

---

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

---

Université A. MIRA - Bejaïa

Faculté des technologies

Département du génie électrique



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

---

## Mémoire de Master

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique*

*Spécialité : Réseaux Electrique*

***Thème :***

Influence de l'intermittence de la production  
distribuée sur le profil de la tension d'un réseau de  
transport bouclé

**Présenté par :**

-Mr. Soula Mouhoub

**Encadré par :**

-Dr. Bouzidi Athmane

Nom & Prénom	Département d'affiliation	Qualité
Dr. Aouzellagnée Lahacani Narimen		Président
Dr. Medjdoub Abdellah		Examineur
Dr. Bouzidi Athmane		Encadreur

2020-2021

---

## Remerciements

Je remercie vivement mon encadreur Dr. Bouzidi Athmane pour sa disponibilité tout au long de réalisation de ce travail, je le remercie encore pour son aide si précieuse sur tous les plans, pour ces conseils et ces orientations.

Je tiens tout particulièrement à remercier les enseignants du département Electrotechnique option réseaux électriques pour leur disponibilité et encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Mes reconnaissances vont aussi aux membres de jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail.

---

## Dédicaces

Tout d'abord, je dédie ce modeste travail à ma chère mère qui grâce à son sacrifice, son soutien inébranlable et ses encouragements que j'ai pu accomplir mon parcours. A mes adorables frères et sœurs et sans oublier mes amis Malek, Amine, Ali, Hocine, Morade, Thiziri, Ahecen,

MouhoubΨ

**Sommaire**

<b>I. Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>II. Chapitre I. Généralités sur les réseaux électriques .....</b>	<b>2</b>
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition du Réseau Electrique .....	3
I.3. Description des réseaux électriques.....	3
I.4. Hiérarchisation d'un réseau électrique .....	4
I.4.1. Les réseaux de transport .....	4
I.4.2. Les réseaux de répartition .....	4
I.4.3. Les réseaux de distribution.....	5
I.5. Classification des tensions dans un réseau électrique .....	7
I.6. Architecture des réseaux électriques .....	7
I.6.1. Topologies des réseaux électriques .....	7
I.7. Différent types des lignes (THT, HT, MT, BT).....	9
I.7.1. Le réseau de transport : lignes très haute et haute tension(THT) et (HT).....	9
I.7.2. Le réseau de distribution : lignes moyenne et basse tension (MT) et (BT) .....	9
I.7.3. Lignes aériennes et câbles souterrains.....	10
I.8. Postes électriques.....	11
I.9. Types du poste électrique .....	11
I.9.1. Poste d'interconnexion .....	11
I.9.2. Poste de transformation (post source) .....	11
I.9.3. Postes mixtes.....	12
I.10. Objectif des postes .....	12
I.11. Eléments d'un poste électrique.....	12
I.12. Types de perturbations dans les réseaux électriques .....	13
I.12.1. Variations et fluctuations de tension .....	13
I.12.2. Creux de tension.....	13
I.12.3. Coupures.....	13
I.12.4. Surtension.....	13
I.12.5. Variation de fréquence .....	13
I.13. Réglage du réseau .....	14
I.13.1. Réglage primaire (les premières secondes après perturbation .....	14
I.13.2. Réglage secondaire (au cours des 15 minutes après perturbation).....	14
I.13.3. Réglage tertiaire (dans les 15 à 30 minutes après perturbation).....	14
I.14. Conclusion .....	14

<b>III. Chapitre II. Généralités sur les énergies renouvelables et leur intégration aux systèmes électriques .....</b>	<b>15</b>
II.1. Introduction.....	15
II.2. Energie renouvelable.....	15
II.2.1. Définition .....	15
II.2.2. Ressources du renouvelables .....	15
II.3. Production d'électricité décentralisée .....	20
II.4. Conditions techniques d'interconnexions .....	21
II.4.1. Raccordement .....	21
II.4.2. Jugement de conformité .....	21
II.4.3. Accord de raccordement .....	21
II.4.4. Dispositif de protection .....	21
II.5. Impacts des énergies renouvelables sur les systèmes électriques .....	22
II.5.1. Impacts locaux.....	22
II.5.2. Impacts globaux.....	23
II.6. Conclusion .....	24
<b>IV. Chapitre III. Étude Stabilité des réseaux d'énergies électriques .....</b>	<b>24</b>
III.1. Introduction.....	25
III.2. Définition de la stabilité d'un Réseau électrique .....	25
III.3. Classification de la stabilité des réseaux électriques .....	25
III.3.1. Stabilité de tension.....	26
III.3.2. Stabilité de fréquence .....	27
III.3.3. Stabilité angulaire aux petites perturbations.....	27
III.4. Position du problème .....	28
III.4.1. Phénomènes transitoires électromécaniques.....	28
III.4.2. Phénomènes transitoires électromagnétiques .....	28
III.5. Formes d'instabilité .....	29
III.5.1. Causes d'instabilité de tension.....	29
III.5.2. Production trop éloignée de la consommation.....	29
III.5.3. Manque local d'énergie réactive.....	29
III.6. Bute se la stabilité transitoire.....	30
III.7. Méthodes d'analyse de la stabilité transitoire .....	30
III.8. Méthodes d'évaluation de la stabilité transitoire .....	31
III.9. Modélisation de la machine synchrone (Modèle à deux axes) .....	32
III.9.1. Hypothèses du modèle.....	32
III.9.2. Transformation de Park.....	32

III.10. Calcul d'écoulement de puissance .....	33
III.10.1. Méthodes itérative de l'écoulement de puissance .....	33
III.10.2. Equation du réseau électrique .....	34
III.11. Méthodes d'amélioration de la stabilité transitoire .....	35
III.11.1. Augmentation de la constante d'inertie des générateurs.....	36
III.11.2. Augmentation de la tension du système.....	36
III.11.3. Réduction de la réactance de transfert $X_L$ .....	36
III.11.4. Installation de protections rapides et de disjoncteurs rapides .....	36
III.11.5. Implémentation des valves rapides des turbines à vapeur .....	36
III.12. Moyens d'amélioration de la stabilité transitoire .....	36
III.12.1. Amélioration par les moyens classiques .....	37
III.12.2. Amélioration par les moyens modernes (FACTS) .....	38
III.13. CONCLUSION .....	38
<b>V. Chapitre IV. Simulation de variation d'état avec l'intégration des énergies renouvelables</b>	
Erreur ! Signet non défini.	
IV.1. Introduction .....	40
IV.2. Logiciel de simulation utilisé PSAT .....	40
IV.2.1. But de simulation PSAT .....	40
IV.2.2. Bibliothèque de SIMULINK .....	41
IV.2.3. Fonctionnement de PSAT .....	42
IV.3. Simulation d'un réseau de 16 jeu de barre .....	42
IV.4. Présentation de réseau et données .....	42
IV.5. Résultat et interprétation de la simulation .....	44
IV.5.1. Etude du réseau test sans intégration de DG.....	44
IV.5.2. Intégration au réseau de la DG sans intermittence .....	44
IV.5.3. Intégration de la DG au réseau avec diminution de 25%, 50% et de 75% de sa production.....	45
IV.5.4. Intégration de la DG au réseau avec augmentation de (25%,50%,et de 75%) de production distribué.....	48
IV.5.5. Comparaison des résultats et interprétation .....	50
IV.6. CONCLUSION .....	52
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>52</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>56</b>

**Liste des figures**

Figure I.1. Schéma d'un réseau .....	1
Figure I.2. Architecture générale de réseaux d'énergies électrique.	6
Figure I.3. Schéma d'un réseau radial.....	7
Figure I.4. Schéma d'un réseau maillé.....	8
Figure I.5. Schéma d'un réseau bouclé .....	8
Figure I.6. Image de ligne de transport de réseau électrique .....	9
Figure I.7. Schéma d'un réseau HTA aérienne .....	10
Figure I.8. Schéma d'un réseau HTA souterrains en Double dérivation .....	11
Figure I.9. Schéma d'un réseau HTA souterrains en coupeur d'artère .....	11
Figure I.10. Composants électriques dans un poste .....	12
Figure II.1. Diagramme des énergies renouvelables .....	16
Figure II.2. Module photovoltaïque .....	17
Figure II.3. Chauffe-eau solaire .....	17
Figure II.4. Tour solaire .....	18
Figure II.5. Eolienne à axe horizontale .....	18
Figure II.6. Eolienne à axe verticale .....	18
Figure II.7. Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique .....	19

Figure II.8. Etapes de production des déchets de la biomasse .....	20
Figure II.9. Les types de géothermie.....	20
Figure II.10. Courant en régime permanent avant et après insertion DG sur le réseau .....	22
Figure III.1. Classification de la stabilité des réseaux électriques .....	26
Figure III.2. Les buts de la stabilité transitoire .....	30
Figure III.3. Schéma équivalent de la machine synchrone .....	33
Figure III.4. Modèle simplifié d'une machine synchrone.....	34
Figure IV.1. Page de commande .....	41
Figure IV.2. Bibliothèque Simulink (Simulink Library) .....	41
Figure IV.3. Schéma du réseau de transport	43
Figure IV.4. Profil de tension ou niveau des JDB sans l'intégration de la DG.....	43
Figure IV.5. Profil de tension ou niveau de chaque JDB après l'intégration de la DG sans intermittence.....	44
Figure IV.6. Evolution des tensions des jdb suite à une diminution de la production de la DG. ....	45
Figure IV.7. Profil des tensions aux JdB avec diminution de la production de la DG de 25, 50 et de 75%.....	46
Figure IV.8. Evolution des tensions des jdb suite à une augmentation de la production de la DG. .	47
Figure IV.9. Profil de la tension aux JdB après une augmentation la production de la DG de 0%, 25%, 50% et de 75% .....	48
Figure IV.10. Profil de la tension des JDB avant, après intégration sans intermittence et avec intermittence (diminution et augmentation de 25%, 50%, et de 75%) .....	50

**Liste des tableaux**

Tableau I.1. Niveaux de tension dans un réseau électrique .....	7
Tableau IV.1. Les tensions des JDB sans intermittence et avec la diminution de la production de la DG de 25%,50% et de 75% .....	46
Tableau IV.2. Tensions des JDB sans intermittence et avec l'augmentation de la DG de 25%, de 50% et de 75% .....	48
Tableau IV.3. Tension en pu suite à une diminution et une augmentation de 0, 25, 50 et 75% .....	49

Abréviations et symboles

**ER** : Energie renouvelable

**PV**: Photovoltaïque

**PF**: Power Flow

**OPF**: Optimal Power Flow

**CPF**: Continuation Power Flow

**SSSA**: Small Signal Stability Analysis)

**TD** : Time Domaine.

**JDB** : jeu de barre

**CEI** : commission électrotechnique internationale

**DG** : distributed generation

## **Introduction générale**

## **Introduction générale**

L'histoire qui lie l'homme à l'énergie est née dès la première existence de ce dernier sur la terre. L'homme continue toujours à chercher de nouvelles sources d'énergie qui peuvent satisfaire ses besoins. Il a réussi à accumuler des expériences très riches en matière d'exploitation et de conversion de l'énergie.

Depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance. Tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique et industrielle d'une part, et de l'augmentation démographique et de la consommation d'électricité par habitant d'autre part.

Le réseau de transport d'énergie, forme un grand circuit électrique, obéissant aussi aux mêmes lois fondamentales que les circuits électriques plus simples.

L'industrialisation, la croissance économique et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter la quantité d'énergies produite, ce qui implique une augmentation du coût d'investissement et un effet négatif sur l'environnement dans le cas de l'utilisation des énergies faciles.

Les énergies renouvelables apparaissent aujourd'hui comme la solution adéquate à long terme qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur des énergies fossiles qui est la pollution et l'émission de gazes à effet de serre. Elles jouent une grande importance à cause de leur souplesse, la simplicité d'utilisation, leur disponibilité et leur diversité. Mais par contre elles créent aussi d'autres problèmes dus à leur intermittence, leur dépendance des conditions climatiques et du fait qu'elles participent peu au réglage de la fréquence. Ces modes de production ainsi que les moyens de transport et de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

La raison qui nous amène à nous intéresser à ces phénomènes ; c'est qu'ils peuvent provoquer des conséquences néfastes sur le réseau électrique, tels des dégradations irréversibles des éléments (ligne électrique, transformateur...) et même les équipements des clients, cela peut conduire à des disfonctionnement du réseau de transport d'énergie électrique et à des pertes économiques considérables

Notre travail s'intéresse à l'étude des problèmes liés à l'intégration aux réseaux électriques des productions distribuées (DG) et des phénomènes transitoires se produisant dans les réseaux de transport d'énergie électrique dus à la volatilité des DG d'origines généralement renouvelables (solaire thermique, photovoltaïque et éolienne).

Nous allons étudier et analyser, à l'aide du logiciel PSAT, à travers un réseau test bouclé de 16 jeux de barres (JdB), le comportement d'un réseau électrique, face à l'intégration de DG. Nous allons étudier d'abord le fonctionnement du réseau sans et avec intégration de DG sans intermittence. Ensuite nous allons étudier et analyser son comportement face à l'intégration de la DG avec diminution de la de production de cette dernière de 25%,50% et de75%. En fin il sera aussi analysé avec une augmentation de la production de cette dernière de 25%, 50% et de 75%.

Notre travail est structuré comme suit :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les éléments de base d'un réseau électrique, le fonctionnement des réseaux électriques, les équipements électriques et les perturbations qui peuvent dégrader la qualité de la tension.

Dans le chapitre 2, nous avons présenté les familles des énergies renouvelables et leur intégration aux réseaux électriques.

Le chapitre 3 est consacré à l'évaluation et à l'étude de la stabilité transitoire des réseaux électriques et les méthodes les plus utilisées pour l'analyse de la stabilité.

Enfin le 4ème chapitre présente la simulation du réseau test de 16 JdB dans le cas de l'intégration de la DG sans et avec intermittence, nous terminons ce chapitre par l'analyse et l'interprétation des résultats.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale des perspectives

## **Chapitre I. Généralités sur les réseaux électriques**

## I.1. Introduction

L'électricité est considérée maintenant comme un produit à part entière, ce qui implique des nécessités de qualité, cette dernière doit répondre correctement à la demande des consommateurs qui veulent disposer d'une énergie électrique ajustée à leurs besoins.

Les réseaux électriques sont des éléments clés pour assurer une alimentation fiable et de qualité en énergie électrique, qui est un vecteur indispensable aux activités humaines et un facteur essentiel de développement pour les pays.

Dans ce chapitre nous exposerons les définitions et les descriptions des réseaux électriques leur hiérarchisation (transport réparation et distribution), leur classe fictive et leurs architecture, les lignes aériennes et souterraines, les postes, nous verrons aussi les perturbations qui peuvent se présenter dans un réseau électrique et nous terminons ce chapitre par le réglage de la tension et de la fréquence.

## I.2. Définition du Réseau Electrique

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destinés à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique et veiller sur la qualité de cette dernière, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. L'architecture du réseau est un facteur clés pour assurer ces dernières. Cette architecture peut être divisée en deux parties

D'une part, l'architecture du poste, et de l'autre part l'architecture de la distribution [1].

Comme l'énergie électrique produite ne peut pas être stockée ou est difficilement stockable (très coûteux), il faut toujours maintenir en permanence l'équilibre production-consommation [2].

Production = Consommation + pertes

On retrouvera dans l'analyse des réseaux toutes les sciences de l'ingénieur, du génie civil à la mécanique, la thermodynamique, le choix des matériaux, la chimie, l'informatique, le traitement de signal, l'électronique et bien entendu l'électricité, auxquelles il faut rajouter les sciences de gestion [2].

## I.3. Description des réseaux électriques

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

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de transport maillé à très haute tension pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes.

Elle baisse ensuite sur les réseaux de répartition, elle passe en moyenne et basse tension sur les réseaux de distribution où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux petits consommateurs à travers les réseaux de distribution à basse tension. Généralement le transit de l'énergie le réseau peut être représenté comme le montre la figure I.1 [3].

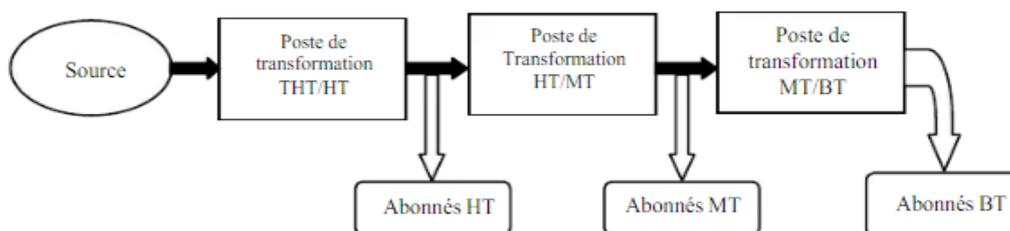


Figure I.1. Schéma d'un réseau

Les réseaux électriques sont hiérarchisés. La plupart des pays ont adopté (selon la CEI) les niveaux de tension suivants :

Un réseau de transport THT 220 .... 800 kV

Un réseau de répartition HT 60 ..... 170 kV

Un réseau de distribution MT 5 ..... 36 kV

Un réseau de livraison de l'abonné BT 400/230 V

La nouvelle norme en vigueur UTE C18-510 définit les niveaux de tension alternative comme suit :

HTB → pour une tension composée supérieure à 50 kV

HTA → pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV

BTB → pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV

BTA → pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V

TBT → pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V

#### **I.4. Hiérarchisation d'un réseau électrique**

Le système électrique est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et définis par des tensions ajustées à ces fonctions :

Le réseau de transport, de répartition et de distribution de l'électricité.

##### **I.4.1. Les réseaux de transport**

Les réseaux de transport ont principalement pour mission :

- De collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation.
- De permettre l'interconnexion des centrales de production et sont caractérisés par [4]:
  - Les tensions 150 kV, 220 kV et dernièrement 420 kV.
  - Neutre directement mis à la terre.
  - Réseau maillé.

En matière de production décentralisée, les réseaux de transport jouent un rôle lié au fait qu'ils constituent l'ossature du système électrique pour les échanges d'énergie et que l'intégration d'une proportion appréciable d'énergie distribuée de type renouvelable aura une influence sur le comportement global du système et sur son exploitation. Même si, pour une grande part, cette production décentralisée sera connectée au réseau de distribution.

En effet, cette intégration requière une grande flexibilité des échanges entre production centralisée et production décentralisée [5].

##### **I.4.2. Les réseaux de répartition**

Les réseaux de répartition sont caractérisés par [4]

- Un niveau de tension 90 kV ou de 63 kV,
- La mise à la terre du neutre par réactance ou transformateur.
  - Limitation courant neutre à 1500 A pour le niveau 90 kV.

- Réseaux en boucle ouvert ou fermé, ou maillé.

Ces réseaux sont, en grande partie, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. En zone urbaine dense, ces réseaux peuvent être souterrains sur des longueurs n'excédant pas quelques kilomètres. Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et, d'autre part, les utilisateurs industriels dont la demande est, supérieure à 60 MVA, qui nécessite un raccordement à cette tension.

#### **I.4.3. Les réseaux de distribution**

Ces réseaux constituent des circuits électriques passifs dans lesquels les flux de la puissance active et réactive écoulent des hautes vers les basses tensions. Ces flux ainsi que les tensions sont déterminés par les charges. Les systèmes de protection et de réglage de la tension se basent sur le caractère unidirectionnel de l'échange d'énergie. L'introduction de la production décentralisée en proportion appréciable en réseaux de distribution, va avoir des conséquences très importantes. Ces réseaux deviennent des circuits électriques actifs, dans lesquels les flux de puissance et les tensions sont gouvernés non seulement par les charges mais aussi par les sources. Les flux de puissance peuvent fort bien, dans certaines conditions, remonter des basses vers les hautes tensions [5].

Réseaux de distribution à moyenne tension caractérisés par [4] :

- Les niveaux tension 30 et de 10 kV (le plus répandu),
- Le neutre mis à la terre par une résistance du neutre tiens :
  - à 300A pour les réseaux aériens,
  - à 1000 A pour les réseaux souterrains,
- Réseaux souterrains en boucle ouverte.

Le réseau de distribution à basse tension caractérisés par [4]

- Le niveau de tension 230 / 400 V
- Le neutre mis à la terre par une résistance,
- Réseaux de type radial, maillé et bouclé

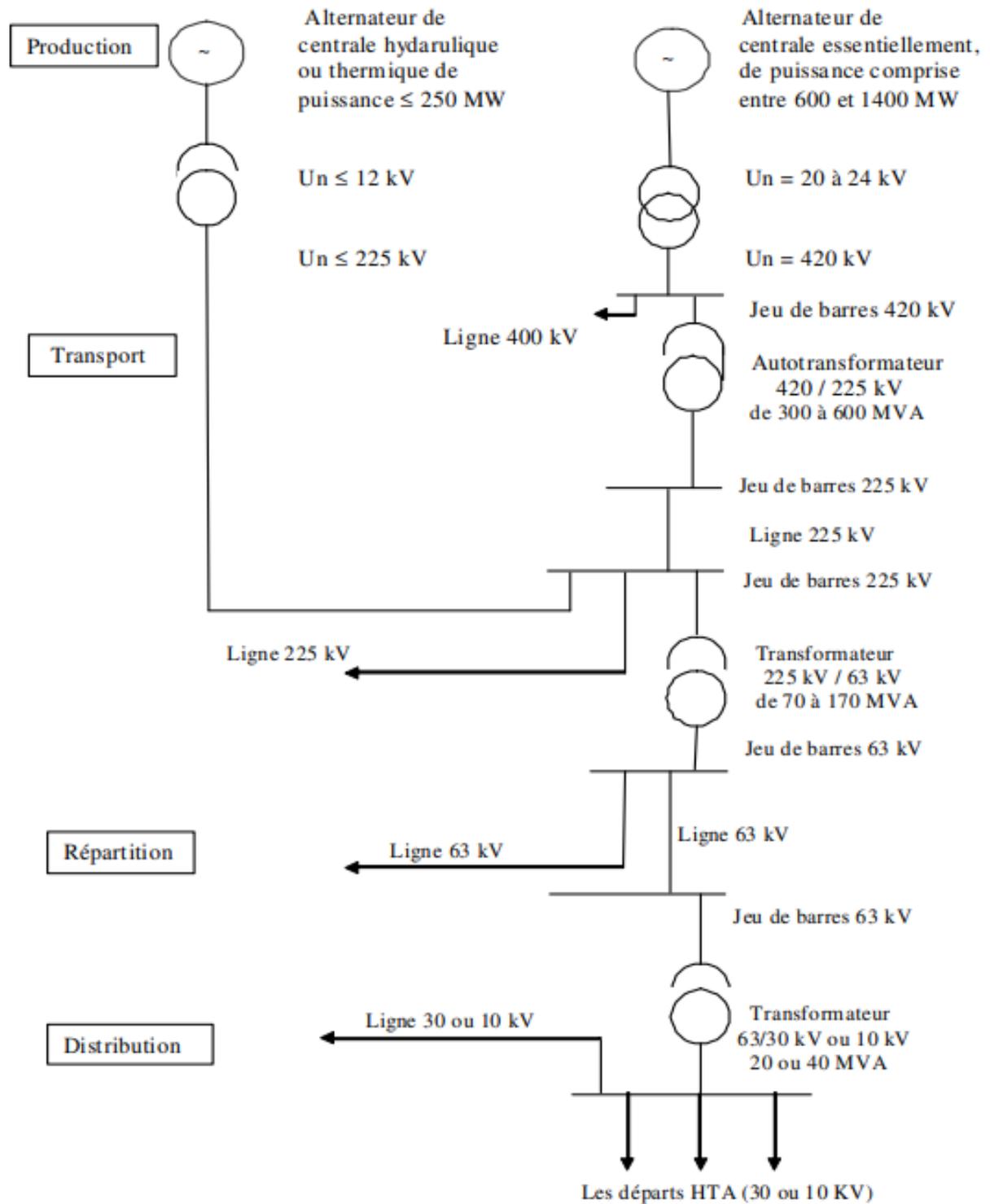


Figure I.2. Architecture générale de réseaux d'énergies électrique.

## I.5. Classification des tensions dans un réseau électrique

A travers la NF C 15-100 et la NF C13-200, les niveaux de tension sont définis comme suit [6]:

Tableau II.1. Les niveaux de tension dans un réseau électrique

Appellation courante	Domaine de tension	Tension alternative	Tension continue
Très basse tension	TBT	$U_n \leq 50 \text{ V}$	$U_n \leq 120 \text{ V}$
Basse tension (BT)	BTA	$50 \text{ V} < U_n \leq 500 \text{ V}$	$120 \text{ V} < U_n \leq 750 \text{ V}$
	BTB	$500 \text{ V} < U_n \leq 1000 \text{ V}$	$750 \text{ V} < U_n \leq 1500 \text{ V}$
Moyenne tension (MT)	HTA	$1 \text{ kV} < U_n \leq 50 \text{ kV}$	$1500 \text{ V} < U_n \leq 75 \text{ kV}$
Haute tension (HT)	HTB	$U_n > 50 \text{ kV}$	$U_n > 75 \text{ kV}$

## I.6. Architecture des réseaux électriques

### I.6.1. Topologies des réseaux électriques

Il est important de trouver un compromis entre le coût des investissements supplémentaires pour satisfaire une éventuelle de demande et celui que cette énergie risque de ne pas être distribuée. Ce compromis ne peut être le même suivant les fonctions assurées par les réseaux, leur tension, le type d'usagers raccordés à ceux-ci. Cela conduit à différentes topologies de réseaux dont nous pouvons citer les réseaux radiaux, bouclés et maillés [7].

#### I.6.1.1. Les réseaux radiaux

C'est une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT [8].

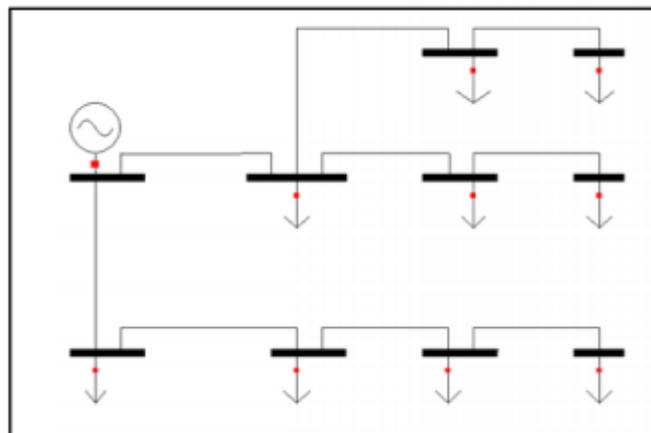


Figure I.3. Schéma d'un réseau radial

Leur configuration est celle rencontrée dans l'exploitation des réseaux de distribution dont les sources de tension sont constituées d'un ou plusieurs transformateur(s) abaisseur(s). La tension fournie par chacune de ces sources peut être variable en suivant les fluctuations du réseau haute tension auquel est branché le transformateur réglable si le rapport de transformation peut être modifié.

### I.6.1.2. Les réseaux maillés

Ce sont des réseaux dans lesquels les liaisons forment des boucles dont la majorité a des côtés communs, réalisant ainsi une structure semblable aux mailles d'un filet. Ainsi, si un hôte est hors service, ses voisins passeront par une autre route. Cela évite d'avoir des points sensibles, qui en cas de panne, coupent la connexion d'une partie du réseau. Cette structure nécessite que tous les tronçons de lignes (ou de câbles) soient capables de surcharges permanentes, et qu'ils soient munis à leurs deux extrémités d'appareils de coupure, les isolants en cas d'avarie. Cette structure est généralement utilisée pour le transport.

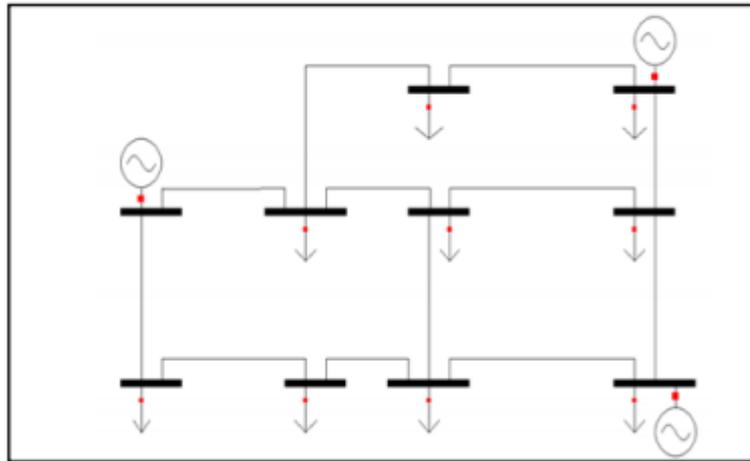


Figure II.4. Schéma d'un réseau maillé

### I.6.1.3. Les réseaux bouclés

Un réseau bouclé est un réseau maillé simplifié présentant un certain nombre de boucles fermées. Le réseau est dit bouclé car pour chaque phase, les lignes forment un circuit fermé sur lui-même. Chacune des boucles contient un nombre limité de sources.

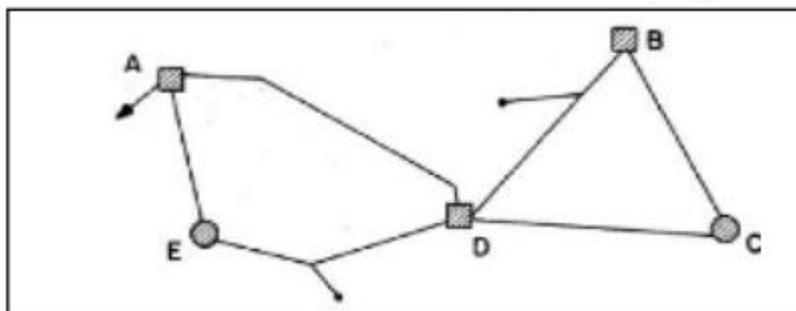


Figure II.5. Schéma d'un réseau bouclé

#### **I.6.1.4. Les réseaux arborescents**

Les réseaux arborescents sont des réseaux à deux ordres de lignes : dorsales et dérivation, des sous dérivations peuvent être utilisées pour alimenter des charges isolées ou pour grouper sous un même Interrupteur à commande manuelle un ensemble de postes (MT/BT).

Des interrupteurs automatiques seront installés à l'endroit de chaque dérivation pour permettre l'élimination de la dérivation en défaut.

#### **I.7. Différent types des lignes (THT, HT, MT, BT)**

Le réseau électrique peut être facilement comparé à un réseau routier, il a ses autoroutes, ses voies nationales et départementales. Une fois produite, l'électricité doit être transportée et distribuée jusqu'au consommateur. Pour cela, on distingue le réseau de transport et le réseau de distribution [4, 9].



Figure II.6. Image de ligne de transport de réseau électrique

##### **I.7.1. Le réseau de transport : lignes très haute et haute tension(THT) et (HT)**

Il est constitué de deux types de lignes : les lignes très hautes tension (THT) et les lignes hautes tension (HT). Il représente un peu plus de 150 KV .Les lignes THT permettent de transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances avec des pertes minimales.

Ces lignes, dont la tension est supérieure à 100 kilovolts (kV) constituent le réseau de grand transport ou d'interconnexion. Elles permettent de relier les régions et les pays entre eux ainsi que d'alimenter directement les grandes zones urbaines. La majorité des lignes THT ont une tension de 400 kV. Les lignes haute tension constituent le réseau de répartition ou d'alimentation régionale et permettent le transport à l'échelle régionale ou locale. Elles acheminent l'électricité aux industries lourdes, aux grands consommateurs électriques comme les transports ferroviaires et font le lien avec le second réseau. Leur tension est comprise entre 10kV et 100kV.

##### **I.7.2. Le réseau de distribution : lignes moyenne et basse tension (MT) et (BT)**

Tout comme le premier, ce réseau est constitué de deux types de lignes : les lignes moyennes tension (MT) et les lignes basses tension (BT). Les lignes moyennes tension permettent le transport de l'électricité à l'échelle locale vers les petites industries, les PME et les commerces. Elles font

également le lien entre les clients et les postes de transformations des compagnies de distribution du courant.

Les lignes MT ont une tension comprise entre 15kV et 30kV. Les lignes basses tension sont les plus petites lignes du réseau. Leur tension est de 230V ou 400V. Ce sont celles qui nous servent tous les jours pour alimenter nos appareils ménagers. Elles permettent donc la distribution d'énergie électrique vers les ménages et les artisans et représentent plus de la moitié du réseau national.

### I.7.3. Lignes aériennes et câbles souterrains

Depuis 1994 la plupart des compagnies d'électricité ont pris la décision de ne plus établir de nouvelles liaisons aériennes en deçà de 150 kV. A terme donc tout le réseau de distribution et progressivement celui de répartition se fera en câbles souterrains.

L'utilisation de câbles en plus haute tension - même s'il existe quelques cas à 220 kV, 400 kV et 500 kV - est confronté à des problèmes technologiques significatifs (surtout les jonctions) ainsi qu'à un coût très élevé (si le coût en basse tension est similaire, voire inférieur pour une liaison souterraine, il devient jusqu'à environ 20 fois plus élevé à 400 kV par rapport à une liaison aérienne).

Les lignes aériennes sont constituées de conducteurs nus en aluminium (souvent un alliage pour renforcer les propriétés mécaniques), parfois avec une âme en acier.

#### I.7.3.1. Réseaux HTA aériens

Les zones rurales à faible densité de charge sont alimentées par des lignes HTA aériennes en simple dérivation, traditionnellement moins coûteuses que les câbles souterrains. Le dimensionnement de ces ouvrages est lié aux chutes de tension maximales admissibles en raison de l'éloignement des charges à desservir

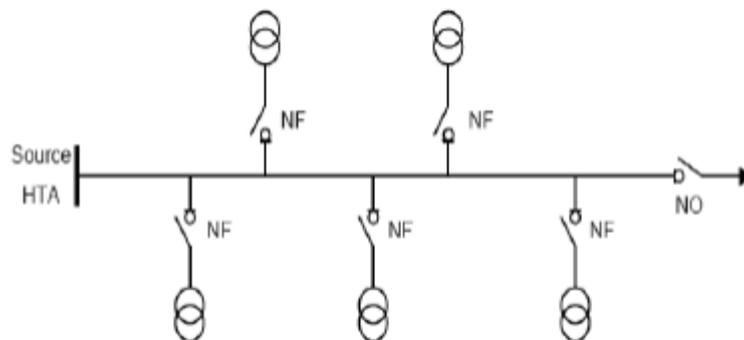


Figure II.7. Schéma d'un réseau HTA aérienne

#### I.7.3.2. Réseaux HTA souterrains

Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentées par des câbles HTA enterrés en double dérivation ou en coupure d'artère.

En double dérivation, les postes HTA/BT sont normalement alimentés par le câble de travail (CT), le câble de secours (CS) permet de garantir une bonne continuité de service en cas de défaut.

Le dimensionnement des ouvrages souterrains est principalement lié aux courants admissibles dans les câbles en raison de la densité des charges à desservir.

Les ouvrages de distribution neufs ou les rénovations en zones rurales sont également réalisés en câble enterré depuis les années 1990, en raison de la baisse notable du surcout lié à cette technique.

De plus, une volonté politique croissante de qualité environnementale, tend à la réduction de l'impact visuel des ouvrages

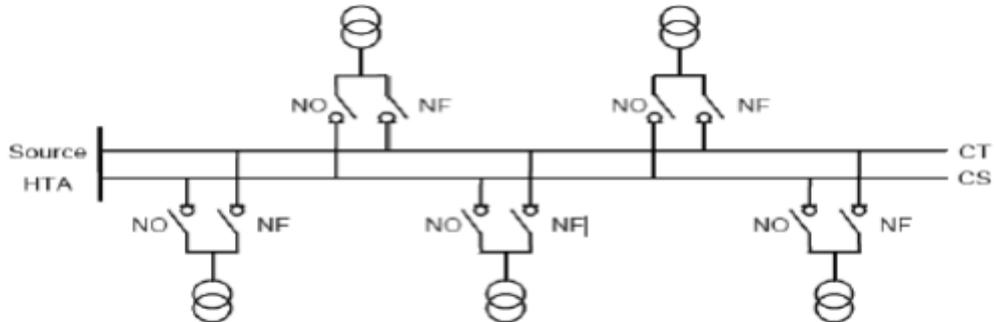


Figure II.8. Schéma d'un réseau HTA souterrains en Double dérivation

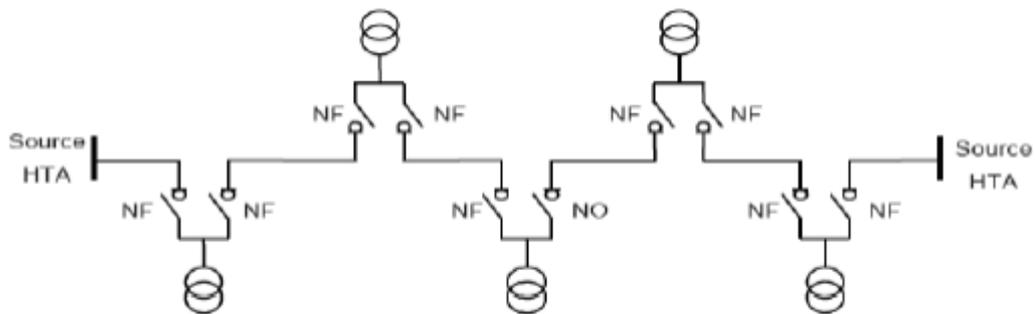


Figure II.9. Schéma d'un réseau HTA souterrains en coupeur d'artère

## I.8. Postes électriques

Les postes électriques permettent d'adapter la tension en fonction des lignes et des réseaux, mais aussi à aiguiller l'électricité et à la "surveiller" à distance sur les différentes lignes qu'elle emprunte. On distingue, suivant les fonctions qu'ils assurent. [3]

### I.9. Types du poste électrique

Il existe trois grandes catégories de postes électriques :

#### I.9.1. Poste d'interconnexion

Qui comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés

#### I.9.2. Poste de transformation (post source)

Les postes de transformation permettent de passer d'un niveau de tension d'entrée donné à un niveau de tension de sortie qui peut être supérieur (on parle alors de transformateurs éleveurs) ou inférieur (abaisseur).

### I.9.3. Postes mixtes

Les postes mixtes, sont plus fréquents, ils assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation.

### I.10. Objectif des postes

Les postes électriques ont 3 fonctions principales :

- le raccordement des plusieurs réseaux d'électricité.
- l'interconnexion entre les différentes lignes électriques.
- la transformation de l'énergie en différents niveaux de tension

Le schéma (topologie) de ces postes dépend principalement de deux aspects :

1. niveau de sécurité d'exploitation :

On entend par là qu'en cas de défaut sur le jeu de barre ou sur une ligne, il faut veiller à éliminer ce défaut par des disjoncteurs aussi peu nombreux que possible en vue de garder en service le plus d'ouvrages sains possible (sécurité élevée) ou un certain nombre de lignes ou de travées (sécurité moyenne ou faible).

2. Niveau de souplesse désiré :

On entend par là la facilité d'exploitation relative aux manœuvres volontaires et aux changements de la configuration électrique du poste. On trouve ainsi des schémas à un ; deux ou trois jeux de barres, avec ou sans sectionnement, à un ou deux disjoncteurs par départ.

Le jeu de barre peut être en ligne ou en boucle, simple, double ou multiple. Le choix fait également intervenir :

- Le nombre de travées (ligne et transformateur).
- Le nombre de nœuds désiré (un nœud est un ensemble de travées électriquement séparées des autres).
- Accessibilité des travées aux nœuds[10].

### I.11. Eléments d'un poste électrique

Les postes contiennent un certain nombre d'appareils électriques qui participent au bon fonctionnement du réseau [3] :

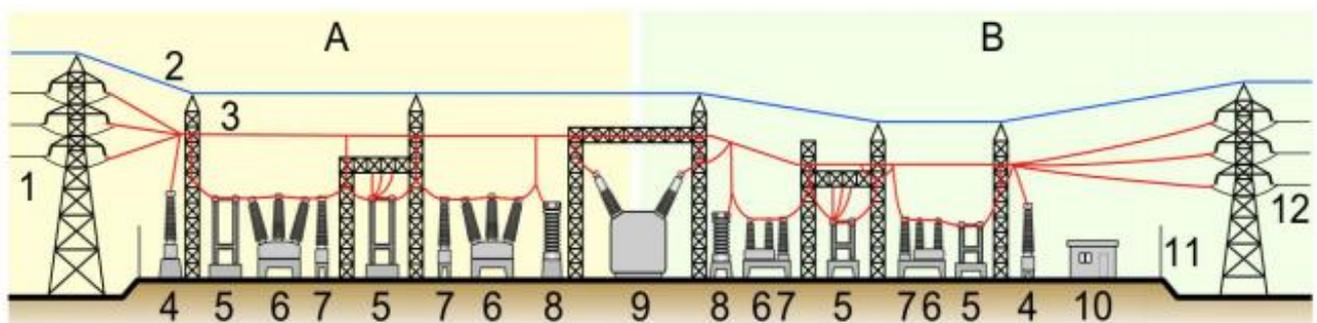


Figure II.10. Composants électriques dans un poste

1. Ligne électrique primaire ;
2. Câble de garde ;
3. Ligne électrique ;
4. Transformateur de tension ;
5. Sectionneur ;
6. Disjoncteur ;
7. Transformateur de courant ;
8. Parafoudre ;
9. Transformateur de puissance ;
10. Bâtiment secondaire ;
11. Clôture ;
12. Ligne électrique secondaire

## **I.12. Types de perturbations dans les réseaux électriques**

### **I.12.1. Variations et fluctuations de tension**

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude [11].

### **I.12.2. Creux de tension**

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise entre 90 % et 10 % d'une tension de référence suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (10 ms à 50 Hz) et une minute [11].

### **I.12.3. Coupures**

L'isolement des défauts par les dispositifs de protections (disjoncteurs, fusibles) provoquent des coupures (brèves ou longues) pour les utilisateurs alimentés par la section en défaut du réseau. Les coupures brèves sont souvent le résultat du fonctionnement des automatismes de réseau tels que les réenclenchés rapides et/ou lents, les permutations de transformateurs ou de lignes. Les coupures longues sont le résultat de l'isolement définitif d'un défaut permanent par les dispositifs de protection ou de l'ouverture volontaire ou intempestive d'un appareil [11].

### **I.12.4. Surtension**

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête dépasse les limites d'un gabarit définis par une norme ou une spécification est une surtension [11]

### **I.12.5. Variation de fréquence**

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome, Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des

conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$  [12].

### **I.13. Réglage du réseau**

Concernant la tension, il s'agit d'un problème essentiellement local (compensation). Il faut limiter les transits de réactif dans le réseau. On admet des plages de variations de l'ordre de 5 à 10% selon le niveau de tension et le type de clientèle [2].

#### **I.13.1. Réglage primaire (les premières secondes après perturbation)**

Sans disposition particulière, si la production (consommation) augmente (diminue), la fréquence chute (augmente) pour trouver un nouvel équilibre.

C'est qui n'est pas admissible, il faut donc une action automatique, menée par les régulateurs de vitesse de chaque centrale prévue en réglage primaire, pour maintenir la fréquence.

#### **I.13.2. Réglage secondaire (au cours des 15 minutes après perturbation)**

Ce réglage, également automatique, agit juste après le réglage primaire (c'est-à-dire après environ une minute). Il permet de rétablir la fréquence de référence. Cette action est centralisée. On définit cette fois l'énergie réglant secondaire.

#### **I.13.3. Réglage tertiaire (dans les 15 à 30 minutes après perturbation)**

Pour faire, il faut procéder à un réajustement des programmes de fonctionnement des centrales (en prenant en compte les coûts de production marginaux) pour rétablir un optimum économique. Ce réglage est aussi centralisé au sein de la zone initialement en défaut.

### **I.14. Conclusion**

Dans ce chapitre on a fait une présentation générale des réseaux électriques, avec leurs différents composants nécessaires à la production, au transport, à la distribution et à la consommation de l'énergie électrique et on a présenté les types de réseaux qui existent en citant les types de perturbation qui peuvent toucher le réseau particulièrement la tension ainsi que le réglage de cette dernière.

# **Chapitre II. Généralités sur les énergies renouvelables et leur intégration aux systèmes électriques**

## **Chapitre II. Généralités sur les énergies renouvelables et leur intégration aux systèmes électriques**

### **II.1. Introduction**

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables (ER) ont connu une forte croissance ces dernières années. 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 mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie.

Une source d'énergie est dite renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre, de la biomasse humide ou sèche à une échelle de temps compatible avec l'histoire de l'humanité. Ce n'est pas le cas des combustibles fossiles et nucléaires.

### **II.2. Energie renouvelable**

#### **II.2.1. Définition**

Les ER sont des formes d'énergie qui proviennent d'une source renouvelable, c'est-à-dire une source qui se renouvelle assez rapidement de telle sorte que son utilisation actuelle n'ait pas d'impact sur sa disponibilité future. Elles présentent des énergies de flux puisqu'elles se régénèrent d'une manière permanente (les flux solaires, le vent, etc.). Par conséquent, elles ont des caractéristiques différentes des énergies fossiles qui sont plutôt des énergies de stock.

La notion d'ER est souvent confondue avec celle d'énergie propre. Or, même si une énergie peut être à la fois renouvelable et propre, toutes les ER ne sont pas nécessairement propres. Mais, généralement les ER ont peu d'impacts négatifs sur l'environnement [13].

#### **II.2.2. Ressources du renouvelables**

Les énergies renouvelables sont des énergies qui peuvent être régénérées naturellement. Il existe cinq types de source principale d'énergies renouvelables que nous choisissons ici dans l'ordre d'importance de leur exploitation actuelle [14] :

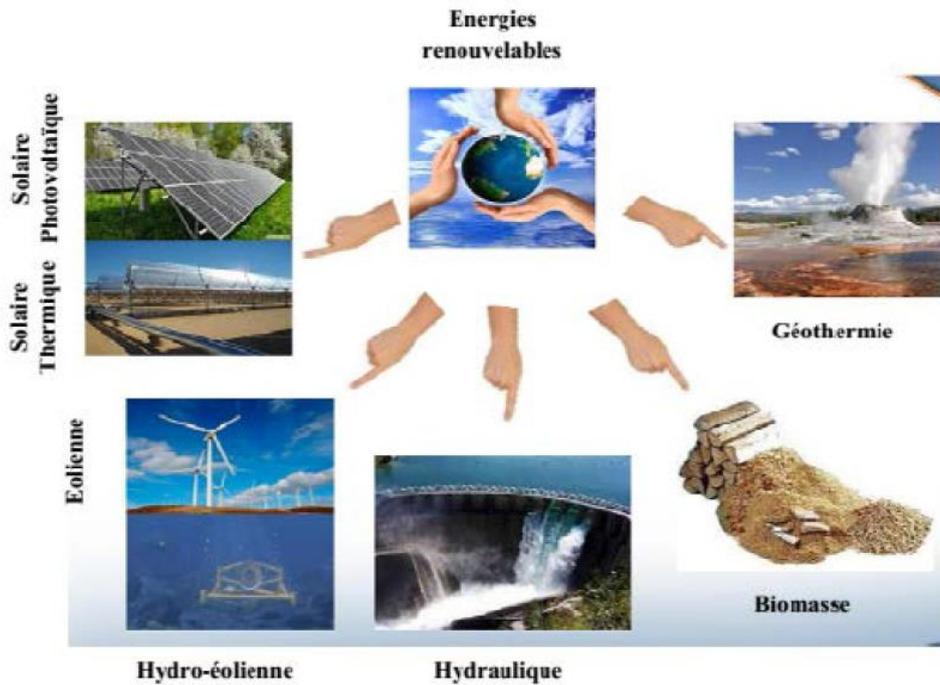


Figure III.1. Diagramme des énergies renouvelables

1. L'énergie solaire.
2. L'énergie éolienne.
3. L'énergie hydraulique (hydroélectricité).
4. La biomasse (avec le bois de chauffage, ainsi que biogaz...).
5. La géothermie.

### II.2.2.1. L'énergie solaire

Le soleil est la source principale de l'énergie utilisée puisque, en plus de son action de réchauffement direct, il a des impacts sur le vent, les marées et même les ressources fossiles. Il existe différents procédés qui permettent d'exploiter l'énergie solaire. L'énergie solaire passive, par exemple, est utilisée comme source d'énergie dans l'architecture. Les techniques passives visent à exploiter l'énergie solaire au moyen de grandes fenêtres pour bénéficier au maximum du rayonnement solaire ou de murs qui emmagasinent la chaleur. On obtient donc des maisons solaires passives totalement optimisées d'un point de vue thermique.

L'énergie solaire peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés ou des miroirs.

En effet, il existe trois types de technologies d'énergie solaire :

#### ➤ L'énergie Solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie.



Figure III.2. Module photovoltaïque

➤ **L'énergie solaire thermique**

Elle est radicalement différente de l'énergie solaire photovoltaïque, elle, produit de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer de l'eau ou de l'air. On utilise dans ce cas des capteurs thermiques qui relèvent d'une toute autre technologie. Dans le langage courant, ce sont des « chauffe eau solaires » ou des « capteurs à air chaud ».



Figure III.3. Chauffe-eau solaire

Il y a aussi ce qu'on appelle l'énergie solaire thermodynamique, qui fonctionne sur le principe de concentration des rayons solaires au moyen des miroirs galbés, en un foyer placé sur une tour qui emmagasine les calories pour les restituer ensuite sous forme mécanique à l'aide d'une turbine à vapeur par exemple [15].



Figure III.4. Tour solaire

#### II.2.2.2. L'énergie éolienne

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite cette énergie est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique. Les termes « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre « onshore » ou dans la mer « offshore ». Les coûts d'investissement sont relativement élevés, surtout pour le « offshore », mais l'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental est petit [16].

Dans certaines régions, les éoliennes posent quand même quelques problèmes, liés au bruit de basse fréquence, désagréable pour les personnes qui habitent à côté et les impacts avec les troupeaux sur les oiseaux. Les petites éoliennes peuvent être à axe vertical ou à axe horizontal.



Figure III.5. Eolienne à axe horizontale



Figure III.6. Eolienne à axe verticale

### II.2.2.3. L'énergie hydroélectrique

Les centrales hydrauliques transforment l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électriques

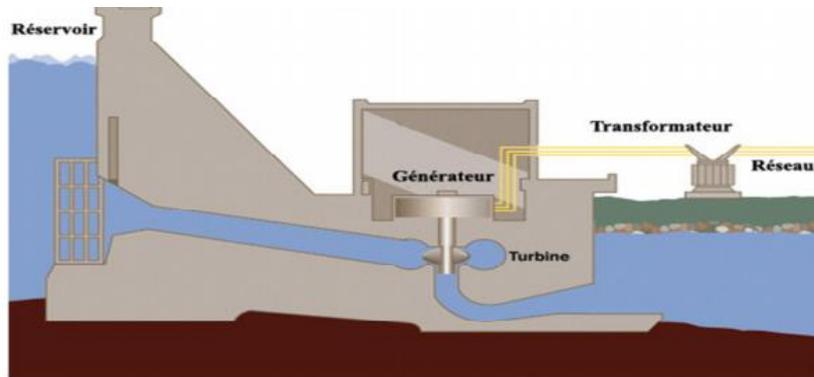


Figure III.7. Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique

La puissance maximale dépend de la hauteur de chute, du débit d'eau et des caractéristiques mécaniques de la turbine. Il y a trois types principaux de centrales hydroélectriques :

- **Les centrales dites gravitaires** : pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement issus du cours d'eau par gravitation.
- **Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (S.T.E.P.)** : aussi connues sous l'appellation centrales hydrauliques à réserve pompée ou centrale de pompage turbinage, qui permettent de pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. Elles sont souvent utilisées comme une forme de stockage : pompage durant le creux de la demande à partir d'électricité produite par des équipements de base (nucléaire) et production d'électricité par turbinage durant la pointe, plus coûteuse, des équipements de pointe.
- **Les usines marémotrices** : au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (dites aussi hydroliennes) ou du mouvement des vagues [17].

### II.2.2.4. La biomasse

La biomasse représente l'ensemble de la matière organique, qu'elle soit d'origine végétale ou animale. Elle peut être issue de forêts, milieux marins et aquatiques, haies, parcs et jardins, industries générant des coproduits, des déchets organiques ou des effluents d'élevage. Elle est la source d'énergie principale pour cuisiner et se chauffer. Cette biomasse qui comprend tous les produits obtenus à partir de plantes ou de résidus de plantes, secs ou déshydratés comme le bois, la paille, les grignons d'olives, la bagasse de la canne à sucre, est exploitée par combustion ou métabolisation. Mais pour être une réelle énergie renouvelable, les quantités brûlées ne doivent pas excéder les quantités produites. En fonction des besoins, elle permet une production de chaleur ou d'électricité. De ce fait, sa participation à la production d'énergie mondiale est énorme par rapport aux autres énergies [18].

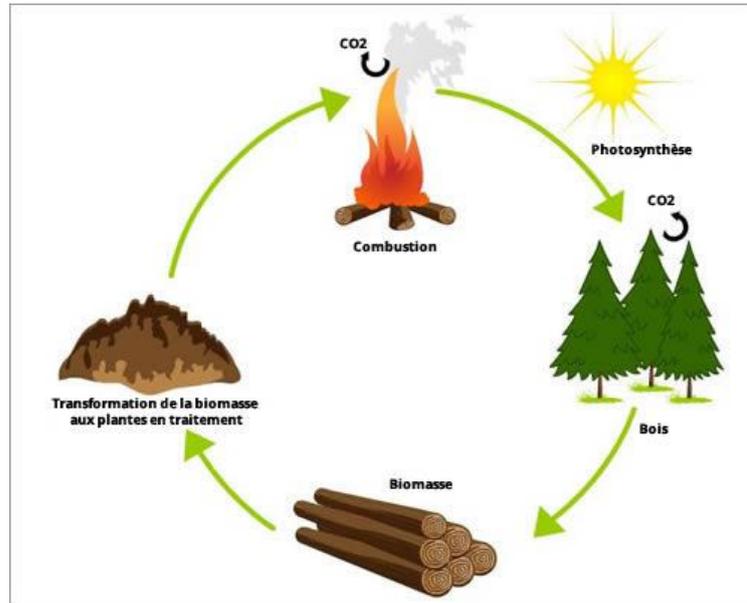


Figure III.8. Etapes de production des déchets de la biomasse

### II.2.2.5. La géothermie

La géothermie est une forme d'énergie utilisant les sources de chaleur des régions intérieures de la terre, à savoir le sous-sol. Elle est naturellement présente dans les régions connaissant des phénomènes géothermiques. La chaleur se diffusant dans les pierres proches de la surface peut être exploitée pour le chauffage (température inférieure à 90°) ou pour produire de l'électricité (température comprise entre 90 et 150°). Les centrales géothermiques convertissent cette chaleur en la captant et en la ramenant à la surface de la terre par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau puis en transformant l'énergie contenue dans le fluide en électricité à l'aide de turbines à vapeur [19].

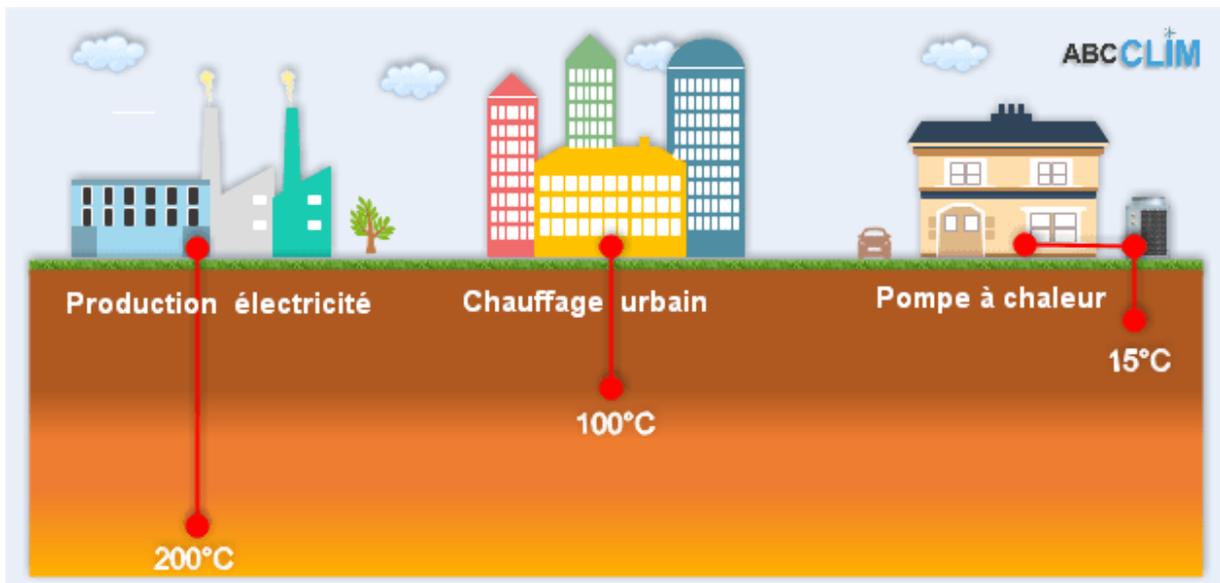


Figure III.9. Les types de géothermie

### II.3. Production d'électricité décentralisée

La production décentralisée (dite encore « dispersée » ou « distribuée ») c'est la production d'énergie électrique à l'aide des installations de petite puissance raccordées aux réseaux à basse (et plus rarement moyenne) tension contrairement à la production centralisée de grande puissance,

raccordée au réseau de transport. La production décentralisée est à base de sources d'énergie renouvelable, mais dans certains cas elle peut être effectuée aussi avec des générateurs conventionnels (groupes diesel et micro-turbines à gaz en cogénération). [21]

## **II.4. Conditions techniques d'interconnexions**

Les conditions techniques d'interconnexion au réseau électrique sont :

### **II.4.1. Raccordement**

En fonction de la puissance à raccorder, des caractéristiques du réseau sur lequel elle est appelée à être raccordée et du maintien d'une qualité de tension dans les limites fixées par des normes, le gestionnaire du réseau établit les dispositions du raccordement. Le réseau qui doit assurer le transit de la production décentralisée est soumis à plusieurs contraintes. Il doit pouvoir maintenir le plan de tension dans les limites d'exploitation avec et sans la présence de la production décentralisée.

De plus, le transit de la puissance doit se faire sans excéder la capacité des éléments du réseau. En conséquence, le raccordement peut nécessiter des renforcements du réseau et de ce fait, une participation financière du producteur décentralisé dans ces renforcements peut être demandée. Sur la base de ces critères, le gestionnaire du réseau fixe le mode de raccordement de l'installation de production au réseau de distribution. Chaque cas fait l'objet d'un examen particulier qui tient compte des conditions réelles rencontrées [21].

### **II.4.2. Jugement de conformité**

Le producteur est tenu de soumettre un rapport de contrôle rédigé à ses frais par un organisme agréé qui démontre la conformité de l'installation au règlement général des installations électriques. En outre, le gestionnaire du réseau contrôle avant le raccordement de l'installation du producteur décentralisé en ce qui concerne les aspects particuliers de l'installation de fourniture d'énergie. Ceci inclut entre autre le schéma de raccordement, le fonctionnement de l'appareil de découplage, le réglage et le fonctionnement de l'ensemble constituant les protections particulières, le dispositif de mise en parallèle, l'éventuelle protection contre l'injection de courant continu[21].

### **II.4.3. Accord de raccordement**

L'installation de production décentralisée ne peut être raccordée au réseau de distribution qu'après accord écrit du gestionnaire du réseau (sonelgaz). Cet accord n'est pas encore fonctionnel au cas où le producteur décentralisé envisage une modification de son installation de production, notamment s'il modifie la puissance concernée [21].

### **II.4.4. Dispositif de protection**

Lors de travaux hors tension sur le branchement ou sur le réseau de distribution, l'installation de production décentralisée doit pouvoir être séparée du réseau par un dispositif de coupure de sécurité. La coupure de sécurité doit être visible, verrouillable et accessible en permanence au gestionnaire du réseau. Ces dispositifs sont de type agréé par ce dernier. Lorsque la puissance de l'installation de production décentralisée est  $< 10$  kW, la coupure de sécurité peut éventuellement être réalisée pour chaque unité de production, par un système automatique de sectionnement. Les installations photovoltaïques  $< 5$  kW doivent être pourvues de ce système automatique [21].

## II.5. Impacts des énergies renouvelables sur les systèmes électriques

En raison de la nature intermittente de la source d'énergie et des fluctuations qui en résultent au niveau de la puissance produite par une unité de production d'ER, le raccordement de celle-ci à un système électrique quelconque a un impact non négligeable qui dépend de la technologie utilisée et aussi du type de réseau[22].

En général, on peut dire que plus le taux de pénétration n'est important, plus l'impact de l'intégration des ER dans les réseaux n'est significatif. On peut distinguer des impacts locaux et les impacts globaux [22].

### II.5.1. Impacts locaux

Ce sont les impacts qui se produisent dans le voisinage du point de raccordement de l'unité et qui peuvent être attribués directement à cette dernière. Les impacts locaux sont en général indépendants du taux de pénétration global des unités de production d'ER dans le système. Ils concernent deux principaux aspects : la capacité d'accueil du réseau et la qualité de tension.

Lorsque l'installation de production d'ER est reliée aux réseaux de distribution ou de transport et qu'elle exporte de la puissance sur le réseau HTB, des phénomènes de congestion peuvent apparaître. Suivant les puissances raccordées, les phénomènes de congestion pourront par exemple être observés à l'échelle d'une région [22].

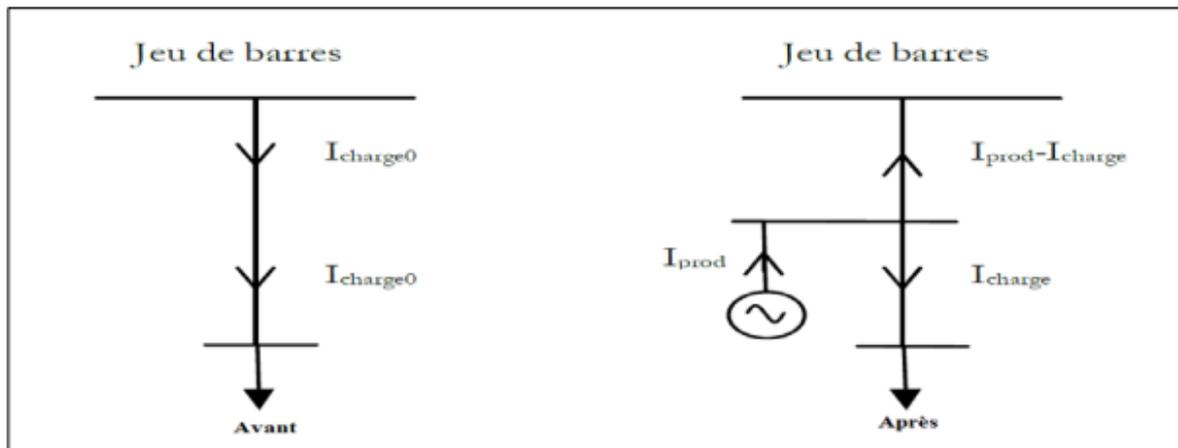


Figure III.10. Courant en régime permanent avant et après insertion DG sur le réseau

#### II.5.1.1. Courants en régime permanent

Suite au raccordement d'un producteur (DG ou pas) sur le réseau, l'intensité du courant en fonctionnement normal parcourant un ou plusieurs éléments du réseau (lignes, câbles) peut augmenter. Il y a donc risque de dépassement des valeurs admissibles pour les différents équipements de réseau. Ceci implique naturellement la première contrainte à respecter qui est de ne pas dépasser ces valeurs admissibles quel que soit la configuration et le point de fonctionnement de la centrale connectée et du système électrique dans lequel elle s'insère.

#### II.5.1.2. Profil de tension

Les changements de puissances actives et réactives dus aux sources (quel que soit leur nature) se répercutent sur le profil de tension en régime permanent selon les caractéristiques du réseau. Des

simulations sont nécessaires pour vérifier que ce profil s'inscrit dans un gabarit prédéfini. En général, le niveau de tension s'élève au point de raccordement d'une installation de production

### **II.5.1.3. Variations de tension**

Les variations de puissance générée, conséquence directe des variations de l'ensoleillement pour les centrales PV, peuvent entraîner des variations lentes de la tension sur le réseau. Dans certains cas (la connexion ou la déconnexion d'une centrale PV enclenchement de transformateur à vide) des sauts de tension peuvent survenir ce qui limite le nombre de génératrices pouvant être connectées à un nœud précis du réseau (cet effet est limité par des dispositifs limiteurs ou des règles d'exploitation spécifiques). [22]

### **II.5.1.4. Emissions d'harmoniques**

Les harmoniques de tension et de courant sont toujours présents dans un réseau de distribution. Ils sont essentiellement provoqués par la présence de charges non linéaires et de convertisseurs de puissance. Ces harmoniques provoquent une surchauffe de l'équipement, un fonctionnement défectueux du système de protection, et des interférences dans les circuits de communication. Les dispositifs d'électronique de puissance utilisés pour optimiser la puissance extraite des unités de production DG présentent l'inconvénient d'être des sources d'harmoniques [22].

### **II.5.1.5. Plan de protection**

Le plan de protection est un système coordonné de protections visant à isoler très rapidement un ouvrage en défaut (ligne, transformateur, jeu de barres, etc.) afin de garantir la sécurité des biens et des personnes. Différents types de relais mesurant différentes grandeurs physiques sont utilisés. Le raccordement de la production d'énergie renouvelable peut entraîner des variations du sens (réseau de production) ou de l'amplitude des courants en régime permanent, des variations des courants de court-circuit, des modifications de la tension, des variations des impédances mesurées, etc. Ces variations peuvent avoir une influence sur le bon fonctionnement du plan de protection avec notamment des aveuglements de protection ou des déclenchements intempestifs [22].

## **II.5.2. Impacts globaux**

La problématique majeure des ER est de deux ordres :

- La variabilité de la production DG du fait des variations de l'énergie primaire qui de plus est non contrôlable (fatale). Les gestionnaires de réseau doivent donc faire face à une production fatale variable pour pallier à ces variations, en particulier pour satisfaire la demande en période de pointe.
- L'incertitude sur cette problématique est plus marquée car les prévisions de vitesse de vent sont moins fiables que celles de l'ensoleillement [22]

### **II.5.2.1. Dispatching**

Cet impact est dû à la variabilité et aux erreurs de prédiction de la production renouvelable. Ces deux aspects influent sur les deux principaux aspects influencés sont : le dispatching, et l'exploitation (durée, charge partielle, arrêts/démarrages) du parc de production. Il est donc important de développer des méthodes pour analyser et intégrer l'impact des ER sur la gestion prévisionnelle du parc de production.

### **II.5.2.2. Capacité de transport**

L'impact de l'intégration des DG sur les capacités de transport dépend de la situation géographique de la production renouvelable par rapport à la demande, de la corrélation entre cette production et la demande et de la puissance du réseau initial. La production d'énergie renouvelable affecte le transit de puissance dans le réseau.

L'analyse des capacités de transport nécessite à la fois des études statiques (calcul de la répartition des flux de puissance) et dynamiques (analyse de stabilité).

### **II.5.2.3. Services système**

Les services systèmes sont nécessaires pour garantir un fonctionnement sûr et fiable du système électrique. Ils sont gérés par les gestionnaires de réseaux sur la base de contributions fournies par les producteurs raccordés. Parmi les services systèmes on peut citer : le réglage de la tension, le réglage de la fréquence, et la reconstitution de réseau. La variabilité, le non contrôlabilité de l'énergie photovoltaïque, et la nature des technologies utilisées limitent grandement la capacité de ces énergies à fournir des services systèmes. A l'heure actuelle les installations utilisant comme source primaire le vent et le soleil, ceci a pour conséquence l'accroissement des sollicitations des autres groupes de production présents.

La capacité du système à garder un niveau de services systèmes suffisant malgré l'intégration des énergies renouvelables sera une des principales limites à l'insertion de ces dernières si elles ne sont pas en mesure de fournir ces services [22].

## **II.6. Conclusion**

Ce chapitre s'est consacré à la présentation les différents types des énergies renouvelables avec une explication brève de leur notion de production d'électricité décentralisée dans les différentes sources, et on a présenté aussi les conditions techniques d'interconnexion et les impacts des énergies renouvelables sur les systèmes électriques.

**Chapitre III. Étude Stabilité des réseaux d'énergies  
électriques**

### **III.1. Introduction**

Depuis le début du XXème siècle, on reconnaît l'étude de la stabilité du réseau électrique comme une problématique importante et elle fait l'objet de sérieuses préoccupations pour les chercheurs [Steinmetz, 1920) – (AIEE, 1926)]. Historiquement, la stabilité transitoire a été le problème de stabilité dominante abordée sur la plupart des réseaux (Kundur et al, 2004) ; mais avec l'accroissement de l'exploitation des réseaux à leurs conditions limites, plusieurs autres formes de stabilité ont émergé : stabilité transitoire de tension, de fréquence, etc...

Une compréhension claire des différents types de stabilité et de la façon dont ils sont liés entre eux s'impose pour une conception satisfaisante d'outils appropriés pour la prédiction de l'instabilité en temps réel. En effet, dans ce travail, on aborde le problème du point de vue de l'instabilité qui est le fait de se retrouver hors de la région de stabilité du réseau.

Dans ce chapitre, on se propose de définir la stabilité de manière globale et dans le cadre spécifique des réseaux électriques tout en identifiant les différents types de stabilité généralement rencontrés sur ces derniers. Par la suite, on aborde les fondements théoriques de la stabilité ainsi que le modèle mathématique utilisé pour son évaluation. Finalement, on relate les différents modes d'opération des réseaux électriques.

### **III.2. Définition de la stabilité d'un Réseau électrique**

La stabilité d'un réseau électrique de HT est une propriété d'un système de puissance qui lui permet de rester dans un état d'équilibre dans des conditions normales de fonctionnement et de retrouver un état acceptable d'équilibre après avoir été soumis à une perturbation [23].

La stabilité d'un système de puissance est la capacité d'un système d'énergie électrique, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de retrouver le même état ou un autre état d'équilibre après avoir subi une perturbation physique, en gardant la plupart des variables du système dans leurs limites, de sorte que le système entier reste pratiquement intact

### **III.3. Classification de la stabilité des réseaux électriques**

La stabilité peut être étudiée en considérant la topologie du réseau sous différents angles. L'état de fonctionnement d'un réseau électrique est décrit selon des grandeurs physiques, telles que l'amplitude et l'angle de phase de la tension à chaque bus, et la puissance active / réactive circulant dans chaque ligne et la vitesse de rotation de la génératrice synchrone. Si elles ne sont pas constantes, le réseau électrique est considéré comme étant en perturbations [24].

La stabilité peut être classifiée selon la nature de la perturbation : stabilité de l'angle du rotor, stabilité de la tension et stabilité de la fréquence. La stabilité peut être classifiée en petite et grande amplitude de perturbation en fonction d'origine et de l'ampleur de la perturbation. Par rapport au temps d'évaluation, la stabilité peut être à court ou à long durée, tel qu'il est décrit dans la figure III.1 [25].

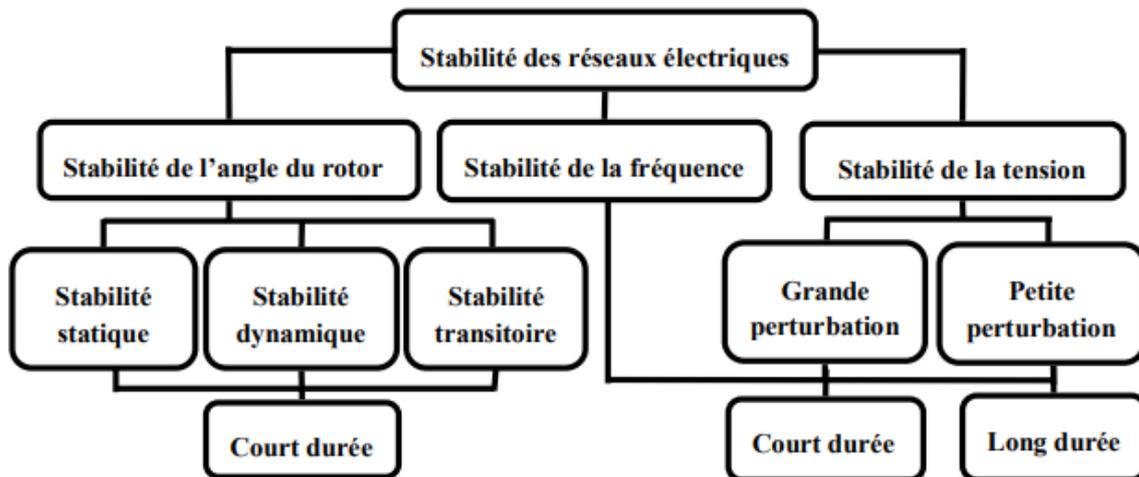


Figure III.1. Classification de la stabilité des réseaux électriques

### III.3.1. Stabilité de tension

La stabilité de tension, par définition, se rapporte à la capacité d'un système de puissance, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de maintenir des valeurs de tensions acceptables à tous les nœuds du système après avoir subi une perturbation. La stabilité de tension dépend donc de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre la demande de la charge et la fourniture de la puissance à la charge. L'instabilité résultante se produit très souvent sous forme de décroissance progressive de tensions à quelques nœuds.

Selon l'amplitude de la perturbation, on distingue la stabilité de tension de petites perturbations et celle de grandes perturbations [26].

Généralement, l'instabilité des tensions se produit lorsqu'une perturbation entraîne une augmentation de puissance réactive demandée au-delà de la puissance réactive possible. Plusieurs changements dans le système de puissance peuvent contribuer à l'instabilité de tension voici quelques exemples :

- Une augmentation de charge.
- Des générateurs, des condensateurs synchrones, ou des SVCS (Statice Var Compensatoire system) qui atteignent les limites de puissance réactive.
- Une tentative d'un régulateur automatique en charge ayant échoué de restaurer la tension de charge à son niveau initial avant la perturbation.
- Une panne de générateur, une perte d'une charge importante ou un déclenchement de ligne.

Enfin, la stabilité de tension peut être classée en deux catégories ; la stabilité de tension aux grandes perturbations et aux petites perturbations

- ❖ Stabilité de tension aux grandes perturbations. Le souci dans ce cas est de maintenir des tensions normales aux nœuds du réseau électrique après une grande perturbation. La stabilité est déterminée ici par les caractéristiques du système et de charge, et par les interactions entre les différents dispositifs de commande de tension dans le système

- ❖ Stabilité de tension aux petites perturbations. Dans ce cas, les caractéristiques de la charge et des dispositifs de commande déterminent la capacité du système à maintenir les tensions équilibrées [27].

### **III.3.2. Stabilité de fréquence**

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système de maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à un important déséquilibre, entre les puissances produite et consommée.

Le maintien de la fréquence à une valeur nominale dans un système de puissance est lié à l'équilibre global entre les puissances actives produites et consommées (y compris les pertes).

Autrement dit, suite à certaines perturbations, l'équilibre global des puissances produite, et consommés peut être déséquilibré : ce déséquilibre entraîne alors une variation de fréquence [27].

### **III.3.3. Stabilité angulaire aux petites perturbations**

Elle concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations comme : une petite variation de la charge ou de génération, manoeuvre d'équipement, etc. L'évaluation de ce type de perturbation prend quelque secondes.

#### **III.3.3.1. Stabilité statique**

En général, à la fin d'un régime transitoire provoqué par une perturbation, le système atteint un régime dit permanent. Dans ce cas, l'étude de la stabilité du système, porte sur l'évaluation de l'état statique du réseau. Le système n'est pas en état de stabilité statique si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées.

Dans cet état, les opérateurs du centre de contrôle ont suffisamment de temps pour ramener le système à l'état stable ou au régime normal en apportant des modifications supplémentaires. Si certaines contraintes d'exploitation ne sont pas respectées, une des parties du réseau se sépare du système, le reste continuant son fonctionnement normal [28] [29].

#### **III.3.3.2. Stabilité Dynamique**

Il arrive que de petites oscillations apparaissent sur les signaux, à cause d'un changement dans la structure du réseau, dans les conditions d'exploitation, dans les systèmes d'excitation ou au niveau des charges. Ces oscillations peuvent aboutir à déstabiliser un alternateur, une partie ou tout le réseau. Dans ce cas, nous pouvons utiliser des modèles linéaires afin de simuler le réseau. Les principaux éléments tels que les machines synchrones, les excitatrices, les systèmes de régulation de vitesse, la turbine et le PSS (Power System Stabiliser) dont les dynamiques ne sont pas négligeables seront pris en compte dans ces modèles [28].

#### **III. 3.3.3. Stabilité transitoire**

Elle concerne la capacité du système de puissance de maintenir le synchronisme après avoir subi une perturbation sévère transitoire tel un court-circuit sur une ligne de transmission ou une perte d'une partie importante de la charge ou de la génération. La réponse du système implique de grandes variations des angles de rotor. Elle dépend de la relation non-linéaire couples- angles [29][30].

Le phénomène de stabilité transitoire concerne les grandes perturbations. On peut citer le court-circuit affectant un élément du réseau, la perte d'ouvrages importants de production ou de

transport,... etc. Les conséquences de ses défauts peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement complet du réseau (black-out) [27].

La stabilité transitoire dépend :

- du type de perturbation.
- De la durée de perturbation.
- Du lieu de perturbation.
- De la performance des systèmes de protection (relais, disjoncteur...).
- Du point de fonctionnement avant défaut.
- ◇ niveau de puissance active.
- ◇ Topologie du réseau.
- ◇ Degré d'excitation des machines.

### **III.4. Position du problème**

La sûreté de fonctionnement ou sécurité d'un réseau peut être définie comme la robustesse de son fonctionnement, sous des conditions d'opérations normales aussi bien que perturbées.

La sécurité couvre ainsi un large éventail de phénomènes que l'on subdivise, généralement en statique, dynamique et transitoire [31].

Il existe deux types de phénomènes transitoires dans les system électrique :

#### **III.4.1. Phénomènes transitoires électromécaniques**

Ce sont des phénomènes lents car ils sont directement liés à l'inertie des machines électriques de production. Leur durée varie de 1 seconde jusqu'à quelques minutes. Ils se manifestent par des oscillations ou des machines asynchrones des alternateurs. Sont principalement dus [27]

- A la variation des grandes charges.
- A une perte de production importante.
- Ouverture de ligne d'interconnexion.
- A la modification de la configuration du réseau suite au fonctionnement des protections sur défaut.

#### **III.4.2. Phénomènes transitoires électromagnétiques**

Ce sont des phénomènes rapides qui durent de quelques millisecondes jusqu'à quelques centaines de secondes. Ils sont indésirables sur le réseau. Leur élimination nécessite l'intervention rapide et sélective des protections électriques. Ils sont principalement dus [27]

- Aux courts circuits de tout type.
- A l'action des régulateurs de tension des alternateurs (désexcitation ou surexcitation).
- A la modification de la configuration du réseau suite au fonctionnement des protections sur défaut etc.
- Enclenchement ou déclenchement de grandes charges

Les conséquences de ses défauts peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement complet du réseau [32][33].

### **III.5. Formes d'instabilité**

Il existe trois formes différentes d'instabilité d'un système de puissance : instabilité de l'angle de rotor, l'instabilité de la tension et l'écroulement de tension, et de l'instabilité à moyen et à long terme des fréquences.

La stabilité de l'angle Rotor est la capacité des machines synchrones interconnectées d'un système de puissance de rester dans le synchronisme. La stabilité de la tension est la capacité d'un système d'alimentation de maintenir des tensions acceptables à tous les bus du système, dans des conditions normales de fonctionnement et après avoir été soumis à une perturbation. Pour que la tension soit stable, les machines synchrones doivent fonctionner en synchronisme.

La stabilité à long terme est associée à des phénomènes plus lents et de plus longue durée qui accompagnent les troubles du système à grande échelle et sur les inadéquations soutenus résultant entre la production et la consommation de puissance active et réactive.

Dans la stabilité à moyen terme, l'accent est mis sur la synchronisation des oscillations de puissance entre les machines, y compris les effets de certains phénomènes plus lents et éventuellement de grandes excursions de fréquence ou de tension élevée.

#### **III.5.1. Causes d'instabilité de tension**

Les problèmes d'apparition du phénomène d'écroulement de tension sont toujours liés à la difficulté de régler la tension au-dessus d'une certaine valeur appelée tension critique.

Généralement, l'écroulement de tension se produit dans les réseaux électriques qui sont fortement chargés, court-circuités et/ou ont un manque de la puissance réactive dans cette situation le réseau électrique ne peut pas assurer la puissance réactive demandée par la charge, ceci est dû à des limitations sur la production et la transmission de la puissance réactive, de telle sorte que, la puissance réactive des générateurs et des systèmes FACTS est limitée par des contraintes physiques.

En plus la puissance réactive générée par des bancs de condensateur est relativement réduite à des tensions basses. La limite sur le transport d'énergie réactive est due principalement aux pertes réactives élevées dans les lignes électriques fortement chargées. Les principales causes de l'instabilité de tension sont présentées dans la section suivante [34].

#### **III.5.2. Production trop éloignée de la consommation**

Dans la plupart du temps les sources d'énergie électrique se trouvent loin des zones de consommation. Cette situation rend le transport de l'énergie réactive très difficile à cause des pertes réactives très élevées. Cette difficulté de transport d'énergie réactive augmente la probabilité d'apparition d'une instabilité ou d'un écroulement de tension [34].

#### **III.5.3. Manque local d'énergie réactive**

L'écroulement de tension est fortement lié au manque de la puissance réactive requise pour maintenir le profil de tension dans une marge de fonctionnement permise. A un certain niveau de charge, le réseau électrique ne satisfait pas la puissance réactive demandée par la charge à cause des limitations sur la production et la transmission de celle-ci. La limitation de production de la puissance réactive inclut les générateurs et les équipements FACTS ainsi que la puissance réactive limitée des condensateurs. La limite de production de la puissance réactive des générateurs est due principalement aux contraintes thermiques exercées sur le bobinage rotorique et statorique. [34].

Sans la limitation thermique, l'instabilité et l'écroulement de tension sont souvent impossibles. Dans le même contexte, les équipements FACTS sont de très grande dimension

### III.6. Buts de la stabilité transitoire

L'objectif le plus important des études de stabilité est de trouver le comportement dynamique des principales variables qui déterminent le fonctionnement des générateurs ainsi que l'angle, la vitesse, le courant, la tension et la puissance. Même, grâce à ces variables, il est possible de déterminer le temps critique d'élimination des perturbations ou la marge de stabilité. Autrement dit, la stabilité vise à répondre à la question suivante : quel est le temps maximum de libération du défaut pour lequel le réseau reste stable [35].

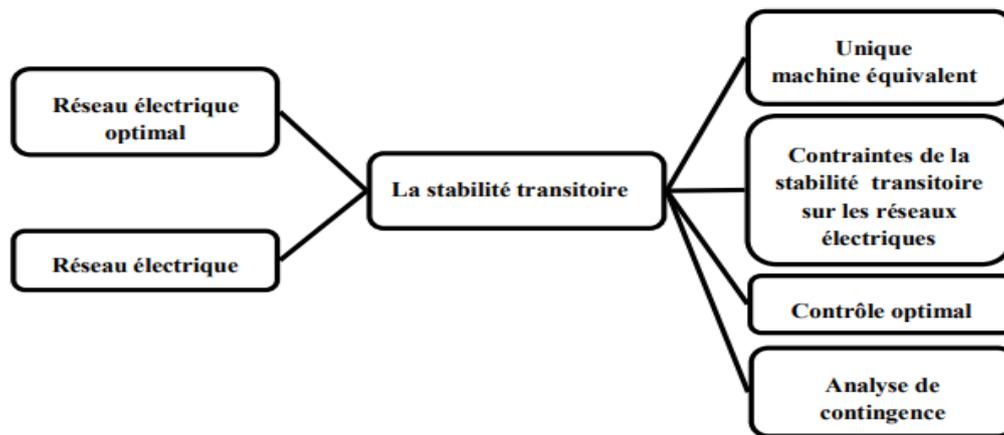


Figure III.2. Les buts de la stabilité transitoire

### III.7. Méthodes d'analyse de la stabilité transitoire

La dynamique de réseau durant la période transitoire est décrite par un système d'équations différentielles de la forme générale suivante [4][36] :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u) \quad (\text{III.1})$$

$x$  : Vecteur des variables d'état du système

$U$  : Vecteur des paramètres du système

La stabilité transitoire concerne l'étude de la dynamique du réseau décrit par l'ensemble des équations différentielles.

Cette étude fournit des informations relatives aux variations dans le temps des angles internes, vitesses rotoriques, tensions, courants et puissances des unités de production ainsi que les variations des tensions, courants et puissances transités dans les branches de transport, avant, pendant et après la perturbation [37].

Cette analyse permet d'une part de juger si le système est en fonctionnement stable ou non et d'autre part de dimensionner les protections censées éliminer le défaut avant d'atteindre le temps critique (plan de défense ou de sauvegarde). Elle aide aussi les planificateurs dans leurs tâches de renforcement des réseaux d'énergie électrique par de nouveaux ouvrages de production, de transport ou des compensateurs.

Les études de la stabilité transitoire ne sont pas essentielles seulement dans les exercices de protection et de planification mais elles sont aussi présentes dans l'établissement des prévisions de charges journalières, des plans de marche et même dans la conduite économique en temps réel (Economic Dispatch ED, Automatic Generation Control AGC...) [38].

On distingue différentes méthodes pour l'analyse de l'état transitoire des systèmes de puissance.

Trois méthodes d'analyses se détachent :

1. Analyse en planification qui tient compte :
  - Du temps de réponse des protections.
  - Du type de conducteurs.
  - Du niveau de tension.
  - De la qualité des régulateurs de tension et de vitesse
2. Analyse en mode préventif, mettant en œuvre :
  - Les méthodes numériques ou indirectes.
  - Les méthodes directes
3. Analyse en mode curatif aboutissant :
  - A la modification de la caractéristique des lignes.
  - Au contrôle de transit de puissance dans les lignes.

Pour avoir l'amélioration de la stabilité transitoire il faut que trois objectifs soient fixes

- L'amélioration du temps critique d'élimination des défauts ou des perturbations.
- L'amortissement des oscillations après la perturbation
- L'amélioration de la capacité de transfert des lignes

### **III.8. Méthodes d'évaluation de la stabilité transitoire**

En raison du retard dans la construction de nouveaux ouvrages (centrales de production, postes de transformation, lignes de transport...etc.), de la dérégulation du marché d'électricité et de l'interconnexion des réseaux électriques, les conducteurs du réseau électrique se retrouvent obligés de faire fonctionner les réseaux électriques près, ou même des fois, à leurs limites de stabilité. Ce qui donne une importance capitale à l'évaluation de la stabilité des réseaux d'énergie électrique en temps réel.

Une variété d'approches permettant l'évaluation de la stabilité des réseaux d'énergie électrique a été proposée dans la littérature. Elles peuvent être classées en quatre catégories distinctes [39] [40] :

- a. Méthodes indirectes d'intégration numérique.
- b. Méthodes directes énergétiques.
- c. Méthodes directes d'apprentissage automatique.
- d. Méthodes hybrides

## III.9. Modélisation de la machine synchrone (Modèle à deux axes)

### III.9.1. Hypothèses du modèle

Pour l'analyse dynamique des réseaux électriques, on a besoin de modéliser les unités de génération de type machine synchrone dont le modèle détaillé sera brièvement présenté. On admet dans ce qui suit les hypothèses suivantes :

- La saturation est négligée, il en résulte que les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements.
- On ne tient pas compte de l'hystérésis et des courants de Foucault dans les parties magnétiques.
- Les forces électromotrices correspondant aux enroulements du stator sont à répartition spatiale sinusoïdale.
- L'effet de la variation de la vitesse est négligé. Cette simplification est basée sur l'idée que la vitesse  $\omega r$  en (pu) égale à 1.0. Cela ne signifie pas que la vitesse est constante mais que les variations de celle-ci sont très petites et n'ont aucun effet sur la tension au stator [41].

### III.9.2. Transformation de Park

Considérons les trois phases du stator comme génératrices du courant et l'enroulement inducteur comme récepteur. Lorsque la saturation des circuits magnétiques est négligée, l'application de la loi d'Ohm à chacun des six enroulements de la conduit aux équations suivantes : pour les trois phases du stator [42] :

$$V_a = -r_a i_a - \frac{d\Psi_a}{dt} \quad (III.1)$$

$$V_b = -r_b i_b - \frac{d\Psi_b}{dt} \quad (III.2)$$

$$V_c = r_c i_c - \frac{d\Psi_c}{dt} \quad (III.3)$$

Pour les circuits du rotor :

$$V_f = r_f i_f - \frac{d\Psi_f}{dt} \quad (III.4)$$

$$0 = r_{1d} i_{1d} + \frac{d\Psi_{1d}}{dt} \quad (III.5)$$

$$0 = r_{1q} i_{1q} + \frac{d\Psi_{1q}}{dt} \quad (III.6)$$

$$0 = r_{2q} i_{2q} + \frac{d\Psi_{2q}}{dt} \quad (III.7)$$

Avec :

$V_k$ : Tension aux bornes de l'enroulement k ( $k = \{a, b, c, f, 1d, 1q, 2q\}$ ) ;

$\Psi_k$  : Flux dans l'enroulement k ;

$i_k$ : Courant dans l'enroulement k ;

$r_k$  : Résistance dans l'enroulement k.

La transformation de Park (décomposition selon les deux axes d et q) peut s'interpréter comme la substitution aux trois enroulements de phase (a, b, c), immobiles par rapport au stator, de deux

enroulements d et q tournant à la même vitesse que le rotor, ayant pour axes magnétiques respectivement l'axe direct et l'axe en quadrature.

La matrice de transformation de Park s'écrit

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Le schéma équivalent de la machine synchrone est représenté sur la Figure III.3 suivante

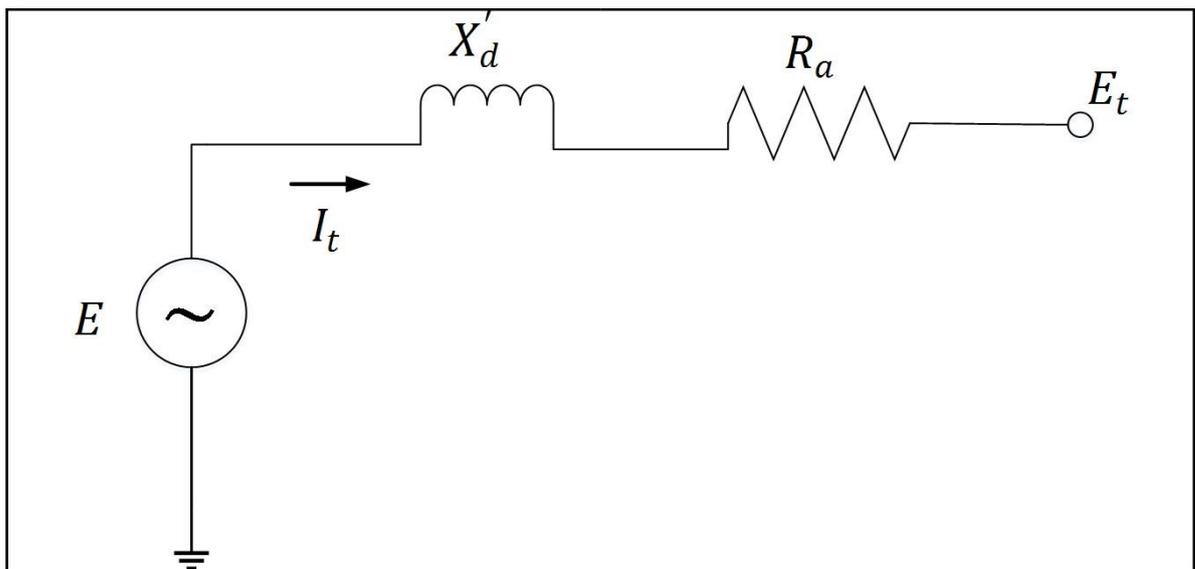


Figure IV.3. Schéma équivalent de la machine synchrone

### III.10. Calcul d'écoulement de puissance

L'analyse de la répartition des puissances dans un réseau électrique composé de plusieurs nombres de générateurs, lignes de transmission et des charges est très importante pour les études, la planification et l'exploitation d'un réseau électrique. Cela permet de connaître les conditions de production et de charge et les niveaux des tensions du réseau.

Les calculs permettant d'obtenir ces informations sont connus sous le nom (écoulement des puissances ou encore power flow) [44].

#### III.10.1. Méthodes itérative de l'écoulement de puissance

La résolution du problème de l'écoulement de puissance est basée sur un processus itératif. On utilise des valeurs estimées des tensions des jeux de barres pour calculer un ensemble de nouvelles valeurs, qui sont fonctions des valeurs estimées des tensions, des puissances actives et réactives spécifiées et des admittances du réseau. Chaque fois qu'un ensemble des valeurs de tensions est obtenue, le nombre d'itérations augmente d'une unité.

Depuis longtemps plusieurs méthodes ont été proposées par différents chercheurs pour la résolution des systèmes d'équations modélisant le fonctionnement en régime permanent du Système

électrique. Pour calculer les tensions des jeux de barres des réseaux électriques on utilise l'une des méthodes suivantes :

1. La méthode de Gauss.
2. La méthode de Gauss-Seidel.
3. La méthode de Newton Raphson. [44][45].

### III.10.2. Equation du réseau électrique

L'équation décrivant les relations entre courants et tensions aux jeux de barres est donné par [46] :

$$I_{bus} = Y_{bus} * V_{bus} \quad (III.10)$$

Ou :

$V_{bus}$  : Vecteur des tensions des jeux de barres.

$$V_{bus} = \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ \cdot \\ \cdot \\ Vn \end{bmatrix} \quad (III.11)$$

Ou :

$I_{bus}$  : Vecteur des courants des jeux de barres

$$I_{bus} = \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ \cdot \\ \cdot \\ In \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

Ou :

$Y_{bus}$  : La matrice admittance du réseau électrique donnée par :

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n y1i & -y12 & \dots & -y1n \\ -y21 & \sum_{i=0}^n y2i & \dots & -y2n \\ yn1 & -yn2 & \dots & \sum_{i=0}^n yni \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

La matrice  $Y_{bus}$  présente les propriétés suivantes :

1.  $Z_{bus}$  Matrice carrée d'ordre n.
2. Matrice symétrique  $Y_{bus}(i, j) = Y_{bus}(j, i)$
3. Matrice complexe
4. Chaque élément  $Y_{bus}(i, k)$  en dehors de la diagonale est l'opposé de l'admittance de la branche  $Y_{ij}(j, i)$  entre les nœuds i et k
5. Chaque élément de la diagonale  $Y_{bus}(k, k)$  est la somme des admittances de toutes les branches liées au jeu de barres k

### III.10.2.1. GAUSS-SEIDEL

La méthode de GAUSS-SEIDEL est l'une de plus simples méthodes itératives utilisées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance [48].

On désigne comme accès bileux le jeu de barre1 .donc les calculs commenceront pour le jeu de barre2.

La puissance injecte dans chaque nœud :

$$S_2 = V_2 I_2^* = P_2 + jQ_2 \quad (III.14)$$

$$I_2^* = \frac{P_2 + jQ_2}{V_2} \quad (III.15)$$

$$I_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} \quad (III.16)$$

En faisant intervenir les éléments de la matrice admittance on aura

$$I = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \quad (III.17)$$

D'où on tire la tension au jeu de barre2 :

$$V_2 = \frac{1}{Y_{22}} \left[ \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} - Y_{21}V_1 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \right] \quad (III.18)$$

### III.10.2.2. Méthode de Newton-Raphson

Cette méthode est base sur l'expansion du développement en série de TAYLOR. L'étude de cette méthode commencera avec la résolution d'un problème de deux équations avec deux variables. L'intégration de cette méthode dans le problème de l'écoulement de puissance est comme suit :

Les tensions des jeux de barres et les admittances des lignes sont exprimées sous forme polaire

$$\bar{V}_i = |V_i| \angle \phi_i \quad (III.19)$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} \quad (III.19)$$

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j = \sum_{j=1}^n \bar{V}_i^k V_j Y_{ij} \angle (\theta_{ij} + \phi_j - \phi_i) \quad (III.20)$$

Donc :

$$P_i = \sum_{j=1}^n \bar{V}_i^k V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \phi_i - \phi_j) \quad (III.21)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n \bar{V}_i^k V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \phi_j - \phi_i) \quad (III.22)$$

Comme dans la méthode de GAUSS-SEIDEL, le jeu de barres de référence ne sera pas considère puisque le module et l'angle de la tension au niveau de ce jeu de barres sont spécifiés.  $P$  et  $Q$  sont spécifiés pour tous les jeux de barres sauf le swing bus elles correspondent au vecteur  $K$  à partir des équations précédentes.

$$P_i = \sum_{j=1}^n \bar{V}_i \bar{V}_j \bar{Y}_{ij} \cos(\theta_{ij} + \phi_j - \phi_i) \quad (III.23)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n \bar{V}_i \bar{V}_j \bar{Y}_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (III.24)$$

## III.11. Méthodes d'amélioration de la stabilité transitoire

Il est évident qu'il est souhaitable qu'un système d'alimentation puisse supporter autant de perturbations que possible sans devenir instable. Cependant, on se rend compte qu'il n'est pas

possible de concevoir un système capable de faire face à toutes les éventualités imaginables, il faut donc limiter les perturbations considérées dans la conception du système. Habituellement, on ne considère que les défauts les plus fréquents dans le système. Il est également important de prendre en compte les conséquences d'un défaut ou d'une perturbation lors de la conception d'un système.[46].

#### **III.11.1. Augmentation de la constante d'inertie des générateurs**

Cela rend les rotors plus difficiles à accélérer en présence d'un défaut ou d'une perturbation quelconque et le risque de perdre le synchronisme est réduit. Dans la plupart des cas, ceci est un moyen très coûteux et seulement dans des cas spéciaux, il peut être appliqué, par exemple en installant un volant d'inertie sur une petite unité hydroélectrique.[46].

#### **III.11.2. Augmentation de la tension du système**

Ceci augmente  $P_e$  maximale et pour une puissance mécanique donnée  $P_m$  la marge de stabilité est augmentée.

#### **III.11.3. Réduction de la réactance de transfert $X_L$**

Cela augmentera également  $P_e$ , max comme dans le cas précédent. Ceci peut être réalisé en construisant des lignes parallèles, ou en installant des condensateurs en série sur des lignes existantes ou de nouvelles lignes. En installant des condensateurs en série, la réactance effective de la ligne est réduite. (Cette méthode a été largement utilisée au cours des années, par exemple dans le système suédois).

Des lignes parallèles supplémentaires augmentent la capacité de transfert de puissance. La réduction des réactances du système augmente également la capacité de transfert de puissance [47].

#### **III.11.4. Installation de protections rapides et de disjoncteurs rapides**

De cette façon, le temps d'existence de défaut peut être réduit et par conséquent le temps d'accélération des rotors des générateurs est réduit. La capacité du système d'amortir les oscillations du rotor est renforcée.

#### **III.11.5. Implémentation des valves rapides des turbines à vapeur**

Par un contrôle rapide de la puissance mécanique pendant et après un défaut ou perturbation, l'accélération des rotors peut être diminuée ou augmenté selon les cas. Il ne peut pas être appliqué aux centrales nucléaires pour des raisons de sécurité. La méthode n'a pas été utilisée dans une plus grande mesure, car elle prétend imposer des contraintes thermiques et mécaniques importantes sur les vannes, les turbines.

### **III.12. Moyens d'amélioration de la stabilité transitoire**

En vue de son importance dans la planification, la conception et l'exploitation des réseaux d'énergie électrique, l'amélioration de la stabilité transitoire reste un défi majeur pour les ingénieurs pour éviter tout événement qui peut conduire vers un black-out

La compensation est une technique de la gestion d'énergie réactive afin d'améliorer la qualité énergétique dans les réseaux électriques à courant alternatif.

Elle peut se réaliser de plusieurs manières, ayant pour buts [48].

- La correction du facteur de puissance.
- Amélioration de la régulation de la tension.
- Equilibre des charges.
- L'aide au retour à la stabilité en cas de perturbation

### **III.12.1. Amélioration par les moyens classiques**

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissances indésirables entre les zones interconnectées, subissent des surcharges de ligne, des problèmes de stabilité et un accroissement des pertes.

Les moyens classiques de contrôle des réseaux sont :

- Les transformateurs avec prises réglables en charge ;
- Les transformateurs déphaseurs ;
- Les compensateurs séries ou parallèles commutés par disjoncteurs ;
- Modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs pourraient s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau [48].

Les variations rapides de la tension causées par les variations de la puissance réactive, peuvent changer la puissance active demandée et causer des oscillations de puissances. Pour remédier à ces problèmes, plusieurs solutions ont été adoptées [49].

- Les batteries de condensateurs ;
- Le compensateur synchrone

#### **III.12.1.1. Compensateur synchrone**

Les compensateurs synchrones sont eux aussi des alternateurs synchrones connectés au réseau, mais ils ne sont pas entraînés par une turbine et ne fournissent donc pas de puissance active.

Les compensateurs synchrones situés à des points stratégiques dans un système d'alimentation peuvent ainsi constituer une source de puissance réactive précieuse.

Pour répondre aux demandes variées de la charge et aux exigences pour la transmission de puissance dans un système à tension constante. [50].

#### **III.12.1.2. Compensateurs statiques**

Les compensateurs statiques sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances :

Les bancs de condensateurs sont des dispositifs statiques de compensation de puissance réactive les plus économiques des systèmes électriques.

Leur connexion sur le réseau permet d'injecter de la puissance réactive [50].

Ils sont installés et contrôlés par des opérateurs de système locaux. Les opérateurs installent ces banques dans des emplacements spécifiques pour fournir la quantité requise de puissance réactive au système local.

Ils peuvent réduire les pertes d'énergie, améliorer le profil de tension, corriger le facteur de puissance et augmenter la capacité de transmission de puissance du système [50][51].

### **III.12.1.3. Stabilisateur du système de puissance (PSS)**

Les PSS ont été largement utilisés comme système de contrôle supplémentaire, qui est souvent appliqué dans le cadre du système d'excitation du générateur. Le PSS destiné à fournir un amortissement d'oscillation des rotors de la machine synchrone à travers le système d'excitation du générateur et améliorer la performance de stabilité du système. Ainsi on peut réduire les problèmes liés à l'oscillation locale et interzone en générant des signaux de commande de tension supplémentaires fournis à l'entrée du système d'excitation. Cet amortissement est assuré par un couple électrique appliqué au rotor en phase avec la variation de vitesse [52] [53].

### **III.12.2. Amélioration par les moyens modernes (FACTS)**

Comme nous avons mentionné dans le troisième chapitre qui aborde les différents types dispositifs FACTS utilisés dans la littérature. C'est une technologie plus prometteuse qui offre une solution viable à ces exigences. Il est Basé sur l'utilisation de l'électronique de puissance et permet aux opérateurs de réseau électrique de contrôler de manière optimale le réseau, tant en régime permanent qu'en cas de perturbations. Ces systèmes capables de générer et d'absorber une quantité contrôlable de puissance réactive afin de modifier et réguler les grandeurs du réseau telles que la tension au point de couplage commun ou le flux de courant et de puissance sur une ligne de transmission.

Les avantages offerts par les dispositifs FACTS sont doubles : ils sont capables d'augmenter le transfert de puissance sur les lignes de transmission et peuvent rendre ces transferts de puissance entièrement contrôlables. La dernière décennie a été marquée par un grand intérêt pour la conception et l'application des dispositifs FACTS, issus à la fois de la recherche académique et industrielle [54].

## **III.13. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présente la définition et les caractéristiques des différents types de stabilité d'un système de puissance, et puis nous avons aussi présente les différentes causes d'instabilité, et les différent méthodes qui lié à l'étude de la stabilité transitoire et la stabilité de la tension et les méthodes d'écoulement de puissance, A la fin on a donné les moyens d'amélioration de la stabilité.

## **Chapitre IV. Simulation de l'intermittence de la production des DG**

## IV.1. Introduction

Les systèmes électriques (centrales de production transformateurs les lignes .exact) sont réalisés avec un objectif d'atteindre une bonne stabilité et une bonne continuité de service.

Les taches d'un réseau de transport d'électricité peuvent être affectées au cours de leur fonctionnement par un nombre de perturbation de natures différentes.

Dans ce chapitre portera une étude sur un réseau de transport de 16 JDB. Pour étudier l'effet de volatilité de la production distribués(PG) on va étudier le réseau d'abord sans intégration de la production distribuée (PG) ensuite et sera simulé avec l'intégration des sources des énergies renouvelable (photovoltaïque au éolien) avec une diminution de 25%,50%,75% et on termine avec une augmentation de 25% ,50%,75%.

La simulation est réalisée sur sous le logiciel PSAT ajouté au toolbox de matlab.

## IV.2. Logiciel de simulation utilisé PSAT

### IV.2.1. But de simulation PSAT

PSAT (Power System Analysis Toolbox), est un logiciel développé sous Matlab par Dr. Federico Milano pour l'analyse de tous les systèmes des réseaux électriques.

Il peut effectuer les fonctions statiques et dynamiques suivantes :

- Calcul d'écoulement de puissance PF (Power Flow).
- Calcul d'écoulement de puissance Optimal OPF (Optimal Power Flow).
- Calcul d'écoulement de puissance continu CPF (Continuation Power Flow)
- Analyse de la stabilité de petites perturbations SSSA (Small Signal Stability Analysis).
- Simulation temporelle TD (Time Domaine).

L'analyse des problèmes de PF, OPF, CPF, SSSA et TD s'effectue dans une page de commande comme montre la figure (IV.1).

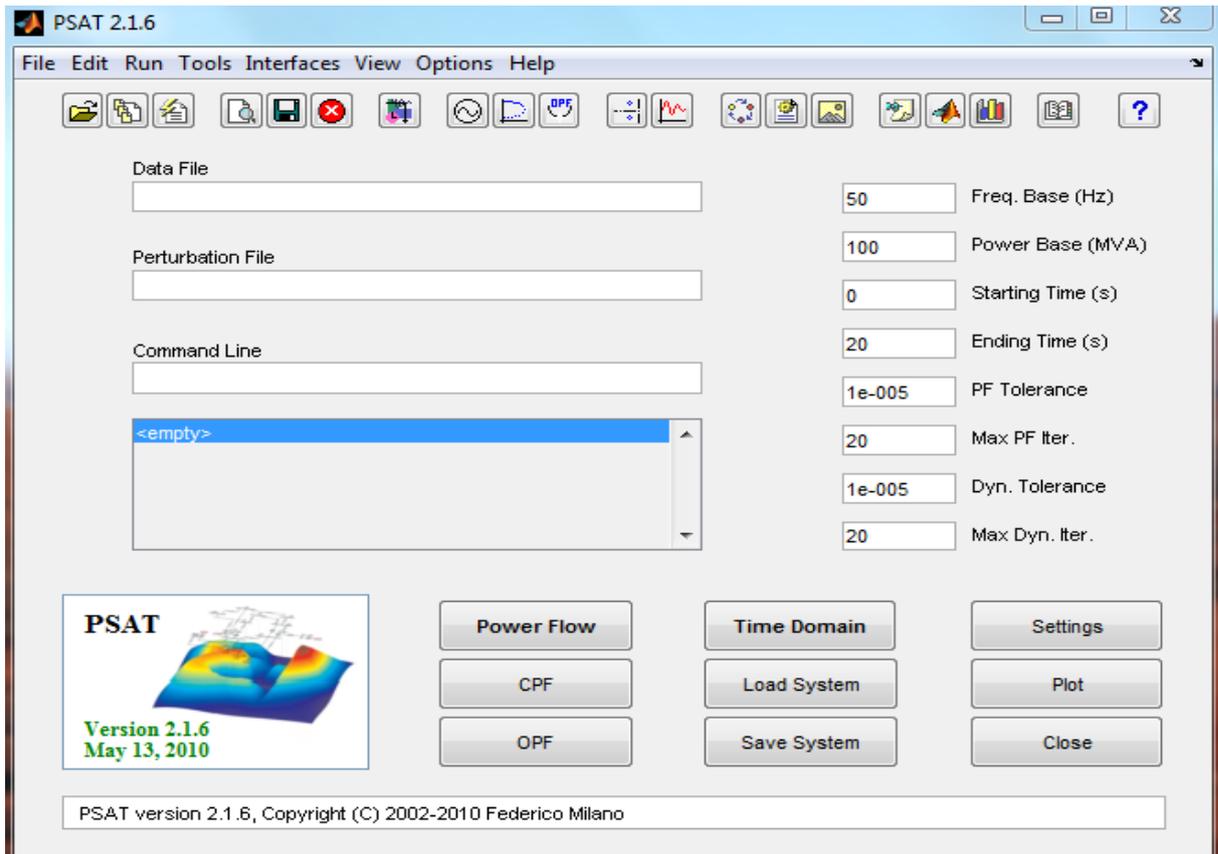


Figure V.1. Page de commande

#### IV.2.2. Bibliothèque de SIMULINK

La première étape est d'implanter le réseau à étudier en utilisant une bibliothèque contenant les modèle d'élément de base pour du système électrique (figure IV.2).



Figure V.2. Bibliothèque Simulink (Simulink Library)

### IV.2.3. Fonctionnement de PSAT

Les étapes de fonctionnement de PSAT sont :

- Ouvrir un nouveau fichier.
- Créer le réseau électrique qu'on doit étudier
- Ouvrir la bibliothèque Simulink.
- Introduire les données numériques des éléments (générateurs, lignes, transfos, machine, FACTS, les charge).
- Exécuter l'écoulement de puissances.

### IV.3. Simulation d'un réseau de 16 jeu de barre

Dans cette partie on va simuler sur PSAT l'impact de l'intégration et l'intermittence de la production distribué sur un réseau électrique. Le réseau bouclé de 16JDB représenté par la figure IV.3 est après comme exemple. Le logiciel PSAT permet d'évaluer les niveaux de tension des JDB et l'impact de vitalités du réseau.

On a 3 cas à étudier :

Cas N°1 : -Fonctionnement sans intégration de PG.

Cas N°2 : -Intégration au réseau de la DG sans intermittence.

CasN°3 : -Intégration de la DG au réseau avec diminution de (0%,25%,50%et75%) de production distribué.

Cas N°4 :-Intégration de la DG au réseau avec L'augmentation (25%,50%,75%) de la production distribué.

### IV.4. Présentation de réseau et données

Les caractéristiques du réseau de transporte de 16 JdB sont données comme suit :

Réseau bouclé

❖ Nombre de jeux de barres =16

Nombre de branches =15

Accès bilan =1

Accès générateurs =1

Accès DG =1

Tension de base =230 kV

Puissance de base = 100 MVA

Les charges totales que doit satisfaire le réseau est de 8.7pu

%	Bus	p <sub>busa</sub>	S <sub>ra</sub>	v	f	R	L	X	Imax, Pmax and Smax [p.u., p.u., p.u.]			
Line.con = [	1	2	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25;
	2	3	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25;
	3	4	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25;
	4	5	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25;
	5	6	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25;
	6	7	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25;

7	8	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25;
8	9	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25 ;
9	10	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25 ;
10	11	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25 ;
11	12	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25 ;
12	13	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25 ;
13	14	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25 ;
14	1	100	230	50	0.0063	0.049	0.103	6.	00	0.0	6.25 ;

% bus p |v| v(pu) Qmax Qmin vmax vmin  
 SW.con = [ 1 100 230 1.02 2.4 -01.1 1.05 0.95 ];

% bus p |v| v(pu) pa Qmax Qmin vmax vmin  
 PV.con = [ 7 100 230 1.056 1.5 0.2 -0.5 1.05 0.95 ;  
 13 100 230 1.014 1.6 0.2 -0.5 1.05 0.95

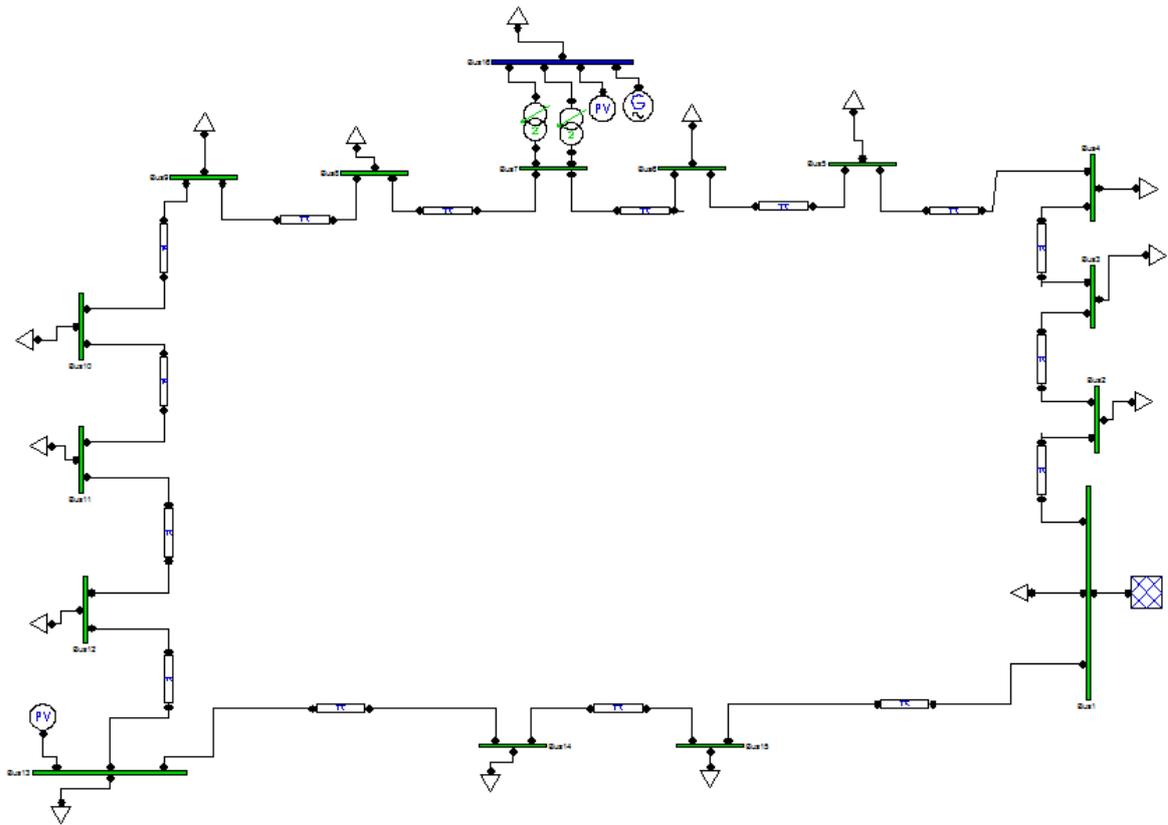


Figure V.3. Schéma du réseau de transport

## IV.5. Résultat et interprétation de la simulation

### IV.5.1. Etude du réseau test sans intégration de DG

Après la création du réseau bouclé et de 16 JDB, on a fait les simulations suivantes :

On a d'abord effectué le calcul d'écoulement de puissance (PF) du réseau en prenant en compte son état actuel sans intégration de DG. L'écoulement de puissance obtenu par PF donne le bilan de puissance et le profil des tensions des JDB représenté par la figure IV.4.

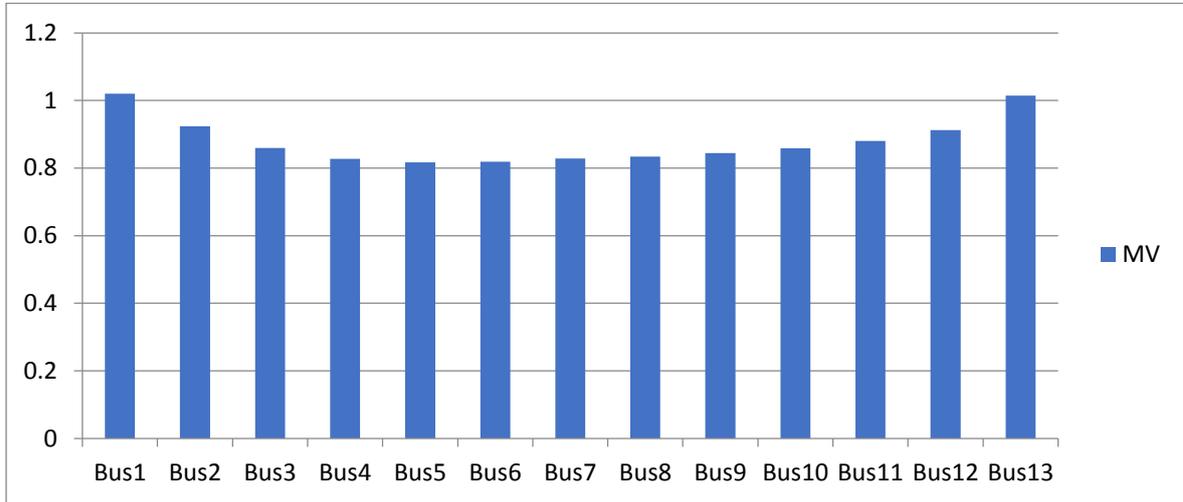


Figure V.4. Profile de tension ou niveau des JDB sans l'intégration de la DG

### IV.5.2. Intégration au réseau de la DG sans intermittence

Après intégration de la DG au JdB 16 relié par des transformateur au JdB 7 dans les conditions normale d'utilisation, le profile des tensions des JdB est amélioré, les tensions des JdB voisin du JdB 7 augmentent et se rapproche de 1pu comme le montre la figure IV.5.

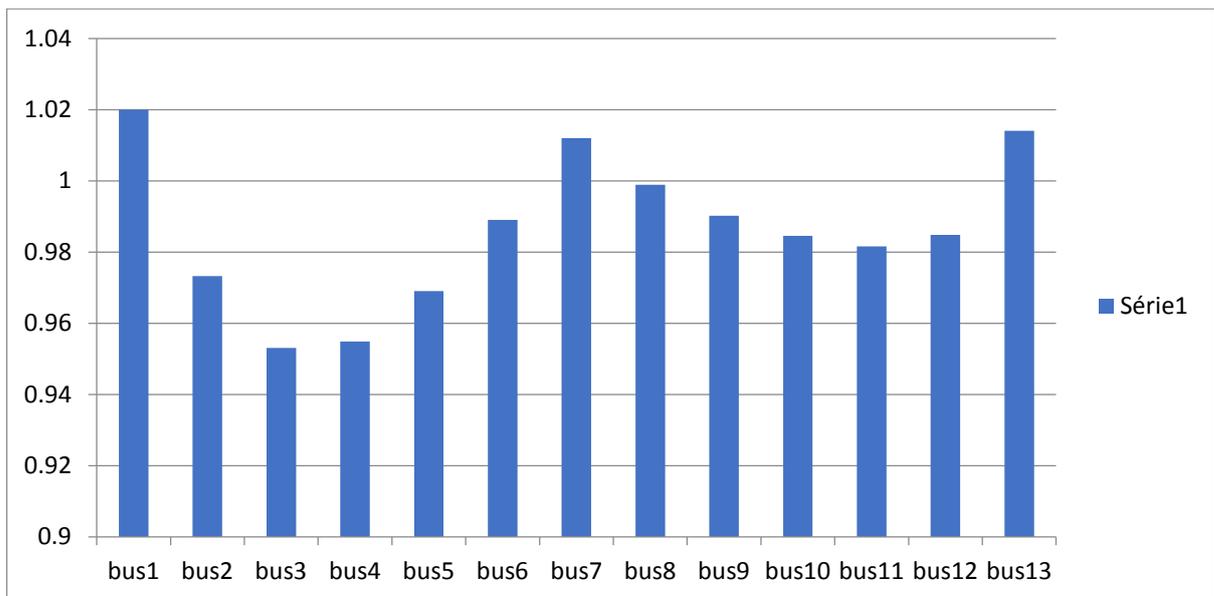
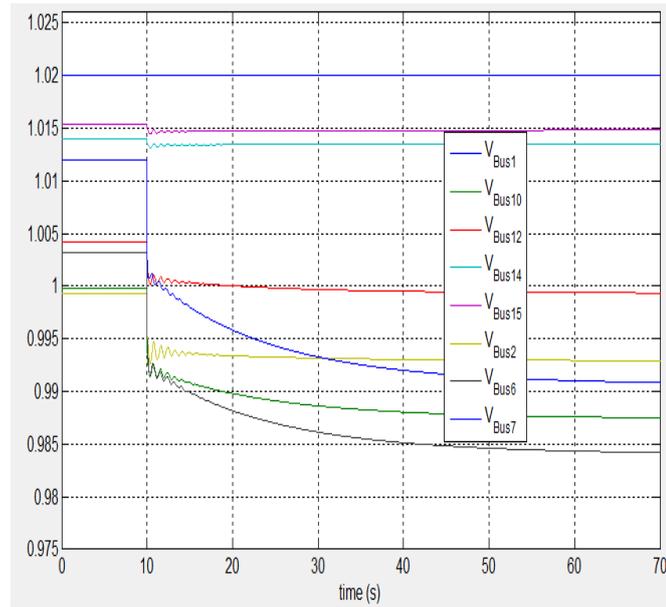


Figure V.5. Profile de tension ou niveau de chaque JDB après l'intégration de la DG sans intermittence.

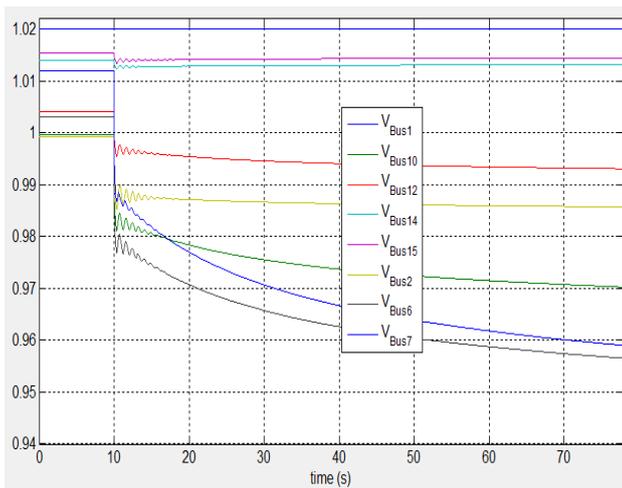
### **IV.5.3. Intégration de la DG au réseau avec diminution de 25%, 50% et de 75% de sa production**

Après avoir inséré la DG au niveau de JDB 7, on a simulé notre réseau en supposant des conditions climatiques imprévues conduisant à des diminutions de la production de la DG de 25%, 50% et de 75%.

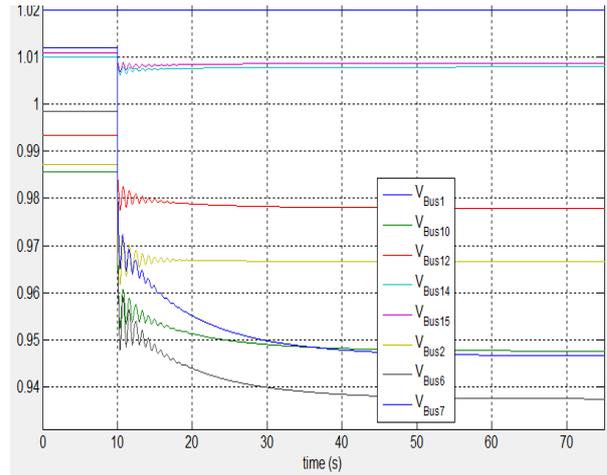
L'étude du réseau par "TD" simulé sur PSAT avec une diminution de la production de la DG de 25%, 50% puis de 75%, donne le régime transitoire des tensions au JDB représenté par la figure IV.6.



a) Diminution de 25% de la production



b) Diminution de 50% de la production



c) Diminution de 50% de la production

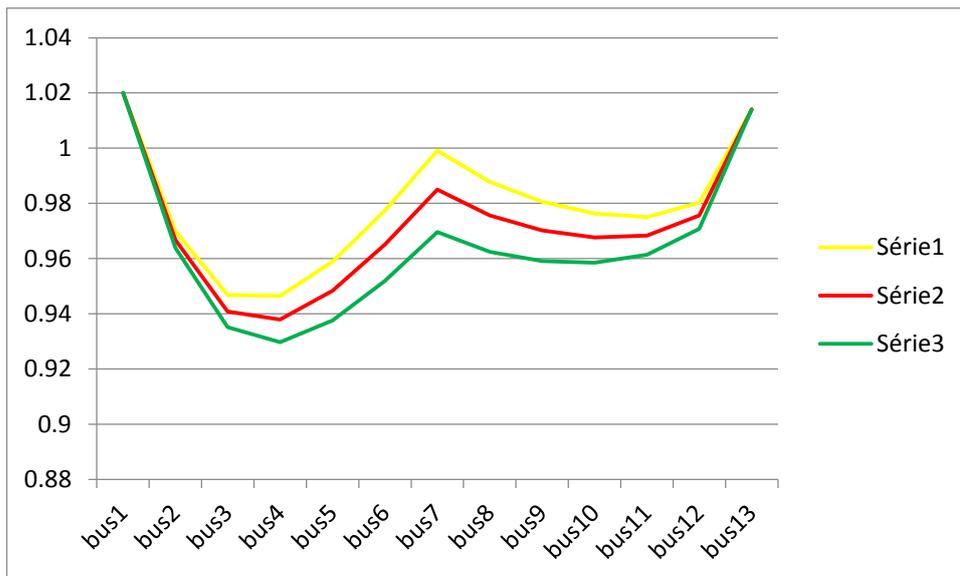
**Figure V.6.** Evolution des tensions des jdb suite à une diminution de la production de la DG.

Les tensions de JDB du réseau, obtenues en régime établi après la diminution de la production de la DG de 0%, 25%, 50% et de 75%, sont données dans le tableau IV.1.

L'évolution de la tension du JdB 1 jusqu'à 13 en régime établi avant et après la diminution de la production de la DG de 0%, 25%, 50% et de 75%, sont représentées sur la figure IV.7

**Tableau V-1** Les tensions des JdB sans intermittence et avec la diminution de la production de la DG de 25%,50% et de 75%

JdB	diminution de la production de la DG			
	0%	25%	50%	75%
bus1	1,02	1,02	1,02	1,02
bus2	0,9732	0,9699	0,9667	0,9639
bus3	0,9531	0,9469	0,9409	0,9352
bus4	0,9549	0,9465	0,938	0,9297
bus5	0,969	0,9589	0,9484	0,9376
bus6	0,989	0,9774	0,9651	0,952
bus7	1,012	0,9991	0,985	0,9697
bus8	0,9989	0,9878	0,9756	0,9625
bus9	0,9902	0,9806	0,9702	0,9591
bus10	0,9845	0,9763	0,9677	0,9586
bus11	0,9816	0,9751	0,9684	0,9614
bus12	0,9848	0,9803	0,9756	0,9708
bus13	1,014	1,014	1,014	1,014
bus14	1,0106	1,0104	1,0104	1,0103
bus15	1,0116	1,0114	1,0113	1,0113

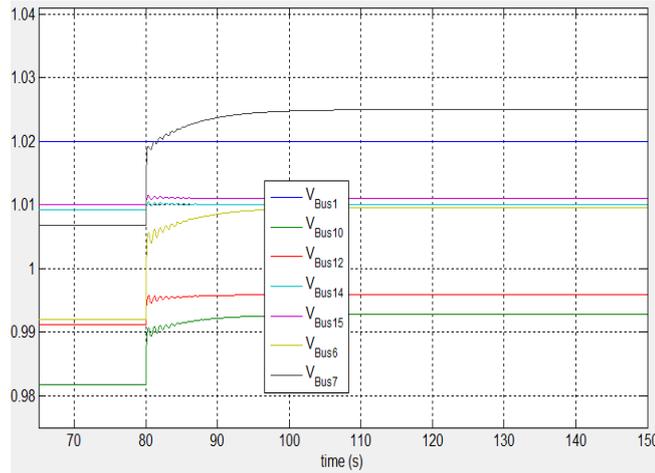


**Figure V.7.** Profil des tensions aux JdB avec diminution de la production de la DG de 25, 50 et de 75%.

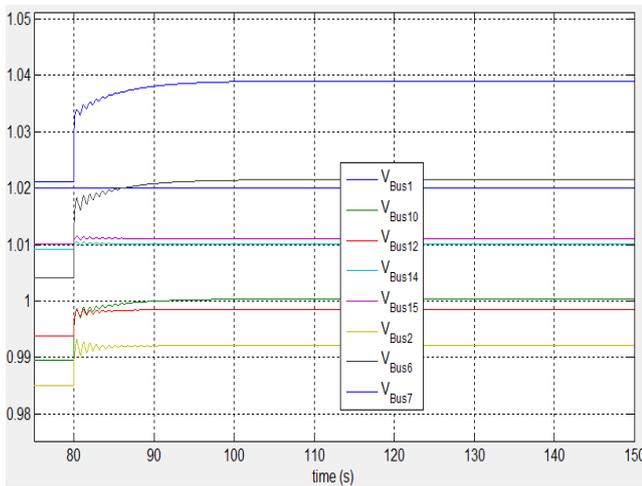
#### IV.5.4. Intégration de la DG au réseau avec augmentation de (25%,50%,et de 75%) de production distribué

On a simulé le réseau en supposant des conditions climatiques imprévues conduisant à une augmentation de la production de la DG de 25%, de 50% et de 75%

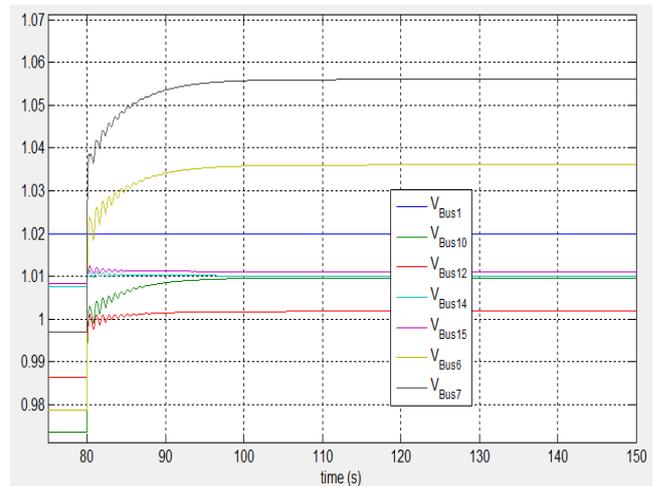
L'étude du réseau par Time Domaine "TD" donne l'évolution transitoire des tensions des différents JdB dû à l'augmentation de la production de la DG de 25%, 50% et de 75%, représentée par les figures IV.8.a, b et c respectivement.



a) Augmentation de 25% de la production



b) Augmentation de 50% de la production



c) Augmentation de 75% de la production

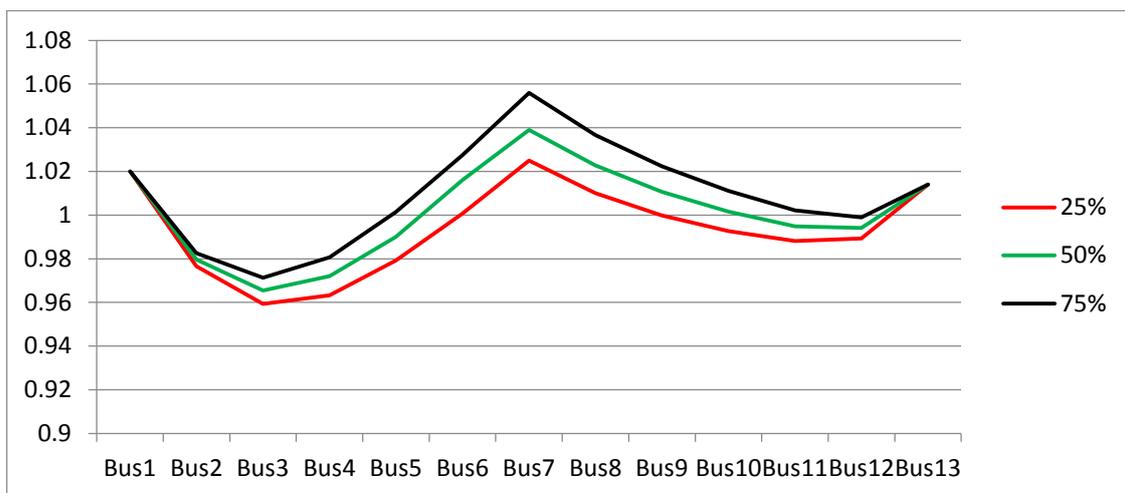
Figure V.8. Evolution des tensions des jdb suite à une augmentation de la production de la DG.

Les tensions de JDB du réseau, obtenues en régime établi avec intégration de la DG sans intermittence et après l'augmentation de la production de la DG de 0%, 25%, 50% et de 75%, sont données dans le tableau IV.2.

L'évolution de la tension du JdB 1 jusqu'à 13 en régime établi avant et après l'augmentation de la production de la DG de 25%, 50% et de 75%, sont représentées sur la figure IV.9

**Tableau V-2.** Tensions des JDB sans intermittence et avec l'augmentation de la DG de 25%, de 50% et de 75%

Bus/pourcentage%	0%	25%	50%	75%
bus1	1,02	1,02	1,02	1,02
bus2	0,9732	0,9765	0,9797	0,9826
bus3	0,9531	0,9593	0,9654	0,9713
bus4	0,9549	0,9633	0,9721	0,9807
bus5	0,969	0,9792	0,99004	1,0014
bus6	0,989	1,00073	1,0161	1,0274
bus7	1,012	1,025	1,039	1,056
bus8	0,9989	1,0101	1,0227	1,03667
bus9	0,9902	0,9998	1,0106	1,0223
bus10	0,9845	0,9927	1,0016	1,0111
bus11	0,9816	0,9881	0,9949	1,0022
bus12	0,9848	0,9893	0,99408	0,999
bus13	1,014	1,014	1,014	1,014
bus14	1,0106	1,0108	1,0108	1,0109
bus15	1,0116	1,0118	1,0119	1,0119



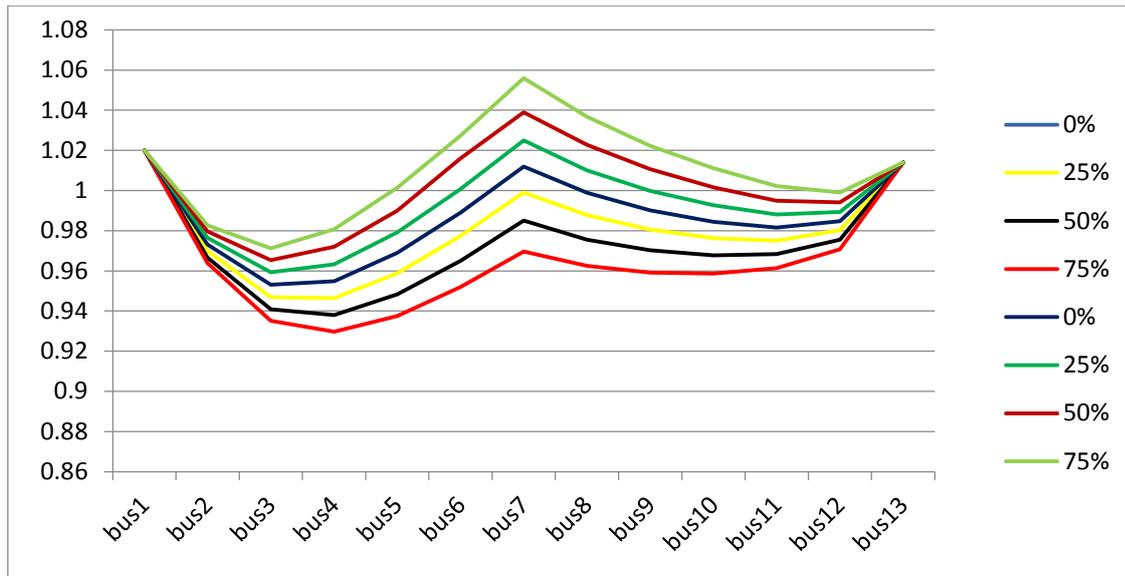
**Figure V.9.** Profil de la tension aux JdB après une augmentation la production de la DG de 0%, 25%, 50% et de 75%

#### IV.5.5. Comparaison des résultats et interprétation

Les tensions de JDB avant l'intégration de la DG sans intermittence d'abord, ensuite avec diminution de 25%, 50% et 75% de la production et enfin avec une augmentation de 25%, 50%, et de 75% sont portées dans le tableau IV.3 et représentées sur la figure IV.10.

Tableau V.3. Tension en pu suite à une diminution et une augmentation de 0, 25, 50 et 75%

	diminution				augmentation			
	0%	25%	50%	75%	0%	25%	50%	75%
bus1	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
bus2	0,9732	0,9699	0,9667	0,964	0,9732	0,9765	0,9797	0,9826
bus3	0,9531	0,9469	0,9409	0,935	0,9531	0,9593	0,9654	0,9713
bus4	0,9549	0,9465	0,938	0,93	0,9549	0,9633	0,9721	0,9807
bus5	0,969	0,9589	0,9484	0,938	0,969	0,9792	0,99004	1,0014
bus6	0,989	0,9774	0,9651	0,952	0,989	1,00073	1,0161	1,0274
bus7	1,012	0,9991	0,985	0,97	1,012	1,025	1,039	1,056
bus8	0,9989	0,9878	0,9756	0,963	0,9989	1,0101	1,0227	1,03667
bus9	0,9902	0,9806	0,9702	0,959	0,9902	0,9998	1,0106	1,0223
bus10	0,9845	0,9763	0,9677	0,959	0,9845	0,9927	1,0016	1,0111
bus11	0,9816	0,9751	0,9684	0,961	0,9816	0,9881	0,9949	1,0022
bus12	0,9848	0,9803	0,9756	0,971	0,9848	0,9893	0,99408	0,999
bus13	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014
bus14	1,0106	1,0104	1,0104	1,01	1,0106	1,0108	1,0108	1,0109
bus15	1,0116	1,0114	1,0113	1,011	1,0116	1,0118	1,0119	1,0119



**Figure V.10.** Profil de la tension des JDB avant, après intégration sans intermittence et avec intermittence (diminution de 25%,50%et de 75% et augmentation de 25%,50%, et de 75%)

L'intégration de la DG apporte d'abord une amélioration du profile de la tension, la tension la plus faible est élevé à 0.8167 pu au lieu de 0.9531

L'intermittence de la production de la DG, dans le cas d'une diminution de la production de 25 de 50 et de 75% qui peut être provoquée par une perturbation ou un changement de condition climatique, conduit à la détérioration du profile de tension avec une diminution des niveaux des tensions atteinte 0.9465 pu, 0.938 pu et 0.9297 pu respectivement.

L'intermittence de la production de la DG, dans le cas d'une augmentation de la production de 25, de 50 et de 75% due aussi au changement des conditions climatiques conduit à la détérioration du profile de la tension avec des surtensions des JDB, les tensions atteignent les valeurs 0.9593pu 0.9645 pu et de 0.9713pu respectivement

Les résultats de simulation du réseau est en régime dynamique "TD" montrent qu'avec les quantités de charges à satisfaire et la quantité de la production de la DG, le réseau reste stable et retrouve son équilibre mais avec des chutes de tensions importantes (jusqu'à 0.9297 pu) dans le cas de les diminutions de la production de la DG. Dans le cas l'augmentation de la production de la DG 25 et 50 et de 75% due aux changements des conditions climatiques conduisent à des surtensions que atteignent les valeurs de 1.025 pu, 1.039 pu et de 1.056 pu respectivement.

Les tests effectués sur le réseau en surcharge montrent qu'en fixant la production de la DG à ces limites, une variation de cette dernière conduit à l'écoulement de la tension et l'instabilité de réseau.

## **IV.6. CONCLUSION**

Ce chapitre a été consacré pour étudier les problèmes de la stabilité de tension du réseau électrique et discuté l'influence de l'impact de l'intégration de production décentralisée dans le réseau de transport la stabilité de la tension.

Les résultats de simulation du système globale on utilisant le logiciel PSAT.

On a simulie et a interprété les résulta d'un réseau de 16 jeux de barre avec 3 cas différent qui sont :

- ❖ L'étude montre que le réseau surchargé présente des chutes de tension importantes et dangereuse.
- ❖ L'étude montre que l'intégration de la DG permet d'améliorer le profil de la tension d'augmenter le travail de résistance. La diminution de la production de la DG conduit à des chutes de tension important et peuvent conduire l'instabilité du RE.
- ❖ Une exploitation du réseau en surcharge avec une intermittence de la production de DG peuvent conduire à l'instabilité du réseau électrique.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'objectif principal est l'étude de la stabilité de la tension d'un réseau de transport face à l'intermittence de la production.

Au fil du temps, la demande de l'énergie électrique augmente, ce qui nécessite une augmentation de production pour répondre à la forte demande des consommateurs. L'insertion des productions décentralisées dans les réseaux de transport est une preuve de l'avancement des études recherchées sur ce sujet. À cause de cette intégration d'énergies nouvelles basées sur des ressources renouvelables, les réseaux électriques subissent des dérèglements de plusieurs paramètres et surtout de la tension et de la fréquence. Et le schéma d'exploitation classique des réseaux de transport 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.

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

L'intégration des productions décentralisées influence tant la gestion de la production que la planification d'un réseau électrique. Pour gérer le raccordement de cette production afin d'assurer l'équilibre production-consommation et la stabilité du réseau, des normes et des mesures qui peuvent être différentes de pays en pays, doivent être mises en place.

Le développement des nouvelles technologies, qui comprennent les systèmes de stockage d'énergie, ainsi que l'évolution des systèmes de contrôle faciliteront l'intégration massive d'énergie renouvelable au réseau de transport.

Nous avons montré l'importance du réglage de la tension dans les réseaux électriques. Ensuite, nous avons abordé les services systèmes de réglage de tension à trois niveaux (primaire, secondaire et tertiaire) qui sont chargés d'assurer l'équilibre entre consommation et production. Et puis nous avons parlé du principe du réglage de la tension et le moyen de réaliser ça en présence d'une production d'énergie dans le réseau de transport.

On a présenté une simulation du réseau bouclé de transport sans et avec production distribuée dans un système de 16 JDB utilisé comme réseau de test, toutes les simulations sont effectuées dans la boîte à outils d'analyses du réseau électrique (PSAT).

Nous avons traité le problème de la stabilité de tension du réseau électrique de transport et discuté l'influence de l'impact de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau de transport sur l'amélioration de la stabilité. L'application a été effectuée sur des réseaux de transport de 16 JDB.

Nous avons ensuite étudié l'impact de la volatilité de la production de la DG. On a constaté dans le cas d'une diminution de la puissance produite par la DG suite à des perturbations climatiques, une diminution de la tension des jeux de barre. Le réseau retrouve généralement son équilibre et un nouveau régime établi pour de petites variations de production. Il peut par contre, si la variation est importante, conduire à un effondrement de la tension du réseau et à son instabilité.

Pour une augmentation de puissance produite par la DG on voit une augmentation de tension dans toutes les jeux de barre ce qui induit des surtensions et peut conduire à une instabilité. Dans ce cas aussi le réseau retrouve généralement son équilibre et un nouveau régime établi pour de petites variations de production. Il peut par contre, si la variation est importante, conduire à un effondrement de la tension du réseau et à son instabilité.

L'étude réalisée dans ce travail a montré qu'il est nécessaire de faire un choix optimal du ou des JDB ou les DG doivent être insérées afin de procurer au réseau une meilleure stabilité en tension et en fréquence et un meilleur transit de puissance avec moins de pertes. Des mesures et des précautions doivent être prises lors de l'intégration des productions distribuées avec intermittence afin de faire face aux fluctuations de la production.

Cette étude peut être étendue à un réseau maillé avec un nombre de JdB importants.

.



## **Références bibliographiques**

- [1] F. P. DeMello, L. N. Hannet et J. M. Undrill, Practical approaches to supplementary stabilizing from accelerating power, IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst 1978.
- [2] J. L. Lilien, "Transport et distribution de l'énergie électrique" Cours donné à l'institut d'électricité Montefiore Université de Liège, 2010.
- [3] Dr. Aouzzellzag Lahacani Narimen, "Transport et distribution de l'énergie électrique". cours UEF3111 licence 3 électrotechnique. 2017
- [4] M. Zellagui, "Etude des protections des réseaux électriques" (30 & 10 kV), mémoire de Magistère en électrotechnique, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2010.
- [5] Olivier Meile le Conseil fédéral Suisse "Stratégie Réseaux électriques concept détaillé dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050", 2013.
- [6] B. de Metz-Noblat, "Les calculs sur les réseaux électriques BT et HT", Cahier technique n° 213, Groupe Schneider, édition décembre 2004, 40p
- [7] T. Mishami, "Modélisation et calcul des courants de défaut dans un réseau multimachine", mémoire d'Ingénieur civil électricien, Université de Kinshasa, 2011
- [8] Technical Manual TM 5-811-14, "Coordinated Power Systems Protection", Headquarters, Department Of The United States Army, 1991 2016
- [9] Guillaume rami "contrôle haute tension auto adaptif pour production décentralisée d'énergie connecté au réseau électrique de distribution", Thèse de doctorat INPG, 2006
- [10] J.L. LILIEN "Cours donné à l'Institut d'Electricité Montefiore Université de Liège" JL Lilien · 2017
- [11] Nicolas Gheorghe "Cahier Technique n° 53 "Règles de raccordement au réseau de transport et distribution d'énergie électrique". janvier 2008
- [12] Djaffar OULD ABDESLAM, "Technique neuromimétique pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension", thèse doctorat, Université de Haute- Alsace U.F.R. des Sciences et Techniques, 2005
- [13] ACKERMANN Thomas, Göran ANDERSSON et Lennart SÖDER. "Overview of Government and Market Driven Programs for the Promotion of Renewable Power Generation", Renewable Energy, 2001
- [14] khadraoui Zakaria, "Etude d'une centrale solaire thermique", master en génie mécanique, université Badji Mokhtar, Annaba, 2017
- [15] A.M. Ibrahim, "Fuzzy Logic for Embedded Systems Application", Elsevier Science USA, 2004.
- [16] N. Kandil, Algorithmes pour accélérer la simulation en stabilité transitoire, Thèse d'état, Université de Montréal, 1999

- [17] : Hydro power, Alternative Energy News, ,disponible Sur: <http://www.alternative-energy-news.info/technology/hydro2010>
- [18] R. M. Parizeau, “Réseaux de neurones“ Université Laval, Automne2004.
- [19] PETIBON Stéphane, “Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques “, thèse de doctorat TOULOUSE III, 2009
- [20] C. Lerouge“ Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) Etats-Unis “ Sciences physique états – unis, 2006
- [21] S.S. Sastry et M. Bodson, Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [22] Slootweg, “Modelling and Impact on Power System Dynamics“, thesis from the Technical University of Delft, 2005.
- [23] P. Kundur; Power system stability and control, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [24] J.Grainger et Stevenson “power system analyses “ McGraw-Hill Higher education, 1994
- [25] Rouche, HabetsetLaloy, “Stability thory by Liapunov’s Direct Method“, edition1977
- [26] AlMarhoonetHussain H., A “Practical Method for Power Systems Transient Stability and Security“, University of New Orleans Theses and Dissertations, 2011
- [27] Alkhatib H., “Etude de la stabilité transitoire aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques“, Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, Marseille, 2008
- [28]J. Task-Force, “Definition And Classification Of Power System”, IEEE\CIGRE June 2003.
- [29] M. Crapp, “Stabilité et sauvegarde des réseaux d'énergie électrique” Bermes science publication, LAVOISIER, 2003
- [30] M. El Hawaryet J. Momoh, “Electric Systems, Dynamics, and Stability with Artificial Intelligence Applications”, 2000.
- [31] Corroyer C. et Deveau P, “Protection des réseaux de transport et de répartition“, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, Août 2000.
- [32] BENABID R., "Optimisation Multi-objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques", Université Amar Telidji Laghouat, 2007.
- [33] Ouali A., "Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux électriques par les réseaux de neurones artificiels et les plans d'expériences", université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, Octobre 2008.
- [34] Abdel-Aziz, Fouad A.,Vittal V., "Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method", Université de Californie, Prentice Hall.5Momoh, 2012–Grigsby, 2016.

- [35] J. Task-Force, "Definition And Classification Of Power System", IEEE\CIGRE, 2003.
- [36] M. Crapp, "Stabilité et sauvegarde des réseaux d'énergie électrique" Bernes science publication, LAVOISIER, 2003.
- [37] A. J. Wood et B.F. Wollenberg "Power generation, operation and control", Quinn-Woodbine, New York, 1983.
- [38] E. G. Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", Thèse d'état, université de Nancy, 2003.
- [39] N. Kandil, "Algorithmes pour accélérer la simulation en stabilité transitoire", Thèse d'état, université de MONTREAL, 1999.
- [40] A.R. Bergen et V. Vittal, "Power System Analysis". 2nd Edition, Prentice Hall, 2000.
- [41] P.W. Sauer et M.A. Pai, "Power system dynamics and stability", Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1998.
- [42] Grainger, J. J. and W. D. Stevenson "Power system analysis ". New York Montréal, McGraw-Hill.1994.
- [43] Glover Sarma et Overbye, "Power system analysis and design", power system analysis and design: si edition fournitures diverses – 7 avril 2011
- [44] A. BOUZIDI. "Modélisation et simulation des réseaux électriques" cours UEF1211 Master I électrotechnique, option Réseaux électriques, université de Béjaia,.2017
- [45] Oussama Mammeri, "Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un nœud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie", Mémoire Magister, l'université de Batna, 2012.
- [46] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Thomas J. Overbye, "power system analysis and design", 5edition, Publisher, Global Engineering, Christopher M. Shortt, 2011.
- [47] B. BOUSSAHOUA, " Evaluation de la sécurité transitoire des réseaux électriques par les algorithmes intelligents " Thèse de doctorat en Electrotechnique, Faculté d'Electronique et informatique, 2014.
- [48] M. Pavella et P.G. Murthy, "Transient Stability of Power Systems: theory and practice", Library of congress cataloguing in publication, 1994.
- [49] MartinHennebel, "Valorisation des services système sur un réseau de transport d'électricité en environnement concurrentiel", thèse de doctorat, Université Paris Sud – ParisXI, 2009.
- [50] FAHAD SAEED ALSOKHIRY, "Operational Issues related to the Integration of Renewable Generation in Distribution Networks" thèse de doctorat, University of Strathclyde, 2015.
- [51] Mahiraj Singh Rawat, Shelly Vadhera, "Comparison of FACTS Devices for Transient Stability Enhancement of Multi Machine Power System", International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom), pp.1-5, 2016.

- [52] C. APPRAEZ, “ Etude Comparative de Méthodes de Simulation de La Stabilité Transitoire, école de technologie supérieure“, Université du Québec, 2012.
- [53] Antonio Griffo, “Novel FACTS controllers for power system stability enhancement”, thèse de doctorat, University of Naples Federico II, Novembre 2006.
- [54] T.T. Nguyen and R. Gianto, “Optimisation-based control coordination of PSSs and FACTS devices for optimal oscillations damping in multi-machine power system”, IET Gener. Transm. Distrib, Vol.1, No.4, 2007
- .