

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

Université A. MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie électrique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques

Thème

Insertion de production distribuée dans les réseaux de distribution électrique: Impact et régulation de la tension.

Présenté par :

M^r. ALLAOUA Amayass

M^r. SLIMANI Menad

Encadré par :

M^r. MEDJDOUB A.

Membres du Jury :

M^r. ATROUNE S.

M^r. TAIB N.

Soutenu : Le 08/11/2020

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

*Tout d'abord, nous remercions dieu de nous avoir donné la force, la volonté et le courage
pour accomplir ce modeste travail.*

*Nous remercions profondément nos chers parents qui nous ont soulevés au plus haut et en
mettant à notre disposition leur motivation, leur temps, leurs moyens et leur soutien, pour
nous voir réussir.*

*Une énorme gratitude à Mr Medjdoub notre encadreur, merci de nous avoir donné de
votre temps, merci de nous avoir orienté et nous pousser à travailler plus.*

*Un immense remerciement à tous nos camarades et amis qui nous ont soutenues et motivés
à accomplir ce travail.*

*Un grand merci à nos enseignants qui ont fait de grands efforts pour nous voir arriver là
dans nos parcours.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt que vous avez
porté à notre travail et en acceptant d'examiner notre mémoire et de l'enrichir par vos
recommandations.*

*Enfin, nous tenons à adresser notre gratitude à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de
loin pour réaliser ce travail, en particulier, Hamadi Massinissa, Slimanou Meriem, Aissani
Amina Ibtissem, Brahmi Juba, Hamam Sarah et Deghmous Nacima.*

Dédicace

Je dédie ce modeste projet de fin d'étude :

A mes chers parents qui m'ont poussé et motivé dans mes études, sans eux je n'aurais certainement pas fait de longues études. Ce travail représente l'aboutissement de leur soutien et de leur encouragement tout au long de ma scolarité.

A mes deux sœurs Amila et Reyane et mon frère Ryad. Vous m'avez aidé et motivé jusqu'au bout je vous souhaite plein de réussites et que tous vos projets se réalisent.

A mon cher grand-père. Tu as implanté en moi dès mon très jeune âge, la notion des études et du savoir, toutes mes réussites sont grâce à toi.

A tous mes camarades de classe, nous avons formés une famille et des liens solides. Tous nos souvenirs resteront gravés dans ma mémoire à jamais.

A mes amis Yougorta et Massi, vous m'avez toujours aidé depuis les années qu'on se connaît, vous avez été un grand soutien dans les études et la vie privée.

A mon binôme, camarade et ami avant tout Slimani Menad, je te souhaite plein de réussite, merci pour ton soutien et tous les beaux moments passés ensemble.

Amayass

Dédicace

Je dédie ce modeste projet de fin d'étude :

A ma très chère mère, ton amour infaillible et ta présence à mes côtés m'a été une source de force pour affronter les obstacles de la vie.

A mon très cher père, ton soutien ainsi que ta confiance m'ont été d'une grande aide durant mon parcours universitaire. Au travers de ce travail je souhaite te démontrer ma reconnaissance ainsi que ma gratitude pour tous ce que tu as fait pour moi.

A mes très chères sœurs Lydia et Kenza Pour leur présence et encouragements.

A mon binôme qui a été disponible et à l'écoute pour discuter de l'avancement de notre mémoire. Je n'oublierai pas les innombrables et enrichissantes discussions que nous avons eues.

Je dédie également cet humble travail à mon oncle et cousin qui m'ont été d'une grande aide et accompagnement dans tous ce que j'entreprends.

Menad

Table des matières :

Introduction générale.....	1
I. Les réseaux électriques et la production d'énergie.....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Le réseau électrique	3
I.3 Les différents types de réseaux électriques.....	3
I.3.1 Le réseau de transport.....	4
I.3.3 Le réseau de distribution	5
I.4 Les types de ressources	5
I.4.1 Les énergies non renouvelables	5
I.4.2 Les ressources énergétiques renouvelables	6
I.5 Les types de production	8
I.5.1. La production centralisée.....	8
I.5.2. La production décentralisée	10
I.6 Structure topologique du réseau électrique	12
I.6.1 Structure maillée	12
I.6.2 Structure bouclée	13
I.6.3 Structure radiale	13
I.7. Conclusion	14
II. Étude des impacts de la production d'énergie renouvelable sur les réseaux de distribution.....	15
II.1. Introduction	15
II.2. Étude des impacts de la production d'énergie renouvelable sur les réseaux électriques	15
II.2. 1 Impacts sur le système de distribution	15
II.2. 1.1 Transit de puissance	15
II.2.1.2 Impacts sur la stabilité du système	17
II.2.1.3 Impacts sur le plan de protection	17
II.2.1.4 Impacts sur l'observabilité et de contrôlabilité du système	17
II.2.1.5 Impacts sur la continuité de service	18
II.2.1.6 Impact sur le profil de tension	18
II.2.1.7 Les surtensions induites par la connexion d'un générateur d'énergie	19
II.2.2 Impacts sur le système de transport :.....	20
II.2.2.1 Risque de congestion	20
II.2.2.2 Incertitude du système électrique	21
II.2.2.3 Changement des marges d'exploitation.....	21

Table des matières :

II.2.2.4 Apparition des flux d'énergie réactive.....	21
II.2.2.5 Fermeture des grandes centrales.....	21
II.2.2.6 Perte de la production d'énergie.....	22
II.3 Conclusion.....	23
III. Réglage de tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution	24
III.1 Introduction	24
III.2 L'importance de réglage de la tension et de la fréquence dans les réseaux électrique	24
III.2.1 Le maintien de la tension.....	24
III.2.2 Le maintien de la fréquence	25
III.3 Les services systèmes	26
III.3.1 Réglage de fréquence.....	26
III.3.1.1 Réglage primaire de fréquence	27
III.3.1.2 Réglage secondaire de fréquence	30
III.3.1.3 Réglage tertiaire de fréquence.....	30
III.3.2 Réglage de tension	30
III.3.1.1 Réglage primaire de tension	31
III.3.1.2 Réglage secondaire de tension.....	32
III.3.1.3 Réglage tertiaire de tension	32
III.4 Principe et moyens de réglage de la tension dans un réseau de distribution.....	33
III.4.1 Régulation de la tension par le contrôle de la puissance réactive de la source de production décentralisée.....	35
III.4.2 Réglage de la tension par le contrôle de la puissance active de la source de production décentralisée.....	40
III.4.2.1 Présentation du principe.....	40
III.4.2.2. Synthèse du correcteur	41
III.5 Conclusion :	44
IV. Simulation et interprétation des résultats	45

Table des matières :

IV.1 Introduction.....	45
IV.2 Outil de simulation.....	45
IV.2.1 Utilisation de PSAT	47
IV.3 Simulation	47
IV.3.1 Présentation des réseaux et leurs données	48
IV.4 Résultat et interprétation des résultats de la simulation	54
IV.4.1 1 ^{er} cas sans DG.....	54
IV.4.2 2 ^{ème} cas avec DG.....	55
IV.4.3 Comparaison des résultats obtenus	57
IV.5 Conclusion	60
Conclusion générale	61
Références.....	63

Liste des figures

<i>Figure I. 1 : Schéma simplifiée d'un réseau électrique</i>	4
<i>Figure I. 2 : Schéma d'une centrale hydroélectrique [11].</i>	9
<i>Figure I. 3 : Insertion de la production décentralisée dans le système électrique.</i>	11
<i>Figure I. 4 : Schéma d'une structure maillée</i>	12
<i>Figure I. 5 : Schéma d'une structure bouclée</i>	13
<i>Figure I. 6 : Schéma d'une structure radiale</i>	13
<i>Figure II. 1 Réseau de distribution sans PDE [18].</i>	16
<i>Figure II. 2 : Réseau de distribution avec PDE [18].</i>	17
<i>Figure II. 3 : Variation de la tension le long d'un départ HT sans GER.</i>	18
<i>Figure II. 4 : Détermination de la chute de tension sur une ligne.</i>	19
<i>Figure III. 1 : Réglage hiérarchisé de fréquence : emploi des différentes réserves suite à un défaut [22]</i>	27
<i>Figure III. 2 : Intégration d'un statisme dans une boucle de régulation de vitesse. [22]</i>	28
<i>Figure III. 3 : Statisme [22]</i>	29
<i>Figure III. 4 : organisation du réglage hiérarchisé de tension [2]</i>	31
<i>Figure III. 5 : Schéma général d'un réseau de distribution. [23]</i>	34
<i>Figure III. 6 : Illustration des moyens de réglage de la tension [23]</i>	34
<i>Figure III. 7 : Réseau test [23]</i>	36
<i>Figure III. 8 : Principe de réglage de la tension par action sur la puissance réactive [23]..</i>	37
<i>Figure III. 9 : Diagramme bloc du système de réglage de la tension par le contrôle du réactif [23]</i>	39
<i>Figure III. 10 : Système de réglage de la tension par le contrôle de la puissance active [24]</i>	41
<i>Figure III. 11 : Modèle simplifié du réseau test [23]</i>	42
<i>Figure III. 12 : Boucle de réglage de la tension par le contrôle de la puissance active [23]</i>	42
<i>Figure III. 13 : Le correcteur IP utilisé dans la boucle de réglage de tension. [23]</i>	44

Liste des figures :

<i>Figure IV. 1 : La première fenêtre du PSAT.</i>	45
<i>Figure IV. 2 : L'éditeur de PSAT</i>	46
<i>Figure IV. 3 : Bibliothèque de Simulink.</i>	47
<i>Figure IV. 4 : Représentation simplifiée du réseau de distribution en boucle IEEE 33 accès.</i>	48
<i>Figure IV. 5 : représentation du réseau IEEE 33 accès en boucle.</i>	49
<i>Figure IV. 6 : Représentation simplifiée du réseau de distribution radial IEEE 33 accès. ...</i>	49
<i>Figure IV. 7: Représentation du réseau IEEE 33 accès radial.</i>	50
<i>Figure IV. 8: Profil de tension des jeux de barre pour le réseau bouclé sans DG</i>	54
<i>Figure IV. 9: Profile de tension des jeux de barre pour le réseau radial sans DG</i>	55
<i>Figure IV. 10: Profile de tension des jeux de barre pour le réseau bouclé avec DG</i>	56
<i>Figure IV. 11: Profile de tension des jeux de barre pour le réseau radial avec DG</i>	56
<i>Figure IV.12 : comparaison des profils de tension dans les différents jeux de barre des réseaux bouclé et radial sans DG</i>	59
<i>Figure IV.13 : comparaison des profils de tension dans les différents jeux de barre des réseaux bouclé et radial avec DG</i>	60

Liste des Tableaux

<i>Tableau II. 1 : Puissances réactives et puissance naturelle triphasée de quelques lignes.....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau II. 2 : Programmation pluriannuelle de l'énergie en France [21].</i>	<i>22</i>
<i>Tableau III. 1 : Limites de fonctionnement du réseau de distribution [NF 50160] [Arrêté-1986].</i>	<i>26</i>
<i>Tableau III. 2 : Sélection de la stratégie de contrôle du réactif.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau III. 3 : Limitations en France des facteurs de puissance des sources de production décentralisée</i>	<i>40</i>
<i>Tableau IV. 1: Caractéristiques techniques des branches du réseau IEEE 33-accès.</i>	<i>51</i>
<i>Tableau IV. 2: Caractéristiques techniques des jeux de barres du réseau de distribution IEEE 33-accès.</i>	<i>53</i>
<i>Tableau IV. 3: Comparaison de la tension des 33 nœuds des deux réseaux avant et après l'introduction d'une production d'énergie</i>	<i>57</i>

Introduction générale

Le marché de l'électricité est en plein développement et l'organisation de ce secteur change continuellement. En effet diverses fonctions relatives à ce domaine se décentralisent, et sont jouées par des acteurs distincts (distributeur, producteur, commerçant, régulateur, etc.). Les dérégulations du marché de l'énergie ont engendrés une privatisation progressive, et ont permis à des producteurs quelconques de produire et de vendre leurs énergies sur le marché. Ainsi, il apparaît une multiplication de producteurs indépendants.

Et puis, il existe une volonté mondiale de promouvoir la production d'électricité à base d'énergie renouvelable. En effet, suite au protocole de Kyoto (Le Protocole de Kyoto est un accord international, organisé par l'ONU, visant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre), la part d'électricité produite à base d'énergie renouvelable a augmenté, dans le but de limiter le niveau d'émission des gaz à effet de serre, et diminuer le risque des centrales nucléaires. La commission européenne s'est fixé des orientations à court terme pour le développement de ces énergies.

Ainsi, différentes technologies de productions d'énergie sont dorénavant disponibles pour parvenir à ces objectifs tels que les éoliennes, les panneaux solaires, les centrales de cogénération d'électricité et de chaleur, etc. Cette nouvelle avancée va avoir plusieurs impacts sur le fonctionnement du réseau électrique de distribution.

Dans un schéma classique, les centrales de production sont en amont par rapport à la distribution, et la connexion des énergies renouvelables est réalisée sur le réseau de distribution de par leur puissance. La présence des PDE ne date pas d'hier, en effet ils ont été là depuis longtemps, mais leur présence n'était pas aussi considérable, Ainsi année après années, avec l'augmentation du nombre des producteurs, Tout porte à croire que cette production d'énergie ne va pas arrêter de s'étendre à l'avenir, apportant avec elle un problème d'insertion dans le réseau actuel de la distribution.

L'impact de ces productions d'énergie sur le fonctionnement du réseau n'est pas insignifiant et celles-ci apportent des problèmes de qualité d'énergie, de contrôle de la tension, de stabilité, de réglage de protections etc. il est donc important de trouver des solutions innovantes à ces problèmes dû à l'insertion des énergies renouvelable.

Dans ce contexte, les travaux de recherches présentés dans ce mémoire se focalisent sur l'impact de la production d'énergie sur la tension et le principe du réglage de la tension en présence de PDE.

Introduction générale.

Le premier chapitre expose une présentation du réseau électrique, son rôle, la production électrique et ses types (production centralisée et production décentralisée). Nous exposerons la structure des réseaux électriques, à savoir les réseaux de transport, répartition et de distribution.

Le deuxième chapitre aborde les différents impacts du raccordement de ces PDE sur le réseau de distribution. On s'intéresse davantage sur l'impact de ce raccordement sur le plan de la tension.

Le troisième chapitre traite l'importance de réglage de la fréquence et de la tension dans le réseau électrique. Les réglages hiérarchisés de la tension et de la fréquence seront aussi abordés. Ainsi que le réglage de la tension en présence d'une production d'énergie distribué.

Le quatrième chapitre expose le logiciel PSAT « Power System Analysis Toolbox » sous MATLAB, et montre l'impact de l'insertion d'une PDE sur deux réseaux électriques 33 JdB bouclé et radial, avec une simulation sur le logiciel PSAT.

Enfin, une conclusion est présentée à la fin de ce mémoire.

Chapitre I :
**Les réseaux électriques et
la production d'énergie**

I.1 Introduction

Le réseau électrique a été conçu et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermique, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs. Le réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de lignes, des milliers de postes de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique. De ce fait, des contrôles hiérarchisés assurent la tenue en tension et en fréquence ; ceux-ci couplés aux divers automates, ont la charge de garantir la continuité du service du système [1].

A travers ce chapitre, nous allons dans un premier temps essayer de présenter le réseau électrique et ses différents types (réseau de transport, répartition et de distribution). Ensuite dans un second temps, nous aborderons les types de ressources (renouvelables ou non renouvelables). En outre, une partie de ce chapitre sera dédié aux types de productions (centralisées et décentralisées). Enfin, la structure topologique du réseau électrique (maillée, bouclée et radiale) sera également traitée dans cette partie.

I.2 Le réseau électrique

Le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Son rôle est de garantir un approvisionnement sûr et économique de l'énergie. Il n'est pas possible que ce rôle soit assuré par un type unique de réseau qui relierait moyens de production et utilisateur. Ainsi, la solution consiste à établir une hiérarchie de trois catégories de réseaux dont les fonctions sont différentes et qui se distinguent par le niveau de tension de leur ligne ou le niveau de puissance qui transite [2].

Ces fonctions sont les suivantes [3] :

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

- L'alimentation directe de chacun des consommateurs à partir du réseau de répartition, c'est le rôle des réseaux de distribution.

I.3 Les différents types de réseaux électriques

Les réseaux électriques sont répartis en trois types, qui sont représentés sur la figure I.1

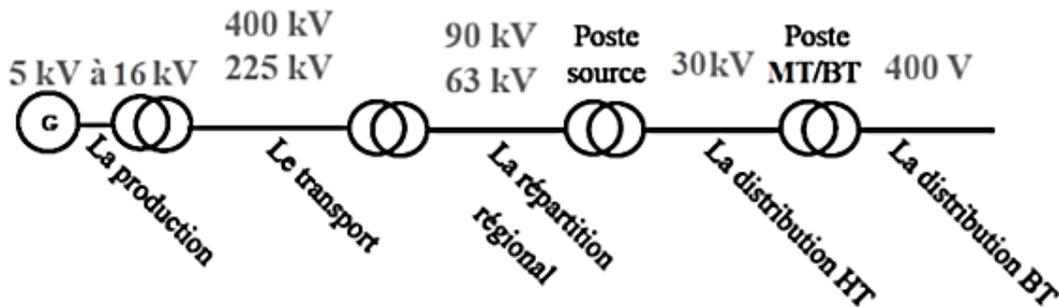


Figure I. 1 : Schéma simplifiée d'un réseau électrique

I.3.1 Le réseau de transport

Les réseaux de transport assurent le transport de l'énergie électrique sur de grandes distances. Ils sont à très haute tension (63 kV à 400 kV). En ce qui concerne la topographie, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, les réseaux de transport sont des réseaux maillés. Les flux de puissance peuvent ainsi être répartis entre toutes les lignes du réseau. Leur gestion est complexe : les transferts de puissance entre zones de production et zones de consommation sont très importants et variables. Ils rendent l'optimisation technico-économique des réseaux difficiles. De ce fait, de manière générale, les réseaux de transport comparativement aux réseaux de distribution sont très supervisés. Effectivement, cette supervision a pour objectif d'effectuer des contrôles de la tension, de la fréquence, la répartition des flux de puissance et des coûts de production, etc. [4].

I.3.2 Le réseau de répartition

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation. Ces centres de consommation sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT ;
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HT. Il s'agit essentiellement d'industriels tels la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire, etc.

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien, parfois souterrain à proximité de sites urbains. Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 25 kV et 275 kV.

Ainsi, les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux [5].

I.3.3 Le réseau de distribution

Les réseaux de distribution assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local. Leur tension est inférieure ou égale à 50 kV (HT). Ils sont constitués de deux types de réseaux :

- Le réseau moyenne tension (MT), qui est connecté au réseau de transport.
- Le réseau basse tension (BT).

Les réseaux de distribution sont dans la très grande majorité des cas exploités de manière radiale. Cette structure permet de facilement assurer la maintenance du réseau, notamment pour la détection et l'élimination rapide des défauts. Des schémas d'exploitation de secours entre postes sources sont prévus et permettent de minimiser le nombre de clients coupés en cas de défaillances [4].

I.4 Les types de ressources

I.4.1 Les énergies non renouvelables

Il s'agit des énergies 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 :

- La 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 [6].
- Hydrogène et 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'espairs 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. Les puissances disponibles de ce type de source varient en fonction de la technologie d'électrolyte considérée de quelques kilowatts à quelques mégawatts [2].

I.4.2 Les ressources énergétiques renouvelables

Ces dernières années, le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance. En effet, d'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. En effet, la production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux. [8].

Par ailleurs, les générateurs d'origine renouvelable sont des générateurs dont la source primaire est inépuisable contrairement aux combustibles fossiles et au nucléaire. L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. En effet, celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale et bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

De plus, l'avantage principal de ces énergies est le fait qu'elles soient propres, c'est-à-dire, qu'elles supposent avoir un faible impact environnemental. Cependant, leur caractère intermittent représente leur plus grande limitation. Effectivement, la puissance de sortie dépend en tout instant de la disponibilité de la source primaire. On peut citer l'hydro-électricité, la biomasse, la valorisation des déchets et sous produits industriels, la géothermie, etc. En revanche, les générateurs d'origine renouvelable les plus répandus (sources primaire réparties et disponible largement) et les mieux adaptés sont les générateurs éoliens et les générateurs photovoltaïques. [9].

Les principales technologies sont :

- **Hydraulique** : les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. En effet, celle-ci est transformée en énergie électrique par un alternateur entraîné par une turbine mue par la force de l'eau qui est due soit à la hauteur de chute dans le cas de centrales alimentées par une conduite forcée, soit au débit dans le cas de centrales au fil de l'eau. En définitive, l'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus répandue puisqu'elle est également utilisée dans la production centralisée.

- **Eolien** : les aérogénérateurs, ou éoliennes, tirent leur énergie du vent qui est transmise par le rotor et le multiplicateur de vitesse à une génératrice. Cette source d'énergie, qui commence à atteindre sa maturité technologique est de plus en plus répandue grâce à son fort attrait écologique. Elle est passée devant la production géothermique au niveau mondial en 2000.
- **Géothermie** : les centrales géothermiques utilisent la chaleur de nappes d'eau souterraines qui peuvent atteindre 350 °C dans les zones les plus favorables. Cette eau chaude est pompée vers la surface pour passer dans des échangeurs. La vapeur produite est turbinée dans une installation thermique classique.
- **Solaire photovoltaïque** : les panneaux solaires convertissent directement l'énergie reçue par rayonnement solaire en énergie électrique à courant continu. Ils sont très utilisés pour l'alimentation de sites isolés (non connectés au réseau) en association avec un système de stockage.
- **Solaire thermique** : les centrales solaires thermiques sont des centrales thermiques utilisant des turbines à vapeur, celles-ci étant produites par chauffage de l'eau via un fluide caloporteur en utilisant le rayonnement solaire concentré sur un échangeur par des miroirs paraboliques.
- **Biomasse et déchets** : certaines centrales thermiques à flamme utilisent comme source primaire des combustibles issus de la biomasse (bois, biogaz, paille, déchets organiques, etc.) ou de déchets industriels et domestiques.
- **Marémotrice** : les centrales marémotrices peuvent s'apparenter à des centrales hydrauliques au fil de l'eau à ceci près que les turbines sont réversibles pour profiter du flux et du reflux des marées. Cette source d'énergie, malgré sa disponibilité considérable, reste anecdotique car elle nécessite la construction de barrages qui modifient les sites côtiers (protégé en France par la loi Littoral du 3 janvier 1986) en causant un ensablement ou un envasement du site.
- **Hydrolienne** : les centrales hydroliennes utilisent l'énergie cinétique de la houle dont l'énergie provient du vent. De nombreuses solutions techniques ont été imaginées, mais l'hostilité du milieu sous-marin compromet sérieusement leur développement à l'heure actuelle. [2].

I.5 Les types de production

I.5.1 La production centralisée

Les productions centralisées d'électricité reposent, pour l'essentiel, sur trois types de centrales :

a) Les centrales thermiques

C'est le type le plus répandu et le plus ancien. Il utilise des combustibles fossiles et fonctionne avec une chaudière à vapeur. Chaque chaudière ne peut utiliser qu'un seul type de combustible car chacun exige un brûleur spécifique [10].

Il en existe trois sortes, suivant le combustible utilisé :

❖ Thermique au charbon

Pour pouvoir être utilisé le charbon est transformé en fines particules dans un broyeur. Ensuite, il est mélangé à de l'air réchauffé avant d'être introduit sous pression dans le brûleur de la chaudière.

❖ Thermique au fioul

Le fioul est trop visqueux pour être utilisé tel quel. De ce fait, il doit être liquéfié en le chauffant avant de l'injecter dans les brûleurs. Il a longtemps été le principal combustible utilisé dans les centrales à flamme, mais il a été remplacé par le charbon après le choc pétrolier de 1973.

❖ Thermique au gaz

Il est naturel ou récupéré des hauts fourneaux. Il est utilisé tel quel.

Les centrales de ce type associent une TAC (Turbine à Combustion) et une turbine à vapeur. Les combustibles brûlés sont du gaz ou du fioul.

Cette technologie demande un investissement plus faible que d'autres types de centrales conventionnelles de puissance plus forte et assure un rendement énergétique nettement supérieur à celui d'une centrale thermique classique (65 % contre 38 %). Ainsi, ce type de centrale peut être facilement implanté au plus près des lieux de consommation (zones urbaines, installations industrielles).

b) Les centrales hydrauliques

Ce sont des unités de production d'électricité dans lesquelles le flux créé par l'eau amenée par écoulement libre (canaux) ou par des conduites en charge (conduites forcées) actionne la rotation des turboalternateurs avant de retourner à la rivière. C'est une forme d'énergie renouvelable, propre et non polluante. Il existe de petites centrales hydroélectriques

qui transforment l'énergie sauvage d'une chute d'eau en énergie mécanique grâce à une turbine, puis en énergie électrique grâce à un générateur [11].

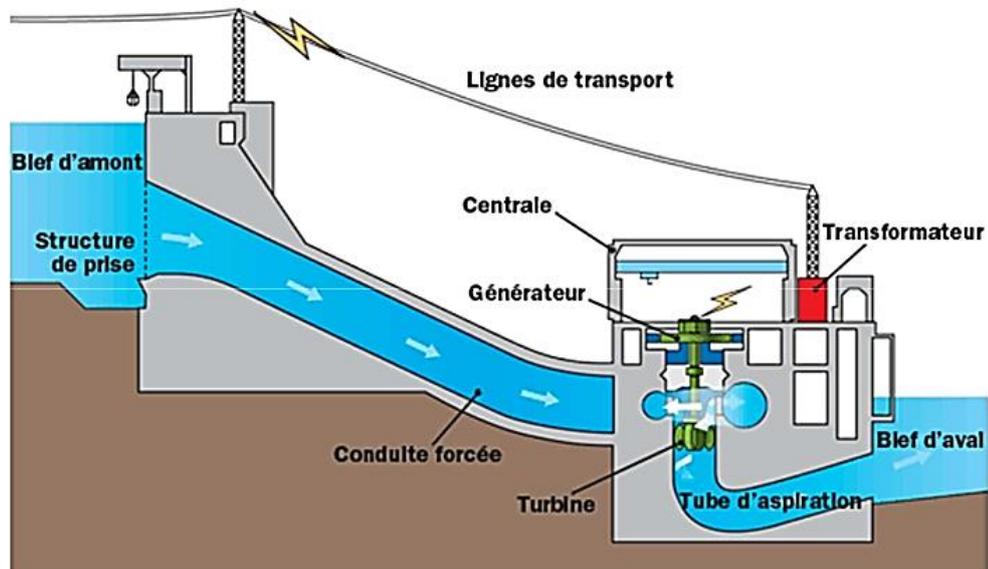


Figure I. 2 : Schéma d'une centrale hydroélectrique [11].

c) Les centrales nucléaires

L'énergie nucléaire dépend d'un combustible fissile et d'uranium dont le minerai est contenu dans le sous-sol de la Terre. Elle permet de produire de l'électricité dans les centrales nucléaires ; appelées centrales électronucléaires grâce à la chaleur dégagée par la fission d'atomes d'uranium [12]

Une centrale nucléaire se compose de 4 parties principales :

- Le bâtiment contenant le réacteur dans lequel a lieu la fission.
- La salle des machines où est produite l'électricité.
- Les départs de lignes électriques qui évacuent et transportent l'électricité.
- Des tours de refroidissement uniquement en bord de rivière.

✚ Les différents types de réacteurs nucléaires

Une centrale nucléaire produit toujours de l'électricité à partir d'un combustible nucléaire mais il existe plusieurs types de réacteurs. On peut les classer en cinq grandes catégories en fonction de la nature du combustible utilisé, de la substance qui transporte la chaleur appelée caloporteur et de la substance qui ralentit les neutrons appelée modérateur [13] :

- **Réacteur à eau pressurisée (ou REP)** : l'eau sous pression (donc à l'état liquide) est à la fois le caloporteur et le modérateur. Le combustible utilisé est de l'uranium enrichi.

Ce type de réacteur est le plus répandu dans le monde, représentant environ 55 % des réacteurs installés.

- **Réacteur à eau bouillante (ou REB)** : l'eau est aussi le caloporteur, mais elle n'est plus pressurisée. À pression atmosphérique ambiante, elle devient bouillante. Le combustible utilisé est de l'uranium enrichi. Ce type de réacteur représente 22 % des réacteurs installés dans le monde.
- **Réacteur à eau lourde** : l'eau lourde est à la fois le caloporteur (mis sous pression) et le modérateur. C'est une eau constituée de molécules d'eau dont l'atome d'hydrogène est un atome de deutérium, isotope lourd de l'hydrogène. Le combustible utilisé est de l'uranium naturel.
- **Réacteur à neutrons rapides (ou RNR)** : Il n'utilise pas de modérateur et cherche à exploiter de façon plus complète les propriétés du combustible. Le fluide caloporteur est un métal liquide (tel le sodium) ou un gaz (par exemple l'hélium). Le combustible utilisé est de l'uranium enrichi ou du plutonium. Ils peuvent générer de la matière fissile d'où leur nom de surgénérateurs.
- **Réacteur caloporteur gaz (RCG)** : l'hélium est le caloporteur, qui est porté à haute température. Il permet d'alimenter directement la turbine sans échangeur intermédiaire. Il peut permettre la réalisation de centrales de petites tailles (de 100 à 300 MW) et peut également fonctionner avec des neutrons rapides.

I.5.2. La production décentralisée

La production décentralisée ou dispersée se définit par opposition à la production classique comme des unités de grosses puissances raccordées au réseau HT, dont la localisation et la puissance ont fait l'objet d'une planification, et qui sont commandées de manière centralisée pour participer au contrôle de la fréquence et de la tension, mais aussi assurer un fonctionnement fiable et économique de l'ensemble du réseau. Ces unités centralisées sont dites « dispatchables ».

Par rapport aux unités classiques, les unités décentralisées sont caractérisées par des puissances ne dépassant pas 50 à 100 MW. Elles ne sont pas planifiées de manière centralisée, ni actuellement coordonnées, elles sont généralement raccordées au réseau de distribution (<15MW) et ne sont pas non plus actuellement destinées à assurer des services systèmes. Cette production décentralisée se développe dans tous les pays, sur base d'unités de cogénération d'énergies renouvelables ou de production traditionnelle, installées par des producteurs indépendants. [15].

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

- ❖ La technologie disponible actuellement offre les garanties de fiabilité pour des unités de 100 kW à 150 MW.
- ❖ Les sites pour une production de puissance réduite sont plus faciles à trouver ;
- ❖ La production est réalisée à proximité de son utilisation, de manière à réduire les frais de transport.
- ❖ Le gaz naturel vecteur énergétique souvent utilisé en production décentralisée, est supposé être facilement disponible dans la plupart des centres de consommation et conserver un prix stable.
- ❖ Les systèmes basés sur le gaz sont construits en beaucoup moins de temps et représentent des investissements nettement moins importants en comparaison avec les grosses centrales classiques utilisant un autre vecteur d'énergie primaire.
- ❖ Les rendements énergétiques supérieurs des systèmes de cogénération ou à cycle combiné (gaz et vapeur) permettent une réduction des frais de fonctionnement.
- ❖ Les politiques des états pour promouvoir des technologies propres afin de réduire les émissions de CO₂, et promouvoir les énergies renouvelables par des subsides et des interventions dans les tarifs, qui conduisent à des conditions économiques intéressantes.

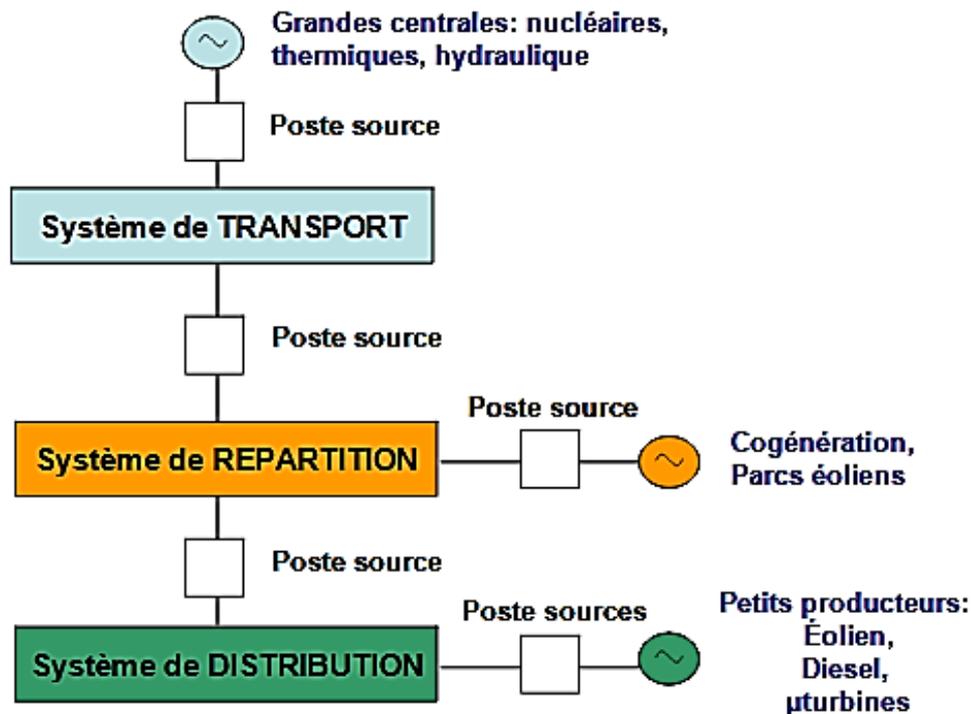


Figure I. 3 : Insertion de la production décentralisée dans le système électrique.

La caractéristique fondamentale de la production décentralisée est d'être pilotée par un autre facteur que la demande d'électricité. Cependant, il en résulte des incertitudes sûres :

- La localisation géographique.
- La dynamique du développement.
- Les niveaux et moments d'activité de production ; avec des conséquences sur le développement des réseaux électriques. Ces derniers doivent en effet être en mesure d'une part, d'accueillir la production décentralisée quand elle est active. D'autre part, d'acheminer la puissance de substitution quand la production décentralisée est inactive.

En définitive, la production décentralisée a donc inévitablement un impact plus ou moins important sur les réseaux aux plans suivants : topologie ou conception, dimensionnement, gestion prévisionnelle, exploitation en temps réel [15].

I.6 Structure topologique du réseau électrique

Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures exposées ci-dessous :

I.6.1 Structure maillée

Cette topologie est 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 voire continentale (figure I.4).

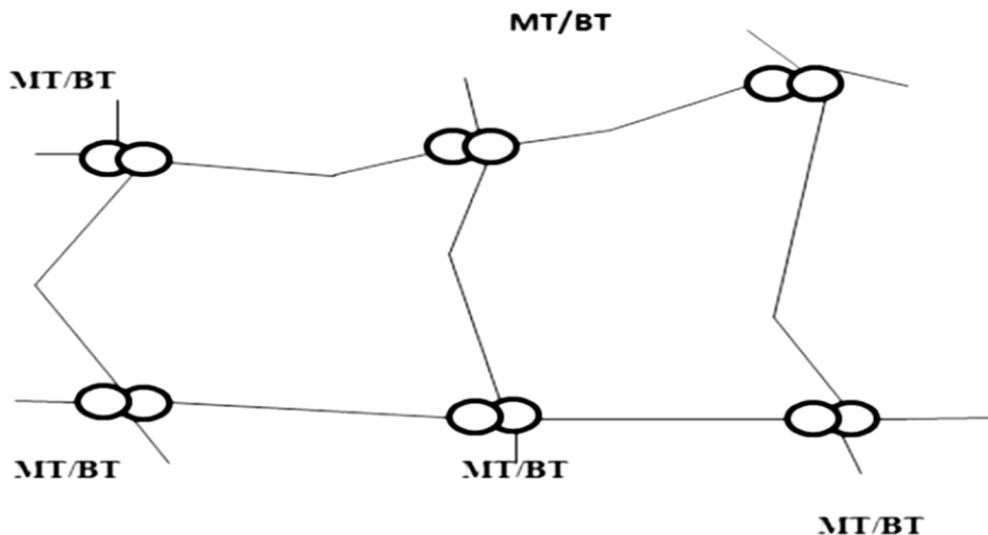


Figure I. 4 : Schéma d'une structure maillée

I.6.2 Structure bouclée

Cette topologie 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 (figure I.5) [16].

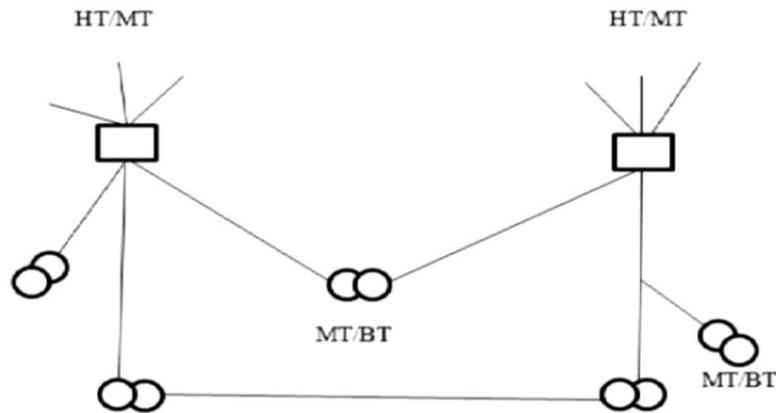


Figure I. 5 : Schéma d'une structure bouclée

I.6.3 Structure radiale

Il s'agit d'une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT. En moyenne tension cette structure est souvent alimentée des deux côtés afin d'assurer la disponibilité [16].

Une configuration particulière est celle des réseaux en antenne que l'on retrouve plus fréquemment en milieu rural pour alimenter des consommateurs éloignés et situés en bout de ligne, situation qui est la plus exposée au point de vue de la sécurité d'alimentation (figure I.6).

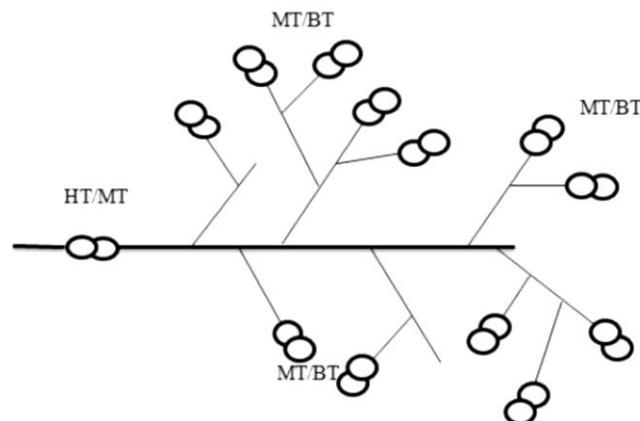


Figure I. 6 : Schéma d'une structure radiale

I.7. Conclusion

Ce chapitre met en exergue une vision sur le réseau électrique avec le rôle des différents types (réseau de transport, répartition et de distribution) avec leurs architectures et schémas. Ainsi, que des types de ressources d'énergies électriques qu'elles soient non renouvelables comme les énergies fossiles (gaz, charbon, pétrole) ou les énergies renouvelables. Ces dernières se révèlent être une source de production d'électricité vitale ; obtenues à partir des gisements considérés comme inépuisables à l'échelle des temps humains (le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau ou encore les marées).

Au regard des éléments cités plus haut dans ce chapitre, nous retrouvons deux types de production : la production centralisée qui consiste en les centrales thermiques, hydrauliques et nucléaires et la production décentralisée qui est généralement basée sur la production d'énergies renouvelables ou de production traditionnelle, installées par des producteurs indépendants.

Chapitre II :
**Etude des impacts de la
production d'énergie
renouvelables sur les
réseaux électriques**

Chapitre II : Etude des impacts de la production d'énergie renouvelables sur les réseaux électriques.

II.1. Introduction

La production décentralisée est un domaine nouveau, qui est en plein développement remarquable. Le marché mondial de l'énergie électrique s'élargit grâce aux nouvelles technologies développées, principalement les énergies renouvelables : Elles donnent tant de solutions écologiques et garantissent un rendement satisfaisant. Ces énergies restent quand même en plein développement pour arriver à des résultats meilleurs.

La production distribuée est utile pour renforcer les réseaux électriques, c'est plus simple, plus pratique et beaucoup moins coûteux que la production centralisée, qui était avant le seul moyen pour renforcer les réseaux électriques. Maintenant on dispose de plusieurs technologies qui peuvent fournir une puissance qui peut aller jusqu'à 100MW, reliée généralement au réseau de distribution, et souvent produite pas loin de la consommation, Pour lui éviter d'être transporté sur de longs trajets.

Les PDE se distinguent des unités de production centralisée 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 centralisée et décentralisée [2].

Mais l'insertion croissante de cette génération est loin d'être sans inconvénients. Elle vient à changer tous les paramètres du système et présente plusieurs incertitudes sur son taux d'intégration dans les réseaux électriques. Dans Ce deuxième chapitre, on va présenter plusieurs impacts de l'insertion de cette énergie sur les réseaux de distribution et de transport.

II.2. Étude des impacts de la production d'énergie renouvelable sur les réseaux électriques

La génération d'énergie peut provoquer certains impacts sur les réseaux électriques. Dont les réseaux de distribution et de transport. Ces impacts sont classés en deux catégories : les Impacts sur le système de distribution et les Impacts sur le système de transport.

II.2. 1 Impacts sur le système de distribution

L'insertion croissante de la production d'énergie pourrait générer plusieurs impacts sur le réseau de distribution. Ces réseaux sont :

II.2. 1.1 Transit de puissance

Les réseaux sont dimensionnés pour recevoir les flux d'énergie du réseau de transport vers la distribution. L'insertion des PDE dans les niveaux de tension autres que le réseau de transport peut créer une injection de puissance dans le sens contraire, c'est-à-dire de la

Chapitre II : Etude des impacts de la production d'énergie renouvelables sur les réseaux électriques.

distribution vers le transport. Les équipements, notamment les protections, doivent alors être bidirectionnels. Ainsi, sachant que les réseaux aux niveaux de tension inférieure sont normalement surdimensionnés afin de faire face à l'accroissement de consommation, on n'aura peut-être pas, à court terme, de problèmes liés à des limites de la capacité de transfert d'énergie ; mais à plus long terme, lorsque le taux de pénétration de PDE augmentera, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales [17].

La modification des transits de puissance est l'un des impacts les plus remarquables concernant l'introduction de la PDE. Le transit de puissance active dans un réseau de distribution sans PDE est représenté sur la figure II-1. P_0 est la puissance active totale consommée. La totalité de cette puissance active provient du réseau de répartition et se ré pond sur les nombreux départs du réseau de distribution. Sur la figure II-2, le transit des puissances actives est représenté lorsqu'on insert de la PDE à ce même réseau. La puissance active qui provient du réseau de répartition n'est plus égal à P_0 , sa valeur a diminué et devient égal à P_0' . Si la puissance de la PDE est supérieure à la puissance de la charge 1, la puissance P_1 va aussitôt changer de sens. La puissance qui transite dorénavant ne provient plus du réseau de répartition, mais provient de la PDE. Si la puissance de la PDE est supérieure à P_0 (la puissance active totale consommée), P_0' viendrait à changer de sens. Dans ce cas, le transit de puissance arrive du réseau de distribution vers le réseau de répartition.

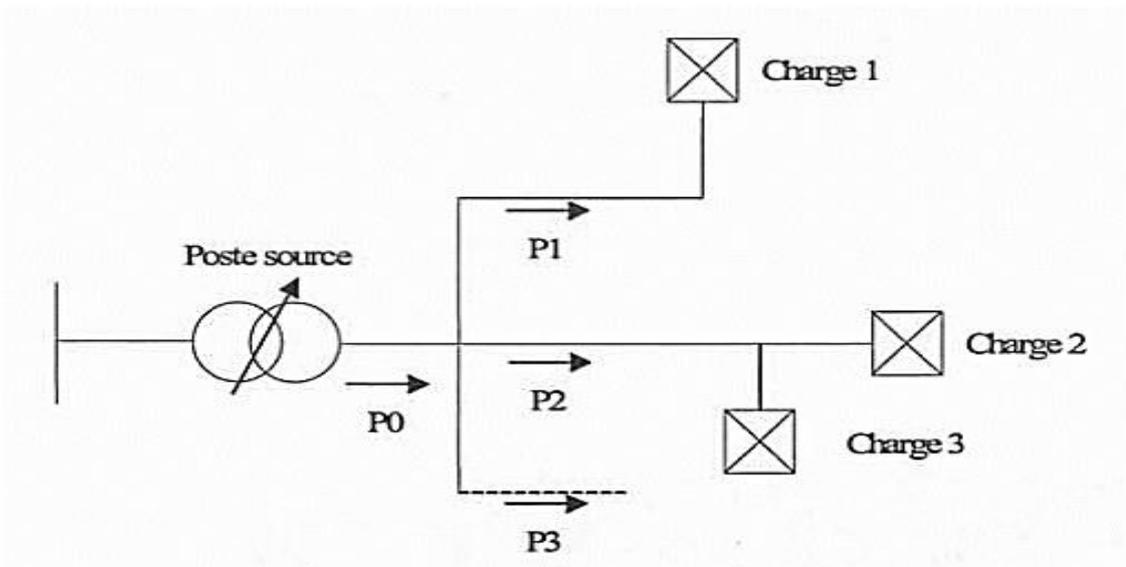


Figure II. 1 Réseau de distribution sans PDE [18].

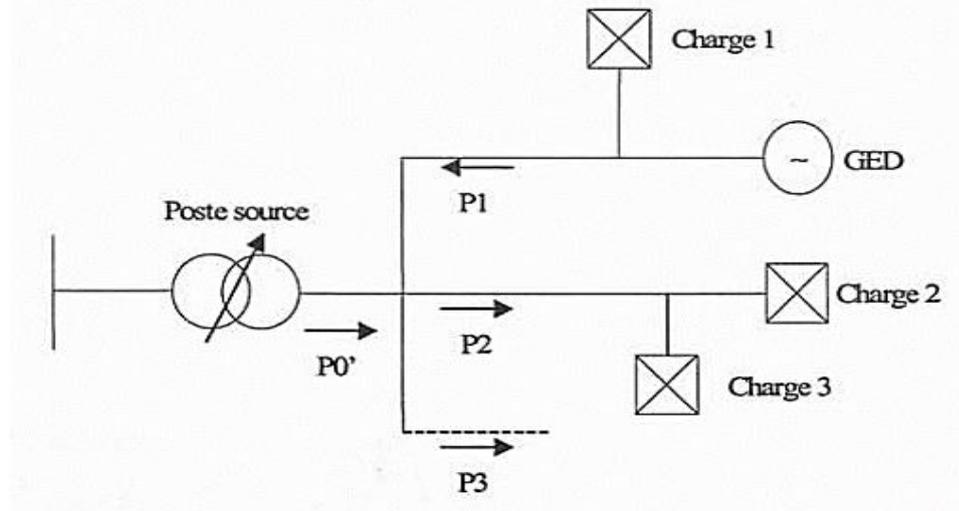


Figure II. 2 : Réseau de distribution avec PDE [18].

La modification du transit de puissance est à étudier lorsque de la PDE est introduite afin de s'assurer que les matériels présents sur les réseaux de distribution (appareils de mesure, protections, etc.) fonctionneront correctement. La modification du transit peut provoquer le changement de ces matériels, notamment les appareils de protection, qui sont très souvent unidirectionnels. Un transit de puissance peut changer lorsque de la PDE est connectée mais aussi lorsque l'état de charge du réseau change (jour/nuit par exemple) [18].

II.2.1.2 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 [17].

II.2.1.3 Impacts sur le plan de protection

La connexion de nouveaux générateurs au réseau modifiera également les courants de courts-circuits et donc le réglage des seuils des protections. D'ailleurs, ce changement peut provoquer une mauvaise sélectivité, des déclenchements intempestifs ou l'aveuglement du système de protection [17].

II.2.1.4 Impacts sur l'observabilité et de contrôlabilité du système

Les PDE, notamment celles à type énergie nouvelle et renouvelable, sont caractérisées par l'intermittence des sources primaires. Cela sera difficile pour l'opérateur d'estimer la puissance de sortie de ces producteurs, donc la puissance fournie du système, par conséquent [17].

Chapitre II : Etude des impacts de la production d'énergie renouvelables sur les réseaux électriques.

II.2.1.5 Impacts sur la continuité de service

Pour la même raison concernant la caractéristique d'intermittence, l'indisponibilité des PDE lors que le système les sollicite peut occasionner la rupture d'électricité par manque de puissance [17].

II.2.1.6 Impact sur le profil de tension

Les générateurs d'énergie modifient aussi le plan de tension des réseaux électriques. En fait, le dimensionnement du réseau est réalisé de manière à avoir une chute de tension admissible sur toute la longueur des départs. Ainsi, en l'absence de production d'énergie, la tension décroît progressivement avec la distance du poste source vers le dernier consommateur en fonction de l'impédance des câbles et des charges. L'ajout d'un ou plusieurs producteurs d'énergie peut créer localement une ou plusieurs élévations de tension. Ces élévations peuvent se transformer en surtensions et dépasser les limites admissibles par le code électrique, notamment en cas de faible charge sur le réseau. Le phénomène est illustré à la figure 14 représentant l'évolution de la tension le long d'un départ [19].

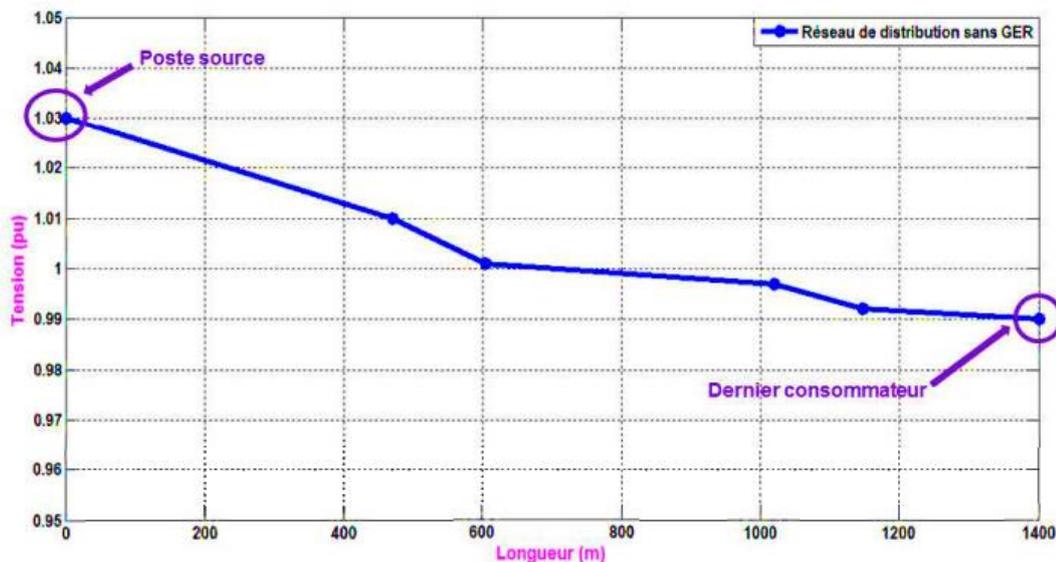


Figure II. 3 : Variation de la tension le long d'un départ HT sans GER.

Les transformateurs régleurs en charge des postes sources HT mesurent en effet la tension à leurs bornes. Par contre, si les producteurs d'énergie se trouvent suffisamment loin, les transformateurs régleurs en charge ne détecteront pas les élévations de tension et, en cherchant à maintenir la tension à la valeur de consigne au poste source, pourront provoquer des surtensions près des générateurs d'énergie.

Chapitre II : Etude des impacts de la production d'énergie renouvelables sur les réseaux électriques.

II.2.1.7 Les surtensions induites par la connexion d'un générateur d'énergie

La principale problématique du producteur et du distributeur en charge du réseau électrique est la continuité du service ainsi que le respect des caractéristiques contractuelles en tension et en fréquence [6].

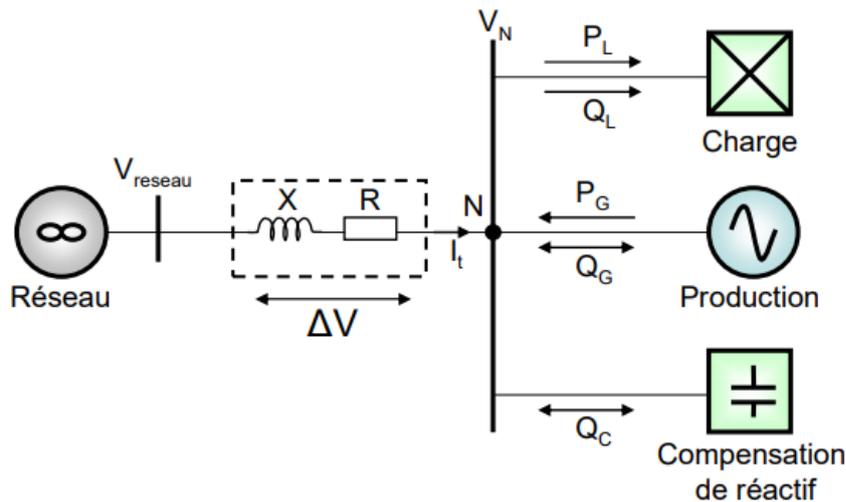


Figure II. 4 : Détermination de la chute de tension sur une ligne.

Dans le réseau de distribution classique de structure radiale, la tension est, en règle générale, plus élevée au poste source et diminue vers l'extrémité du départ. La puissance circule dans un sens à partir du poste source vers les consommations. Mais, avec la présence de PDE sur le réseau, le réseau devient actif et les transits de puissance sont modifiés. La chute de tension (ΔV en pu) entre le poste source et le point de raccordement d'une PDE via une ligne (Figure I - 6) est déterminée comme suit :

$$\Delta V = R \cdot I_t \cdot \cos \varphi + L \cdot \omega \cdot I_t \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots (2.1)$$

Où : R, L sont la résistance et l'inductance totale de la ligne.

V_N la tension au nœud N et I_t le courant transitant dans la ligne.

P_N, Q_N les puissances active et réactive au nœud N.

$$\Delta V = R \cdot \frac{P_N}{V_N} + L \cdot \omega \cdot \frac{Q_N}{V_N} = \frac{R(P_G - P_L) + L \cdot \omega (\pm Q_G - Q_L \pm Q_C)}{V_N} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\Delta V = \frac{R \cdot P_N + X \cdot Q_N}{V_N} \dots\dots\dots (2.3)$$

P_G, Q_G sont les puissances active et réactive fournie par PDE.

P_L, Q_L sont les puissances active et réactive de consommation.

Q_C est la puissance réactive du dispositif de compensation.

Chapitre II : Etude des impacts de la production d'énergie renouvelables sur les réseaux électriques.

L'équation (2.3) illustre un des principaux problèmes liés à la connexion de PDE sur un réseau. En effet, l'injection de puissance, active ou réactive, va induire une élévation de la tension au nœud de connexion. Les impacts sur la tension de telles productions vont être différents selon le type de réseau auxquelles elles sont connectées. Selon la structure du réseau, les caractéristiques du poste source, le point de raccordement et la puissance injectée par la PDE, la tension peut être élevée au point de raccordement, pouvant même dépasser la limite autorisée ou limite admissible.

Dans le réseau de transport, la réactance est supérieure à la résistance, ainsi si $X \gg R$, la formule (2.3) peut être simplifiée comme suit :

$$\Delta V = \frac{X.Q_N}{V_N} \dots\dots\dots(2.4)$$

L'injection de puissance réactive aura donc plus d'impact sur le niveau de tension que l'injection de puissance active.

Dans le réseau de distribution et en particulier en BT, la résistance linéique est plus importante que la réactance linéique $R \gg X$:

$$\Delta V = \frac{R.P_N}{V_N} \dots\dots\dots(2.5)$$

La puissance active injectée par PDE joue donc un rôle important dans la modification de la tension.

De plus, la production des PDE est non garantie en général pour les sources d'énergie renouvelable (caractère intermittent), pouvant provoquer une fluctuation imprévue de la tension.

Le plan de tension dans le réseau de distribution dépend fortement du niveau de consommation et du facteur de puissance de ces charges. Un changement de charge provoque une variation de tension sur le réseau. Le cas extrême pour une élévation de tension correspond à une charge consommée nulle associée à une production maximale. Cette situation peut cependant être réaliste en imaginant une consommation nocturne très faible alors que les productions de PDE restent nominales.

II.2.2 Impacts sur le système de transport

La production d'énergie peut aussi avoir plusieurs impacts sur le réseau de production si elle est connectée en masse. Les impacts les plus importants sont les suivants :

II.2.2.1 Risque de congestion [19]

L'insertion des sources intermittentes est normalement localisée dans des zones où les conditions climatiques sont plus appropriées. Ceci provoque le besoin d'un renforcement local du réseau vu les possibilités de congestions locales.

Chapitre II : Etude des impacts de la production d'énergie renouvelables sur les réseaux électriques.

II.2.2.2 Incertitude du système électrique

L'intermittence des sources d'énergie provoque une incertitude dans le système en termes de quantité d'énergie générée et de la localisation de l'injection : le réseau électrique doit être prêt à accueillir un nombre important de producteurs d'énergie sans ne connaître a priori ni la position, ni la puissance qu'ils vont débiter [19].

II.2.2.3 Changement des marges d'exploitation

Tableau II. 1 : Puissances réactives et puissance naturelle triphasée de quelques lignes

Liaison	Q fournie à vide (MVar/km)	Q absorbée en charge max (MVar / km)	P maximale admissible (MVA)	Puissance naturelle (MVA)
Aériennes 63 kV	0.012	0.400	85	10
Aériennes 225 kV	0.130	1.400	425	130
Aériennes 400 kV	0.600	9.000	2350	550
Souterraines 63 kV	0.320	0.400	120	100
Souterraines 225 kV	4.500	0.140	240	1500

À l'instant t_0 , la marge d'exploitation pour une échéance donnée $t_0 + d$ correspond à la différence entre [20] :

- D'une part, l'offre connue à l'instant t_0 comme devant être disponible à $t_0 + d$.
- D'autre part, la demande estimée à l'instant t_0 comme probable à $t_0 + d$.

Le changement des marges d'exploitation comme conséquence du besoin d'un système de suivi non seulement de la charge mais aussi de l'intermittence des sources [19].

II.2.2.4 Apparition des flux d'énergie réactive

L'apparition des flux d'énergie réactive inattendus dans le système de transport lorsque le flux de puissance active est inférieur à la puissance naturelle de la ligne [19].

II.2.2.5 Fermeture des grandes centrales

La fermeture ou le non remplacement des grandes centrales à cause des raisons économiques et environnementales. [19]

Chapitre II : Etude des impacts de la production d'énergie renouvelables sur les réseaux électriques.

Tableau II. 2 : Programmation pluriannuelle de l'énergie en France [21].

Consommation primaire des énergies fossiles	Baisse de 20% de la consommation primaire d'énergies fossiles en 2023 et de 35% en 2028 par rapport à 2012
Émissions de gaz à effet de serre issues de la combustion d'énergie	277 MtCO ₂ en 2023 227 MtCO ₂ en 2028 Soit une réduction de 14% en 2023 et de 30% en 2028 par rapport à 2016 (322MtCO ₂)
Consommation de chaleur renouvelable	Consommation de 196 TWh en 2023 Entre 218 et 247 TWh en 2028 Soit une augmentation de 25% en 2023 et entre 40 et 60% en 2028 de la consommation de chaleur renouvelable de 2016 (155TWh)
Production de gaz renouvelables	Production de biogaz injecté à hauteur de 14 à 22TWh en 2028 sous l'hypothèse d'une forte baisse des coûts (35 à 55 fois la production de 2017)
Capacités de production d'électricité renouvelables installées	74 GW en 2023, soit +50% par rapport à 2017 102 à 113 GW en 2028, doublement par rapport à 2017
Capacités de production d'électricité nucléaire	4 à 6 réacteurs nucléaires fermés d'ici 2028 dont ceux de Fessenheim. Fermeture de 14 réacteurs nucléaires d'ici 2035, date d'atteinte d'une part de 50 % d'électricité nucléaire dans le mix électrique

II.2.2.6 Perte de la production d'énergie

La production d'énergie est interrompue par les conditions climatiques critiques. Les éoliennes par exemple, s'arrêtent si la vitesse du vent dépasse les 25m/s (pour les éoliennes onshore, et environ 30m/s pour les éoliennes Offshore). La production d'énergie hydraulique régresse avec la baisse du niveau des eaux pendant des périodes de l'année.

II.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'impact de la production de l'énergie renouvelable sur les réseaux de distribution.

Les réseaux électriques déjà existant ne sont pas conçus pour accueillir la production d'énergies renouvelables. Forcément, cette énergie produite affecte directement le réseau en place, et génère des changements des sens de transit de puissance et devient bidirectionnel, ce qui affecte la stabilité de tout le réseau.

L'insertion de cette production décentralisée peut aussi provoquer des surtensions dans les points de connexion. Des surtensions qui peuvent s'avérer critiques pour le réseau électrique. Donc il nous paraît important d'étudier le réglage de la tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution, en démontrant aussi l'importance de ce réglage.

Chapitre III :
**Réglage de tension en
présence de producteurs
d'énergie sur le réseau de
distribution.**

III.1 Introduction

Les réseaux électriques constituent maintenant le support physique de nombreux échanges économiques autour de la production et de la consommation d'énergie électrique. Donc la sécurité du système électrique est, aujourd'hui plus qu'hier, un enjeu capital vu les impacts économiques et sociaux majeurs. Pour cette raison, dans nos sociétés, le rôle joué par les réseaux électriques est vital.

Dans ce chapitre nous allons montrer l'importance du réglage de la tension et de la fréquence dans les réseaux électriques. Ensuite, nous allons aborder les services systèmes de réglage de fréquences et le réglage de tension à trois niveaux (primaire, secondaire et tertiaire) qui sont chargés d'assurer l'équilibre entre consommation et production. Et puis nous allons parler du principe du réglage de la tension et le moyen de réaliser ça en présence d'une production d'énergie dans le réseau.

III.2 L'importance de réglage de la tension et de la fréquence dans les réseaux électrique

La tension et la fréquence sont les paramètres les plus importants pour la stabilité du réseau. Les fournisseurs d'électricité définissent des normes d'exploitation des réseaux électriques pour garder la stabilité et la sûreté du système électrique, et garantir la qualité de l'énergie. Et les gestionnaires doivent appliquer ces normes.

III.2.1 Le maintien de la tension [19]

Les gestionnaires ont donc mis en place sur leurs réseaux des systèmes de réglage de tension qui leur permettent de respecter ces normes et, donc, d'améliorer la qualité et la sûreté sur les réseaux, mais aussi de les exploiter dans des conditions optimales.

Tous les utilisateurs du réseau sont sensibles aux variations de tension. Le distributeur (Hydro-Québec) s'engage quant à la qualité de l'énergie qu'il transporte et, donc, de l'onde de tension. Le respect d'une plage de variation maximale autour d'une tension d'alimentation nominale est en effet primordial pour assurer le bon fonctionnement des récepteurs des consommateurs. Pour les producteurs, là aussi, le maintien de la tension dans une plage fixée est essentiel afin d'éviter que les protections de découplage de leurs groupes de production ne se déclenchent et, par une réaction en cascade, n'affaiblissent la sûreté globale du système électrique.

Chapitre III : Réglage de tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution.

Le maintien de la tension est donc un des aspects fondamentaux de l'exploitation des réseaux de transport et de distribution. En effet, les limites de tension ne doivent pas être dépassées pour les raisons suivantes :

- Les limites supérieures de tension sont imposées pour tous les niveaux d'exploitation par le maintien diélectrique des matériaux, ainsi que par les limites de saturation des transformateurs. En ce qui concerne les réseaux de distribution, la tension est aussi limitée, car une tension trop élevée peut réduire la durée de vie d'appareils utilisateurs (ou entraîne un vieillissement et un endommagement du matériel connecté).
- Les limites inférieures de tension sont imposées au niveau des réseaux électriques par le fonctionnement correct des appareils industriels ou domestiques. Au niveau des réseaux de transport, les limites inférieures de tension sont liées à la sécurité du système électrique dans son ensemble.

Cependant, une tension trop basse aura les conséquences suivantes:

- Surcharge des éléments de transport (lignes et transformateurs) par augmentation du courant et risque de déclenchement (ou perturbation) des protections associées;
- Instabilité de tension pouvant entraîner un écroulement de tension;
- Perte des éléments de production (stabilité statique des alternateurs, limites de fonctionnement des groupes et de leurs auxiliaires).

III.2.2 Le maintien de la fréquence

De même que pour la tension, la fréquence doit nécessairement être maintenue dans les limites contractuelles. Les principaux problèmes apparaissant en cas d'excursion non maîtrisée de la fréquence sont les suivants : [19]

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

Tableau III. 1 : Limites de fonctionnement du réseau de distribution [NF 50160] [Arrêté-1986].

	Tensions et fréquences nominales	Déviations maximales de tension autorisées	Marges de variations de fréquence autorisées
BT	Un=400V fn=50Hz	+6% -10%	± 0,05 Hz
HTA	Un=20kV fn=50Hz	±5%	± 0,05 Hz

III.3 Les services systèmes

Les Services Système ont pour projet de garantir le maintien de la fréquence, de la tension et de façon générale la stabilité du réseau électrique. La totalité des utilisateurs raccordés à ce réseau bénéficient de ces services qui assurent le bon fonctionnement de leurs matériels électriques et de leurs processus de consommation ou de production mais assurent aussi le maintien des conditions d'exploitation sûres du réseau électrique. De fortes variations sur la tension ou la fréquence peuvent effectivement engendrer des incidents de grande ampleur, comme un black-out, privant des régions ou pays entiers d'électricité pendant des durées indéfinies (ça peut aller de plusieurs heures, jusqu'à plusieurs Jours).

Un système d'énergie électrique peut être défini par sa fréquence et sa tension. La stabilité de ces paramètres garantit la stabilité du système dans sa globalité. A cet égard, les producteurs centralisés ont à répondre à ce que l'on appelle les services système, cela signifie qu'ils contribuent au réglage de tension et de fréquence dans des limites déterminé par les gestionnaires du réseau auquel ils sont reliés. Les services système comptent aussi plusieurs dispositifs mis en place sur tout le réseau, et spécialement sur les réseaux de distribution, qui permettent de maintenir la tension en ses termes prédéfinis. Le réseau électrique doit pouvoir faire face à tous les incidents envisageables, et doit garantir un fonctionnement correct.

III.3.1 Réglage de fréquence

En fonctionnement normal la fréquence d'un système d'énergie électrique est identique à un instant donné sur l'ensemble du réseau, elle représente la vitesse des groupes de production synchrones – tous les alternateurs tournent à la même vitesse électrique. La stabilité de la fréquence est assurée par l'équilibre entre la production et la consommation. En conséquence, une variation de charge ou de production a donc pour effet de modifier la fréquence du

Chapitre III : Réglage de tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution.

système : une production supérieure à la consommation entraînera une augmentation de fréquence et inversement. Les groupes de productions sont donc régulés pour garantir la stabilité de la fréquence et son maintien à une valeur nominale de référence (50 Hz en Europe). Ceci est rendu possible grâce à la constitution de réserves de puissance réparties sur différents groupes de production et aux différents réglages hiérarchisés, intervenant successivement, qui leur sont associés : les réglages primaire, secondaire et tertiaire (Fig. III-1). [22]

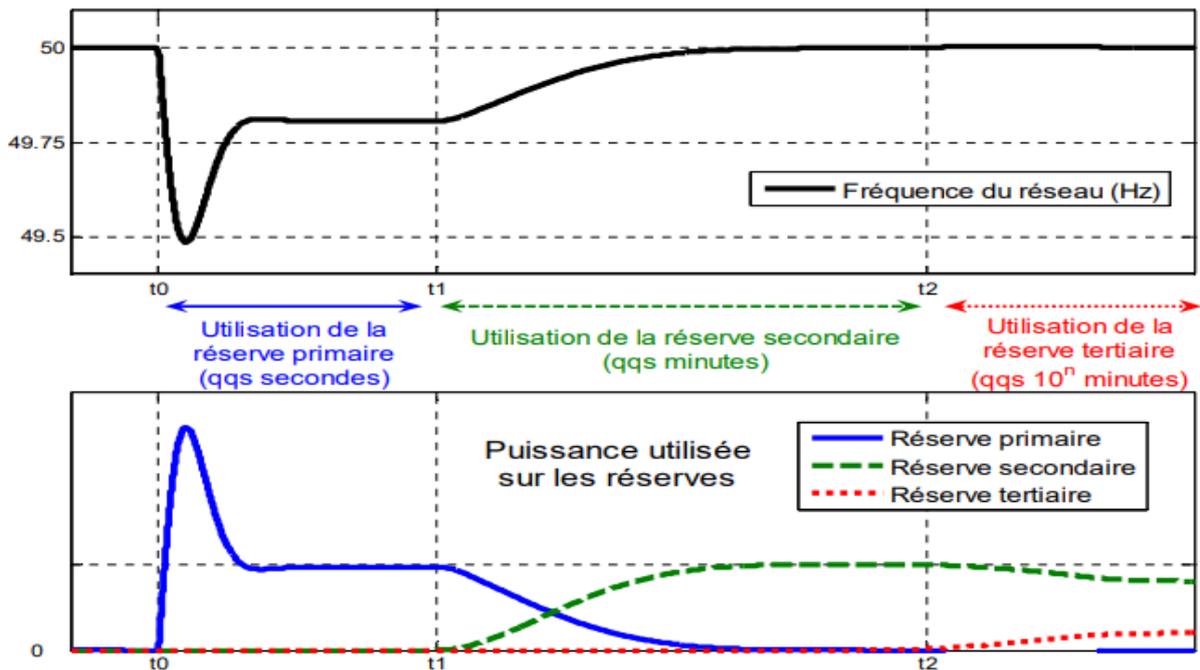


Figure III. 1 : Réglage hiérarchisé de fréquence : emploi des différentes réserves suite à un défaut [22]

III.3.1.1 Réglage primaire de fréquence [22]

Le réglage primaire de fréquence est une correction automatique qui intervient rapidement pour rétablir l'équilibre production / consommation et maintenir la fréquence proche de sa valeur de référence. Ce réglage agit directement sur la vitesse des alternateurs par l'intermédiaire des boucles de régulation (Fig. III.1) : rappelons que la vitesse d'un groupe synchrone est une image directe de la fréquence. À la fin de ce réglage la fréquence est différente de la fréquence de référence.

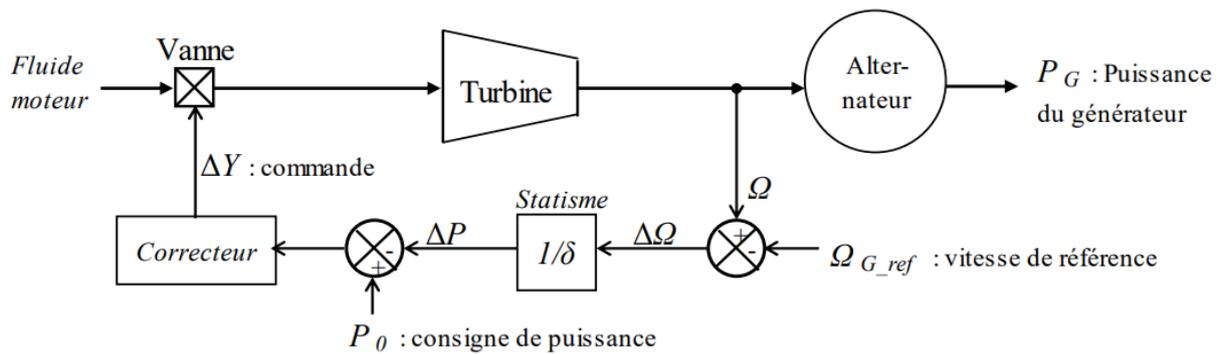


Figure III. 2 : Intégration d'un statisme dans une boucle de régulation de vitesse. [22]

Tous les groupes de production classiques raccordés au réseau de transport ont l'obligation de participer à ce réglage. Le régulateur de vitesse impose une variation linéaire entre la fréquence et la puissance active du groupe (Fig. III.2), ce qui donne à ce réglage une caractéristique statique. Cette loi de réglage statique est définie par :

$$\frac{(P - P_0)}{P_N} = - \frac{1}{\delta} \frac{(f - f_0)}{f_N} \quad (\text{III.1})$$

Où :

$$(P - P_0) = -K(f - f_0) \quad (\text{III.2})$$

Avec : P_0 : Puissance active fournie à la fréquence nominale, MW

P : Puissance fournie par le groupe en mode quasi stationnaire, MW

P_N : Puissance nominale du groupe, MW

f : Fréquence du réseau, Hz

f_N : Fréquence nominale du réseau, Hz

K : « énergie réglante » du groupe, MW/Hz

δ : statisme du groupe, %

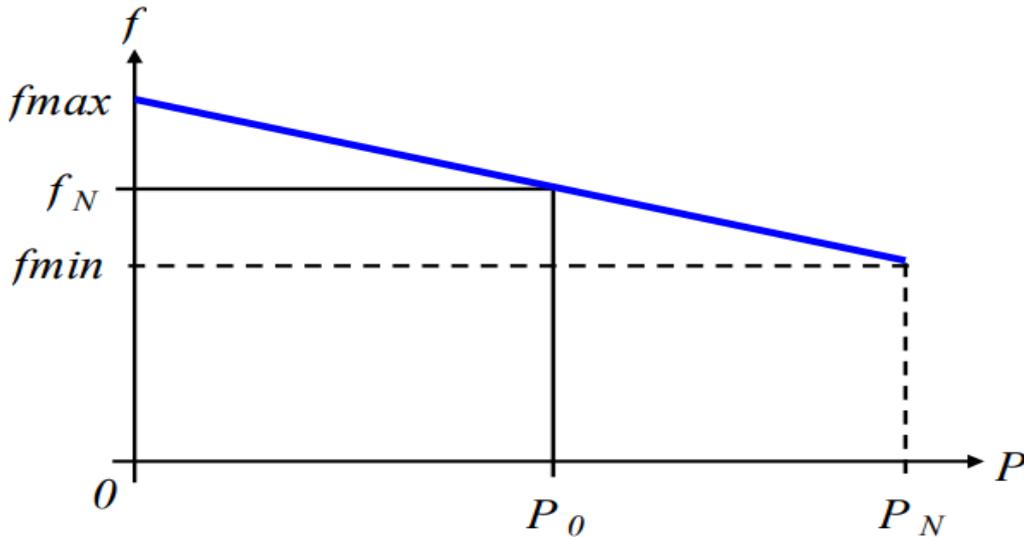


Figure III. 3 : Statisme [22]

Cette stratégie de réglage fait apparaître deux notions, celle de réserve primaire et celle « d'énergie réglante » primaire.

La première correspond à la capacité du système à rétablir l'équilibre production / consommation lorsque la consommation se trouve excédentaire. Pour cela le système doit disposer d'une réserve de puissance suffisante. La réserve primaire d'un groupe correspond donc à la différence entre la puissance active fournie à la fréquence nominale : P_0 , et sa puissance de limitation (si un groupe participe à différents réglages, sa puissance de limitation est inférieure à sa puissance nominale afin qu'il dispose d'une réserve nécessaire pour participer aux autres réglages). L'UCTE préconise pour le réseau européen une réserve primaire de 3000 MW, ce qui permet de compenser la perte de deux des plus gros groupes (trois tranches nucléaires).

L'énergie réglante, K , correspond à la variation de puissance par rapport à la variation de fréquence. Plus cette « énergie » est grande moins la déviation de fréquence après le réglage primaire sera important. L'énergie réglante d'un groupe de production est inversement proportionnelle à son statisme comme le montre l'équation (III.3). Pour un réseau cette énergie correspond à la somme des énergies réglantes de chaque groupe de production. En Europe cette valeur est périodiquement révisée par l'UCTE : depuis 2005 elle est fixée pour l'ensemble du système européen à 21000 MW/Hz.

$$K = \frac{1 P_N}{\delta f_N} \quad (\text{III.3})$$

III.3.1.2 Réglage secondaire de fréquence

Le réglage secondaire prends plus de temps que le réglage primaire (quelques minutes) et il vient agir après la stabilisation de la fréquence par le réglage primaire d'une dizaine de seconde. Le réglage secondaire a pour objectif de corriger l'écart de fréquence par rapport à la fréquence de consigne, et de rétablir les échanges de puissance entre les partenaires à leur valeur convenue. Donc les centres de dispatching envoient des consignes de puissance aux producteurs participants au RSF par le biais d'un réglage automatique centralisé.

III.3.1.3 Réglage tertiaire de fréquence [25]

Le réglage tertiaire est un réglage manuel : il est effectué par les opérateurs du réseau depuis le centre de dispatching. Ce réglage permet d'une part de compléter le réglage secondaire de fréquence si ce réglage s'est trouvé insuffisant pour ramener la fréquence à sa valeur nominale, mais également de compenser la différence entre production et consommation lors de variation lente de cet écart.

En résumé, le dimensionnement des réserves secondaire et tertiaire pour les différents réglages de fréquence doit permettre de passer les pointes de consommation de la journée et celle de la nuit, alors que la réserve primaire doit faire face aux variations rapides de fréquence.

III.3.2 Réglage de tension

Les charges d'un réseau électrique consomment plus ou moins une grande quantité de puissance réactive par rapport à la quantité de puissance active consommée.

Cette puissance réactive consommée est en partie fournie par les groupes de productions essentiellement connectés au réseau de transport, et en partie par des dispositifs de compensations d'énergie réactive généralement placés au plus près de la consommation pour éviter les transits élevés de puissance réactive dans le réseau de transport vers le réseau de distribution. En effet, en HTB, les lignes ont un caractère plus inductif que résistif et le transit de puissance réactive induit de forte chute de tension. De plus, le fait de faire transiter de la puissance réactive dans une ligne diminue la puissance active maximale transmissible par celle-ci. [20]

Chapitre III : Réglage de tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution.

Du fait de l'étendue du réseau HTB les contrôles en tensions s'effectuent de manière hiérarchisée dans le temps et de manière distribuée dans l'espace (Fig. III.4).

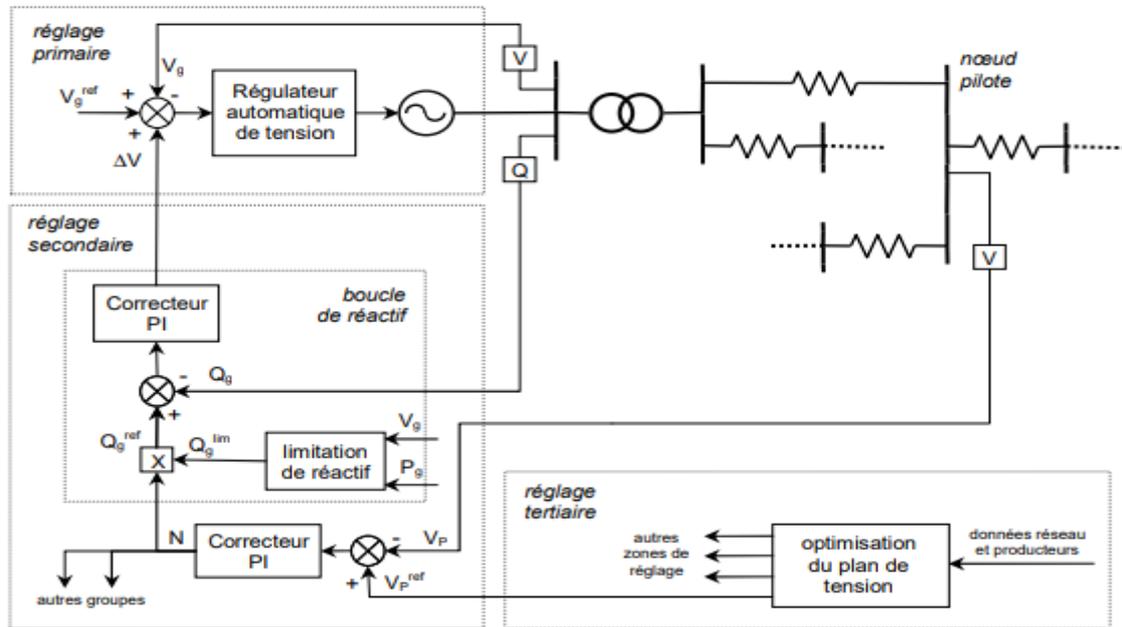


Figure III. 4 : organisation du réglage hiérarchisé de tension [2]

III.3.1.1 Réglage primaire de tension

Le réglage primaire agit au niveau local avec une constante de temps de l'ordre de 100 ms sur la tension aux bornes des groupes pour faire face à des variations rapides de la tension qui peuvent être induites par des variations de demande de puissance réactive, par des défauts ou par des manœuvres sur le réseau. Le RPT est le premier à intervenir suite à une perturbation. Il se caractérise par une action basée sur des critères locaux en asservissant la tension aux bornes du groupe à une valeur de référence. Grâce à cet asservissement les générateurs actuels, essentiellement des alternateurs, fixent la tension à une valeur de consigne sur leur point de raccordement. Le principe est d'agir sur l'excitation de ces machines pour garder le niveau de tension désirée. Ceci est réalisable dans les limites propres de chaque alternateur. Le RPT permet donc, dans la limite des réserves primaires des groupes (en réactif), de maintenir l'équilibre local entre la production et la consommation de puissance réactive et de répondre rapidement aux fluctuations aléatoires de la tension [1].

III.3.1.2 Réglage secondaire de tension [2]

Le réglage secondaire de tension (RST) a pour but de faire face de manière coordonnée à de fortes, mais lentes fluctuations de la tension à l'échelle régionale, ce que le réglage primaire ne peut assurer seul. Le réglage secondaire est automatisé et centralisé par régions dites zones de réglage, ces zones de réglages doivent être indépendantes du point de vue de la tension. Cela signifie que chaque zone est en théorie insensible à toute variation de tension pouvant survenir dans une zone voisine. Il a pour objet de limiter les transits de puissance réactive sur les lignes d'interconnexion, et de maintenir la tension en certains nœuds représentatifs de la tension de chaque zone à sa valeur de consigne. Ces nœuds spécifiques sont appelés nœuds pilotes (il y en a un par zone de réglage).

Cette action est réalisée en élaborant une correction des valeurs de consigne de chaque groupe participant au réglage secondaire. Le correcteur du réglage secondaire élabore un niveau de participation à partir de l'écart entre la consigne de tension du nœud pilote et la tension mesurée en ce même nœud. Ce niveau est ensuite utilisé par la boucle de réactif de chaque alternateur pour déterminer la correction à apporter sur la consigne de tension de ce dernier. Afin de protéger le réseau contre d'éventuelles oscillations dues à des actions contradictoires des réglages primaire et secondaire, ce dernier a un temps de réponse nettement plus long que le précédent : il est de l'ordre de la minute.

III.3.1.3 Réglage tertiaire de tension

Le réglage tertiaire, manuel, effectué en France par le dispatching national, consiste à réévaluer, à intervalles de quinze minutes, les consignes de tension des nœuds pilotes de chaque zone de réglage selon des critères technico-économiques dont les principaux sont les suivants [20] :

- Exploiter le réseau en assurant au mieux sa sûreté.
- Respecter les contraintes de fonctionnement des matériels.
- Minimiser les pertes et les coûts de production.
- Utiliser au mieux la capacité des ouvrages de transport.

Il a pour but d'assurer une bonne tenue globale du plan de tension, et d'éviter des situations engendrant des surcoûts ou des risques pour le système électrique. Les consignes de tension des nœuds pilotes sont calculées par un « optimal power flow », ou OPF, en tenant compte des critères précédemment cités. [1]

III.4 Principe et moyens de réglage de la tension dans un réseau de distribution

Les postes HTB/HTA sont parfois alimentés en antenne mais le plus souvent avec un jeu de barres recevant plusieurs arrivées HTB.

Un ou plusieurs transformateurs HTB/HTA sont raccordés sur ce jeu de barres HTB, simple ou multiple. Un ou plusieurs jeux de barres HTA sont à l'aval de ces transformateurs. Des départs HTA sont raccordés sur ces jeux de barres : [23]

- Soit en câbles souterrains, quasiment toujours bouclables, mais exploités ouverts en un point sur la boucle.
- Soit en lignes aériennes parfois encore en antenne, mais de plus en plus souvent bouclables, elles aussi.

Le long de ces liaisons HTA, on trouve :

- Sur les câbles souterrains, des postes de transformation maçonnés HTA/BTA, raccordés généralement en coupure d'artère, parfois en double dérivation.
- Sur les lignes aériennes, des postes de transformation simplifiés HTA/BTA, raccordés par des piquages en antenne alimentant soit, le plus souvent, des postes aériens sur poteau, soit des postes sous abri dits bas de poteau.

À l'aval de ces transformateurs HTA/BTA, il y a les réseaux BTA qui ne sont pas en général bouclables, sauf quelques réseaux urbains de type particulier où les conducteurs sont bouclés et refermés entre postes HTA/BTA.

Chapitre III : Réglage de tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution.

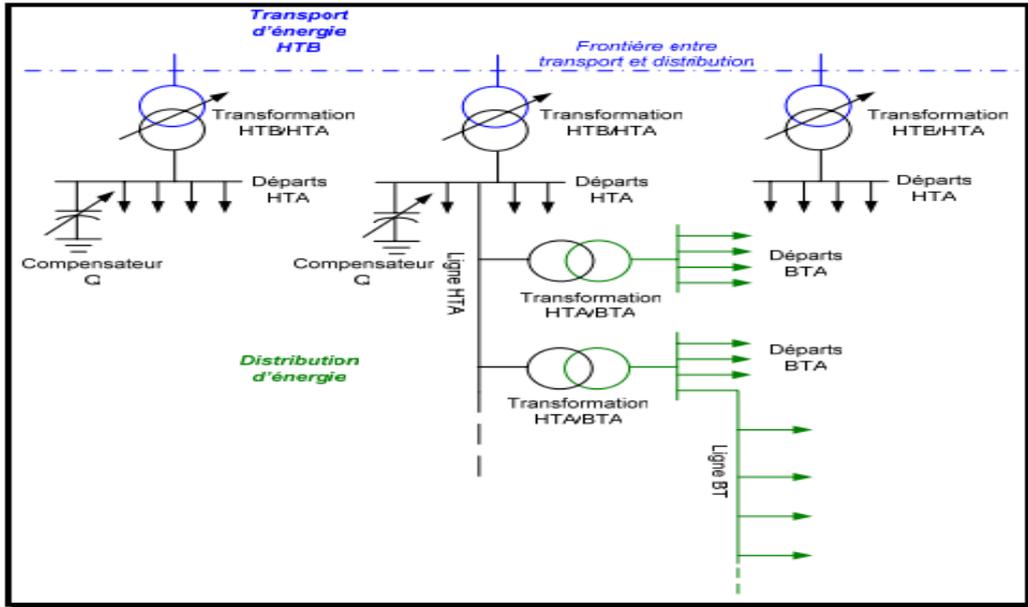


Figure III. 5 : Schéma général d'un réseau de distribution. [23]

D'après la Figure III-5, On peut remarquer que le réseau est structuré en plusieurs niveaux, qui peuvent assurés des fonctions spécifiques propres qui sont caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions.

La figure III-6 présente les moyens de réglage de la tension dans un réseau de distribution, dans lequel est connectée une source de production décentralisée.

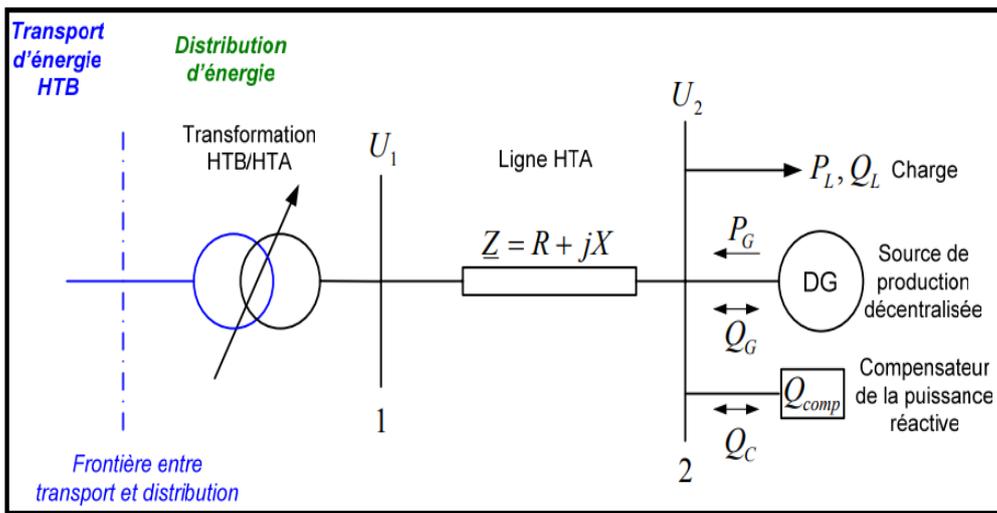


Figure III. 6 : Illustration des moyens de réglage de la tension [23]

Chapitre III : Réglage de tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution.

La liaison avec le réseau de transport situé en amont est assurée par un transformateur HTB/HTA, muni d'un régleur en charge.

La source de production décentralisée (P_G , Q_G), avec une charge (P_L , Q_L) et un dispositif de compensation de la puissance réactive (Q_C), sont connectés sur le même nœud, au bout d'une ligne HTA d'impédance Z .

- L'expression approchée de la chute de tension sur la ligne est donnée par :

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{R(-P_G + P_L) + X(-Q_G + Q_L - Q_C)}{U_2} \quad (\text{III.4})$$

- La valeur approximative de la tension au nœud 2 (U_2) peut être calculée à l'aide de la relation :

$$U_2 \approx \frac{1}{2}U_1 + \frac{1}{2}\sqrt{U_1^2 - 4R(-P_G + P_L) - 4X(\pm Q_G + Q_L \pm Q_C)} \quad (\text{III.5})$$

Les moyens principaux disponibles pour régler la tension U_2 sont :

- Le réglage de la tension au nœud 1 (U_1) par le transformateur muni d'un régleur en charge.
- L'action sur la puissance active fournie par la source de production (P_G).
- L'action sur la puissance réactive produite / consommée par la source (Q_G).
- L'action sur la puissance réactive injectée / absorbée par le compensateur (Q_C).

III.4.1 Régulation de la tension par le contrôle de la puissance réactive de la source de production décentralisée [24]

Nous nous intéressons maintenant à la régulation de tension d'une source de production décentralisée connectée à un réseau de distribution HTA dans le cas d'un réseau simplifié présenté en Figure III-7. La source de production dispersée, caractérisée par la puissance apparente nominale S_{GN} et par les facteurs de puissance minimaux en régime inductif $\cos \varphi_{min}^{ind}$ et capacitif $\cos \varphi_{min}^{cap}$, est munie d'un système de régulation de la tension au nœud de connexion (U_2) qui peut agir, dans le cas général, sur les consignes de puissance réactive (Q_{GREF}) voir de puissance active (P_{GREF}).

Chapitre III : Réglage de tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution.

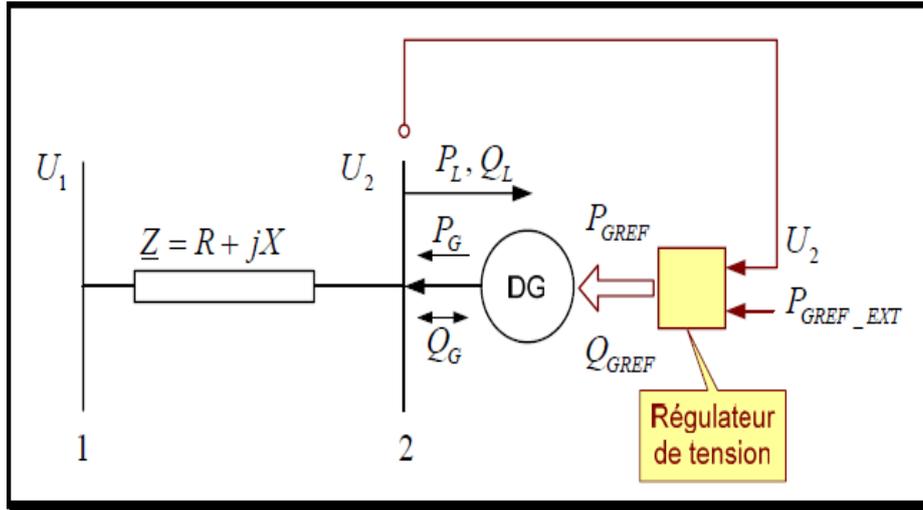


Figure III. 7 : Réseau test [23]

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le réglage de la tension est donc réalisé par action sur la puissance réactive dont nous rappelons ici les différentes variantes envisageables [24]

Nous présentons ici la solution de réglage basée sur une loi linéaire avec une bande morte (ε).

La valeur de référence pour la puissance réactive de la source de production décentralisée GREF Q est calculée en fonction de la valeur de la tension au point de connexion 2 U en employant l'algorithme suivant :

$$Q_{GREF} = \begin{cases} Q_{max}^{ind} ; \text{ pour } U_2 > U_{max} \\ Q_{init} + (U - U_{max}^Q) KQ_1 ; \text{ pour } U_{max} \geq U_2 \geq U_{max}^Q \\ Q_{init} ; \text{ pour } U_{max}^Q > U_2 > U_{min}^Q \\ Q_{init} - (U_{min}^Q - U) KQ_2 ; \text{ pour } U_{min}^Q \geq U_2 \geq U_{min} \\ Q_{max}^{cap} ; \text{ pour } U_2 < U_{min} \end{cases} \quad (III.6)$$

Avec :

$U_0, \varepsilon, Q_{init}$: paramètres qui caractérisent la bande morte ;

Chapitre III : Réglage de tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution.

KQ_1, KQ_2 : pentes de réglage du réactif avec $KQ_1 = \tan(\alpha_1)$, $KQ_2 = \tan(\alpha_2)$,

U_{\min}, U_{\max} : limites du domaine de réglage de la tension par le contrôle du réactif.

Pour ce type de commande, on identifie plusieurs paramètres de réglage présenté dans la figure III-8:

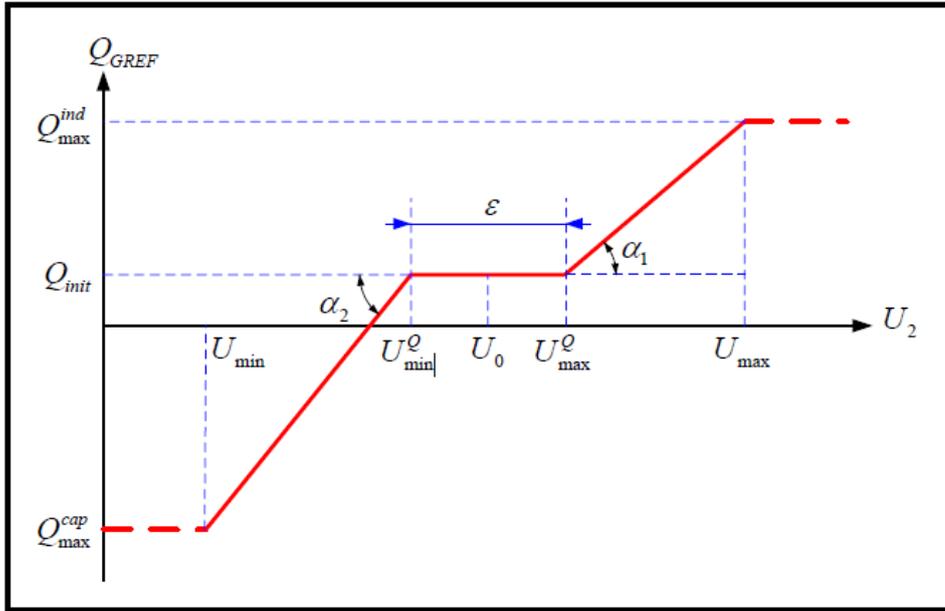


Figure III. 8 : Principe de réglage de la tension par action sur la puissance réactive [23]

Les deux pentes de réglage, (KQ_1, KQ_2), sont déterminées en fonction du domaine de tension dans lequel on réalise le réglage et en fonction des valeurs maximales de la puissance réactive (fonctionnement inductif / capacitif) ainsi :

$$KQ_1 = \tan(\alpha_1) = \frac{Q_{\max}^{ind} - Q_{init}}{U_{\max} - U_{\max}^Q} \quad (\text{III.7})$$

$$KQ_2 = \tan(\alpha_2) = \frac{Q_{init} - Q_{\max}^{cap}}{U_{\max}^Q - U_{\min}} \quad (\text{III.8})$$

Chapitre III : Réglage de tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution.

Les valeurs maximales de la puissance réactive (Q_{\max}^{cap} , Q_{\max}^{ind}) peuvent être fixées de manière définitive ou varier avec la puissance active de la source selon différentes lois.

• A) Réglage à puissance réactive constante: [23]

$$Q_{GREF} = Q_{\max}^{cap} = \sqrt{S_{GN}^2 - P_{GN}^2} \quad (\text{III.9})$$

Où

$$Q_{GREF} = Q_{\max}^{ind} = -\sqrt{S_{GN}^2 - P_{GN}^2} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

S_{GN} - puissance apparente nominale de la source

P_{GN} - puissance nominale de la source.

• B) Réglage à puissance apparente constante: [23]

$$Q_{GREF} = Q_{\max}^{cap} = \sqrt{S_{GN}^2 - P_{GREF}^2} \quad (\text{III.11})$$

Où

$$Q_{GREF} = Q_{\max}^{ind} = -\sqrt{S_{GN}^2 - P_{GREF}^2} \quad (\text{III.12})$$

• C) Réglage à facteur de puissance constant: [23]

$$Q_{GREF} = Q_{\max}^{cap} = |P_{GREF}| \sqrt{\frac{1}{(\cos \varphi_{min}^{cap})^2} - 1} \quad (\text{III.13})$$

$$Q_{GREF} = Q_{\max}^{ind} = -|P_{GREF}| \sqrt{\frac{1}{(\cos \varphi_{min}^{cap})^2} - 1} \quad (\text{III.14})$$

Dans les deux derniers cas de figure les bornes sont variables en fonction de la consigne de puissance active à un instant donné (P_{GREF}) et non plus seulement en fonction de la puissance active nominale de la source. Pour sélectionner une des trois stratégies de réglage on fait appel à un paramètre supplémentaire : s qui prend les valeurs mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau III. 2 : Sélection de la stratégie de contrôle du réactif

Paramètre « s »	Stratégie de contrôle du réactif
1	Réglage à puissance réactive constante
2	Réglage à puissance apparente constante
3	Réglage à facteur de puissance constant

Ainsi, on peut regrouper le principe de réglage de la tension par action sur la puissance réactive en deux parties (calcul des bornes, calcul de la consigne de puissance réactive) tel que présenté en Figure III-9.

La dynamique de la source est modélisée ici par une fonction de transfert du premier ordre de constante de temps τ_Q . Cette constante de temps devienne très faible (quelques millisecondes) dans le cas où la source de production dispersée utilise une interface électronique pour la connexion avec le réseau de distribution.

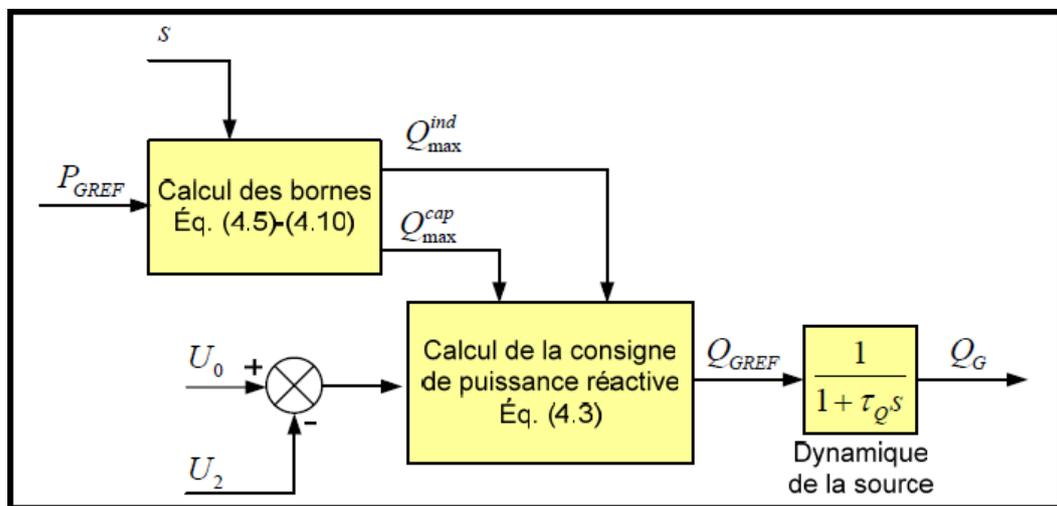


Figure III. 9 : Diagramme bloc du système de réglage de la tension par le contrôle du réactif [23]

Chapitre III : Réglage de tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution.

Tableau III. 3 : Limitations en France des facteurs de puissance des sources de production décentralisée

Réseau	Puissance nominale de la source	Limites des facteurs de puissance	
		Régime capacitif $\cos \varphi_{\min}^{cap}$	Régime inductif $\cos \varphi_{\min}^{ind}$
BT	$P_{GV} \leq 250 \text{ kW}$	1	1
HTA	$P_{GV} \leq 1 \text{ MW}$	0.9165	1
	$1 \text{ MW} < P_{GV} \leq 10 \text{ MW}$	0.995	1
	$10 \text{ MW} < P_{GV} \leq 12 \text{ MW}$	0.8	0.9798

On remarque que : l'utilisation de la puissance réactive comme moyen de contrôle de la tension est d'autant moins autorisée que le niveau de puissance de la source est faible.

III.4.2 Réglage de la tension par le contrôle de la puissance active de la source de production décentralisée

III.4.2.1 Présentation du principe

Lorsque l'on arrive en limitation de puissance réactive, la source est en général déconnectée purement et simplement. Nous présentons ici une méthode permettant de maintenir la production de puissance active au maximum possible tout en respectant les contraintes de tension. [24]

En effet, il est possible d'implanter un réglage de tension par action sur la puissance active. Le principe de la pente de réglage utilisé précédemment n'est plus applicable dans ce contexte puisque la tension doit alors être contrôlée de manière précise afin de ne pas dépasser la limite supérieure de tension (U_{max}). On met alors en œuvre une boucle de régulation avec un correcteur comprenant une action intégrale. La sortie du correcteur définit alors une référence pour la puissance active ($P_{GREF} = P_{REF_CONT}$).

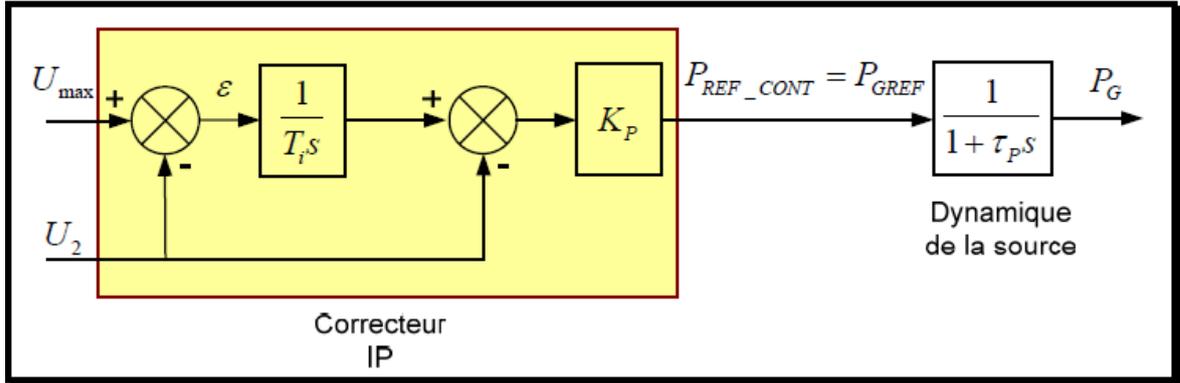


Figure III. 10 : Système de réglage de la tension par le contrôle de la puissance active [24]

Cette fois-ci, la dynamique de la source est représentée par une fonction de transfert de premier ordre avec une constante de temps τ_p , constante qui dépend fortement de la nature de la source.

III.4.2.2. Synthèse du correcteur

La synthèse du correcteur est faite dans le domaine continu sur la base du modèle simplifié du réseau présenté en Figure III-11 .

On rappelle l'expression simplifiée de la variation de tension entre les points 1 et 2 :

$$U_1 - U_2 = \frac{R(P_L - P_G) + X(Q_L - Q_G)}{U_2} \quad (\text{III.15})$$

Hypothèses :

- P_L, P_G et Q_L, Q_G varient indépendamment;
- R et X sont constantes.

L'expression ci-dessus peut se décomposer en 4 termes :

$$U_2 \approx U_1 - \frac{RP + XQ}{U_{20}} = U_1 + U_{P_L} + U_{P_G} + U_{Q_L} + U_{Q_G}$$

$$\text{Avec : } U_{P_L} = -\frac{RP_L}{U_{20}}, U_{P_G} = \frac{RP_G}{U_{20}}, U_{Q_L} = -\frac{XQ_L}{U_{20}}, U_{Q_G} = \frac{XQ_G}{U_{20}},$$

Chapitre III : Réglage de tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution.

Où : U_{20} est la valeur initiale de la tension au noeud 2, autour de laquelle on réalise la linéarisation.

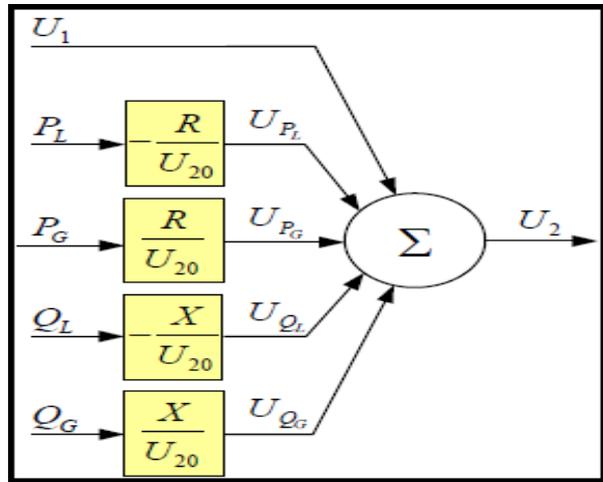


Figure III. 11 : Modèle simplifié du réseau test [23]

Nous pouvons maintenant présenter le schéma fonctionnel du système bouclé (Figure III-11) qui est utilisé pour la synthèse du correcteur.

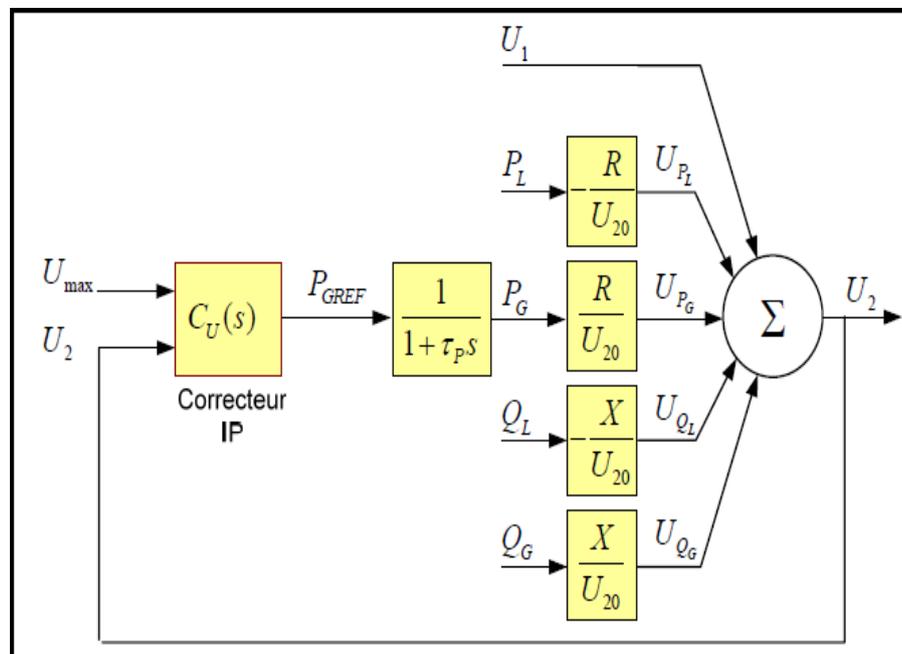


Figure III. 12 : Boucle de réglage de la tension par le contrôle de la puissance active [23]

Chapitre III : Réglage de tension en présence de producteurs d'énergie sur le réseau de distribution.

Les valeurs des paramètres du correcteur (K_p , T_i) sont calculées ainsi en fonction de la dynamique de la source de production τ_p et tiennent compte des caractéristiques du réseau (notamment de R).

La fonction de transfert de la boucle de réglage est la suivante :

$$\mathbf{F}(s) = K_p \left(\mathbf{1} + \frac{\mathbf{1}}{T_i s} \right) \frac{\mathbf{1}}{1 + \tau_p s} \frac{R}{U_{20}} = \frac{K_p (1 + T_i s) R}{U_{20} T_i s (1 + \tau_p s)} \quad (\text{III.16})$$

On a donc pour le polynôme caractéristique :

$$\mathbf{P}_c(s) = \mathbf{1} + s \left(\frac{R K_p T_i + U_{20} T_i}{R K_p} \right) + s^2 \left(\frac{U_{20} T_i \tau_p}{R K_p} \right) \quad (\text{III.17})$$

Celui-ci est identifié à un polynôme de référence du 2^{ème} ordre de paramètres :

- ξ : coefficient d'amortissement,
- ω_n : pulsation naturelle.

On en déduit l'expression des coefficients du correcteur :

$$\begin{cases} K_p = \frac{(-1 + 2\xi\omega_n) U_{20}}{R} \\ T_i = \frac{-1 + 2\xi\omega_n \tau_p}{\omega_n^2 \tau_p} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

D'un point de vue algorithmique, le correcteur s'implante de la manière suivante :

$$P_{REF_CONT}(k) = I(k) - P(k) = K_1 [U_{max} - U_2(k)] + I(k-1) - K_2 U_2(k)$$

$$\text{Avec :} \quad \begin{cases} K_1 = K_p \frac{T_e}{T_i} \\ K_2 = K_p \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

où T_e - la période d'échantillonnage. Nous utiliserons cette expression ultérieurement.

Remarque : $P_{REF_CONT}(k)$ désigne la valeur de la sortie du correcteur à l'instant d'échantillonnage $k T_e$ présenté sur la figure III-12.

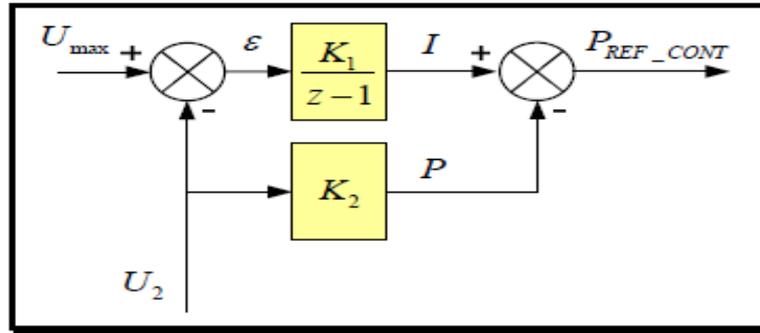


Figure III. 13 : Le correcteur IP utilisé dans la boucle de réglage de tension. [23]

Il est à noter que même lorsque l'on passe en régulation de tension par action sur la puissance active, l'algorithme de réglage de puissance réactive, notamment le calcul des bornes, est toujours en service.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, dans un premier lieu nous avons montré l'importance du réglage de la tension et de la fréquence. Ensuite Nous avons montré le moyen de réglage de ces paramètres.

La tension et la fréquence sont les paramètres les plus importants dans un réseau électrique. Donc leur stabilité est primordiale pour la stabilité du réseau. Le réglage de la tension et de la fréquence se fait en 3 étapes :

- Réglage primaire (RPT et RPF).
- Réglage secondaire (RST et RSF)
- Réglage tertiaire (RTT et RTF).

Mais en présence de PDE dans le réseau, le moyen de la régulation de la tension se fait par le contrôle de la puissance réactive de la source de la production décentralisée, ou alors par le contrôle de la puissance active de la source de la production décentralisée.

Chapitre IV :
Simulation et
interprétation des
résultats

IV.1 Introduction

Tel que nous avons vu dans le chapitre 2, l'insertion d'une production décentralisée dans un réseau n'est pas sans conséquences. En effet, cette insertion entraîne l'instabilité du système, et provoque une dérégulation de ses différents paramètres et caractéristiques tel que la protection, la fréquence, la fiabilité du système et sa continuité et plus particulièrement à la tension. Etant une grandeur importante du réseau, une brusque ou grande variation de la tension pourrait provoquer des dégâts majeurs pour les consommateurs.

Ce chapitre présente une brève comparaison entre deux réseaux électrique de 33 nœuds (bouclé et radial) avec et sans production décentralisée. Le réseau utilisé est un réseau IEEE 33bus. Les simulations sont réalisés avec la boîte à outils « PSAT », exécutés sous l'environnement MATLAB. Après la simulation des 2 réseaux avec et sans PDE, nous allons comparer les tensions aux 33 jeux de barre.

IV.2 Outil de simulation

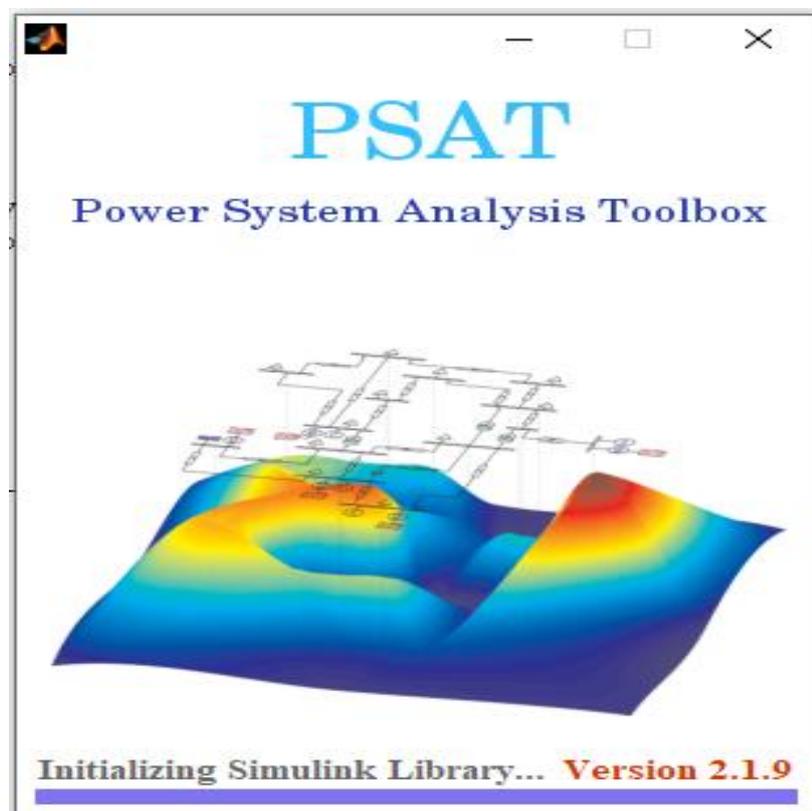


Figure IV. 1 : La première fenêtre du PSAT.

Plusieurs outils de simulation peuvent être utilisés pour la simulation d'un réseau électrique et le calcul de la tension comme Matlab, EMTP, Etap, Power World, PSAT,... etc. Ces logiciels utilisent les mêmes concepts. Ils permettent de nous informer sur les différents facteurs d'un réseau électrique et à simuler les différents cas pour avoir les paramètres du réseau.

Dans le présent travail, on a choisi PSAT comme outil de simulation.

PSAT a été développé par FEDERICO MILANO en 2001, PSAT est une boîte à outils qui Fonctionne sous environnement Matlab. Elle est dédiée pour l'analyse statique et dynamique et le contrôle des réseaux électriques. Le PSAT inclut L'écoulement de puissance, il est basé sur la méthode de NEWTON-RAPHSON, L'écoulement de puissance, la stabilité de tension [26].

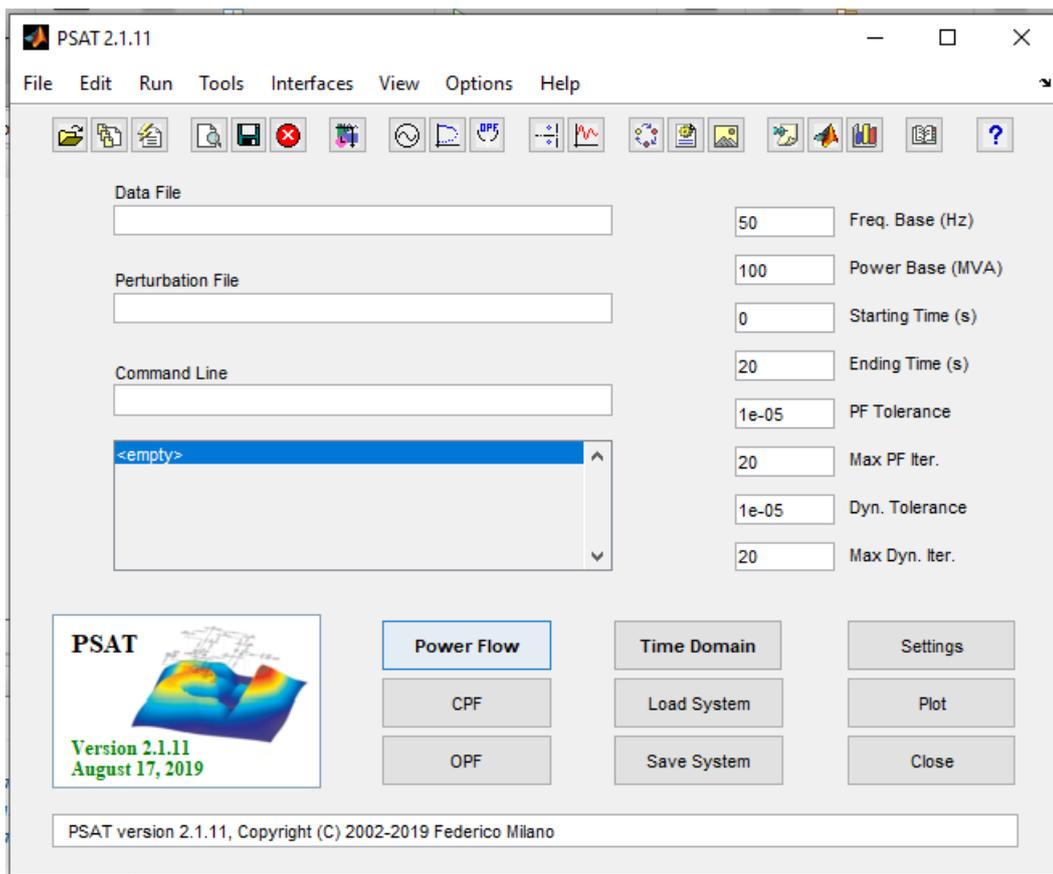


Figure IV. 2 : L'éditeur de PSAT

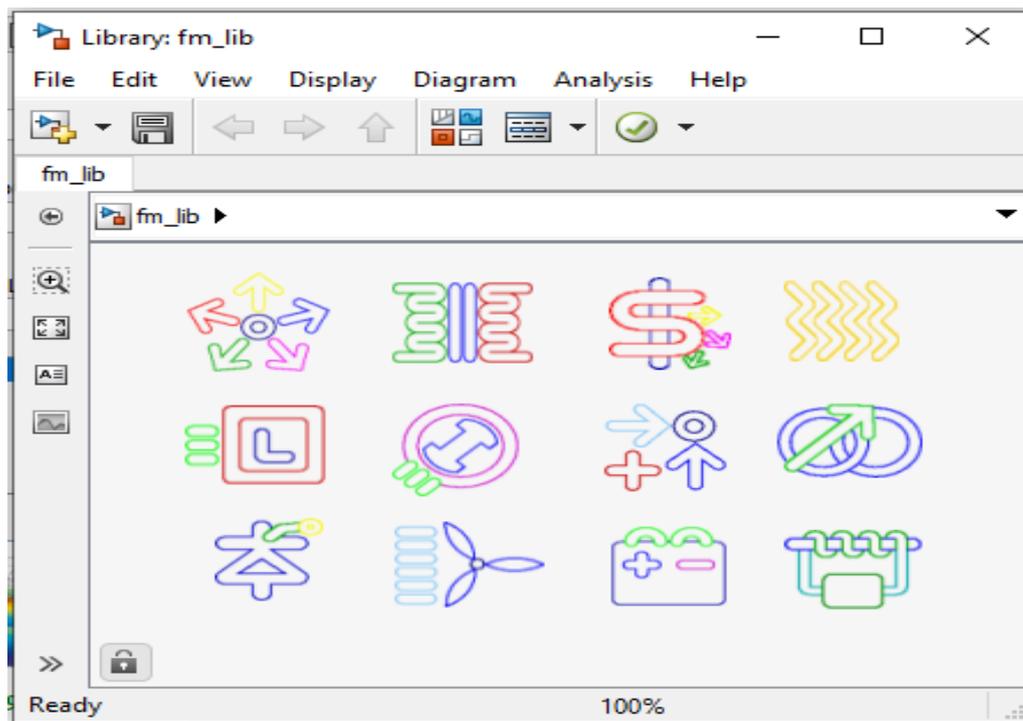


Figure IV. 3 : Bibliothèque de Simulink.

IV.2.1 Utilisation de PSAT

1. Ouvrir un nouveau fichier
2. Créer le réseau électrique à étudier grâce à la librairie SIMULINK
3. Insérer les données numériques des éléments du réseau (générateurs, ligne, transformateurs ...)
4. Exécuter l'écoulement de puissances
5. Exécuter la simulation dans le domaine temporel

IV.3 Simulation

La simulation est effectuée sur PSAT, pour constater l'impact sur la tension après l'insertion d'une PDE dans un réseau de distribution. Le réseau test de la norme IEEE 33 JdB est pris comme exemple. Les tests de simulation sont effectués sur une configuration radiale et un autre en boucle (figure IV-7 et IV-9).

Pour l'analyse de cet impact sur les deux réseaux, deux cas sont étudiés:

- Cas 1 : fonctionnement normal (sans PDE).
- Cas 2 : insertion d'une PDE.

IV.3.1 Présentation des réseaux et leurs données

Les données techniques du réseau IEEE 33-bus sont présentées comme suit :

Pour un réseau bouclé :

- Nombre de jeux de barres : 33 Jdb ;
- Nombre de branches : 37 branches ;
- Accès bilan : 1 ;
- Tension de base : 12,66kV ;
- Puissance de base : 10 MVA.

Pour un réseau radial :

- Nombre de jeux de barres : 33 Jdb ;
- Nombre de branches : 32 branches ;
- Accès bilan : 1 ;
- Tension de base : 12,66kV ;
- Puissance de base : 10 MVA.

Le réseau test IEEE 33-bus bouclé est présenté comme suit dans les figures (IV-4 et IV-5).

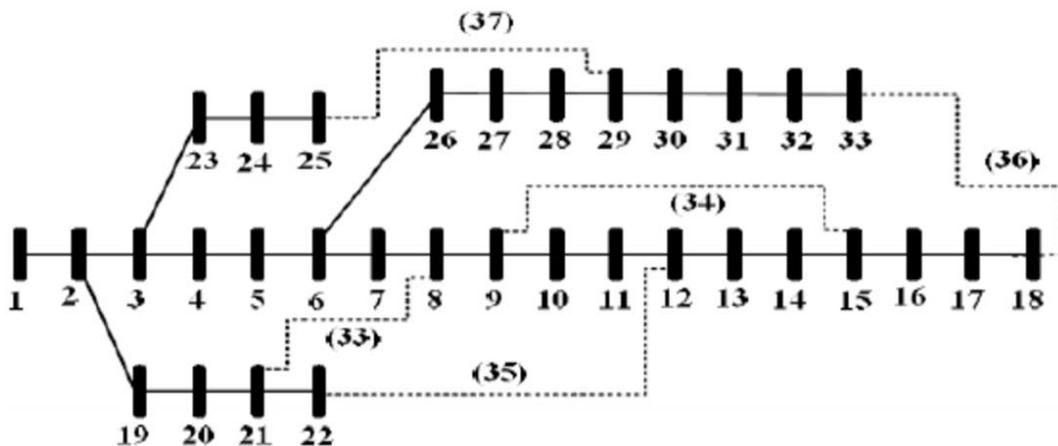


Figure IV. 4 : Représentation simplifiée du réseau de distribution en boucle IEEE 33 accès.

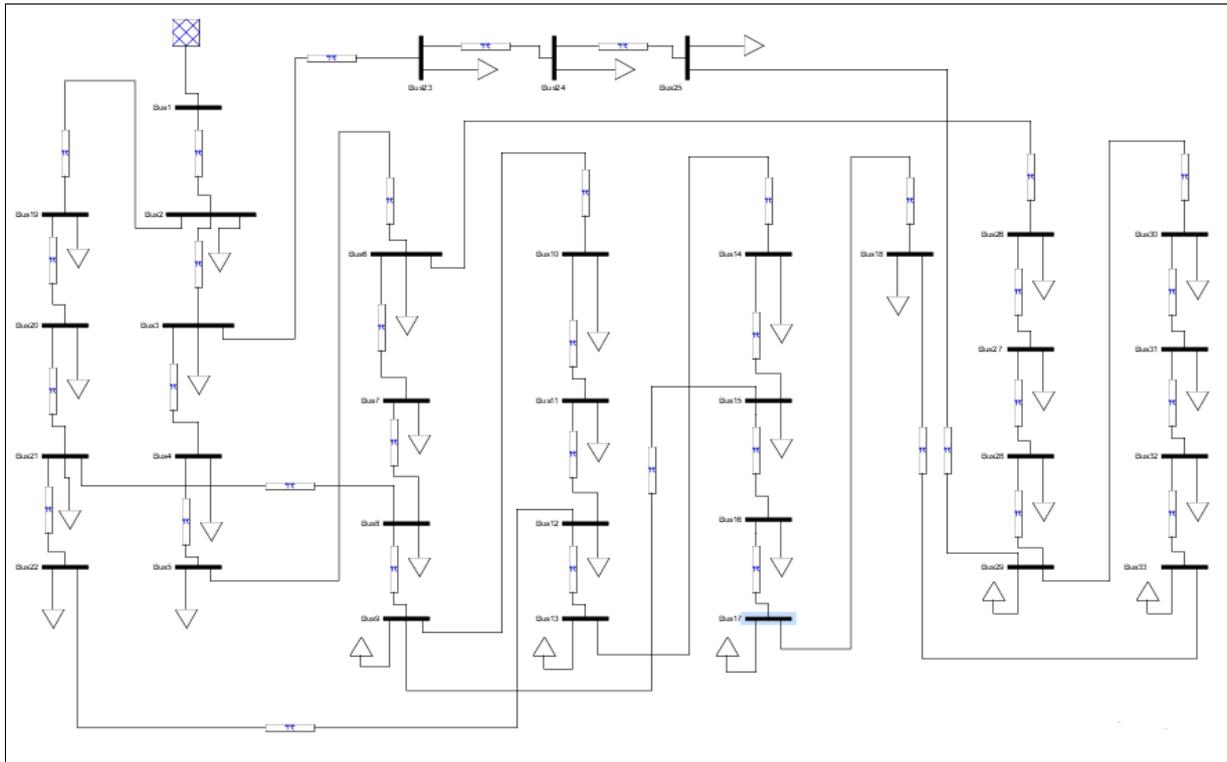


Figure IV. 5 : représentation du réseau IEEE 33 accès en boucle.

Le réseau test IEEE 33-bus radial est présenté comme suit dans les figures (IV-6 et IV-7).

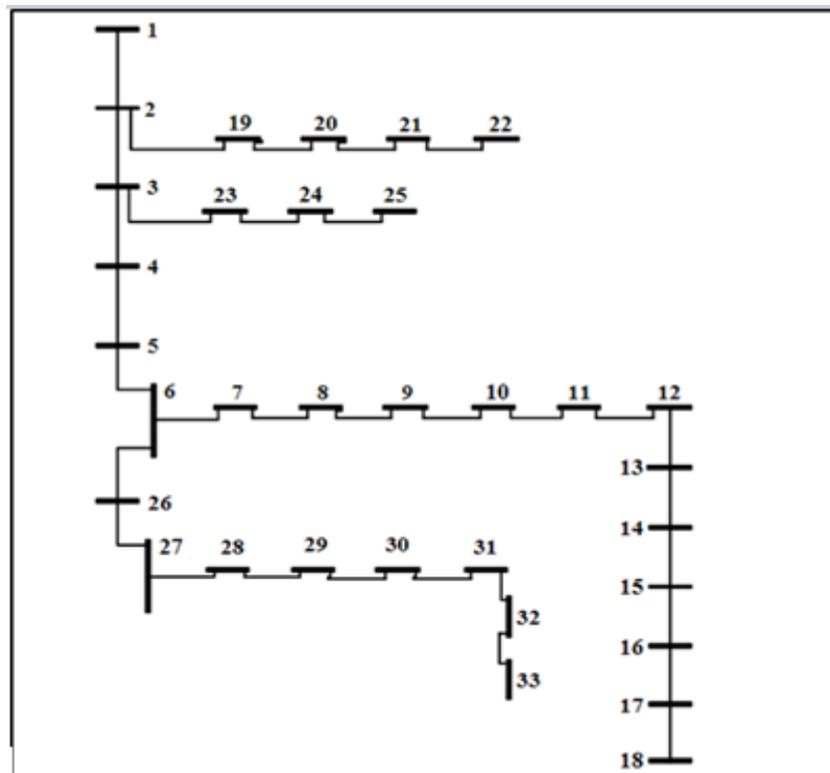


Figure IV. 6 : Représentation simplifiée du réseau de distribution radial IEEE 33 accès.

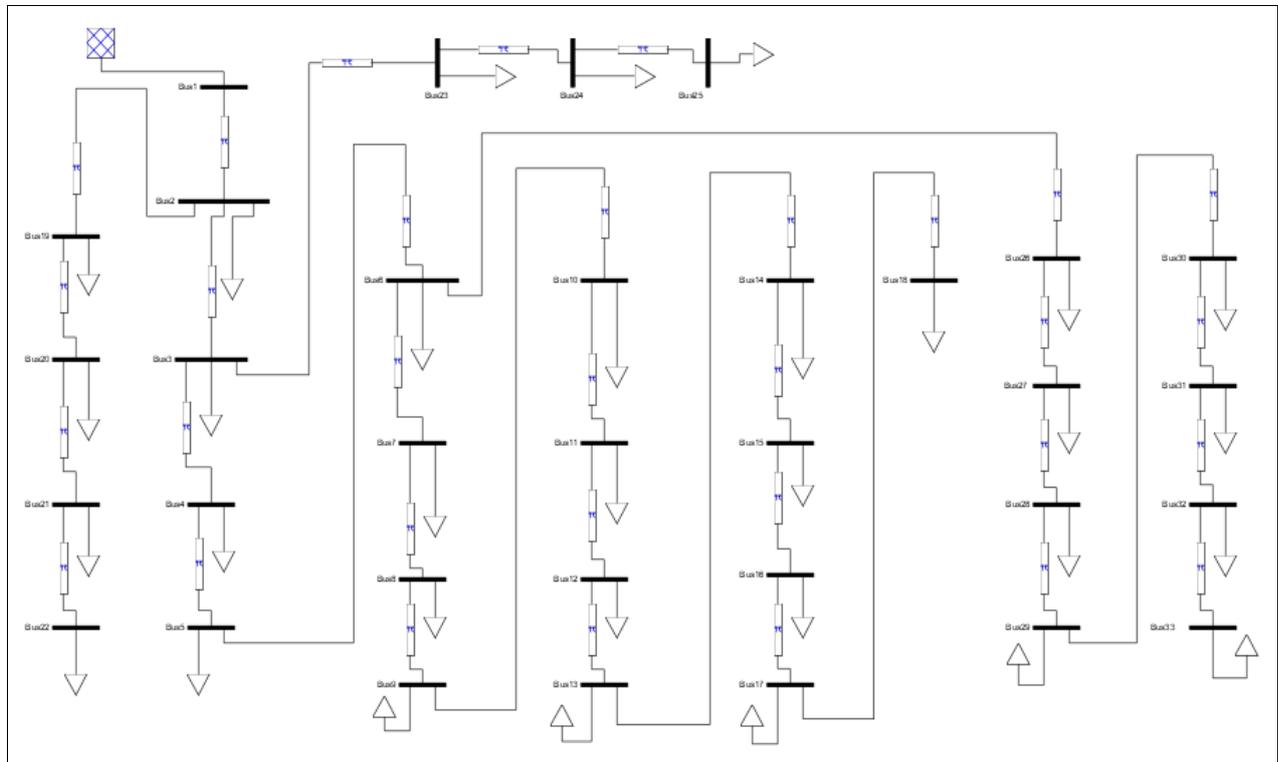


Figure IV. 7: Représentation du réseau IEEE 33 accès radial.

Les données du réseau test sont présentées dans les tableaux suivant (Tableau IV-1, Tableau IV-2)

Tableau IV. 1: Caractéristiques techniques des branches du réseau IEEE 33-accès.

Départ	Arrivée	R (pu)	X (pu)
1	2	0.00575	0.00293
2	3	0.03076	0.01567
3	4	0.02284	0.01163
4	5	0.02378	0.01211
5	6	0.05110	0.04411
6	7	0.01168	0.03861
7	8	0.04439	0.01467
8	9	0.06426	0.04617
9	10	0.06514	0.04617
10	11	0.01227	0.00406
11	12	0.02336	0.00772
12	13	0.09159	0.07206
13	14	0.03379	0.04448
14	15	0.03687	0.03282
15	16	0.04656	0.03400
16	17	0.08042	0.10738
17	18	0.04567	0.03581
2	19	0.01023	0.00976
19	20	0.09385	0.08457
20	21	0.02555	0.02985
21	22	0.04423	0.05848
3	23	0.02815	0.01924

23	24	0.05603	0.04424
24	25	0.05590	0.04374
6	26	0.01267	0.00645
26	27	0.01773	0.00903
27	28	0.06607	0.05826
28	29	0.05018	0.04371
29	30	0.03166	0.01613
30	31	0.06080	0.06008
31	32	0.01937	0.02258
32	33	0.02128	0.03319
21	8	0.66667	0.66667
9	15	0.66667	0.66667
12	22	0.66667	0.66667
18	33	0.16667	0.16667
25	29	0.16667	0.16667

Tableau IV. 2: Caractéristiques techniques des jeux de barres du réseau de distribution IEEE 33-accès.

Bus	P (kW)	Q (kVAr)
1	0	0
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	0	0
7	200	100
8	200	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10
16	60	20
17	60	20
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	0	0
28	60	20
29	120	70
30	200	600

31	150	70
32	210	100
33	60	40

IV.4 Résultat et interprétation des résultats de la simulation

IV.4.1 1^{er} cas sans DG

Après la réalisation des deux réseaux 33 JdB bouclé et radial, on a appliqué le « Power Flow » et le « Time Domain » pour pouvoir visualiser le profil de tension dans les différents jeux de barre des réseaux radiale et bouclé et voir leurs variations en fonction du temps.

Le profil de tension dans les différents jeux de barre des réseaux bouclé et radial sont représentés respectivement dans les figures (IV-8) et (IV-9).

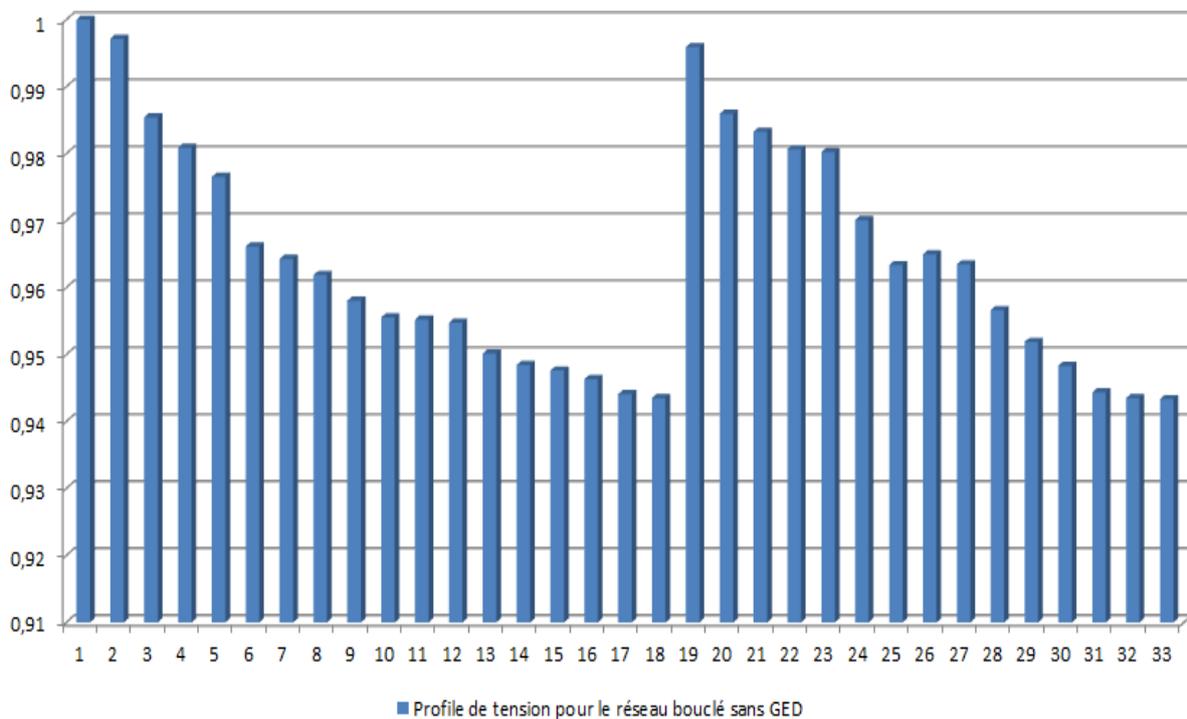


Figure IV. 8: Profil de tension des jeux de barre pour le réseau bouclé sans DG

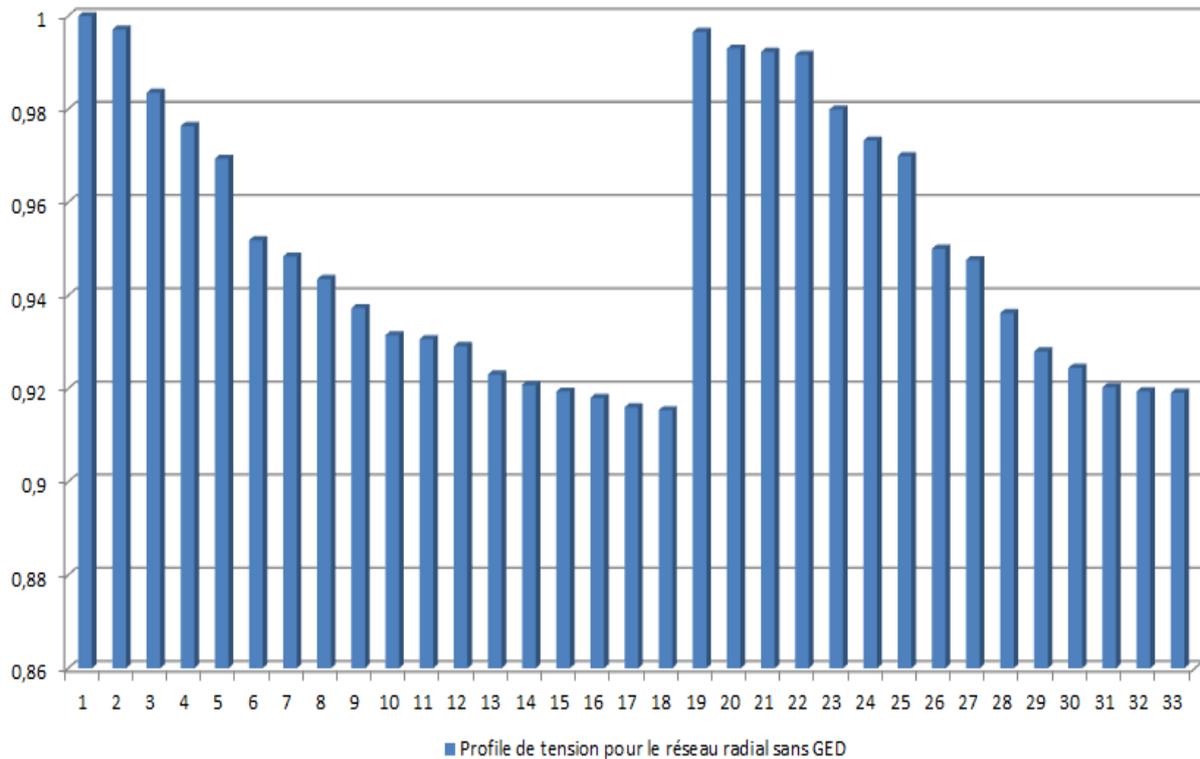


Figure IV. 9: Profile de tension des jeux de barre pour le réseau radial sans DG

IV.4.2 2^{ème} cas avec DG

Après la 1^{ère} simulation (cas sans DG), on a vérifié les tensions aux différents JdB (figure IV-8 et IV-9) de nos systèmes pour ajouter une DG au niveau de l'accès le plus faible, après analyse on a donc ajouté une DG au niveau de l'accès 33 pour le système bouclé et au niveau de l'accès 18 pour le système radial.

Après l'ajout d'une DG qui est un générateur d'une puissance de $S=3.6239\text{MVA}$, on a appliqué encore le « Power Flow » et le « Time Domain » pour pouvoir aussi visualiser le profil de tension dans les différents jeux de barre des réseaux radiale et bouclé, et voir leurs variations en fonction du temps. On obtient les résultats suivants :

Le profil de tension dans les différents jeux de barre des réseaux bouclé et radial sont représentés respectivement dans les figures (IV-10) et (IV-11).

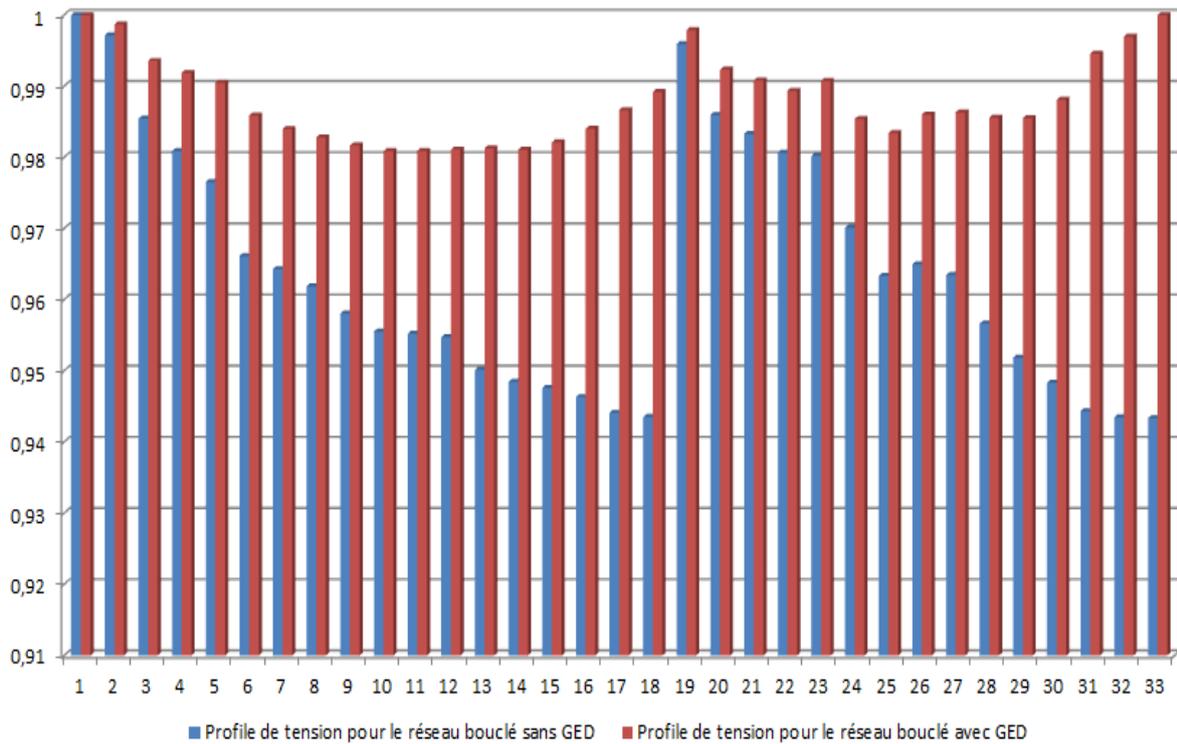


Figure IV. 10: Profile de tension des jeux de barre pour le réseau bouclé avec DG.



Figure IV. 11: Profile de tension des jeux de barre pour le réseau radial avec DG.

IV.4.3 Comparaison des résultats obtenus

Tableau IV. 3: Comparaison de la tension des 33 nœuds des deux réseaux avant et après l'introduction d'une production d'énergie

Nœud	Réseau bouclé			Réseau radial		
	Tension sans PDE (pu)	Tension avec PDE (pu)	Variation de la tension (%)	Tension sans PDE (pu)	Tension avec PDE (pu)	Variation de la tension (%)
1	1	1	0	1	1	0
2	0.99716	0.99866	0.15	0.99713	0.99792	0.08
3	0.98544	0.99354	0.822	0.98352	0.98865	0.522
4	0.98089	0.99186	1.118	0.9764	0.98481	0.861
5	0.97654	0.99052	1.432	0.96938	0.98127	1.227
6	0.966614	0.9859	1.995	0.95188	0.96807	1.701
7	0.96429	0.98399	2.043	0.9484	0.96009	1.233
8	0.96189	0.9828	2.173	0.94357	0.96377	2.141
9	0.95804	0.98169	2.47	0.93732	0.96545	3.001
10	0.95555	0.98087	2.65	0.93152	0.96834	3.953
11	0.95522	0.98091	2.689	0.93066	0.97002	4.23

12	0.95474	0.98111	2.762	0.92916	0.97338	4.76
13	0.95016	0.98127	3.274	0.92306	0.97945	6.109
14	0.94845	0.98109	3.441	0.9208	0.97893	6.313
15	0.94762	0.9821	3.639	0.91939	0.9823	6.842
16	0.94638	0.98401	3.976	0.91803	0.98846	7.6672
17	0.94409	0.98664	4.507	0.91601	0.99267	8.367
18	0.94352	0.98919	4.84	0.9154	1	9.242
19	0.99592	0.9979	0.199	0.9966	0.99739	0.08
20	0.98596	0.99232	0.645	0.99302	0.99382	0.08
21	0.98329	0.99082	0.766	0.99232	0.99312	0.081
22	0.98066	0.98934	0.885	0.99168	0.99248	0.081
23	0.98023	0.99076	1.074	0.97994	0.98508	0.525
24	0.9701	0.98541	1.578	0.97327	0.97845	0.532
25	0.96335	0.9834	2.081	0.96995	0.97515	0.5366
26	0.96497	0.98603	2.183	0.95005	0.96627	1.71
27	0.96347	0.98633	2.373	0.94763	0.96389	1.716

28	0.95663	0.98559	3.027	0.93622	0.95269	1.76
29	0.95187	0.98551	3.534	0.92803	0.94464	1.79
30	0.94833	0.98808	4.192	0.92448	0.94115	1.803
31	0.94434	0.99458	5.32	0.92033	0.93708	1.82
32	0.9435	0.99696	5.666	0.91942	0.93618	1.823
33	0.94334	1	6.006	0.91913	0.9359	1.825

La comparaison des profils de tension dans les différents jeux de barre des réseaux bouclé et radial sans DG est représentée dans la figures (IV-12).

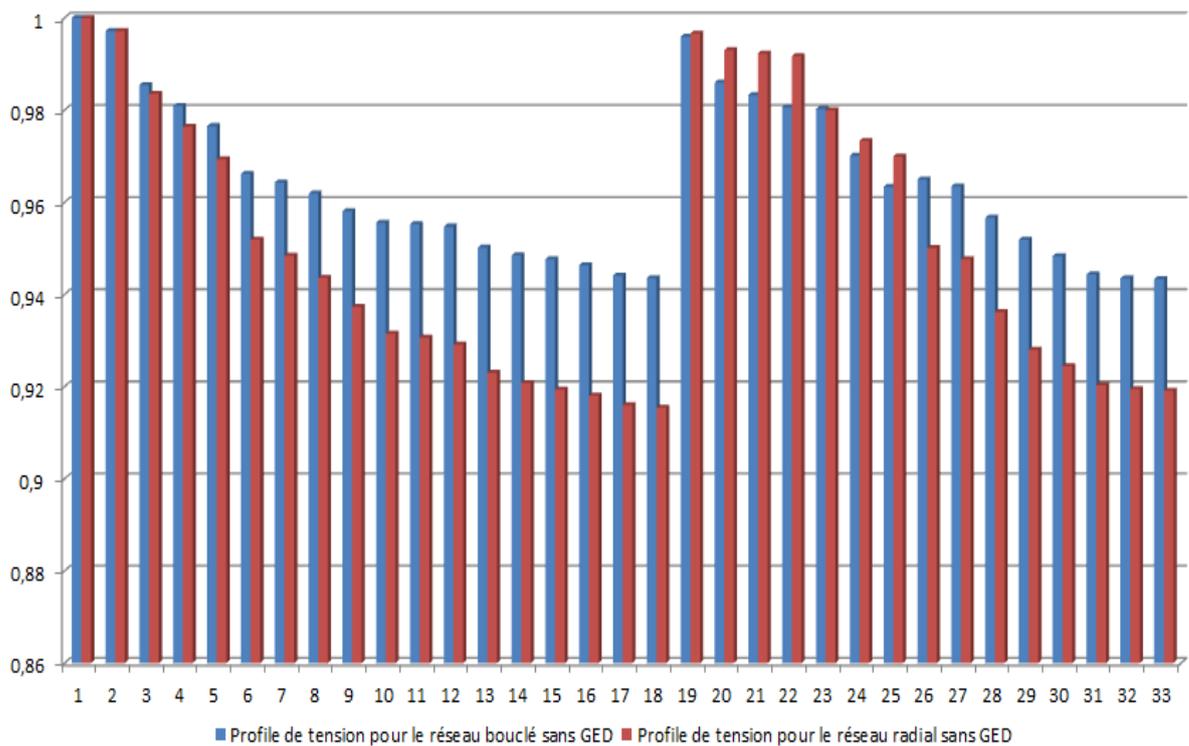


Figure IV-12 : comparaison des profils de tension dans les différents jeux de barre des réseaux bouclé et radial sans DG

La comparaison des profils de tension dans les différents jeux de barre des réseaux bouclé et radial avec DG est représentée dans la figure (IV-13).

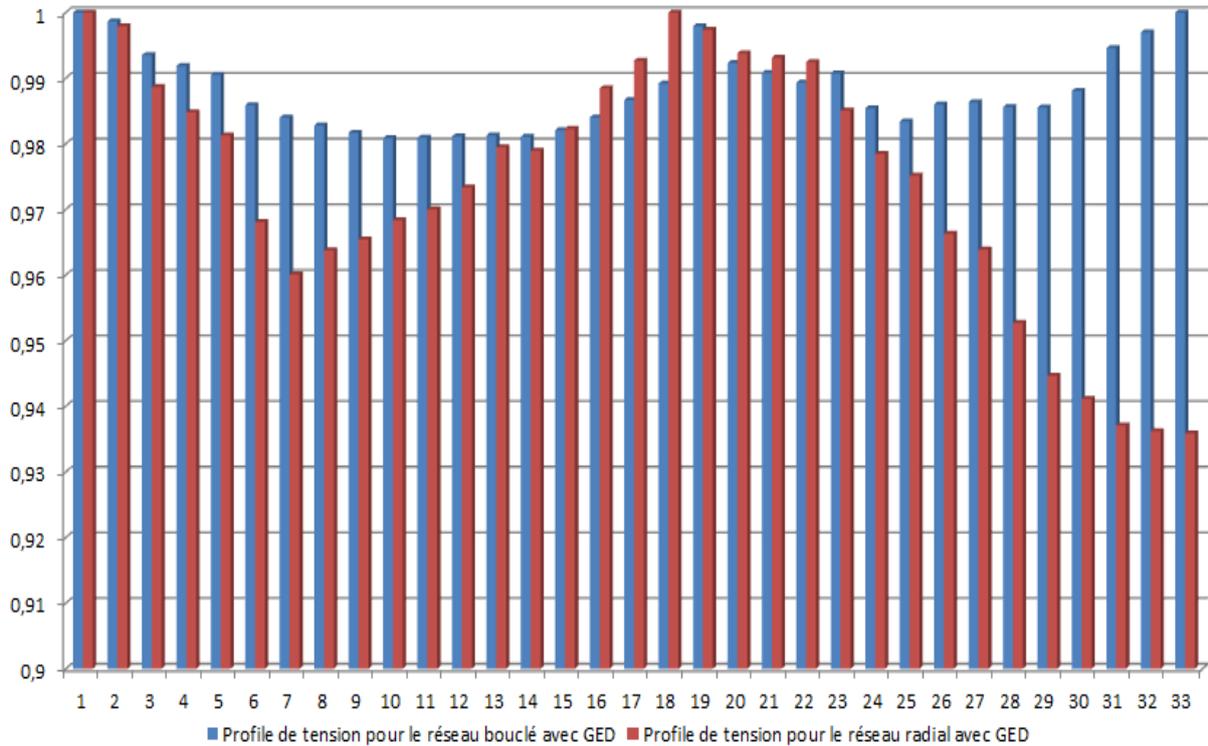


Figure IV-13 : comparaison des profils de tension dans les différents jeux de barre des réseaux bouclé et radial avec DG

a- 1^{er} cas sans DG :

Après l'analyse des résultats, on a remarqué que :

- Sans PDE, le réseau est dans une configuration d'exploitation classique. En effet la tension chute du poste source jusqu'à l'accès le plus éloigné.
- Sans PDE, la chute de tension est moins importante dans le réseau bouclé par rapport au réseau radial, et la tension est plus équilibrée.
- Sans PDE, la tension reste stable dans tous les accès des deux réseaux, avec une chute de tension admissible sur toute la longueur des réseaux.

a- 2^{ème} cas avec un DG

Après l'analyse des résultats, on a remarqué que :

- En insérant une PDE, le profil de la tension du réseau bouclé augmente de manière plus ou moins équitable par rapport au réseau radial. Dans le réseau bouclé, presque tous les accès subissent une surtension dont certaines sont plus importantes que d'autres. Contrairement au réseau radial, où la tension augmente d'une manière dangereuse dans certains accès de la branche où la PDE est installée, alors que le reste des accès ne subissent pas de surtension significative.
- En présence de la PDE, l'augmentation de la tension est arrivée à un seuil critique (en 5% et 10%).
- Avec l'intermittence des énergies renouvelables), la tension pourrait basculer subitement dans les deux sens. La tension pourrait baisser ou augmenter, affectant ainsi le bon fonctionnement des récepteurs des consommateurs, le bon fonctionnement des protections, etc.

IV.5 Conclusion

Une comparaison des réseaux avec et sans production distribué est analysé sur ce chapitre :

- Il est aisément visible que l'insertion d'une production d'énergie distribuée entraîne une augmentation significative de la tension dans l'accès connecté à la PDE, et entraîne ainsi un accroissement de la tension aux nœuds voisins.
- L'insertion d'une PDE provoque des surtensions significatives et qui peuvent dépasser les normes contractuelles.
- Une forte surtension pendant une longue durée (une centaine de millisecondes) pourrait entraîner la déconnexion de la production par l'action d'une protection.
- Le réseau bouclé permet un meilleur écoulement de puissance que le réseau radial, et nous permet ainsi d'apaiser un peu les surtensions.
- Les surtensions dans le réseau menacent le bon fonctionnement des récepteurs des consommateurs, et menacent ainsi la stabilité du réseau.

Conclusion générale

Au fil du temps, la demande de l'énergie électrique n'arrête pas d'accroître, ce qui nécessite une augmentation de production pour répondre à la forte demande des consommateurs. L'insertion des productions distribuées dans les réseaux de distribution est aujourd'hui une avancée implantée et reconnue. À cause de cette forte intégration d'énergies nouvelles basées sur des ressources renouvelables, les réseaux électriques subissent des dérèglements de plusieurs paramètres et surtout de la tension. Et le schéma d'exploitation classique des réseaux de distribution a été remis en cause. En effet l'arrivée de ses énergies n'a fait qu'augmenter le risque du déséquilibre à cause de leurs caractères imprévisibles dus aux phénomènes météorologiques.

L'introduction des productions distribuées aux réseaux se fait au niveau des réseaux de distribution à cause de leurs faibles taux de production comparés aux centrales de production classiques et pour sa participation au réglage de la tension. Leurs raccordements provoquent plusieurs impacts sur l'ensemble des plans d'un réseau électrique, tel que la protection, la fréquence, ainsi que la tension. Les impacts touchent plusieurs aspects de la tension comme la stabilité, sa tenue, la variation etc.

Dans ce mémoire intitulé: « Insertion de production distribuée dans les réseaux de distribution électrique: Impact et régulation de la tension », nous avons abordé la question de l'insertion des productions décentralisée dans les réseaux électriques de distribution. On a tout d'abord exposé les différentes parties du réseau électrique où l'on s'est intéressé au réseau électrique de distribution.

On a tout d'abord exposé, dans le 1er chapitre, les différentes parties du réseau électrique, les types de ressources d'une production d'énergie électrique, les types de production, à savoir la production centralisée et la production décentralisée, et au final les structures topologiques des réseaux électriques.

Dans le 2eme chapitre, on est passé à l'impact de la production décentralisée sur le réseau de distribution. L'introduction d'un trop fort taux de pénétration engendre plusieurs problèmes sur le réseau de distribution, tel que l'impact sur le sens de transit de puissance, l'impact sur la stabilité du système, l'impact sur le plan de protection et l'impact sur la tenue de tension ou des surtensions qui, en fonction des états de charge du réseau, peuvent entraîner un non-respect des valeurs de tensions contractuelles. Cette introduction d'un fort taux de pénétration affecte aussi le réseau de transport, en créant aussi plusieurs problèmes, comme le

Conclusion générale

risque de congestion, l'incertitude du système électrique, le changement des marges d'exploitation, l'apparition des flux d'énergie réactive, la fermeture des grandes centrales etc.

Dans ce 3eme chapitre, on a abordé d'abord l'importance de du réglage de la tension et de la fréquence dans le réseau électrique. Effectivement, la stabilité et la continuité de ces deux grandeurs sont primordiales pour la stabilité et le bon fonctionnement de l'intégralité du réseau. Ensuite, on évoque les services systèmes et le réglage hiérarchisé de la tension et de la fréquence (RPT, RST, RTT & RPF, RSF, RTF). Après cela, on montre le principe de réglage de la tension en présence d'une production décentralisée, en contrôlant les puissances actives et réactives de la source de production décentralisée.

Pour le 4eme chapitre, nous avons étudié l'impact de de l'insertion d'une production distribuée sur deux réseaux électriques de 33 JdB chacun, un est radial et l'autre est bouclé. Pour notre simulation, on a simulé les deux réseaux sans aucune PDE au début, puis on a refait la même simulation mais en insérant une PDE dans les deux réseaux. La simulation a été réalisée par le biais du logiciel PSAT qui fonctionne sous environnement MATLAB. Ensuite, on a comparé les résultats des simulations

Références

- [1] B. Crappe, « Commande et régulation des réseaux électriques », Hermes sciences, 2003.
- [2] Olivier RICHARDOT « Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée » Thèse de doctorat INPG, 2000.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00160006/document>
- [3] Gilbert Naudet et Paul Reuss « Energie, électricité et nucléaire » EDP Sciences, France 2008.
- [4] B. Berseneff « Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur » Université de Grenoble, 2010.
- [5] C. Puret « Les réseaux de distribution publique MT dans le monde » 1991.
- [6] Guillaume Rami « contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution » Thèse de doctorat INP Grenoble, 2006
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00160675/document>
- [8] Abdenour ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » 2007
- [9] Haizea Gaztanaga Arantzamendi « étude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée: application aux microréseaux » INPG, 2006.
- [10] « centrales thermiques »
<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differents-types-de-centrales-thermiques>
- [11] « centrales hydroélectriques »
<https://www.nbpower.com/fr/about-us/learning/learn-about-electricity/hydro/>.
- [12] « centrales hydroélectriques »
<https://www.nbpower.com/fr/about-us/learning/learn-about-electricity/hydro/>.
- [13] « centrales nucléaire »

Références

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-nucleaire>].

[14] « Les différents types de réacteurs nucléaires »

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differents-types-de-reacteurs-nucleaires>].

[15] «Commission AMPERE « évaluation de la production décentralisée effets sur le réseau »

[16] [J.C. Sabonnadière, N. Hadj Said, « Lignes et réseaux électriques 2 : méthodes d'analyse des réseaux électriques » LAVOISIER, paris, 2007.

[17] Thi Thu Hà PHAM « influence de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissances » Thèse de doctorat INPG, 2006.

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00174846/document>

[18] Jean-François CANARD « impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution ». Thèse de doctorat INPG, 2000

https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/688663/filename/CANARD_JeanFrancois_2000_Opt.pdf

[19] Abdellah BOUAKRA « impact et régulation de la tension à la suite d'insertion d'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution électrique » UQAT, 2016

<https://depositum.uqat.ca/id/eprint/669/1/Bouakra%2C%20Abdellah.pdf>

[20] RTE, « Mémento de la sûreté du système électrique », 2004

http://clients.rte-france.com/htm/fr/mediatheque/telecharge/memento_surete_2004/memento_surete_2004_complet_.pdf

[21] Sophie MOURLON « Programmation pluriannuelle de l'énergie » Avril 2020

Références

<https://www.ecologique->

[solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Synth%C3%A8se%20finale%20Projet%20de%20PPE.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Synth%C3%A8se%20finale%20Projet%20de%20PPE.pdf)

[22] Alexandre TENINGE «Participation aux services systèmes de parcs éoliens mixtes : application en milieu insulaire» L'Institut polytechnique de Grenoble, 2010

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00473142/document>

[23] Emanuel Florin Mogos « Production décentralisée dans les réseaux de distribution. Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources » 2005.

[24] P. Lemerle, I. Pascaud, X. Lombard « Procède et installation de régulation de la tension d'un dispositif décentralisé de production d'énergie électrique raccordé à un réseau de distribution » Brevet FR 01 04640, 5 Avril 2001.

[25] Merzak Aimene « Services au système et gestion d'interactions énergétiques transitoires dans un parc éolien offshore » Energie électrique. Université du Havre, 2016.

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01668537/document>

[26] Harkat Said « Amélioration de la stabilité des réseaux électriques en utilisant les systèmes PID et PSS réglés avec l'algorithme PSO » 31 Janvier 2018