction peut jouer un rôle important dans l'amélioration de l'écoulement de puissance et du profil de tension de l'ensemble du système. L'implication de ce type de production peut se manifester par des effets négatifs ou positifs, selon les caractéristiques de la production distribuée et les caractéristiques de fonctionnement du réseau de distribution. Par conséquent, ce travail résume les impacts de l'intégration de la production distribuée dans le réseau de distribution, y compris la stabilité de la tension et les pertes de puissance [22].

III.3.1. Amélioration de la stabilité de tension

La stabilité de tension du système électrique de puissance peut être définie comme la capacité de ce système à retrouver son état de fonctionnement normal après avoir été soumis à de graves interruptions telles que des défauts. Il existe un nombre important d'approches qui sont utilisées pour améliorer la stabilité des systèmes électriques de puissance, comme l'utilisation de dispositifs FACTS, des réactances shunt et de condensateurs ainsi que des unités DG. En effet, les unités DG peuvent jouer un rôle important dans l'amélioration de la stabilité du système électrique en augmentant la pénétration maximale de la charge ainsi que les marges de stabilité de la tension. En outre, les DG injectent une puissance réelle dans les réseaux électriques qui soutiennent la capacité des charges et du réseau par rapport aux fluctuations de tension dues à des changements soudains de charge et à des perturbations [22].

III.3.2. Minimisation des pertes de puissance

Le principe de la production distribuée est largement adopté en raison de ses nombreux avantages en termes d'amélioration de la stabilité du système électrique, minimisation des pertes de puissance et l'amélioration de la fiabilité. En effet, l'une des principales contributions de la technologie de production décentralisée est la minimisation des pertes de puissance, car l'attribution d'unités de production décentralisée peut entraîner une réduction de la quantité de courant absorbée

par la charge, car la majorité des unités de production décentralisée injectent du courant dans le réseau.

Par exemple, dans [22], l'auteur confirme que les unités de production d'électricité réduisent les pertes de puissance et améliorent la fiabilité, puis augmentent la tension. Ils confirment que la capacité et la position du générateur jouent un rôle important dans la modification de la capacité du générateur à améliorer la tension du réseau. De plus, une allocation inappropriée des unités de production décentralisée peut entraîner une augmentation des pertes du réseau car elle peut conduire à une inversion du flux de puissance. En fait, les unités de production décentralisée réduisent les pertes de puissance à des niveaux de pénétration faibles, alors qu'elles peuvent augmenter les pertes plus élevées que la valeur initiale à des niveaux de pénétration élevés. En résumé, les unités de production d'électricité représentent l'un des principaux outils pour améliorer la performance des systèmes électriques de puissance en tenant compte de certains facteurs tels que le niveau de pénétration [22].

III.4. Technologies des DG

Ces derniers temps, les productions intégrés (production décentralisée) ont reçu une attention particulière dans les réseaux électriques en tant qu'alternative aux centrales électriques traditionnelles qui ont causé des problèmes environnementaux. Les technologies de production distribuée existent depuis de nombreuses années. Elles ont été nommées en différents termes, notamment "générateurs de secours", et "systèmes électrique de puissance sur site". Les technologies de production décentralisée ne constituent pas une nouvelle approche, divers types de production décentralisée ont été observés au cours des dernières décennies, comme les turbines à gaz, les moteurs à combustion interne et les micro-turbines. Cependant, de nombreuses nouvelles technologies, notamment l'éolien, la photovoltaïque et les piles à combustible, sont apparues comme des substituts aux précédentes en raison des nouveaux changements survenus dans l'industrie de l'énergie. L'objectif de cette section est de fournir un bref aperçu des technologies de production décentralisée qui sont utilisées dans le monde à l'heure actuelle [22].

III.4.1. L'énergie solaire

Les modules solaires photovoltaïques peuvent être définis comme des dispositifs à l'état solide qui transforment l'énergie autonome des photons en électricité continue. Le principe fondamental du fonctionnement des modules photovoltaïques remonte à 150 ans. Cependant, les progrès significatifs des modules photovoltaïques ont été à l'origine de la sous-invention de la cellule de

silicium par les laboratoires Bell au milieu du vingtième siècle. Il convient de mentionner que la technologie solaire présente de nombreux avantages, tels que des émissions gratuites, des services de longue durée et un fonctionnement silencieux. De plus, elle ne nécessite pas de dépenses élevées en termes de maintenance et de carburant. De plus, l'énergie solaire est considérée comme redondante et infinie. Inversement, elle présente certains inconvénients, notamment l'intermittence et l'indisponibilité de la dépendance aux conditions météorologiques pendant la nuit. De plus, le niveau de pénétration élevé du photovoltaïque, associé aux variations de la demande de charge, entraîne des fluctuations de puissance ainsi qu'une augmentation imprévue de la tension, des problèmes de stabilité de la tension et des pertes de puissance plus importantes dans les réseaux de distribution d'électricité [22].

III-4.2.L'énergie éolienne

L'énergie éolienne n'est pas une forme nouvelle, elle est utilisée depuis sept décennies. Les éoliennes sont composées d'un générateur, d'un rotor, de pales, d'un dispositif d'entraînement, d'un arbre et d'une nacelle. Les turbines contemporaines fournissent de l'électricité verte aux parcs éoliens ou aux particuliers. Ils peuvent être classés en deux catégories, comme l'éolienne à axe vertical et éolienne à axe horizontal turbine. Ce type d'énergie se caractérise par des émissions gratuites et l'absence de besoin en combustible. Il est également connu que l'énergie éolienne est considérée comme une énergie sans fin et redondante source. Toutefois, les principaux problèmes liés à la production éolienne sont l'intermittence et les coûts par ailleurs, certains problèmes peuvent survenir en raison d'une production éolienne extrême simultanée à une demande non satisfaite, tels que l'augmentation de la tension, l'instabilité de la tension et les fortes pertes de puissance dans les réseaux de distribution d'électricité [22].

III-4.3.Système hybride éolien-solaire

Il est impératif de noter que la combinaison de l'énergie solaire photovoltaïque et de l'énergie éolienne présente l'avantage que ces deux sources se complètent, puisque les pics de fonctionnement ont lieu à des moments différents de la journée et de l'année. De toute évidence, la production d'électricité d'un tel système est constante et tend à moins fluctuer que les deux sous-systèmes séparément. Dans ce chapitre, le système hybride éolien-solaire est utilisé pour comprendre l'impact de la combinaison de ces sources sur la stabilité du système de IEEE-14 nœuds. Dans ce cas, l'énergie produite à partir de l'énergie solaire et éolienne est injectée dans les nœuds faibles de ce particulier système [22].

III.5. Calcul Continu de l'écoulement de puissance (Continuation power flow- CPF)

Les techniques du calcul continu de l'écoulement de puissance sont largement reconnues comme un outil précieux pour déterminer les courbes V(P) du système de puissance et permettent d'estimer les conditions de chargement maximal et des solutions «critiques» (par exemple, saddle-node et limites induites de points de bifurcation). Malgré que les grands systèmes nécessitent un calcul numérique exigeant, le CPF n'est pas affectée par des instabilités numériques. En fait, il est capable de déterminer la partie stable et instable des courbes V(p) et peut fournir des informations supplémentaires, telles que les facteurs de sensibilité de la solution actuelle à l'égard des paramètres pertinents.

D'un point de vue mathématique, le CPF est une technique d'homotopie et permet d'explorer la stabilité des équations du système électrique en faisant varier un paramètre du système, qui, dans les études de stabilité statique et dynamique typique de tension, est le paramètre de charge λ . De manière générale, le CPF consiste en un pas prédicteur réalisé par le calcul du vecteur tangent et un pas correcteur qui peut être obtenu soit par l'intermédiaire d'un paramétrage local ou à une intersection perpendiculaire [20].

a) Pas prédicteur

Au point d'équilibre générique p, la relation suivante s'applique:

$$f(x_p, \lambda_p) = 0 \Rightarrow \left. \frac{df}{d\lambda} \right|_p = D_x f|_p \left. \frac{dx}{d\lambda} \right|_p + \left. \frac{df}{d\lambda} \right|_p = 0 \quad (\text{III.1})$$

Et le vecteur tangent peut être approximé par:

$$\tau_p = \left. \frac{dx}{d\lambda} \right|_p \approx \frac{\Delta x_p}{\Delta \lambda_p} \quad (\text{III.2})$$

À partir d'III.1 et III.2

$$\begin{aligned} \tau_p &= -D_x f|_p^{-1} \left. \frac{\partial f}{\partial \lambda} \right|_p \\ \Delta x_p &= \tau_p \Delta \lambda_p \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

À ce point un pas de grandeur k de contrôle doit être choisi pour déterminer la quantité Δx_p et $\Delta \lambda_p$, avec une normalisation afin d'éviter de grands pas quand $\|\tau_p\|$ est grand.

$$\Delta\lambda_p \triangleq \frac{k}{\|\tau_p\|} \Delta x_p \triangleq \frac{k \tau_p}{\|\tau_p\|} \quad (\text{III.4})$$

Où $\|\cdot\|$ est la norme euclidienne et $k = \pm 1$. Le signe de k détermine l'augmentation ou la diminution de λ . La figure (III.1) présente une représentation graphique du pas prédicteur.

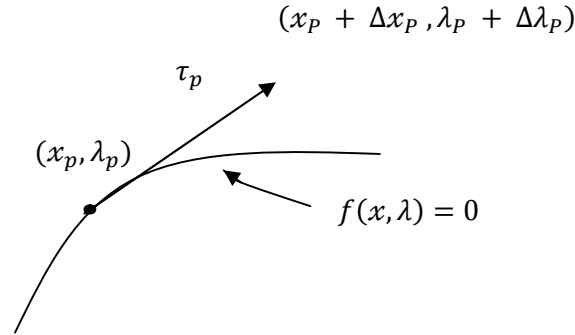


Figure (III.1): Calcul continu de l'écoulement de puissance: pas prédicteur obtenu par les moyens de la tangente

b) Pas correcteur

Pour le pas correcteur, l'ensemble des équations $n+1$ est résolu :

$$\begin{aligned} f(x, \lambda) &= 0 \\ \eta(x, \lambda) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

Où la solution de f doit être dans le collecteur de bifurcation et η est une équation supplémentaire pour garantir un ensemble non singulier au point de bifurcation. Pour le choix de η il y'a deux options: l'intersection perpendiculaire et la par métrisation locale [20].

Dans le cas de l'intersection perpendiculaire, dont la représentation est donnée par la figure (III.2), l'expression de η devient (équation III.6):

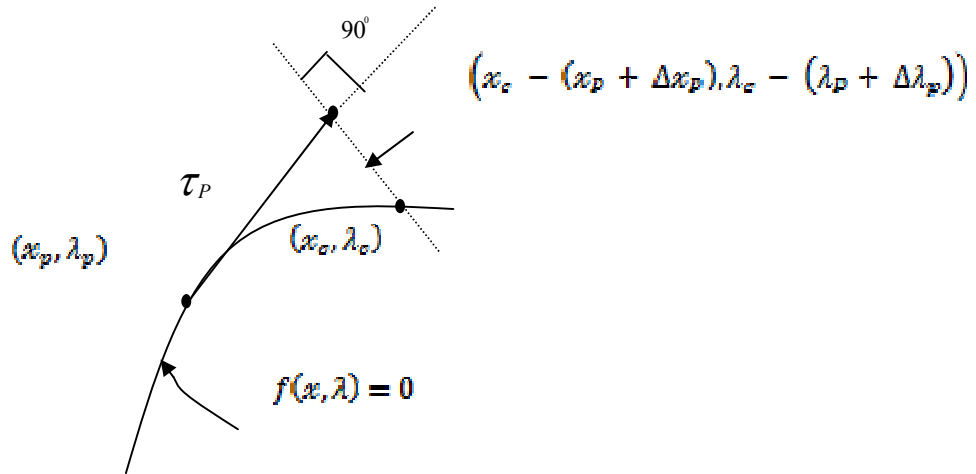


Figure (III.2) : Calcul continu de l'écoulement de puissance : pas correcteur obtenu par les moyens d'intersection perpendiculaire.

$$\eta(x, \lambda) = \begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta \lambda_p \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_c - (x_p + \Delta x_p) \\ \lambda_c - (\lambda_p + \Delta \lambda_p) \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{III.6})$$

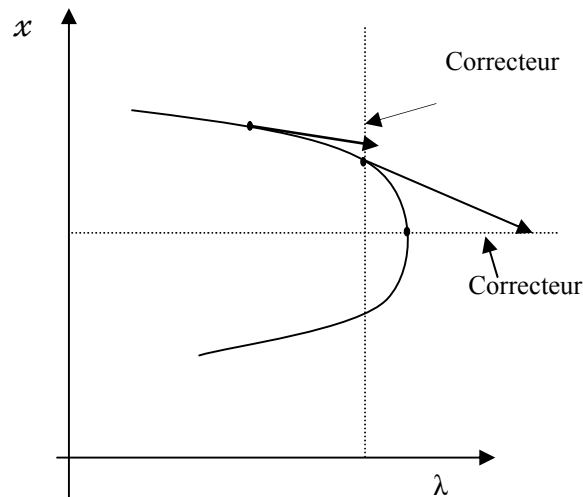
Tandis que pour la paramétrisation locale, soit, le paramètre λ soit la variable x_i est forcée d'être une valeur fixe.

$$\eta(x, \lambda) = \lambda_c - \lambda_p - \Delta \lambda_p \quad (\text{III.7})$$

Ou

$$\eta(x, \lambda) = x_{ci} - x_{pi} - \Delta x_{pi} \quad (\text{III.8})$$

Le choix pour que la variable soit fixe dépend du collecteur de bifurcation défini, comme c'est présenté à la figure (III.3).



Figure(III.3): Calcul continu de l'écoulement de puissance: pas correcteur obtenu par les moyens du para métrisation locale

III.6.Simulations relatives au réseau standard IEEE 14 nœuds

III.6.1.Présentation du réseau

Le réseau IEEE-14 nœuds représente une portion du système électrique américain du Midwest de 1962. Sa structure, montrée à la figure III.4, est composée de deux niveaux de tension différents (33kV et 132kV) [22].

Cinq générateurs sont connectés au réseau, trois de ces générateurs sont utilisés uniquement en compensateur synchrone (Comp3, Comp6 et Comp8). Les générateurs Gr1 et Gr2, connectés en 132kV, sont des générateurs synchrones réalisant le réglage primaire de fréquence et 11 nœuds PQ (nœud de charge).

En utilisant la technique du CPF, la stabilité de tension est étudiée. Le comportement du système test considéré avec et sans l'intégration des DG sous différentes conditions de charge est étudié.

L'emplacement des DG est déterminé à travers le CPF.

L'analyse de la stabilité de tension est effectuée en commençant à partir d'un point de fonctionnement stable initiale et en augmentant ensuite les charges par le facteur λ jusqu'à atteindre le point de singularité de la linéarisation de l'écoulement de puissance. Cette étude est implémentée par le logiciel PSAT sous l'environnement MATLAB.

Dans ce travail, le réseau IEEE 14 nœuds va être analysé sous différents scénarios, état de base, un seul type de DG et multiple DG.

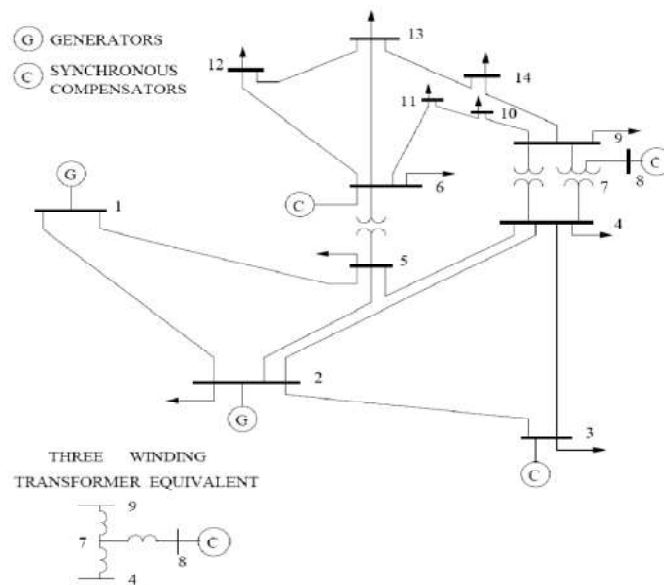


Figure (III.4) : Système test IEEE 14 nœuds

III.6.2.Emplacement des DG

D'après l'analyse du CPF illustré dans la figure (III.5), les nœuds 9,10 et 14 sont les nœuds les plus critiques.

La figure (III.6) montre la courbe $V(P)$ pour les nœuds les plus critiques du système sans les DG.

Le point de charge maximal ou le point de bifurcation quand la matrice jacobienne est singulière survient à $\lambda = 3.579 \text{ p.u}$, les nœuds 9, 10,14 sont indiqués comme étant les nœuds les plus critiques et ont besoin d'être supporté.

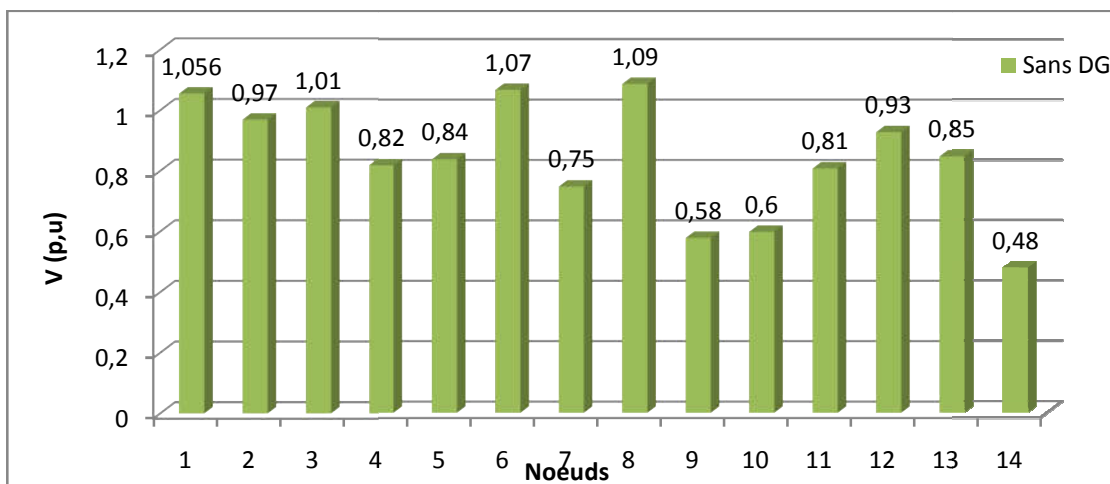


Figure (III.5) : Profil de la tension du systèmeIEEE 14 nœuds

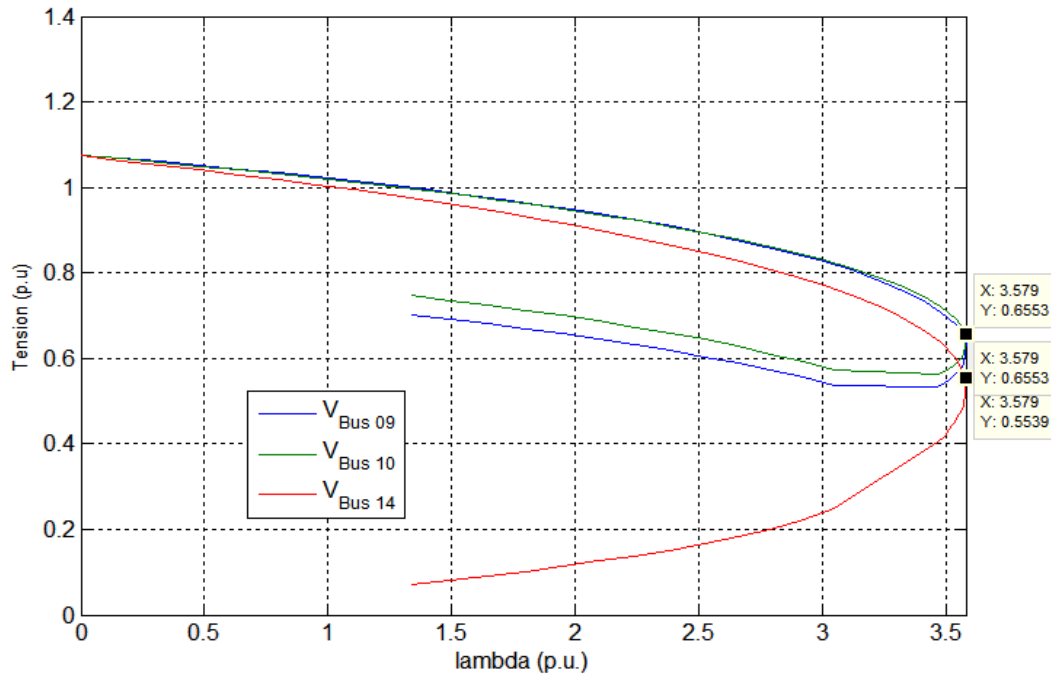


Figure (III.6): Courbe V(P) du système 14 nœuds sans les DG

Selon la courbe V(p) de la figure (III.6) le réseau est considéré instable. Cependant, cette situation a été résolue en installant la production décentralisée aux nœuds les plus critiques du réseau, ce qui a contribué à améliorer la stabilité de la tension de l'ensemble du système.

Les résultats ci-dessous comprennent différentes unités DG, y compris l'énergie éolienne et solaire qui sont intégrées dans les nœuds 10 et 14 qui ont la courbe V(p) la plus instable pour améliorer la stabilité de la tension du système proposé.

III.6.2.1. Emplacement d'un générateur décentralisé au nœud 9

La courbe V(p) pour le système avec le générateur décentralisé de puissance de 30 MVA au nœud 9 est illustrée sur la figure (III.7). D'après la figure (III.7), il est évident que le générateur décentralisé fournit une courbe V(p) plus stable avec un paramètre de charge $\lambda = 6.63 \text{ p.u.}$

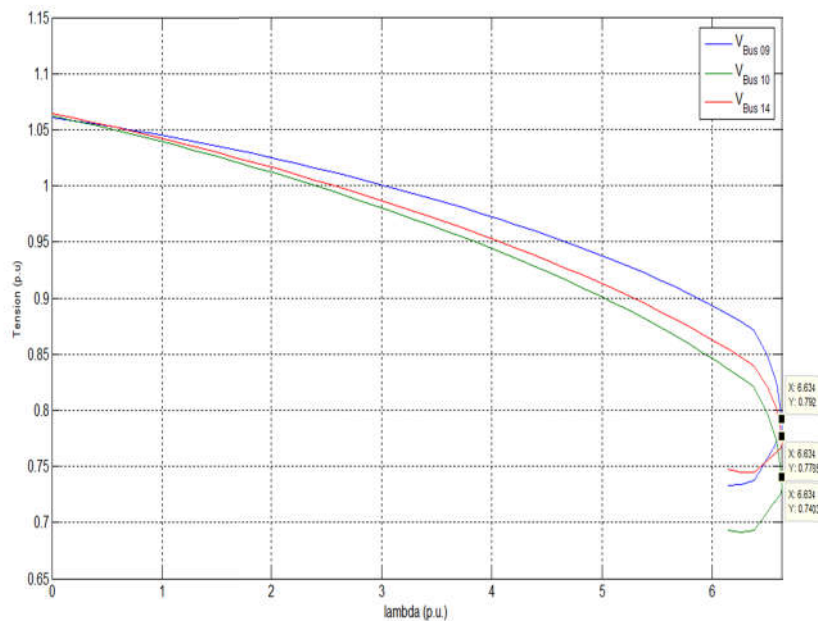


Figure (III.7) : Courbe V(p) avec le générateur décentralisé au nœud 9

Dans l'objectif d'intégrer des DG à base des énergies renouvelable dans le réseau électrique que nous avons adopté (IEEE14 nœuds) la simulation passera par plusieurs scénarios:

III.6.3.Scénario 1: L'intégration d'un DG à base éolien au nœud 14

Nous allons simuler le réseau dans le cas d'un DG éolien intégré au nœud 14 avec une puissance de 20 MW. Les figures (III.8) & (III.9) illustrent respectivement les profils de tension et la courbe V(P), nous remarquons une amélioration de la tension au niveau des nœuds critiques par rapport à l'état de base et le paramètre de charge $\lambda = 6.61 \text{ p.u.}$

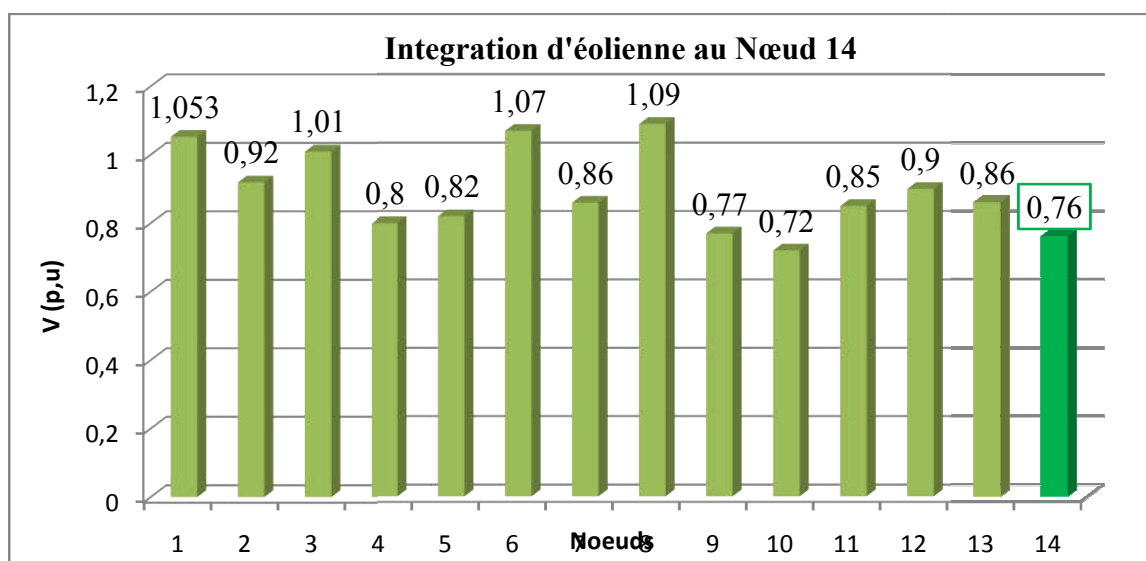
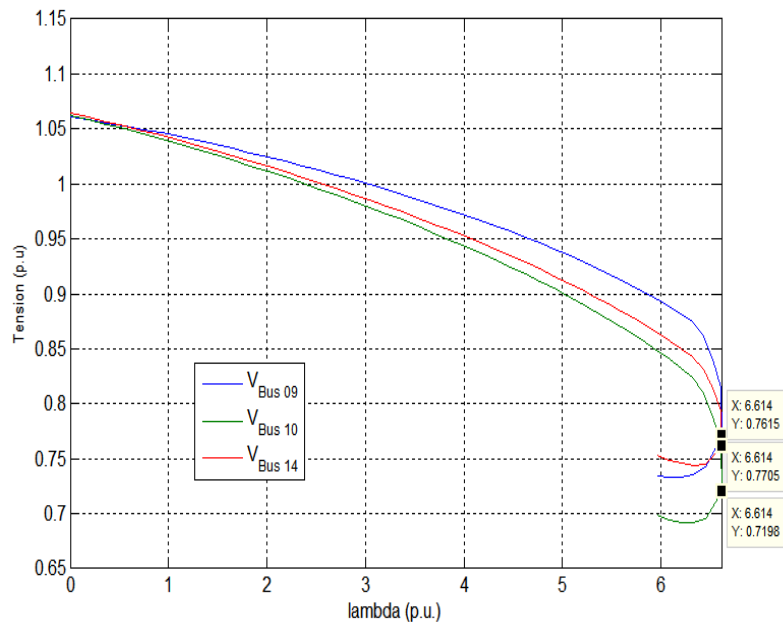


Figure (III.8) : Profil de tension avec DG de type éolien au nœud 14



III-6.4. Scénario 2: L'intégration d'une éolienne aux nœuds 14&10

Nous allons intégrer deux DG type éolien de puissances de 20 MW chacun sur les nœuds fragiles 14 et 10. Les figures (III.10) & (III.11) illustrent respectivement les profils de tension et la courbe V(P), la tension dans des nœuds 10 et 14 est nettement améliorée après l'installation des DG, par contre les courbes V(p) gardent la partie instable par rapport à l'état de base avec un paramètre de charge $\lambda = 5.72$ p.u.

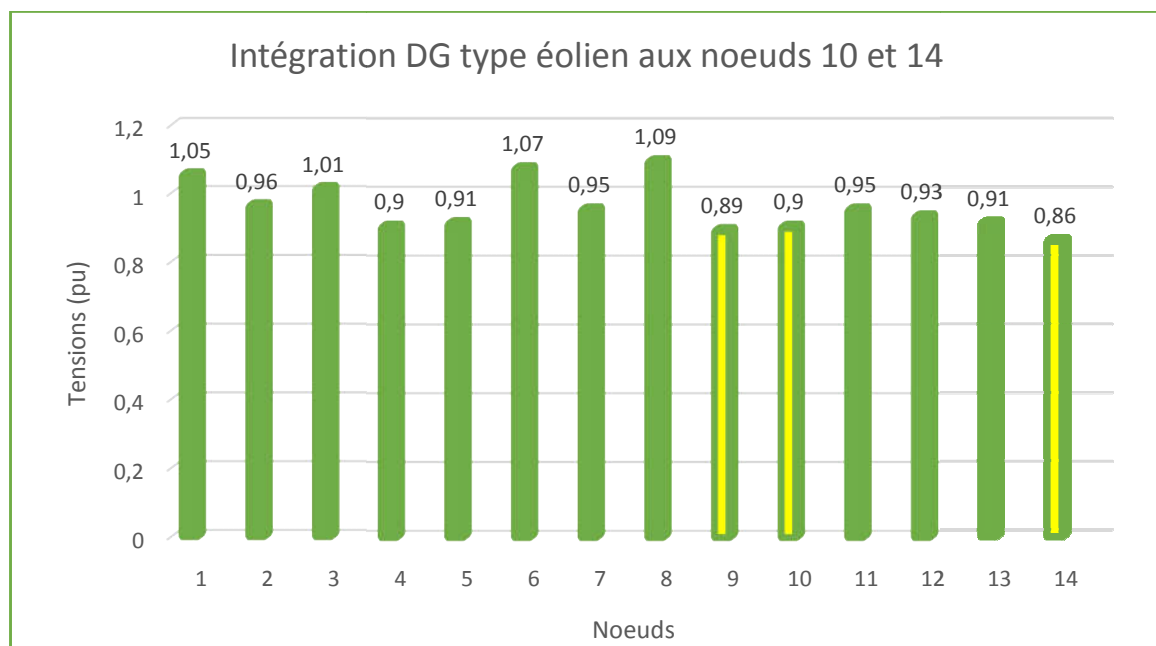


Figure (III.10): Profil de tension avec DG type éolien aux nœuds 14&10

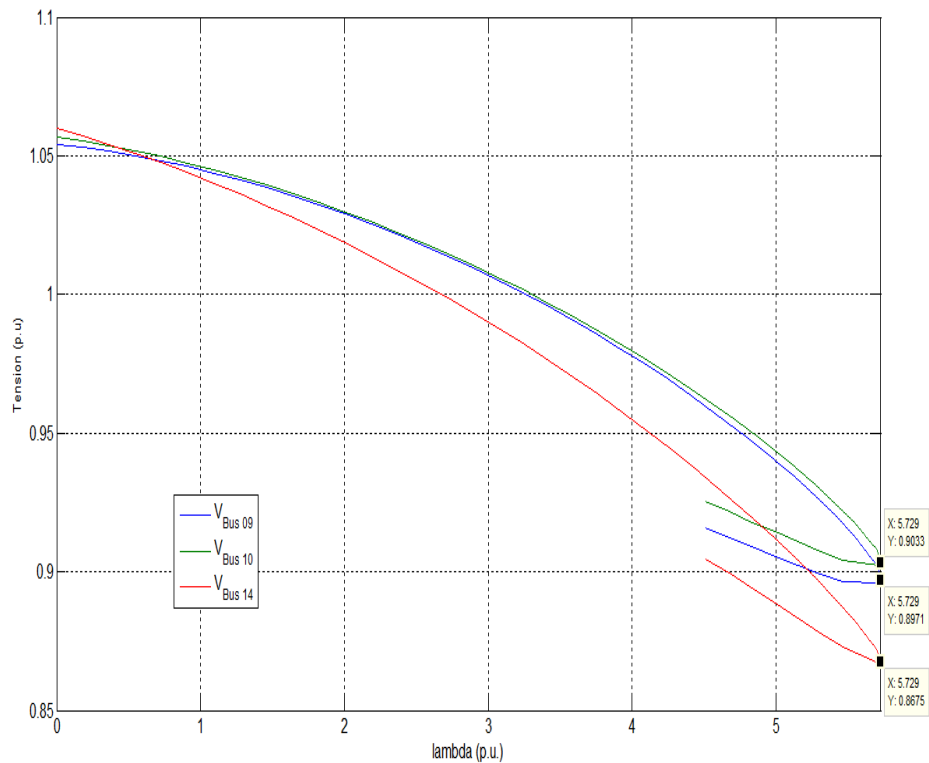


Figure (III.11): Courbe V(p) avec DG éolien aux nœuds 14&10

III.6.5. Scénario 3: L'intégration d'un DG type PV au nœud 14

Après l'intégration du DG type PV d'une puissance de 10 MW au nœud 14, nous avons obtenu le profil de tension du réseau et la courbe V(p) présentés par les figures (III.12) & (III.13) respectivement. Nous remarquons une amélioration de la tension du système y compris des nœuds critiques après l'intégration du système PV au nœud 14. En outre les courbes V(p) sont beaucoup plus plates par rapport à l'état de base avec $\lambda = 7.21$ p.u.

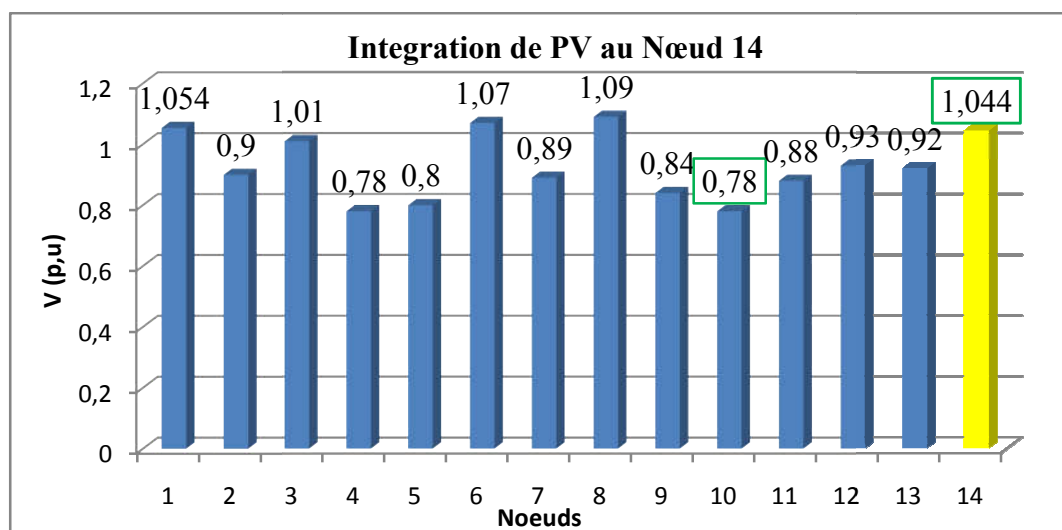


Figure (III.12): Profil de tension avec DG PV au nœud 14

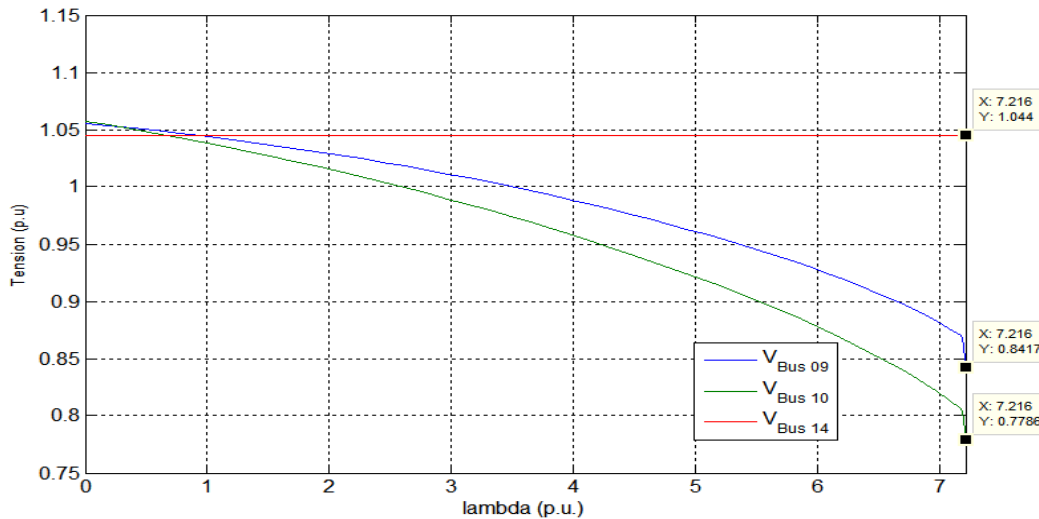


Figure (III.13): Courbe V(P) avec DG type PV au nœud 14

III.6.6.Scénario 4: L'intégration de deux DG type PV aux nœuds 14&10

L'intégration de deux DG type PV d'une puissance de 10 MW chacun aux nœuds 14 et 10 a permis d'obtenir les résultats présentés sur les figures (III.14) & (III.15), ces derniers illustrent les profils de tension et les courbes V(p) respectivement.

D'après ces figures nous remarquons que le profil de tension après l'intégration du système PV a dépassé la limite de tension requise qui est 1,05 p.u, pour la courbe V(p) des nœuds 10 et 14 est beaucoup plus plate ce n'est pas le cas pour le nœud 9 avec $\lambda = 2.55\text{p.u.}$

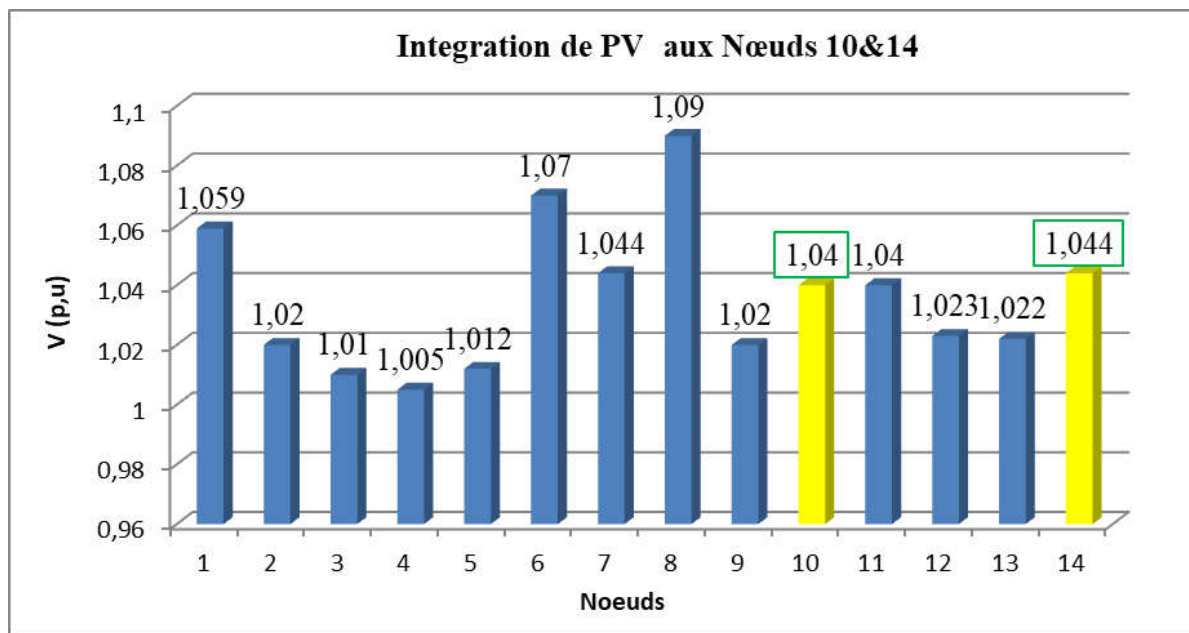


Figure (III.14): Profil de tension avec DG type PV aux nœuds 14&10

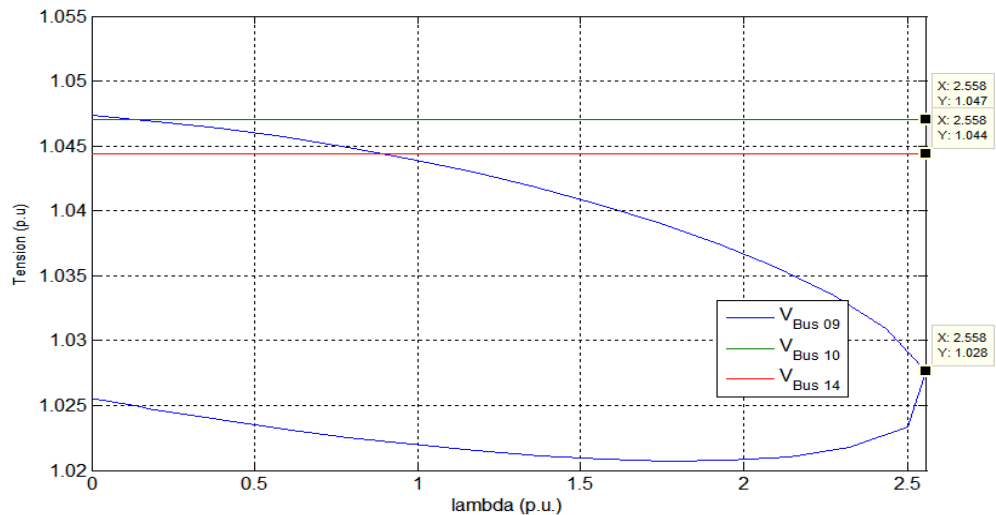


Figure (III.15): Courbe V(P) avec DG type PV aux nœuds 14 & 10

III.6.7.Scénario 5 : l'intégration d'un système hybride (éolien / PV) aux nœuds 10&14

Nous avons gardé l'éolienne raccordé au nœud 10 avec le système PV que nous avons intégré sur le nœud 14 pour former une combinaison éolien /PV et nous avons obtenus les résultats suivants: Les profils des tensions pour le cas avec un système hybride éolien/ PV sont illustrés sur la figure (III.16). D'après cette figure, il est évident que l'introduction de ce système dans les réseaux électriques a un impact sur le profil de tension et d'après la figure (III.17) on remarque que les courbes V(p) sont beaucoup plus plat pa rapport aux scénarios précédents avec $\lambda = 5.26\text{p.u.}$

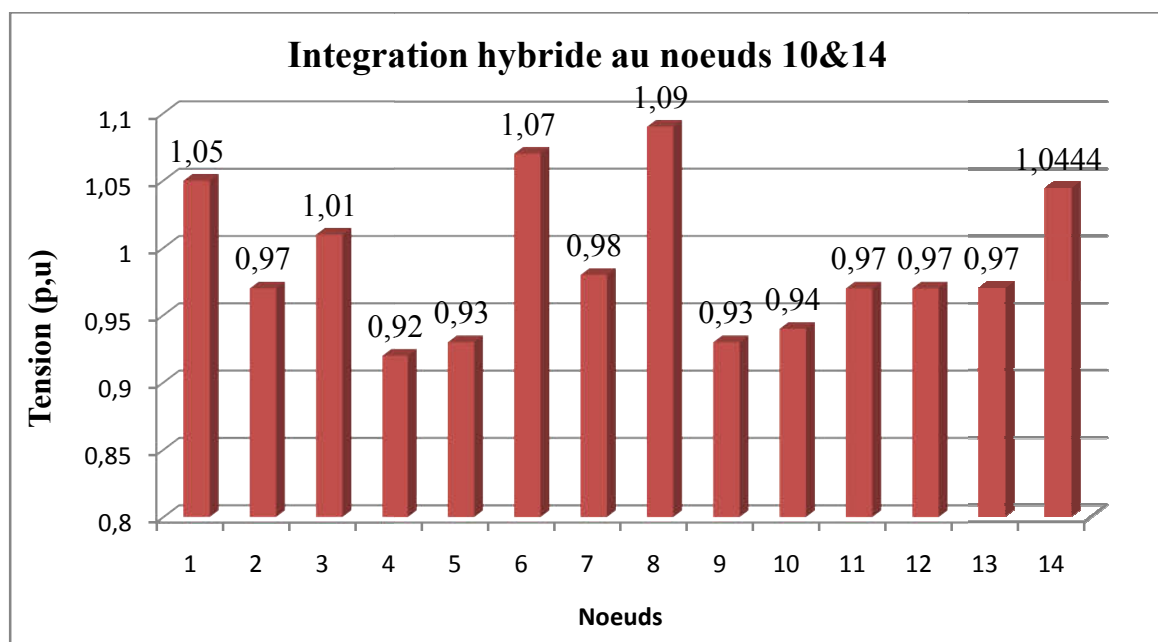


Figure (III.16): Profil de tension avec un système hybride aux niveaux des nœuds 14&10

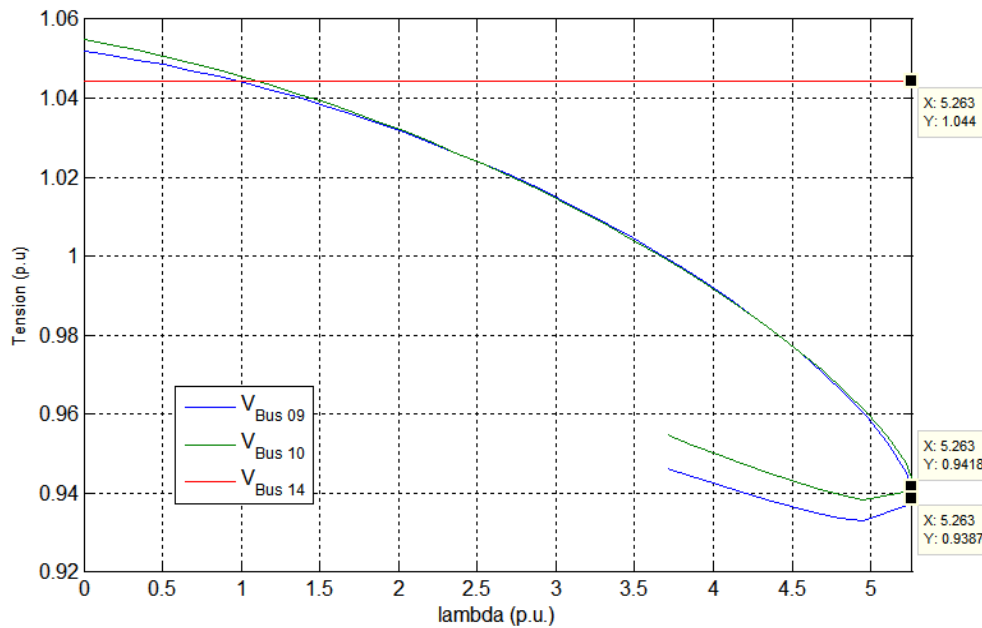


Figure (III.17): Courbe V(p) avec DG Hybride (éolien + PV) aux nœuds 10&14

Il est à noter que la réaction des pertes de puissance et du profil de tension peut jouer un rôle notable dans l'amélioration de la stabilité de la tension qui dépend de l'emplacement des unités de production d'électricité dans le système. En fait, les unités de production d'électricité ont eu un impact positif sur la stabilité de la tension du système respectif. Comme le montre les figures (III.18, III.19) qui montre la différence avant et après l'intégration des unités décentralisée. Le Tableau III.1 comprend les différentes unités de production décentralisée, y compris l'énergie éolienne et solaire qui sont intégrés dans les 14 e et 10. On considère alors l'hybridation entre l'éolien et le solaire pour voir l'importance de cette hybridation. Puisque notre but à travers la recherche de l'emplacement idéal pour la stabilité de tension c'est-à-dire maximiser le facteur de charge λ du système tout en contrôlant la tension et minimisant les pertes des puissances actives et selon les résultats du tableau III.1 et les figures (III.18, III.19) le meilleur emplacement des unités décentralisée c'est le système hybride (éolien et solaire).

Chapitre III : Amélioration de la stabilité de la tension par l'intégration des DG

DG/NŒUD	Sans DG	Puissance Photovoltaïque		Puissance éolienne		Hybride (Solaire + éolienne)
NŒUDS nu	V-Critique	NŒUDS		NŒUDS		NŒUDS
		14	14&10	14	14&10	14&10
1	1.0564	1.0547	1.0596	1.0553	1.0574	1.057
2	0.97248	0.9071	1.0285	0.92383	0.96569	0.97
3	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
4	0.82551	0.78434	1.0055	0.80321	0.90408	0.92
5	0.84768	0.80641	1.012	0.82416	0.91989	0.93
6	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
7	0.75825	0.89164	1.0435	0.86412	0.95738	0.98
8	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
9	0.58676	0.84431	1.0233	0.77051	0.89709	0.93
10	0.60862	0.7786	1.0471	0.71976	0.90331	0.94
11	0.81084	0.88174	1.0474	0.85308	0.95466	0.97
12	0.93555	0.92966	1.0249	0.90232	0.93779	0.97
13	0.85751	0.92894	1.0232	0.86645	0.91566	0.97
14	0.48782	1.0444	1.0444	0.76155	0.86753	1.0444
Plosses (p.u)	1.55	2.05	0.12	1.809	0.891	0.69
λ (p.u)	3.57	7.21	2.55	6.61	5.72	5.26

Tableau III.1: Tension, pertes de puissances, paramètre de charge du système IEEE 14 nœuds sans et avec les unités DG.

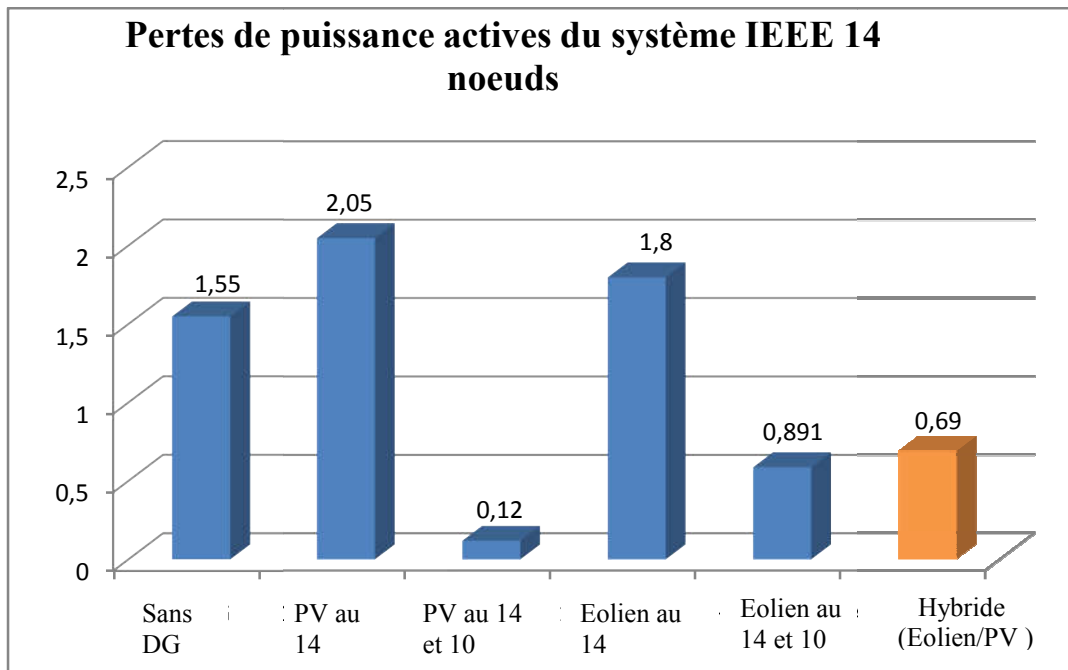


Figure (III.18): Pertes de puissance du système IEEE 14 noeuds dans différents scénarios d'installation d'unités DG.

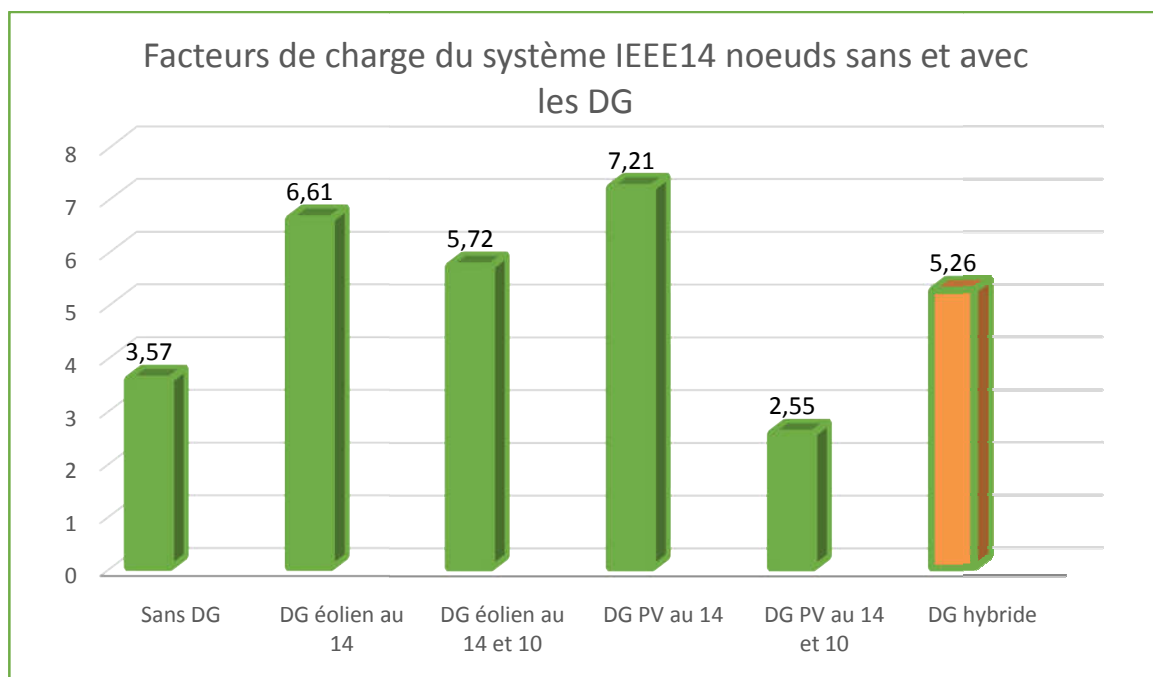


Figure (III.19): Facteurs de charge du système IEEE 14 noeuds sous différents scénarios d'installation d'unités DG.

III.7.Conclusion

Ce chapitre a principalement montré comment améliorer la stabilité de tension du système avec l'installation de production distribuée dans les réseaux de distribution. Principalement, l'impact des DG sur le système de distribution électrique, y compris l'amélioration du profil de la tension et la minimisation des pertes de puissance été discuté. En outre, diverses générations distribuées des technologies telles que l'énergie solaire et l'énergie éolienne ont été présenté dans ce chapitre.

Dans ce chapitre, la méthode de l'écoulement de puissance continu (CPF) a été appliquée au système IEEE- 14 nœuds afin d'analyser la stabilité de la tension avec la pénétration des DG.

Conclusion générale

Conclusion générale

De nos jours, les problèmes liés au fonctionnement des réseaux de distribution et de production d'énergie électrique ont pris une importance considérable. Face à une consommation d'électricité qui ne cesse d'augmenter et à des conditions d'environnement très désagréables, les réseaux d'énergie électrique ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés.

Cette complexité de structure a de très nombreuses conséquences. La difficulté de maintenir un profil de tension acceptable a substantiellement augmenté. La stabilité de tension du réseau est alors caractérisée par sa capacité de maintenir la tension aux bornes de la charge dans les limites spécifiées dans le fonctionnement normal.

Dans le contexte de la production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables et leurs intégrations dans les réseaux électriques le travail effectué dans ce Mémoire concerne l'Analyse de la stabilité de tension avec la pénétration des DG et d'après la simulation effectuée par le logiciel PSAT sous l'environnement MATLAB nous sommes arrivés à ce qui suit:

L'impact des DG sur l'effondrement de tension a été mené à bien à l'aide du logiciel PSAT sous l'environnement MATLAB. Pour les simulations statiques, nous avons utilisé le réseau IEEE 14 nœuds, le facteur de charge a été calculé par la technique du calcul continu de l'écoulement de puissance (CPF). Cette technique a montré ses capacités à surmonter les problèmes de la singularité de la matrice jacobéenne rencontrés dans les algorithmes standards de calcul de l'écoulement de puissance.

Les simulations statiques ont montré l'apport incontestable des DG dans l'amélioration de la stabilité de tension.

L'intégration d'un DG ou des DG améliore le niveau de sécurité du réseau car on pourra, grâce à leurs insertions et suivant les cas, éviter l'effondrement de tension.

Nous pouvons maintenant énoncer quelques perspectives ayant pour objectif de compléter ce que nous avons présenté dans ce rapport de mémoire:

- La simulation en temps réel pour analyser l'impact des DG sur le phénomène de l'effondrement de tension.
- Le raccordement des énergies renouvelables aux réseaux intelligents, dits «smart grids», l'un des défis des énergies renouvelables telles que l'éolien ou le solaire réside dans le risque d'interruption de leur production dont la stabilité est menacée par leur caractère aléatoire.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1]	N. Bakhta, «La production décentralisée», Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état, Université sciences et technologies Mohamed Boudiaf « USTO », 2016/2017.
[2]	N.Aouzellag, «Etude de la variation de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau de distribution», Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état, Université A. MIRA-Bejaia, 2012/2013.
[3]	Site d'internet : https://www.i4ce.org/wp-core/wp-content/uploads/2015/11/I4CE-Secteur-feuillet-ENE-1111.pdf , « Production d'énergie centralisée et réseaux ».
[4]	Site d'internet : https://slideplayer.fr/slide/13588883 , « Réseaux de distribution Publique HTA », Slideplayer, 2018.
[5]	V.S. Tefegum, «Etude de la construction d'une ligne électrique Haute Tension 90KV PA-WONA», Mémoire pour l'obtention du Master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Burkina Faso, 2013/2014.
[6]	Site d'internet : https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/souterrain , « Lignes souterraines »
[7]	Site d'internet : http://www.bestgrid.eu/uploads/media/D3.2_Elia_Public_information_document_part2.pdf , « La pose des liaisons souterraines pour le transport de l'électricité à haute tension ».
[8]	M. A. F. Garcia, «Interaction des réseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisée», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2008
[9]	Y.Guehrrar, « Etude d'intégration d'une production décentralisée dans un réseau de distribution électrique», Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2016/2017
[10]	D.LABED, «Production décentralisée et couplage au réseau», Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Doctorat d'état, Université mentouri, Constantine, 2008.
[11]	Site d'internet : https://www.xpair.com/lexique/definition/energie-geothermique.htm , « Energie géothermique »
[12]	Site d'internet : http://barrages-hydroelectriques.e-monsite.com/pages/fonctionnement.html , « TPE Barrages hydroélectriques ».
[13]	Site internet: https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/energies-renouvelables-la-croissance-va-s-accelerer-si-les-politiques-suivent-selon-l-aie_107695 .
[14]	Site internet : https://les-smartgrids.fr/croissance-energies-renouvelables-pays/ .
[15]	N.HadjSaïd, «La distribution d'énergie électrique en présence de production décentralisée», Ouvrage, La VOISIER, Paris, 2010.
[16]	Site internet : https://www.cairn.info/revue-politique-etrangere-2007-3-page-529.htm#
[17]	M.Khatir, «Insertion de production décentralisée comme facteur de vulnérabilité du système électrique», Cours, Université Djillali LIABES Sidi-Bel-Abbès, 2014.
[18]	M.Mouzaia, S. Idiri, « Étude de la variation de tension pour le raccordement d'une production

Références bibliographiques

	décentralisée dans un réseau de distribution », Mémoire de Master, Université A. MIRA-Bejaia, 2012 / 2013.
[19]	Site internet : https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie
[20]	S.A. Bouras, M.Abdelhafedh, « Contribution à l'étude des systèmes éoliens et leurs emplacements dans les réseaux électriques », Mémoire de master, UniversitéDr. Moulay Tahar-Saida, 2014 / 2015.
[21]	Ouïs, w.Labiad, «Analyse des réseaux électriques par l'intégration des sources à base des énergies renouvelables», Mémoire de Master, UniversitéDr. Moulay Tahar, Saida,2015 /2016.
[22]	Zaid H. Al-Tameemi· Karrar , M. Abuwaleda, Hussam M. Almukhtar , Mohammed K. Abbas, «Voltage stability enhancement based on DG units», https://doi.org/10.1007/s00202-018-0737-1 , Springer, 2018

Annexes

A. Schémas Simulink PSAT

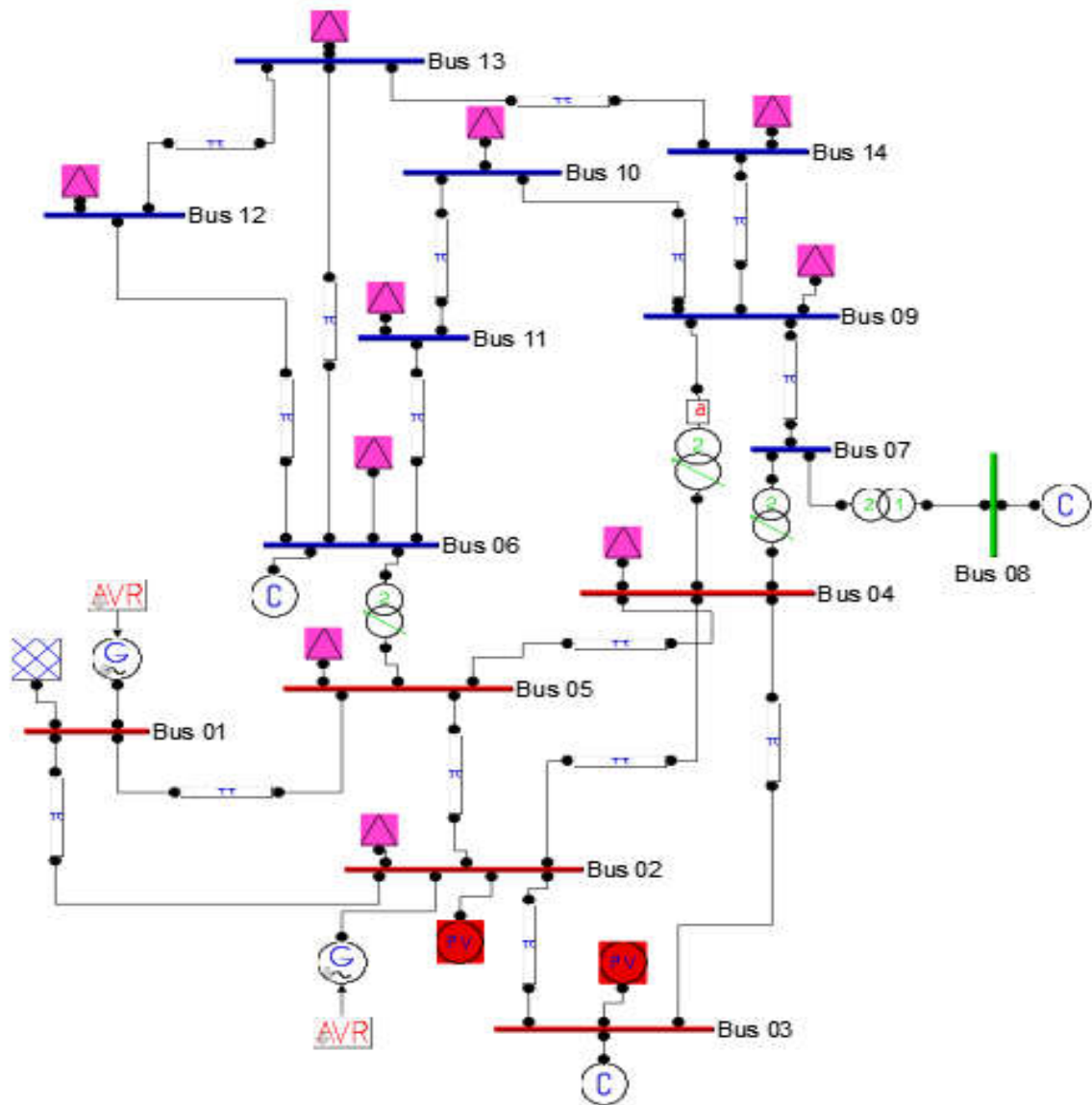


Figure A.1: Système 14 nœuds

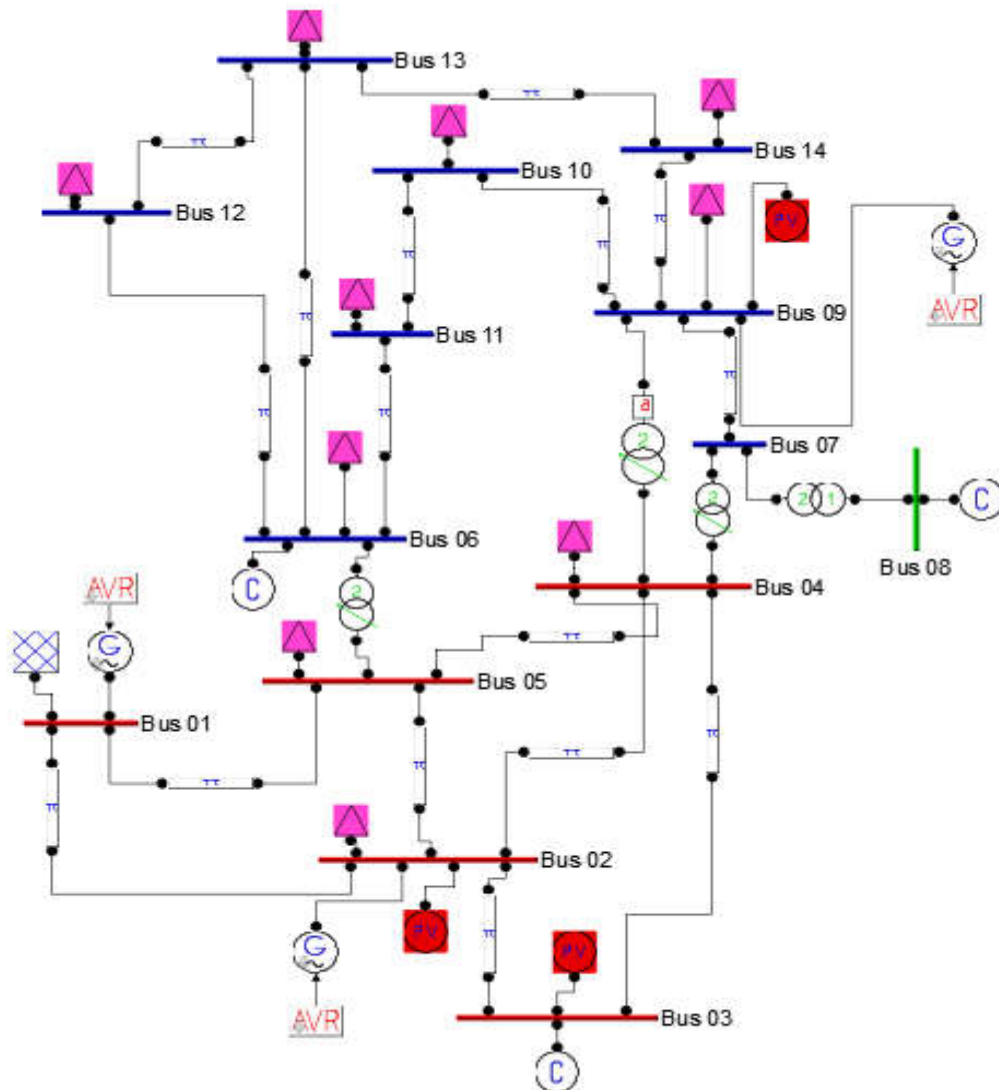


Figure A.2: Système 14 nœuds avec insertion du générateur décentralisé au nœud 9

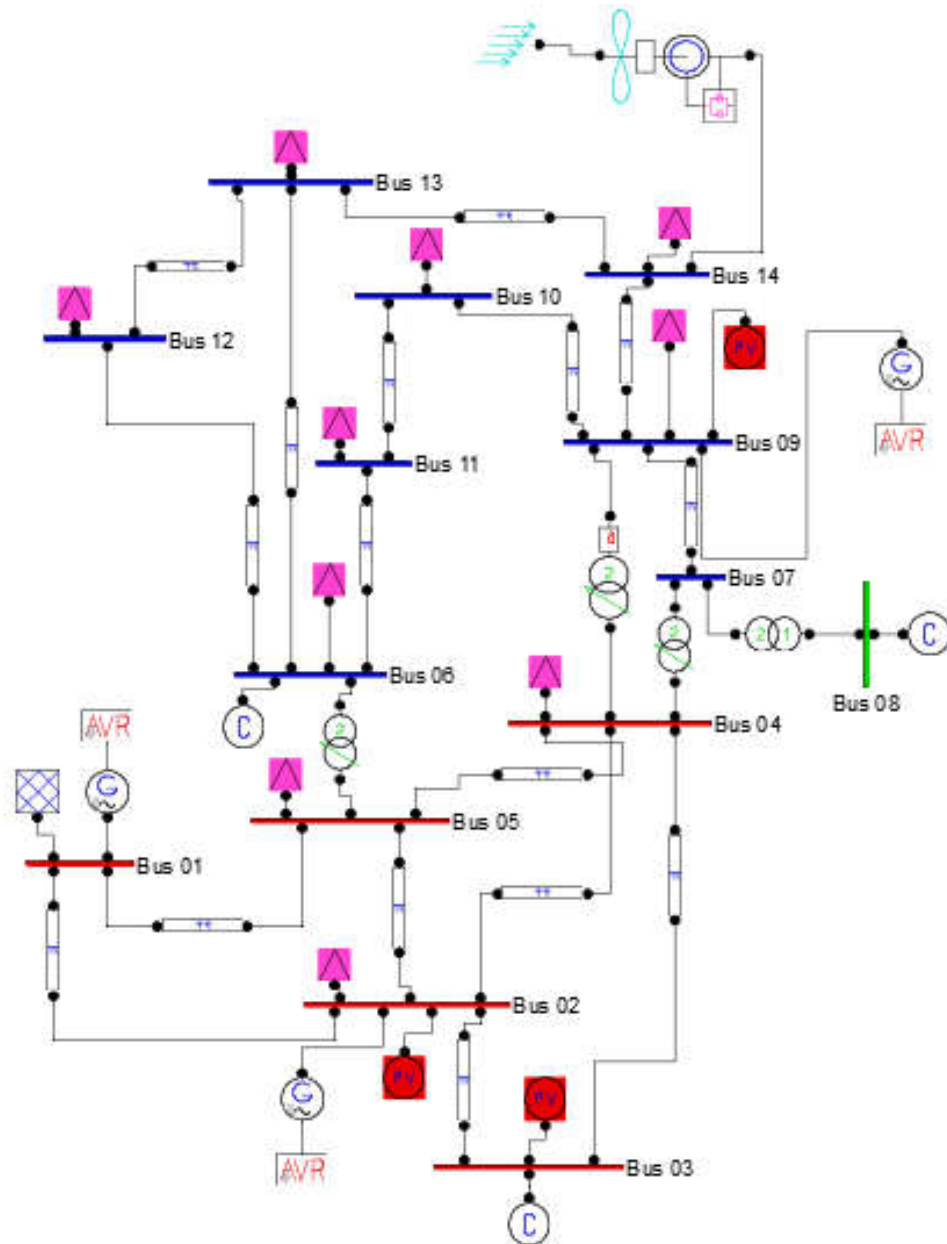


Figure A.3: Système 14 nœuds avec insertion d'éolienne au nœud 14

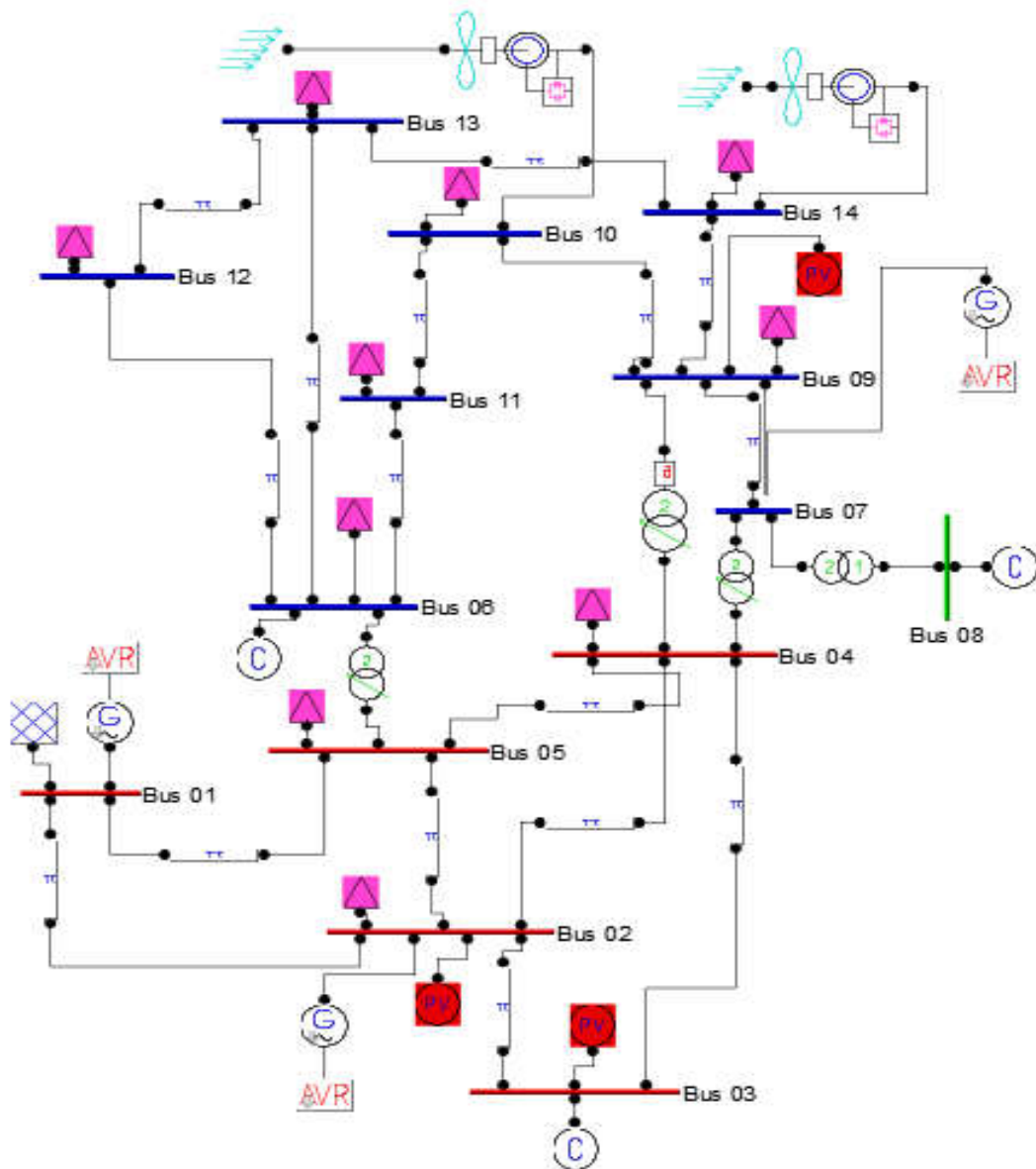


Figure A.4: Système 14 nœuds avec insertion d'éolienne aux nœuds 10&14

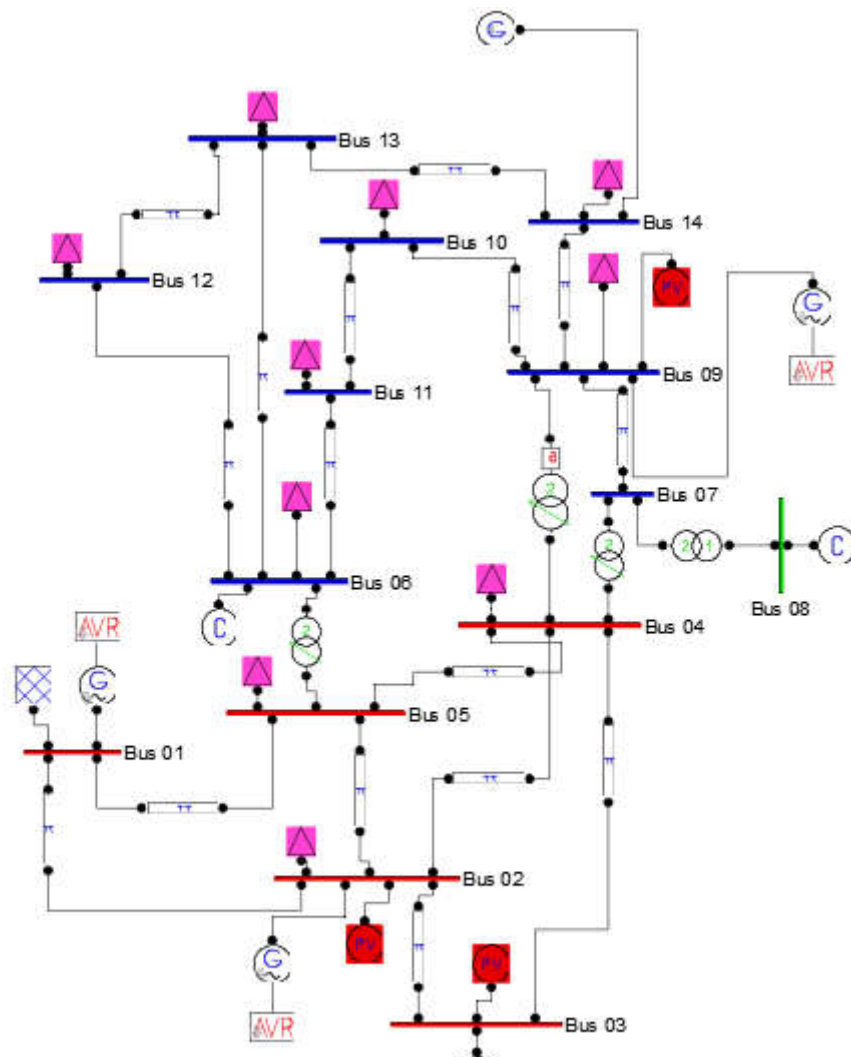


Figure A.5: Système 14 nœuds avec insertion de PV au nœud 14

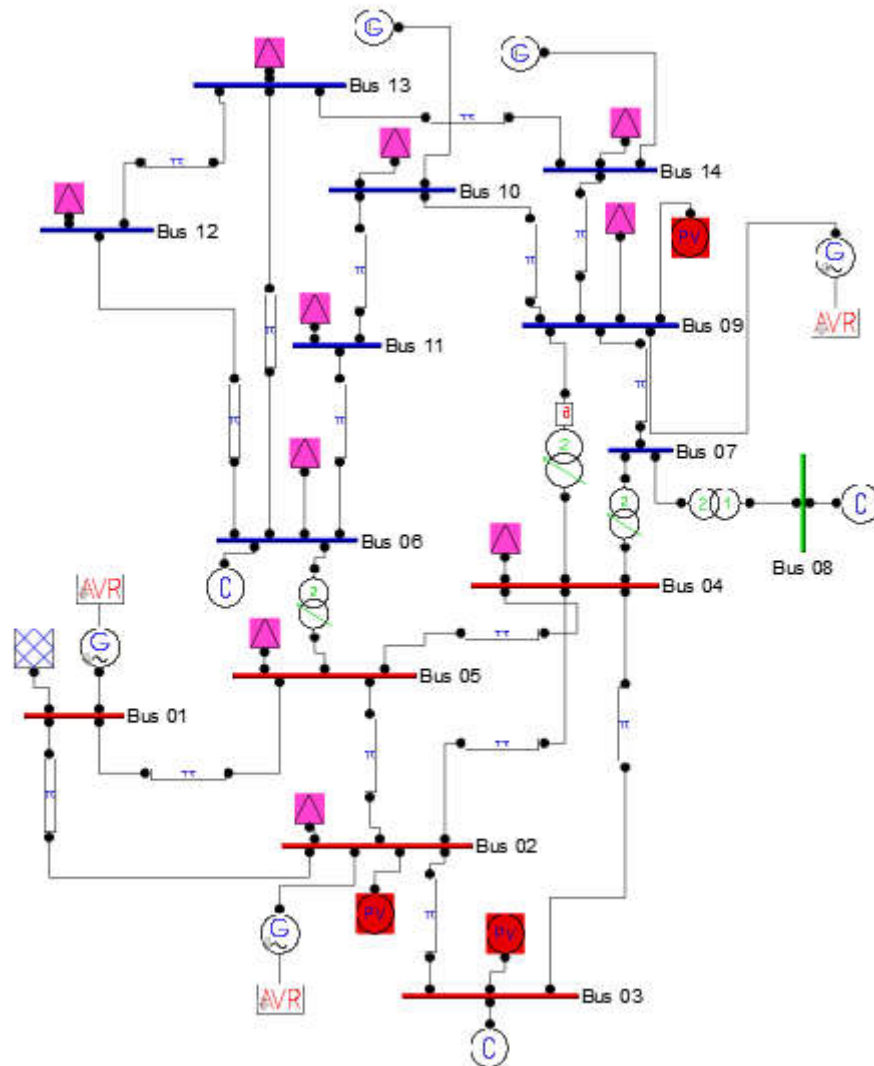


Figure A.6: Système 14 nœuds avec insertion de PV aux nœuds 10&14

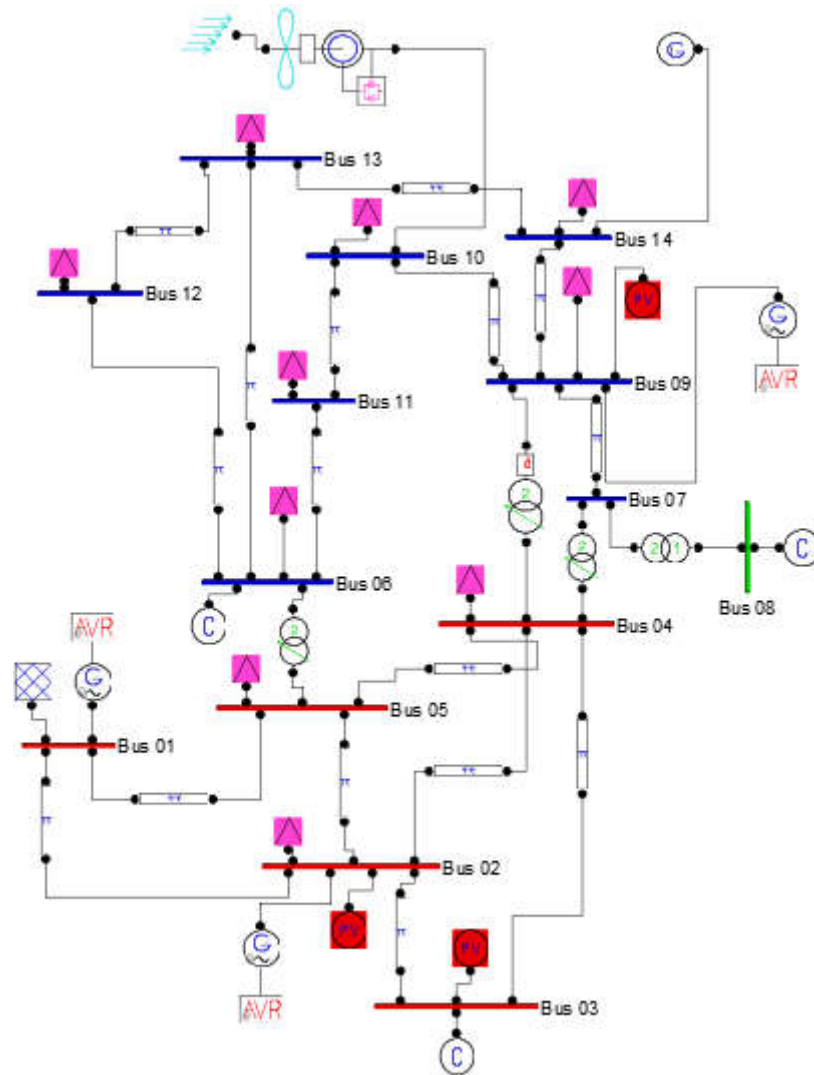


Figure A.7: Système 14 nœuds avec insertion d'hybride aux nœuds 10&14