

**République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de**

**L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université A. MIRA-BEJAIA**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Électrique**



## **Mémoire de fin d'étude**

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

**Option : Réseaux Électriques**

**Thème :**

---

**Contrôle de la tension d'une ferme éolienne connectée au  
réseau électrique**

---

**Préparé par :**

**M<sup>lle</sup>.MAOUCHA Yasmina**

**M<sup>lle</sup>.HAROUNE Nawal**

**Encadré par :**

**Mme. N.AOUZELLAG**

**Mme.O.AOUCHENNI**

**Année Universitaire : 2022/2023**

## *Remerciements*

*En premier lieu, nous remercions Dieu qui nous a procuré  
de la patience et du courage afin d'achever  
ce travail.*

*Nous remercions Madame AOÜZELLAG, notre promotrice  
Pour son attention accordée à notre travail, pour ses nombreux  
conseils et  
remarques, son soutien et sa disponibilité qui ont permis d'améliorer  
la qualité de notre mémoire*

*Nos remerciements vont aussi à Madame AOÜCHENNI, notre co-  
promotrice,  
de nous avoir aidé et dirigé et pour ses remarques constructives.*

*Nous exprimons notre gratitude aux membres de jury  
d'avoir consacré une partie de leur temps  
pour juger ce modeste travail.*

*Nos remerciements les plus vifs vont tout  
particulièrement à nos parents  
ainsi qu'à tous ceux et celles qui ont participé de près et de loin à la  
réalisation de ce travail.*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents, qui m'ont soutenue inconditionnellement tout au long de mon parcours académique. Leurs encouragements et leur confiance ont été les piliers qui m'ont permis d'atteindre mes objectifs.*

*Mes frères et sœurs*

*Tous mes amis et ceux qui m'ont aidé durant mon cursus*

*MAOUCHA Yasmina*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie, à ma lune  
et son fil d'espoir qui éclaire mon chemin, ma vie, ma MAMAN.*

*A celui qui m'a permis de devenir une femme, ma source de vie, à mon  
support qui a toujours été à mes côtés pour me soutenir, à mon prince, mon  
PAPA.*

*A Mes frères Mohamed el Hadi Bouzid Yazid.*

*A ma grande sœur Kenza qui n'a pas cessé de m'aider et me soutenir tout au  
long de mes études malgré son éloignement et la distance.*

*A mes petite sœurs Yasmine, Besma pour leur indéfectible amour.*

*Sans oublier Rima ma copine d'enfance qui est toujours derrière moi, qui  
m'encourage tout le temps.*

*A tout les membres de ma famille, Mamie, ma tante Nabila et tous ce qui  
ont participé à ma réussite, et à tous ceux qui m'aiment.*

**HAROUNE Nawal**

# SOMMAIRE

## Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I. État de l'art sur les réseaux électriques	3
I.1. Introduction	3
I.2. Description d'un réseau électrique	3
I.3. Organisation du réseau électrique	3
I.4. Structures du réseau électrique	4
I.4.1. Réseau de transport	4
I.4.2. Réseau de répartition	4
I.4.3. Réseau de distribution	4
I.5. Différentes architectures d'un réseau de distribution	5
I.5.1. Les réseaux ruraux	6
I.5.2. Les réseaux urbains	6
I.6. Niveaux de tension	9
I.7. Mode de réglage de la tension dans les réseaux électriques	10
I.7.1. Réglage hiérarchisé de la tension sur les réseaux électriques	10
I.7.2. Moyens de compensation de l'énergie réactive	11
I.7.3. Transformateurs avec prises réglables en charge	12
I.7.4. Systèmes FACTS	13
I.8. Conclusion	19
Chapitre II. Généralités sur l'énergie éolienne	20
II.1. Introduction	20
II.2. Énergie éolienne	20
II.2.1. Énergies éoliennes offshore et onshore	21
II.3. Énergie éolienne en quelques chiffres	22

II.4. Avantages et inconvénients des éoliennes	24
II.5. Principe de conversion	24
II.6. Modèle de la turbine éolienne	25
II.7. Contrôle de la connexion au réseau	27
II.8. Les modes de connexion	29
II.8.1. Éolienne à vitesse fixe	29
II.8.2. Éolienne à vitesse variable	29
A. <i>Éolienne basée sur une machine asynchrone</i>	30
B. <i>Éolienne basée sur une machine synchrone à aimants permanents :</i>	31
II.9. Intégration de l'énergie éolienne aux systèmes électriques	32
II.10. Impacts de l'intégration d'un système éolien dans le réseau	32
II.10.1. Impacts Locaux	33
II.10.2. Impacts globaux	35
II.11. Conclusion	37
Chapitre III. Simulation et interprétation des résultats	38
III.1. Introduction	38
III.2. Présentation du réseau étudié	38
III.2.1. État du réseau sans la présence de la production éolienne	39
III.2.2. Etat du réseau avec insertion d'une production éolienne	41
III.3. Conclusion	49
Conclusion générale	50
ANNEXE	52
<i>Références Bibliographiques</i>	55

## LISTE DES FIGURES

<b>Fig.I.1 :</b> Schéma d'un réseau électrique	4
<b>Fig.I.2:</b> Architectures des réseaux électriques	5
<b>Fig.I.3:</b> Réseau rural radial	6
<b>Fig.I.4:</b> Réseau en double dérivation	7
<b>Fig.I.5:</b> Coupure d'artère	7
<b>Fig.I.6:</b> le fuseau	8
<b>Fig.I.7:</b> L'épi	8
<b>Fig.I.8:</b> La maille	9
<b>Fig.I.9:</b> Boucles ou pétales de marguerite	9
<b>Fig.I.10 :</b> Organisation du réglage hiérarchisé de tension	11
<b>Fig.I.11:</b> Condensateur	11
<b>Fig.I.12:</b> Inductance de compensation	12
<b>Fig.I.13:</b> (a) Régleur en phase sans compoundage b) Régleur en phase avec compoundage	13
<b>Fig.I.14:</b> Effet des dispositifs sur les paramètres déterminant la transmission de puissance	14
<b>Fig.I.15:</b> schéma de raccordements shunts	14
<b>Fig.I.16:</b> (a) Structure d'un STATCOM (b) Schéma équivalent d'un STATCOM	15
<b>Fig.I.17:</b> Courant inductif	15
<b>Fig.I.18:</b> Courant capacitif	15
<b>Fig.I.19:</b> Structure d'un SVC, schéma équivalent	16
<b>Fig.I.20:</b> Schéma de raccordement série	17
<b>Fig.I.21:</b> Système TCSC a) Montage, b) Réactance apparente	17
<b>Fig.I.22:</b> Principe de raccordement shunt-série	18
<b>Fig.I.23:</b> Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique	18
<b>Fig.II.1:</b> Énergie éoliennes offshore et onshore	21
<b>Fig.II.2:</b> Évolution des nouvelles capacités éoliennes installées	22
<b>Fig.II.3:</b> Capacité mondiale de production d'énergie éolienne 2012-2021	23
<b>Fig.II.4:</b> Capacité éolienne mondiale par pays en 2021	23

<b>Fig.II.5:</b> Principe de conversion d'énergie d'une éolienne	25
<b>Fig.II.6:</b> Schéma d'une turbine éolienne	25
<b>Fig.II.7 :</b> Schéma électrique du filtre de connexion au réseau électrique	27
<b>Fig.II.8 :</b> Chaîne globale de la régulation des courants	28
<b>Fig.II.9:</b> Éolienne à vitesse fixe	29
<b>Fig.II.10:</b> Éolienne basée sur une GAS à cage alimentée au stator par un convertisseur AC/DC/AC	30
<b>Fig.II.11:</b> Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation partiellement interfacée avec le réseau	30
<b>Fig.II.12:</b> Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation complètement interfacée avec le réseau	31
<b>Fig.II.13 :</b> Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone à grand nombre de paires de pôles	32
<b>Fig.II.14:</b> Impacts de production décentralisée sur le courant de court-circuit	34
<b>Fig.II.15:</b> Problème de déclenchement intempestif des protections	35
<b>Fig.III.1:</b> Topologie du réseau électrique étudié	38
<b>Fig.III.2:</b> Amplitude des tensions aux différents nœuds	39
<b>Fig.III.3:</b> Cumul des chutes de tension de la source dans les branches	40
<b>Fig.III.4:</b> Sens du flux des puissances active et réactive	40
<b>Fig.III.5:</b> Amplitude des tensions aux nœuds avant et après l'insertion de la PD	41
<b>Fig.III.6:</b> Chutes de tension dans les branches avant et après l'insertion de la PD	42
<b>Fig.III.7:</b> Evolution des pertes de puissance active en fonction du taux d'intégration	42
<b>Fig.III.8:</b> Evolution des puissances injectées par la ferme éolienne et le poste source	43
<b>Fig. III.9:</b> Flux de puissances après insertion de la PD à un taux d'intégration de 20%	44
<b>Fig.III.10:</b> Flux de puissance après insertion de la PD à un taux d'intégration de 30%	44
<b>Fig.III.11:</b> Flux de puissance après insertion de la PD à un taux d'intégration de 40%	45
<b>Fig.III.12:</b> Puissances transitées dans les branches avant et après insertion pour différents taux d'intégration	45
<b>Fig.III.13:</b> Cumul des chutes de tension pour différents taux d'intégration	46
<b>Fig.III.14:</b> Puissance injectée par l'éolienne	47
<b>Fig.III.15:</b> Tensions aux nœuds avant compensation	47
<b>Fig.III.16:</b> Tensions aux nœuds après compensation	48
<b>Fig.III.17:</b> Puissance réactive de compensation	48



## Liste des tableaux

<b>Tab. I.1</b> : Bénéfices techniques des dispositifs FACTS.....	17
---	----

## Introduction générale

Les réseaux de distribution électrique sont conçus pour fournir de l'électricité aux consommateurs à une tension spécifique. Les fluctuations de tension peuvent survenir pour diverses raisons, notamment en raison de la demande élevée, des pertes de ligne et des défauts de commutation. Ces fluctuations peuvent être préjudiciables aux équipements électriques des consommateurs et entraîner des pannes, c'est ainsi que le contrôle de la tension dans le réseau électrique de distribution est un aspect crucial de la gestion de l'énergie électrique. Les réseaux électriques doivent fournir une tension stable et fiable pour garantir le bon fonctionnement des équipements électriques des consommateurs [1] [2].

Après le développement et l'intégration de la production électrique à base d'éoliennes au marché de l'électricité, le réseau électrique a subi d'énormes modifications sur le plan de tension. Les éoliennes sont des sources d'énergie renouvelables variables qui peuvent produire des fluctuations de tension dans le réseau de distribution, le contrôle de la tension est donc un aspect important lors de l'insertion d'une éolienne dans le réseau. Les fluctuations de tension engendrées peuvent entraîner des dommages aux équipements électriques et réduire l'efficacité de la distribution de l'électricité. Pour maintenir la tension dans des limites acceptables, les réseaux électriques utilisent des dispositifs de régulation de la tension. La méthode classique de contrôle du réseau est basée sur l'utilisation d'un transformateur à prises réglables pour le contrôle de la puissance, des condensateurs et des inductances pour la compensation de l'énergie réactive placés en série ou en shunt [3].

Le développement de la technologie de l'électronique de puissance a permis d'augmenter la flexibilité du contrôle du réseau et le rendre plus flexible en insérant des dispositifs de contrôle qui sont basés sur des composants connus sous le nom FACTS « Flexible Alternative Current Transmission system ». Certains dispositifs sont utilisés pour minimiser les fluctuations de tension et maintenir une tension stable et fiable dans le réseau. En outre, des techniques avancées de gestion de la production peuvent être utilisées pour contrôler la production d'énergie de l'éolienne et maintenir la stabilité du réseau électrique de distribution assurant ainsi une distribution efficace et fiable de l'électricité [4].

Dans ce mémoire l'impact de l'intégration des productions décentralisées à base de ressources renouvelables sur la tension et le transit de puissances dans un réseau de distribution est étudié. Pour atteindre cet objectif, le présent travail est subdivisé en trois principaux chapitres :

Le premier chapitre exposera des généralités sur les réseaux de distribution, ses différentes architectures ainsi que les modes de réglage de la tension dans les réseaux.

Le deuxième chapitre, traitera la problématique de l'insertion d'un générateur éolien dans le réseau de distribution électrique ainsi que les impacts engendrés sur les grandeurs du réseau et sur la stabilité du système électrique.

Le troisième chapitre sera consacré à la simulation d'un réseau de distribution à 11 nœuds en présence d'une production éolienne. Deux points importants seront développés, il s'agira, pour le premier, du choix de l'emplacement de cette production en vue d'améliorer le plan de tension et la minimisation des pertes de puissances. Le deuxième portera sur son influence sur le sens de transit des puissances.

Une conclusion générale et des solutions à apporter pour une meilleure exploitation des réseaux de distribution futurs en présence des productions décentralisées clôtureront ce mémoire.

# CHAPITRE I

## ETAT DE L'ART SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES DE DISTRIBUTION

## Chapitre I. État de l'art sur les réseaux électriques

### I.1. Introduction

Les réseaux électriques sont une infrastructure fondamentale de notre société moderne, fournissant l'énergie électrique nécessaire pour alimenter nos maisons, entreprises et industries. Ces réseaux sont des systèmes complexes et interconnectés, qui comprennent des centrales électriques, des transformateurs, des lignes de transmission, des postes de distribution et de nombreux autres composants. Les réseaux électriques sont conçus pour répondre à la demande d'électricité des consommateurs, tout en garantissant la stabilité et la fiabilité du système [5].

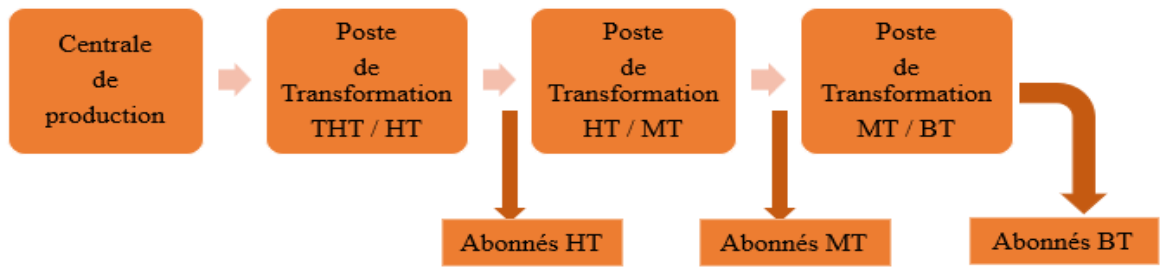
Dans ce chapitre, nous allons explorer les généralités sur les réseaux électriques, en nous concentrant sur leurs architectures et leur fonctionnement. Nous examinerons les différents composants qui les constituent. En comprenant les bases de l'architecture et du fonctionnement des réseaux électriques, nous pourrions mieux appréhender leur rôle crucial dans notre vie quotidienne et les enjeux qui en découlent [5].

### I.2. Description d'un réseau électrique

Un réseau, c'est avant tout un certain nombre de fonctions et de comportements d'ensemble qui doivent être définis, mis en œuvre et maîtrisés par une bonne conception et exploitation. Ensuite, il ya le matériel qui forme le réseau physique. De plus, le réseau est principalement constitué de lignes électriques, de câbles fonctionnant à différents niveaux de tension, qui sont interconnectés dans des sous-stations. Grâce à des transformateurs, ces sous-stations distribuent l'électricité et la font passer d'une tension à une autre [4].

### I.3. Organisation du réseau électrique

L'énergie électrique est acheminée des centres de production jusqu'aux consommateurs en transitant par différents niveaux de tension (figure I.1). En sortie des centrales de production, des lignes à haut niveau de tension permettent de transporter des puissances importantes sur des longues distances, puis des lignes aux niveaux de tension de plus en plus bas acheminent l'énergie jusqu'aux points de consommation finaux [6].



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

#### **I.4. Structures du réseau électrique**

Le réseau électrique est séparé en trois principales subdivisions, à savoir, le réseau de transport, le réseau de répartition et le réseau de distribution.

##### **I.4.1. Réseau de transport**

Le réseau de transport permet de transporter de l'énergie électrique depuis les centres de production vers les centres de consommation les plus éloignés. C'est sur le réseau THT que sont branchées les centrales de grandes puissances ( $> 300\text{MW}$ ). Ces réseaux sont, pour la plupart, aériens et souterrains dans les villes ou à leur approche. Ils sont étudiés pour un transit donné correspondant à la limite thermique de la ligne [4-6].

##### **I.4.2. Réseau de répartition**

La deuxième subdivision est le réseau de répartition, son rôle est de répartir les puissances vers les centres de charge. Il est le point liant le réseau de transport au réseau de distribution. Il est généralement aérien [4].

##### **I.4.3. Réseau de distribution**

Les réseaux de distribution constituent l'architecture la plus importante du système électrique. Ils assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local. Leur tension est inférieure ou égale à  $50\text{kV}$  (THT), ils sont constitués de deux types de réseaux : le réseau moyen tension (MT) avec un niveau de  $10\text{kV}$  et  $30\text{kV}$  connecté au réseau de transport, et le réseau basse tension (BT) entre  $230\text{V}$  et  $400\text{V}$  [9].

Ces réseaux sont la partie d'un réseau électrique desservant les consommateurs d'électricité. Ils acheminent l'énergie électrique d'un réseau de transport ou un réseau de répartition aux transformateurs desservant les clients locaux. Ils sont composés de postes source

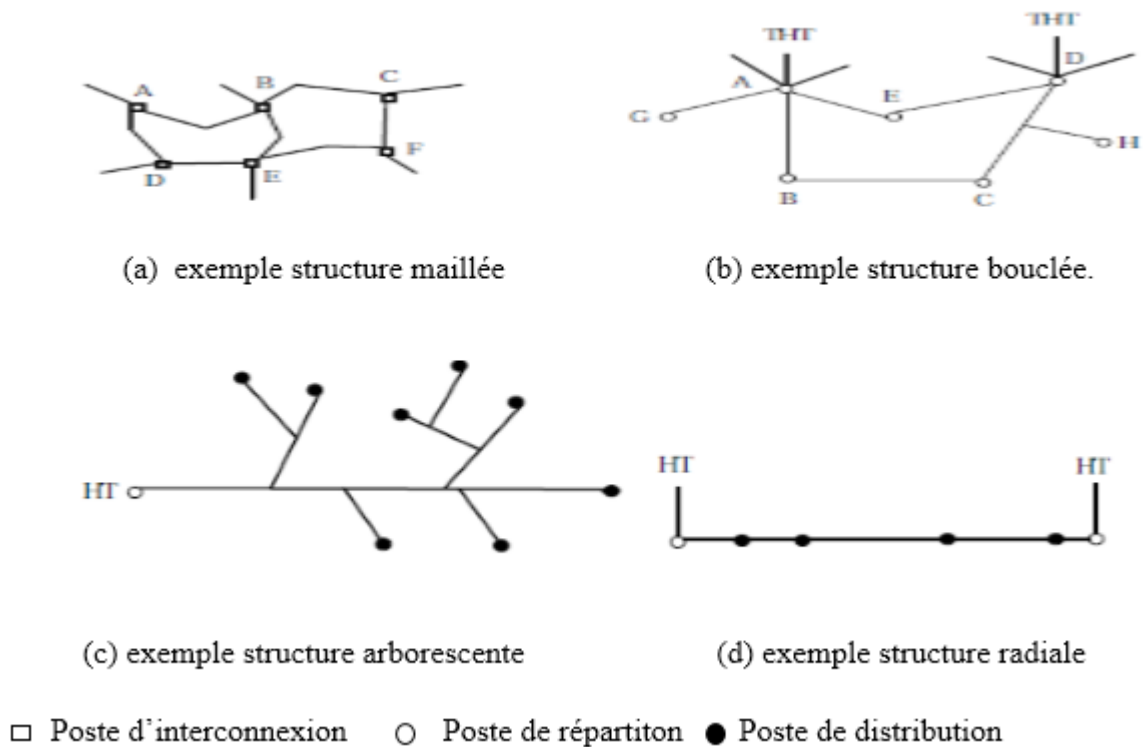
(avec les transformateurs, les équipements de compensation), et de lignes aériennes ou souterraines [4].

### I.5. Différentes architectures d'un réseau de distribution

L'architecture ou le design du réseau est un facteur clé pour assurer la qualité de l'énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. Les réseaux de transport d'énergie et d'interconnexion sont liés entre eux en réalisant une structure maillée comme illustré dans la figure I.2.a. Les réseaux de répartition ont souvent une structure bouclée qui peut être exploitée dans le réseau bouclé ou débouclé selon le besoin énergétique (figure I.2.b) [4].

Ces réseaux de répartition fournissent l'énergie aux réseaux de distribution à moyenne tension assurant l'alimentation d'un grand nombre de consommateurs, directement ou après transformation en basse tension. Leur configuration et leur mode d'exploitation sont variables. On peut trouver, selon les pays, des réseaux maillés exploités débouclés, des réseaux à structure radiale (figure I.2.d) ou des réseaux à structure arborescente (figure I.2.c) [4].

Les caractéristiques des sources de production, les besoins des utilisateurs et l'expérience d'exploitation qui, ajoutés à des considérations économiques, conduisent à choisir la structure topologique des réseaux.



**Fig.I.2:** Architectures des réseaux électriques

Dans ce qui suit nous allons présenter les différentes architectures en détails concernant les réseaux ruraux et urbains [7-8] :

### I.5.1. Les réseaux ruraux

On trouve en milieu rural des architectures arborescentes bouclables mais exploitées en radial (figure I. 3). Les boucles peuvent se situer entre les postes HTB/HTA ou entre départs voisins [7].

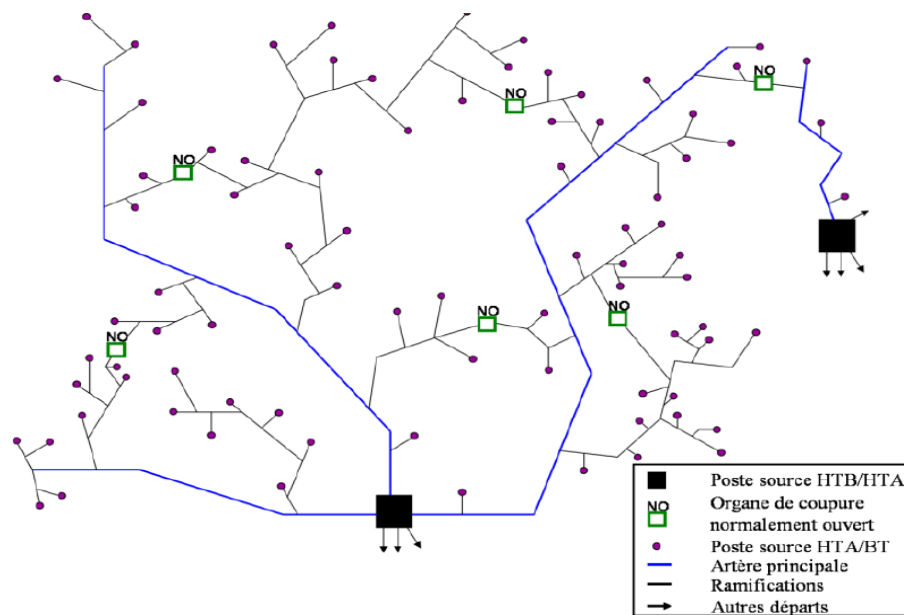


Fig.I.3: Réseau rural radial

### I.5.2. Les réseaux urbains

Les réseaux urbains se divisent en :

#### A. Réseaux en double dérivation simple

Le réseau radial en antenne est doublé à partir du jeu de barre du poste source HTB/HTA. Chaque transformateur HTA/BTA est connecté à un câble normal et à un câble de secours par le biais de dispositifs inverseurs comme le montre la figure I.4. C'est une structure difficilement exploitable manuellement mais automatisable facilement malgré les coûts [7].



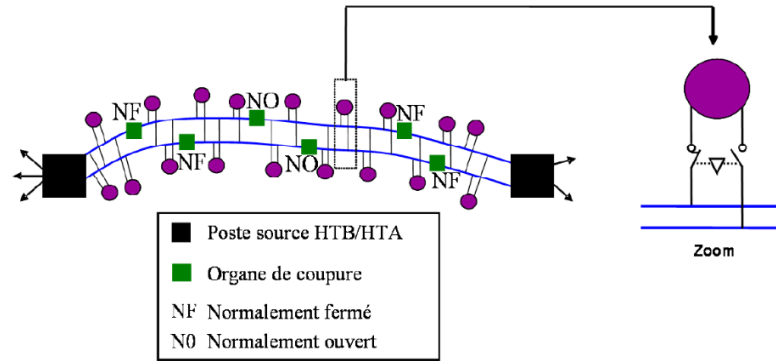


Fig.I.4: Réseau en double dérivation

### B. Structures en coupure d'artère

Dans cette architecture, un câble part d'un poste source HTB/HTA, passe successivement par les postes HTA/BTA à desservir avant de rejoindre soit un autre poste source HTB/HTA, soit un départ différent du même poste source HTB/HTA, soit un câble secours comme illustré dans la figure I.5 [7-8].

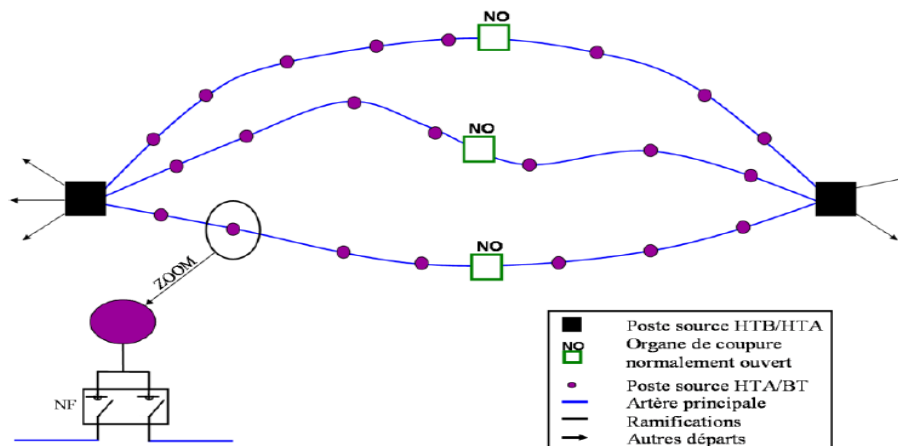


Fig.I.5: Coupure d'artère

La coupure d'artère présente plusieurs variantes tels que :

- ✓ **Le fuseau** : Dans le cas du fuseau (Figure I.6), tous les câbles issus d'un même poste convergent vers un même point appelé point de réflexion (PR sur la figure). Cette structure est simple et son exploitation facile. Par ailleurs, la qualité de fourniture est bonne [7].

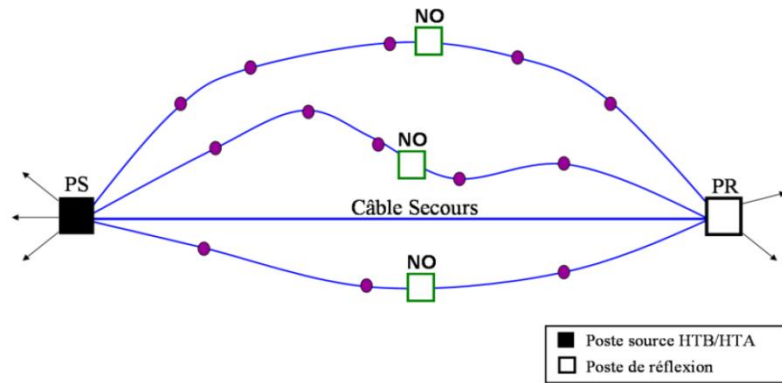


Fig.I.6: le fuseau

- ✓ **L'épi** : Il s'agit d'une variante du fuseau où il y a plusieurs points de réflexion répartis sur le câble secours (figure I.7). Il n'y a pas plus de six câbles travail pour un câble secours. Les câbles de travail partent du poste source et rejoignent un câble de secours qui suit une certaine direction [7].

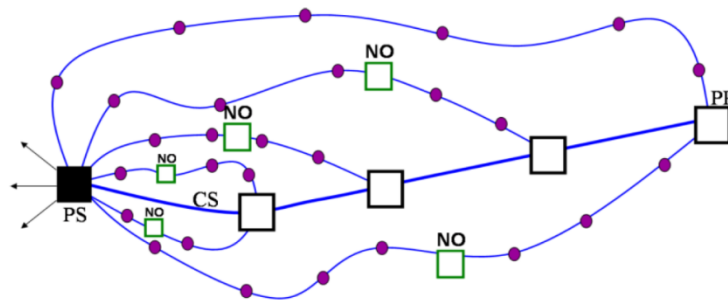


Fig.I.7: L'épi

- ✓ **La maille** : Cette structure est composée de boucles alimentées directement par les sources HTB/HTA ou via des postes têtes de boucle reliée aux sources HTB/HTA par des conducteurs de section importante appelés câbles de structure (figure I.8). Les postes têtes de boucle ont la même structure que les postes source sauf qu'il n'y a pas de transformateur HTB/HTA. Des liaisons inter-boucles permettent le report de charge d'une boucle sur l'autre en cas de perte d'un câble de structure [7].

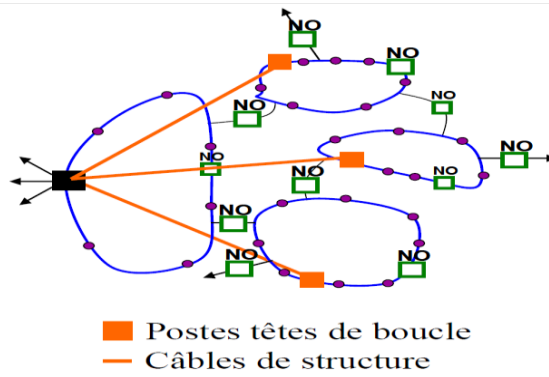


Fig.I.8: La maille

- ✓ **Boucles ou pétales de marguerite** : Cette structure est pratique lorsque le centre de gravité des charges est excentré par rapport au poste source (figure I.9). Contrairement à la maille, il n'y a plus de liaisons entre les boucles [7].

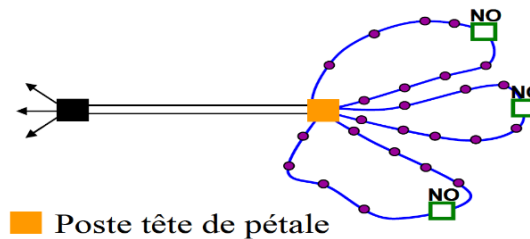


Fig.I.9: Boucles ou pétales de marguerite

## I.6. Niveaux de tension

Dans le réseau existe différents niveaux de tension en fonction du type du réseau comme montré dans ce qui suit [5-9]

- ✓ 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 (selon CEI)

La nouvelle norme en vigueur en France UTE C 18-510 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.7. Mode de réglage de la tension dans les réseaux électriques**

Il existe plusieurs modes de réglage cités ci-dessous :

### **I.7.1. Réglage hiérarchisé de la tension sur les réseaux électriques**

On distingue trois modes de réglages comme illustré sur la figure I.10 :

#### ***A. Réglage primaire RPT***

C'est une régulation locale automatique qui fixe la puissance réactive fournie par les alternateurs raccordés au réseau dans les limites acceptables en agissant sur l'excitation de ces machines. Elle est de l'ordre de 100 ms [10].

#### ***B. Réglage secondaire RST***

Il se fait au niveau régional, en quelques minutes, il a pour objet de limiter les transits de puissance réactive sur les lignes d'interconnexion et maintenir la tension en certaines nœuds (pilotes) représentatifs de la tension de chaque zone à sa valeur de consigne [10].

#### ***C. Réglage tertiaire RTT***

Il est manuel, effectué par le dispatching national, consiste à réévaluer, dans un intervalle de 15 minute, les consignes de tension des nœuds pilotes de chaque zone de réglage [10]. La figure I.10 montre organisation du réglage hiérarchisé de tension.

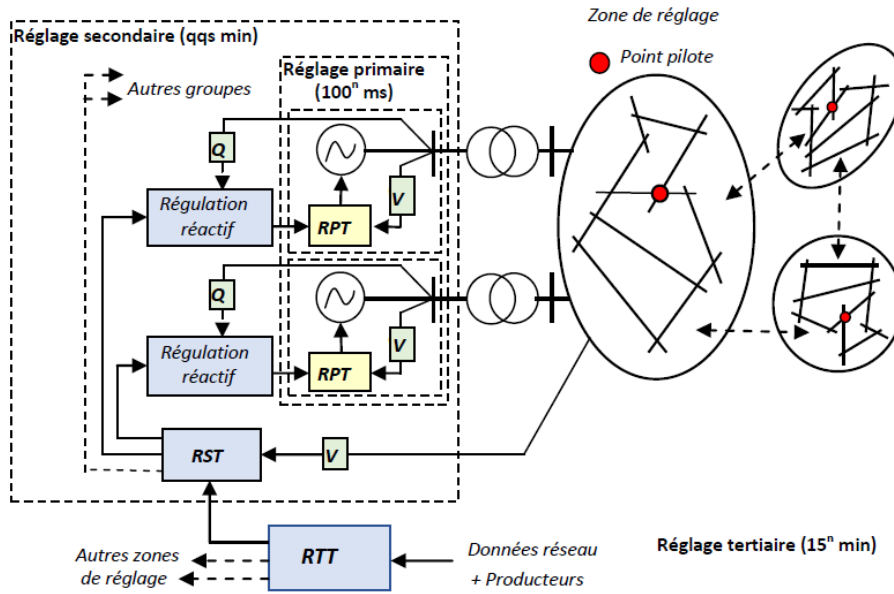


Fig.I.10 : Organisation du réglage hiérarchisé de tension

### I.7.2. Moyens de compensation de l'énergie réactive

Parmi les moyens de compensation de l'énergie réactive on trouve :

#### A. Condensateurs

Les condensateurs (figure I.11) sont utilisés pour corriger le facteur de puissance dans le cas de fortes charges inductives, son rôle est de compenser la puissance réactive absorbée par le réseau et par le transformateur HTB/HTA en mettant en service le bon nombre d'éléments pour une compensation optimale toutes les 10min [6-11].

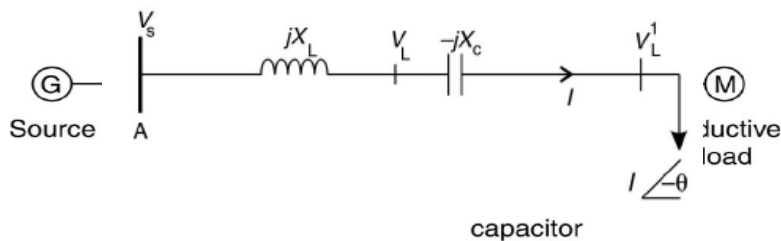
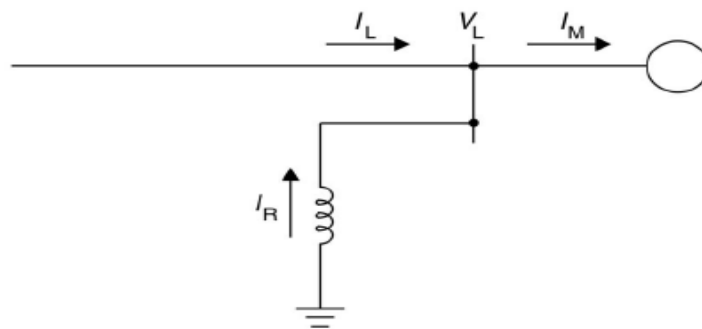


Fig.I.11: Condensateur

### B. Inductances

L'inductance (figure I.12) peut être installée pour plusieurs raisons :

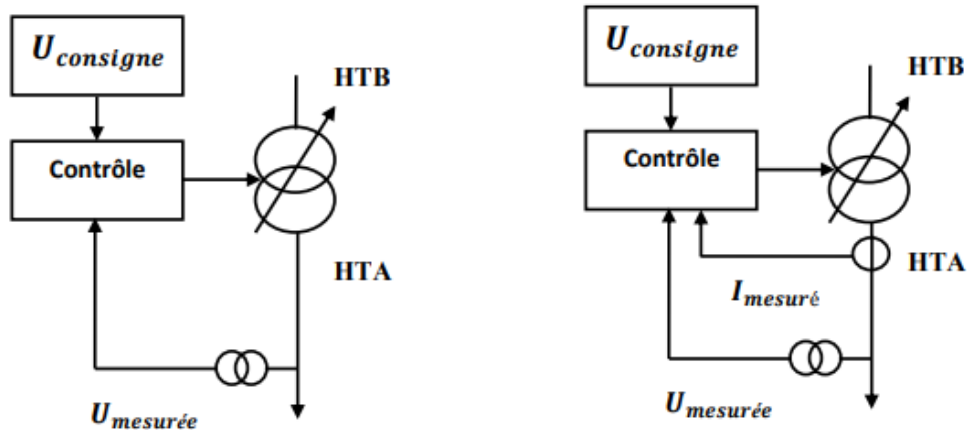
- ✓ Pour compenser les surtensions survenant aux sous-stations desservies par des longues lignes pendant les périodes de faible charge, en raison de la capacité de la ligne (effet Ferranti) ;
- ✓ Pour compenser le facteur de puissance en avance dans les usines de production, résultant d'une baisse transitoire ;
- ✓ Pour réduire la consommation de puissances des lignes en circuit ouvert dans les systèmes à très haute tension (THT) [11].



**Fig.I.12:** Inductance de compensation

### I.7.3. Transformateurs avec prises réglables en charge

Un régleur en charge est un transformateur capable d'adapter son rapport de transformation dans une plage définie. Ceci permet de régler, en fonction du transit de puissance et/ou de la tension mesurée, la tension au secondaire du transformateur. Un régleur en charge peut être avec ou sans compoundage (figure I.13). Le régleur en charge sans compoundage (la figure à gauche) change de prise lorsque la tension mesurée au secondaire du transformateur est supérieure ou inférieure à un écart de tension par rapport à une consigne donnée pendant un temps donné. Le régleur en charge avec compoundage (la figure à droite) effectue en plus une mesure de courant. La tension comparée aux tensions limites est une somme vectorielle de la tension au secondaire et de la chute de tension dans la résistance de compoundage [4-18].



**Fig.I.13:** (a) Régleur en phase sans compoundage (b) Régleur en phase avec compoundage

#### I.7.4. Systèmes FACTS

L'électronique de puissance a permis d'améliorer la souplesse du contrôle des réseaux alternatifs et les rendre plus flexibles et de faciliter l'intégration des générateurs intermittents dans le réseau, ils sont les FACTS. Leur principe se résume en :

- ✓ La régulation de la tension par injection ou extraction de l'énergie réactive ;
- ✓ La modification des impédances des lignes ou d'injecter de la puissance réactive à des positions voulues ;
- ✓ La sensibilité de l'interface aux défauts survenant au voisinage de la connexion et la limitation de la puissance délivrée par le générateur d'énergie renouvelable [4,10].

La figure I.14 montre que la puissance transmise dépend de la tension, de l'angle de phase et de l'impédance de la ligne. Toute tentative de contrôle du transfert de puissance passe par le réglage et la modification des trois paramètres déjà cités [4].

$P_{12}$  : Puissance transitée entre le réseau 1 et le réseau 2 ;

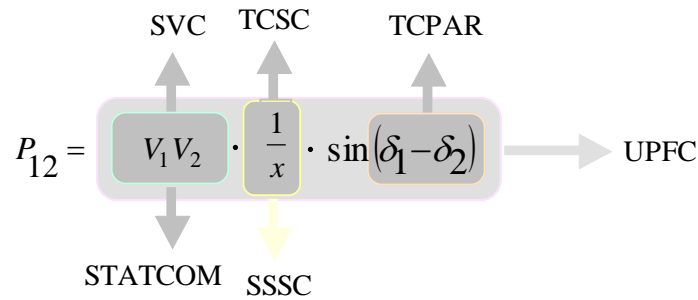
$V_1$  : Tension à la source ;

$V_2$  : Tension à la réception ;

$\delta_1$  : Déphasage de la tension à la source ;

$\delta_2$  : Déphasage de la tension à la réception ;

$X$  : Réactance de la ligne.

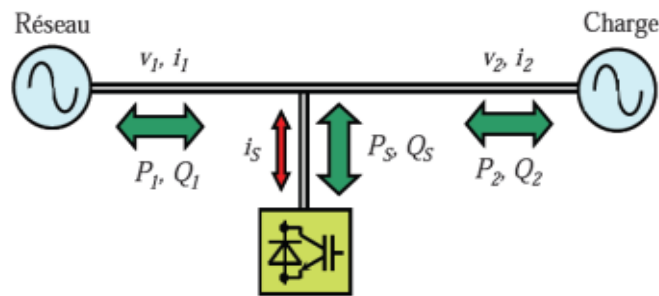


**Fig.I.14:** Effet des dispositifs sur les paramètres déterminant la transmission de puissance

Dans ce qui suit nous allons exposer les différents types de FACTS existant.

### A. Compensateurs parallèles

Le système est à base d'éléments passifs commutés. Il pourra régler la tension au nœud de raccordement en modifiant les échanges de puissances réactives par une injection en parallèle (Figure I.15) d'une énergie de type inductive ou capacitive. Ils sont le plus souvent utilisés pour résoudre les problèmes d'instabilité dynamique ou transitoire de la tension on compte le STATCOM et le SVC [13].

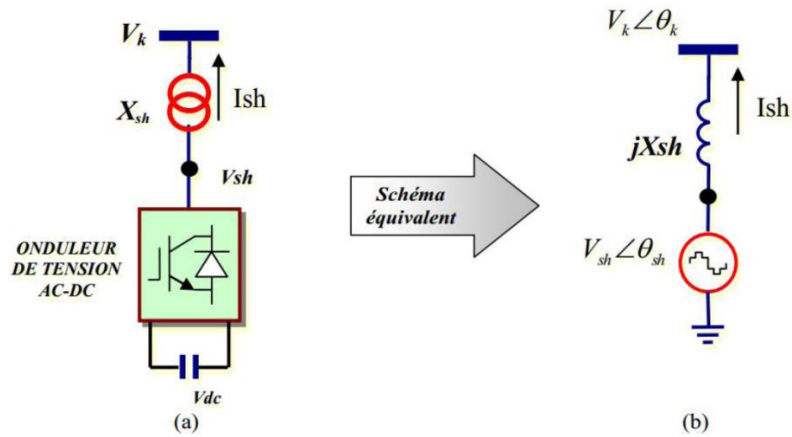


**Fig.I.15:** schéma de raccordements shunts

#### A.1 Compensateur statique synchrone STATCOM

Le compensateur statique synchrone STATCOM (Static Synchronous Compensator), est basé sur la structure d'un convertisseur de tension triphasé (figure I.16). Il correspond à l'équivalent statique exact de la machine synchrone classique fonctionnant en compensateur, mais sans inertie. Il est principalement utilisé pour la compensation dynamique des réseaux, afin de faciliter la tenue en tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et d'amortir les oscillations de puissance [14].

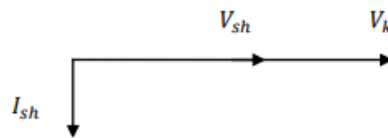




**Fig.I.16:** (a) Structure d'un STATCOM (b) Schéma équivalent d'un STATCOM

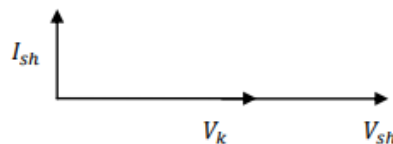
L'échange d'énergie réactive se fait en contrôlant la tension de sortie de l'onduleur, laquelle est en phase avec la tension du réseau. Le fonctionnement peut être décrit comme suit :

- Si la tension  $V_{sh} < V_k$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $-\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension  $V_k$  ce qui donne un courant inductif (Figure I.17) ;



**Fig.I.17:** Courant inductif

- Si la tension  $V_{sh} > V_k$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $+\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension  $V_k$  ce qui donne un courant capacitif (figure I.18) ;



**Fig.I.18:** Courant capacitif

### A.2. Compensateurs statiques d'énergie réactive SVC

Le SVC est un dispositif FACTS de première génération connectée en shunt à la ligne et qui permet la génération ou l'absorption de l'énergie réactive dans le but de maintenir un niveau

de tension désiré. Sa structure est l'association des dispositifs TCR et TSC en parallèles connectés au réseau à travers un transformateur de couplage (figure I.19) [4-14-15].

- TCR (Thyristor Controlled Reactor) : C'est une réactance en série avec un gradateur, sa valeur est continuellement variable selon l'angle d'amorçage des thyristors.

- TSC (Thyristor Switched Capacitor) : des capacités commandées par thyristors fonctionnant en pleine onde.

Le SVC peut être modélisé par une admittance shunt variable  $y_{svc}$ , supposée sans pertes et donc purement imaginaire.

$$y_{svc} = jB_{svc} \quad (I - 1)$$

Tels que

$$B_{svc} = \frac{1}{X_c X_l} \left\{ X_l - \frac{X_c}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] \right\} \quad (I - 2)$$

Avec,  $X_l = L\omega$  est la réactance de l'inductance linéaire et  $X_c = \frac{1}{C\omega}$  est la réactance du banc de capacités.

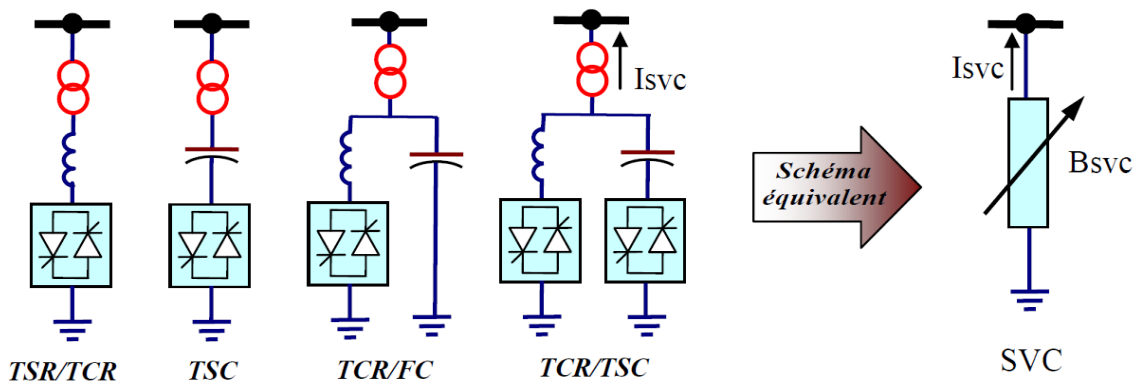


Fig.I.19: Structure d'un SVC, schéma équivalent

## B. Compensateurs Série

La réactance des lignes est une des limitations principales de la transmission de courant alternatif à travers les longues lignes, pour y remédier la compensation série capacitive a été introduite afin de réduire la partie réactive de l'impédance de la ligne (figure I.20) [12].

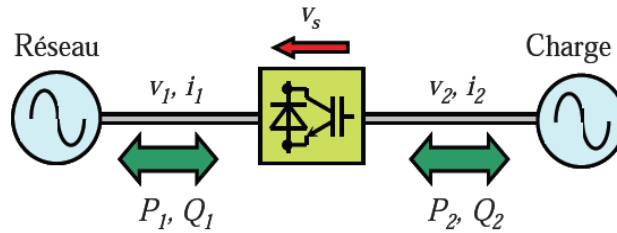


Fig.I.20: Schéma de raccordement série

Le compensateur série le plus utilisé est le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) (figure I.21), il est formé d'une inductance commandée par thyristor en parallèle avec un condensateur [12].

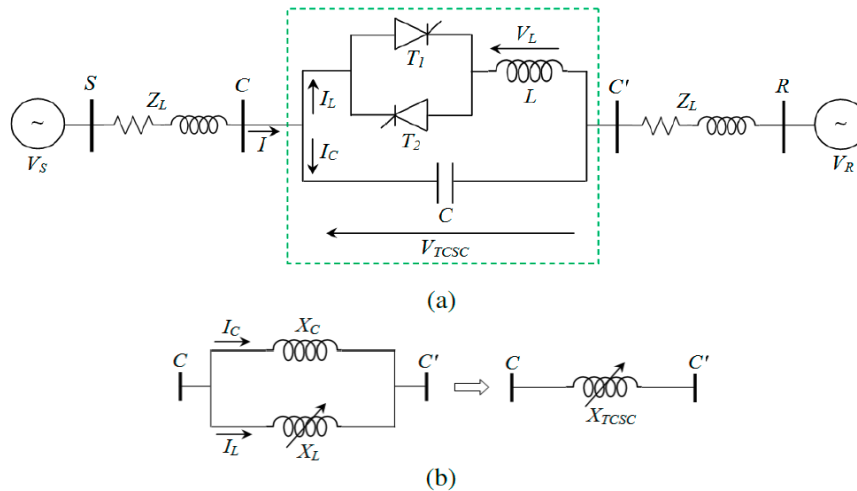


Fig.I.21: Système TCSC a) Montage, b) Réactance apparente

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_c \cdot X_l(\alpha)}{X_c + X_l} \tag{I - 3}$$

Avec  $X_{TCSC}$  est la réactance du TCSC et  $\alpha$  l'angle d'allumage des thyristors.

Tels que,

$$X_l(\alpha) = X_{lmax} \left[ \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin(2\alpha)} \right] \tag{I - 4}$$

Avec,

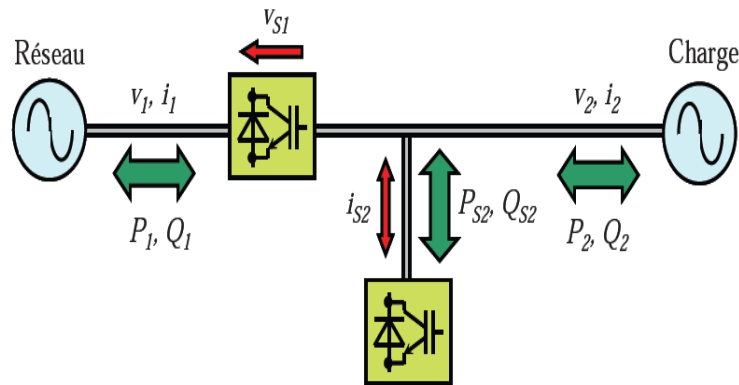
$$X_{lmax} = j \cdot L \cdot \omega \tag{I - 5}$$

Et

$$X_c = \frac{-1}{j \cdot C \cdot \omega} \quad (I - 6)$$

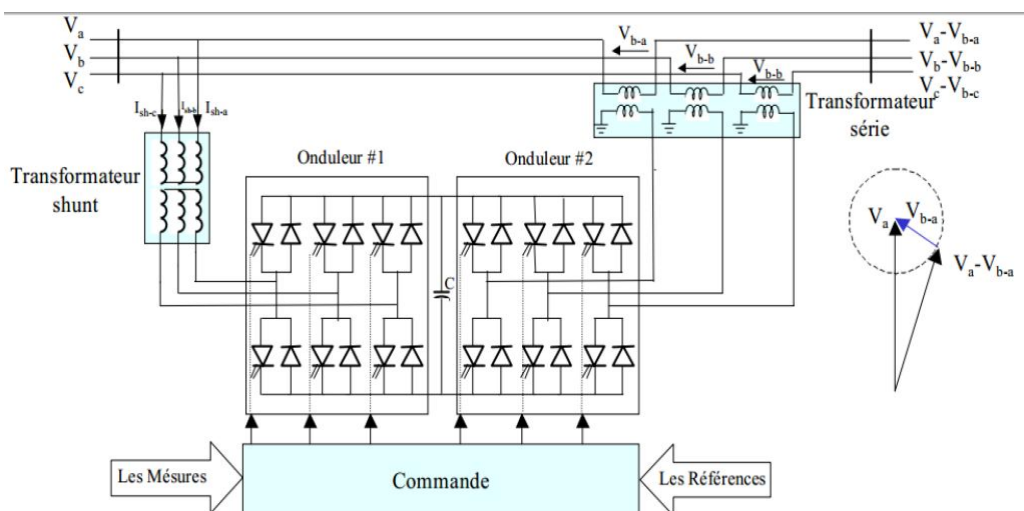
**C. Compensateurs combiné série-parallelé (hybride)**

La combinaison des deux types de compensateurs série et parallelé (figure I.22) permet d'avoir la possibilité de contrôle des trois paramètres déterminant la puissance transmise (tension, impédance et angle de transport) [16].



**Fig.I.22:** Principe de raccordement shunt-série

Le compensateur FACTS hybride le plus utilisé est l'UPFC, il est constitué de deux onduleurs triphasés à deux niveaux, l'un connecté en parallelé au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé et l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés entre eux en étoile. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu et par un condensateur de filtrage comme indiqué sur la figure I.23 [17].



**Fig.I.23:** Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique

Il existe d'autres dispositifs qui sont résumés dans le tableau (I.1) en fonction de leur rôle [13].

**Tab. I.1** : Bénéfices techniques des dispositifs FACTS

Dispositif	Contrôle du transit de puissance	Contrôle de la tension	Stabilité transitoire	Stabilité statique
SVC	+	+++	+	++
STATCOM	+	+++	++	++
TCSC/GCSC	++	+	+++	++
SSSC	++	+	+++	++
TCPST	+++	+	++	++
UPFC	+++	+++	+++	+++
IPFC	+++	+	+++	++

### I.8. Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre, des généralités sur les réseaux électriques de distribution ainsi que les différentes architectures qui le constituent. Par la suite, nous avons présenté les différents modes de réglages de la tension dans le réseau, à savoir, les réglages primaires, secondaires et tertiaires. Une partie a été consacrée pour présenter brièvement les moyens de compensation pour le réglage de la tension tels que les condensateurs, les inductances, les transformateurs à prises réglables et finalement les dispositifs FACTS les plus utilisés.

# CHAPITRE II

## GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

---

## Chapitre II. Généralités sur l'énergie éolienne

### II.1. Introduction

Face à l'épuisement programmé des énergies fossiles et à leur impact négatif sur l'environnement, les énergies renouvelables s'imposent comme la solution d'avenir pour satisfaire de façon durable les besoins énergétiques mondiaux [19].

Les énergies renouvelables sont propres et inépuisables et vu que les autres sources d'énergie sont à coût élevé, plusieurs pays ont encouragé les chercheurs d'étudier et de développer des systèmes de conversion d'énergie renouvelables. Une source d'énergie est 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 [4].

On abordera dans ce chapitre le contexte de l'énergie éolienne en commençant par quelques statistiques sur l'évolution de la production éolienne dans le monde, par la suite une modélisation de la turbine éolienne sera donnée ainsi que la stratégie de commande de la connexion au réseau de la production éolienne. Les impacts de l'insertion des productions décentralisées à base des énergies renouvelables dans les réseaux électriques de distribution seront traités en détails car ces réseaux n'étaient pas conçus initialement pour accueillir ce type de production vu leur structure radiale.

### II.2. Énergie éolienne

C'est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la terre, ce qui crée des zones de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité en utilisant dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent.

Aujourd'hui l'énergie éolienne est bien implantée dans le paysage des producteurs d'énergie électrique. Son essor a été permis grâce aux orientations politiques guidées par différents facteurs (environnemental, stratégique, économique, etc..), mais aussi parce que l'éolien recèle un potentiel énergétique important et que le coût de production à partir de cette énergie est des plus compétitif. Toutefois une telle intégration dans les réseaux électriques n'est pas sans conséquences sur son fonctionnement et son exploitation [20].

### II.2.1. Énergies éoliennes offshore et onshore

L'éolien offshore présente un fort potentiel en termes de production d'énergie éolienne, mais les coûts de mise en place et d'exploitation sont plus élevés que pour les éoliennes onshore installées à terre [21]. Ces dernières sont techniquement plus simples à développer, même si les espaces qui pourraient leur être dédiés pourraient rapidement se raréfier. Les éoliennes offshore installées en mer pourraient être les plus efficaces [22].

L'intérêt de l'implantation en mer est que les vents y sont plus forts et réguliers que sur terre, permettant de produire jusqu'à 60% d'énergie en plus que pour des éoliennes terrestres, en particulier grâce à la taille plus importante des turbines (une éolienne offshore est 2 à 3 fois plus puissante qu'une éolienne terrestre) [23].

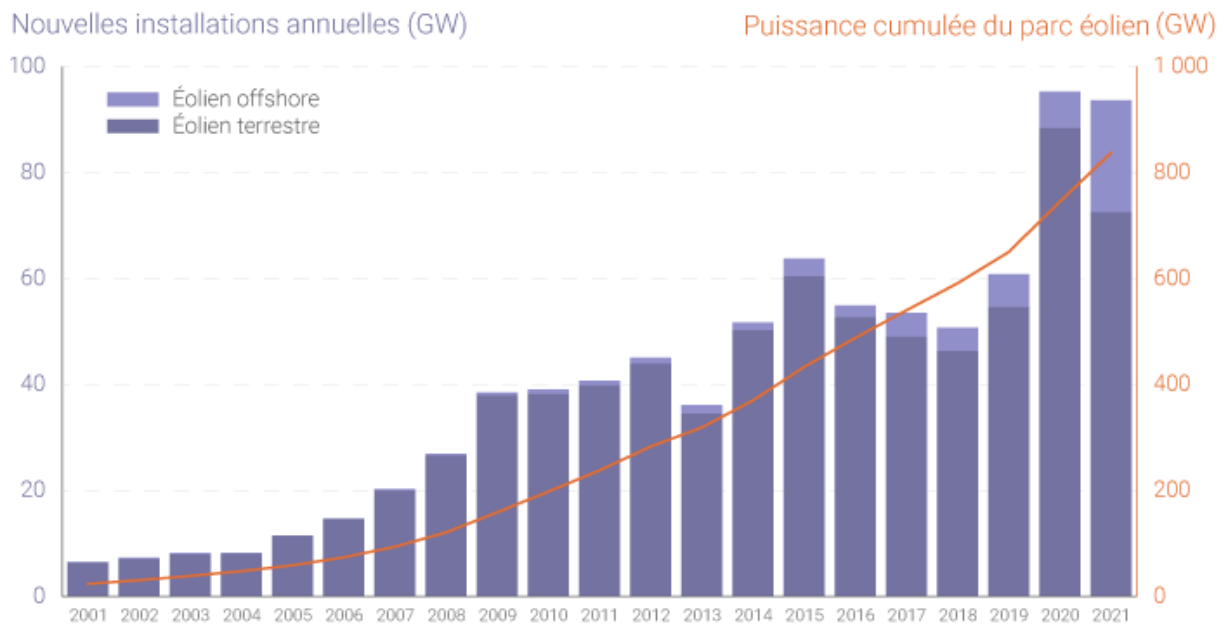
L'espace disponible pour l'éolien onshore pourrait rapidement venir à manquer, contrairement à l'espace en mer qui est potentiellement très vaste. L'éolien offshore permet donc de s'affranchir des limites d'espace pour le déploiement des parcs éoliens (Figure II.1).



**Fig.II.1:** Énergie éoliennes offshore et onshore

En résumé, l'éolien offshore présente des avantages certains en termes de potentiel de production et d'espace disponible, mais il demeure plus coûteux et complexe à mettre en œuvre que l'éolien terrestre. Le choix entre ces deux filières dépend donc des priorités en termes de coûts, de production d'énergie et d'impact environnemental.





**Fig.II.2:** Évolution des nouvelles capacités éoliennes installées

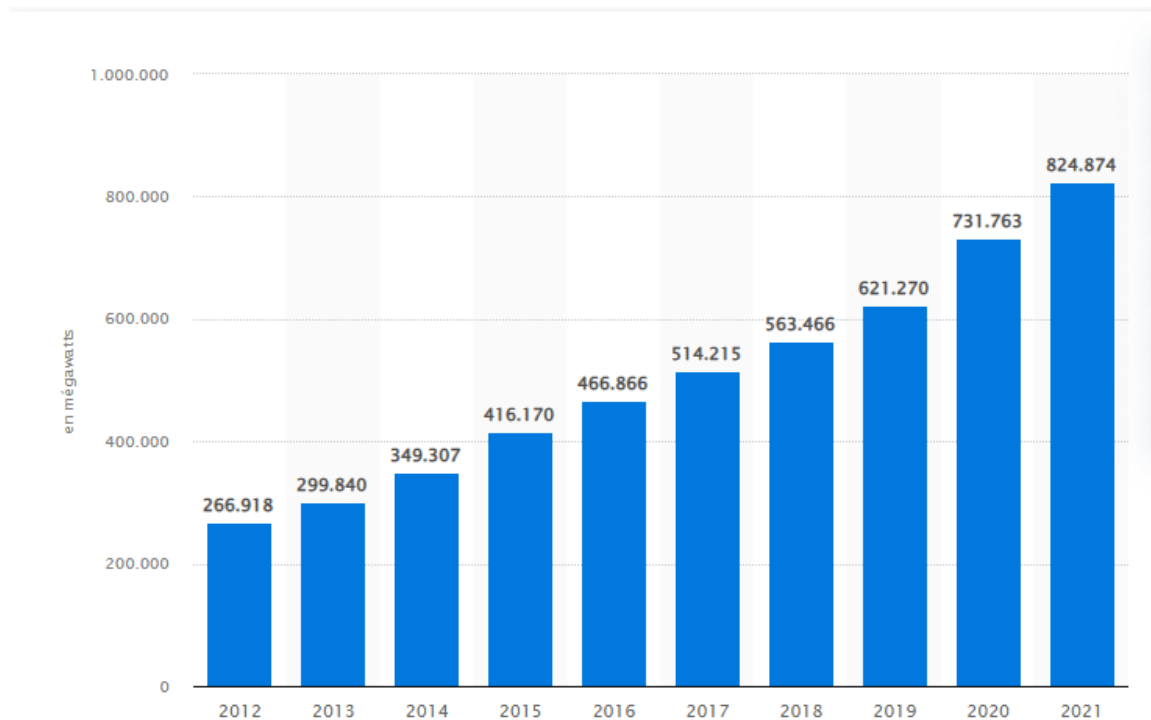
### II.3. Énergie éolienne en quelques chiffres

L'énergie éolienne est connue et exploitée depuis longtemps. Elle fut l'une des premières sources exploitées par l'homme après l'énergie du bois. Sur le fleuve du Nil, cette énergie a été utilisée pour faire avancer les bateaux à voile, en Chine comme au Moyen-Orient pour le pompage d'eau et l'irrigation, en Iran et en Afghanistan dans le broyage des céréales [24].

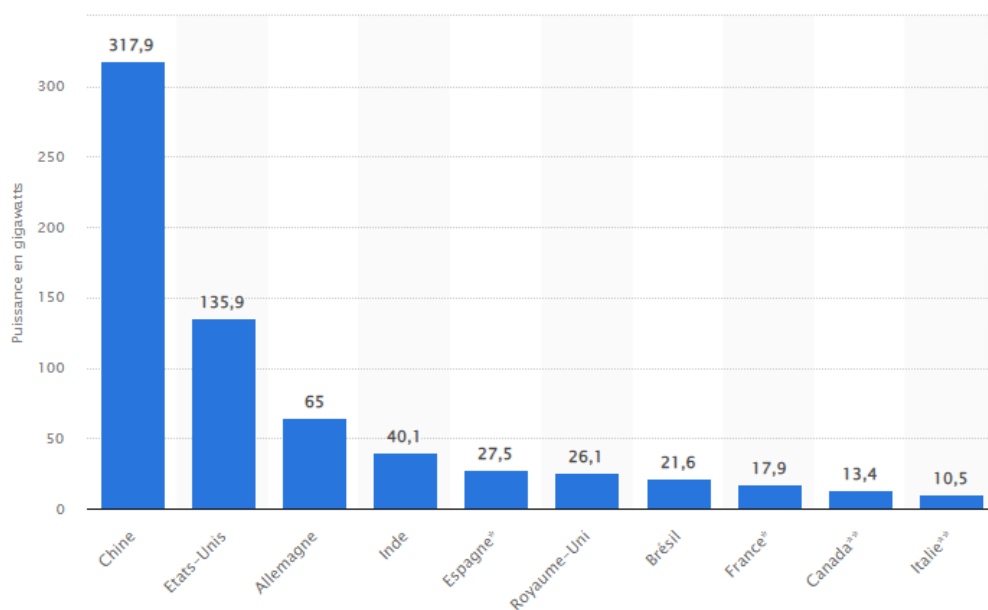
Selon les chiffres publiés par l'Association mondiale de l'énergie éolienne (WWEA), le parc éolien mondial s'est accru de 97,3GW (gigawatts) en 2021. Après l'augmentation de 92,7GW enregistrée en 2020, il s'agit d'un nouveau record de croissance historique. La puissance cumulée de toutes les éoliennes en service sur notre planète dépasse maintenant les 840GW. Une capacité qui leur permet de fournir plus de 7% de la consommation mondiale d'électricité avec 55,8GW de nouvelles turbines, la Chine a installé, à elle seule, plus de la moitié des éoliennes mises en service l'année dernière. Elle bat ainsi à nouveau son propre record de 52GW enregistré en 2020. Cela équivaut à une croissance de 19,4 %. L'Empire du milieu compte désormais 344 gigawatts d'éoliennes en production à travers le pays, soit environ 40% du parc mondial.

En tant que 2<sup>e</sup> marché mondial pour l'énergie du vent, les États-Unis ont également connu une croissance en 2021. La capacité éolienne installée aux USA est maintenant proche de 135GW (soit 16% du parc mondial). Loin derrière ces deux leaders, le parc éolien allemand reste à la 3<sup>e</sup> place en termes de puissance cumulée, avec 64GW, devant l'Inde(40GW) et

l'Espagne (28GW) [25]. La figure II.3 montre une représentation graphique de la capacité de production d'énergie éolienne, et la figure II.4 capacité éolienne mondiale par pays.



**Fig.II.3:** Capacité mondiale de production d'énergie éolienne 2012-2021



**Fig.II.4:** Capacité éolienne mondiale par pays en 2021

---

#### II.4. Avantages et inconvénients des éoliennes

La production éolienne présente plusieurs avantages [4]:

- ✓ Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre ;
- ✓ Elle ne nécessite aucun carburant ;
- ✓ Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. Une éolienne est en grande partie recyclable, entièrement démontable et pourra être très facilement remplacée ;
- ✓ Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ est requis pour les éoliennes ;
- ✓ Les propriétaires fonciers reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain ;
- ✓ L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple.

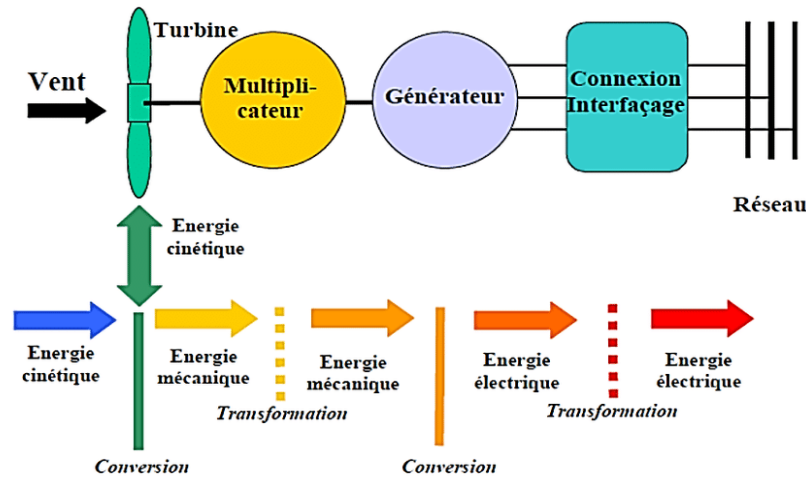
Mais, selon ses détracteurs, plusieurs inconvénients viennent noircir ce tableau presque idyllique [4]:

- ✓ Les riverains craignent généralement une dégradation de l'aspect visuel des sites concernés ;
- ✓ Les riverains déplorent le bruit des éoliennes, et craignent un impact sur l'écosystème induit par ce bruit associé aux interférences électromagnétiques induites par leurs générateurs ;
- ✓ La réception des ondes hertziennes peut être perturbée, ce qui provoque une image bruitée sur les récepteurs de télévision analogique ;
- ✓ Les éoliennes peuvent constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit ;
- ✓ Par son principe de fonctionnement même, une éolienne absorbe l'énergie du vent et le rend turbulent, créant ainsi un effet de sillage derrière elle ;
- ✓ Les éoliennes menacent la sécurité des riverains : chute, bris de pales, blocs de glaces, incendie.

#### II.5. Principe de conversion

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [26], cette conversion (figure II.5) se fait en deux étapes:

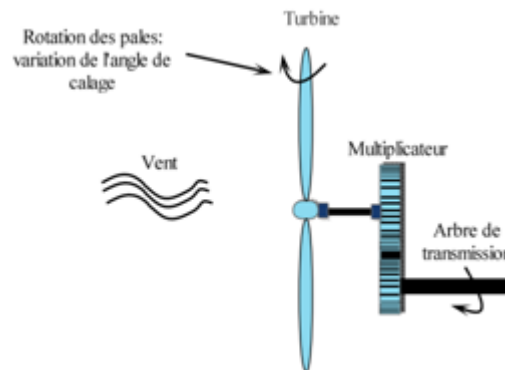
1. La conversion d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ; cette conversion se fait au niveau de l'éolienne.
2. La conversion de cette énergie mécanique en énergie électrique. Selon la technologie de l'éolienne utilisée, la transmission de l'énergie électrique au réseau soit directement, soit par l'intermédiaire total ou partiel d'une interface de l'électronique de puissance [27].



**Fig.II.5:** Principe de conversion d'énergie d'une éolienne

## II.6. Modèle de la turbine éolienne

Considérons une turbine éolienne (figure II.6) munie de 3 pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  [28].



**Fig.II.6:** Schéma d'une turbine éolienne

Si nous considérons une masse d'air ' $m$ ' qui se déplace avec la vitesse ' $v$ ', l'énergie cinétique  $E_c$  de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (II - 1)$$

La puissance disponible ' $P_v$ ' sur une surface ' $S$ ' balayée par la turbine s'exprime par la relation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (II - 2)$$

Avec :

$P_v$  : Puissance incidente sur le rotor (W);

$\rho$  : Densité de l'air (1,225 kg.m<sup>-3</sup>);

$S$  : Surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pôle (mm<sup>2</sup>);

$v$ : Vitesse du vent (m/s).

La puissance capturée par une turbine ' $P_{tr}$ ' s'exprime par :

$$P_{tr} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot S \cdot v^3 \quad (II - 3)$$

Le coefficient de puissance ' $C_p$ ' représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Ce coefficient  $C_p$  est donc bien spécifique à la turbine considérée. L'expression du coefficient de puissance utilisée, est celle d'un système éolien de grande puissance, elle est donnée :

$$\begin{cases} C_p(\lambda; \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda i}} \\ \frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (II - 4)$$

L'angle de calage  $\beta$  ou l'angle d'orientation des pales est maintenu égale à 0 pour l'optimisation (MPPT). En zone 2, la vitesse extraite de la turbine est variable et dépend de la vitesse du vent, c'est là où la maximisation de la puissance ou l'optimisation de la puissance extraite est utilisée. Il faut savoir le minimum sur les zones de fonctionnement des turbines éoliennes

Tel que ' $\lambda$ ' est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{tr}}{v} \quad (II - 5)$$

Connaissant la vitesse de la turbine et la puissance aérodynamique, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aéro} = \frac{P_{tr}}{\Omega_{tr}} \quad (II - 6)$$

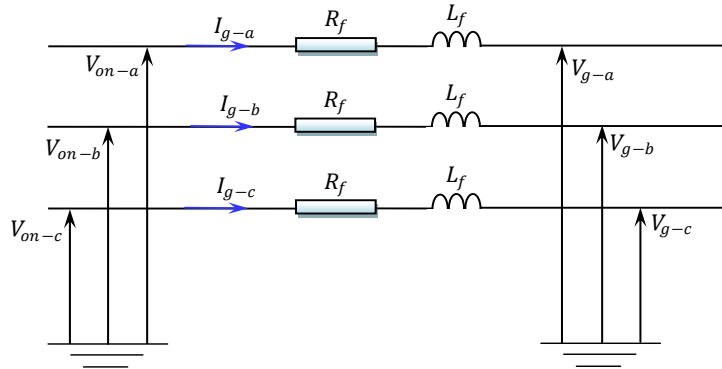
### II.7. Contrôle de la connexion au réseau

Le modèle du filtre de connexion au réseau électrique est illustré sur la figure II.7.

Les équations qui régissent le fonctionnement de ce filtre sont données comme suite [28]:

$$\begin{cases} V_{on-a} = R_f I_{g-a} + L_f \frac{dI_{g-a}}{dt} + V_{g-a} \\ V_{on-b} = R_f I_{g-b} + L_f \frac{dI_{g-b}}{dt} + V_{g-b} \\ V_{on-c} = R_f I_{g-c} + L_f \frac{dI_{g-c}}{dt} + V_{g-c} \end{cases} \quad (II-7)$$

Avec :  $V_{on-a}, V_{on-b}, V_{on-c}$  : tensions à la sortie de l'onduleur ;  $I_{g-a}, I_{g-b}, I_{g-c}$  : courants injectés au réseau électrique ;  $R_f, L_f$  : filtre triphasé ;  $V_{g-a}, V_{g-b}, V_{g-c}$  : tensions du réseau électrique.



**FigII.7** : Schéma électrique du filtre de connexion au réseau électrique

Le modèle de la connexion au réseau dans le repère  $(dq)$  est obtenu en appliquant la transformée de Park à l'équation II-14:

$$\begin{cases} V_{on-d} = R_f I_{g-d} + L_f \frac{dI_{g-d}}{dt} - L_f I_{g-q} \omega_g + V_{g-d} \\ V_{on-q} = R_f I_{g-q} + L_f \frac{dI_{g-q}}{dt} + L_f I_{g-d} \omega_g + V_{g-q} \end{cases} \quad (II-8)$$

Avec :  $V_{on-d}, V_{on-q}$  : composantes de la tension à la sortie de l'onduleur dans le repère  $(dq)$ ;  $I_{g-d}, I_{g-q}$  : composantes de la tension du réseau dans le repère  $(dq)$ ;  $I_{g-d}, I_{g-q}$  : composantes des courants injectés au réseau dans le repère  $(dq)$ .

On définit deux grandeurs de commande :

$$\begin{cases} V_{g-dreg} = R_f I_{g-d} + L_f \frac{dI_{g-d}}{dt} \\ V_{g-qreg} = R_f I_{g-q} + L_f \frac{dI_{g-q}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-9})$$

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation II-16, on obtient :

$$\begin{cases} I_{g-d} = \frac{1}{R_f + sL_f} V_{g-dreg} \\ I_{g-q} = \frac{1}{R_f + sL_f} V_{g-qreg} \end{cases} \quad (\text{II-10})$$

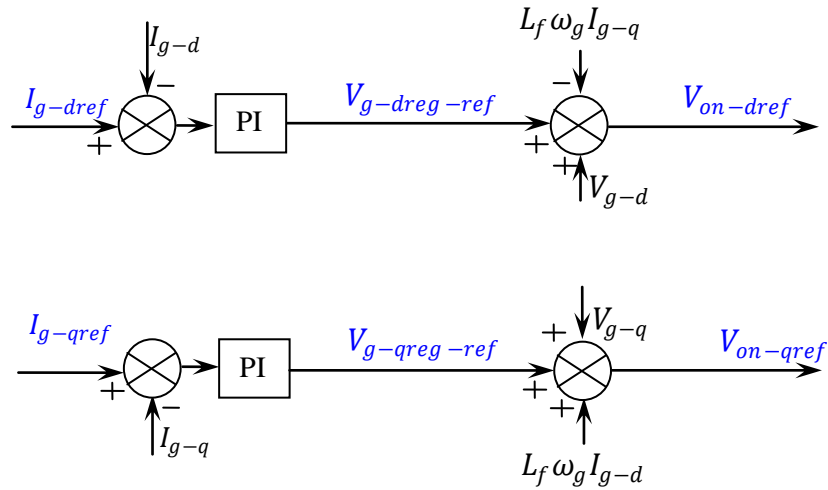
Pour réguler les courants à leurs valeurs de références, des régulateurs proportionnel-intégral (PI) sont utilisés. Si on remplace l'équation II-17 dans II-15, on aboutit à :

$$\begin{cases} V_{on-d} - V_{g-d} = (R_f + sL_f)I_{g-d} - L_f \omega_g I_{g-q} \\ V_{on-q} - V_{g-q} = (R_f + sL_f)I_{g-q} + L_f \omega_g I_{g-d} \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

Les tensions de références sont définies comme suit :

$$\begin{cases} V_{on-dref} = V_{g-dreg-ref} + V_{g-d} - L_f \omega_g I_{g-q} \\ V_{on-qref} = V_{g-qreg-ref} + V_{g-q} + L_f \omega_g I_{g-d} \end{cases} \quad (\text{II-12})$$

La figure II.8. Illustre le schéma bloc du contrôle des courants côté réseau électrique.



**Fig.II.8 :** Chaîne globale de la régulation des courants

Les expressions des puissances active et réactive échangées avec le réseau électrique sont :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} V_{g-d} I_{g-d} \\ Q_g = -\frac{3}{2} V_{g-d} I_{g-q} \end{cases} \quad (\text{II-13})$$

Avec :  $V_{g-d} = \sqrt{3}V_{g-eff}$  ;  $V_{g-eff}$  : valeur efficace de la tension du réseau.

A partir de la relation II-20 on voit bien que la puissance active  $P_g$  et la puissance réactive  $Q_g$  ne peuvent être contrôlées que par les courants  $I_{g-d}$  et  $I_{g-q}$  respectivement. Les courants de références  $I_{g-dref}$  et  $I_{g-qref}$  sont déduits de la relation II-20 comme suit :

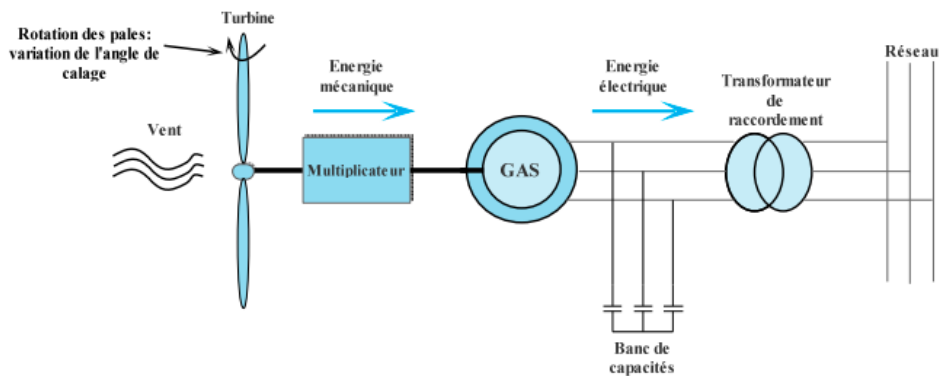
$$\begin{cases} I_{g-dref} = \frac{2 P_{g-ref}}{3 V_{g-d}} \\ I_{g-qref} = -\frac{2 Q_{g-ref}}{3 V_{g-d}} \end{cases} \quad (II-14)$$

## II.8. Les modes de connexion

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration [28].

### II.8.1. Éolienne à vitesse fixe

La génératrice asynchrone à cage, est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans la production d'énergie éolienne à vitesse fixe comme montre sur la figure II.9 [29] :



**Fig.II.9:** Éolienne à vitesse fixe

### II.8.2. Éolienne à vitesse variable

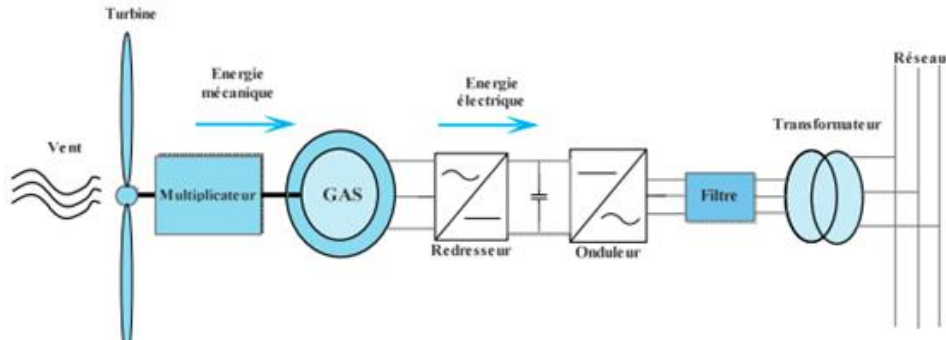
Les systèmes à vitesse variable se sont développés grâce à l'évolution de l'électronique de puissance.

L'obtention de la vitesse variable est souvent réalisée en utilisant deux solutions technologiques [28] :



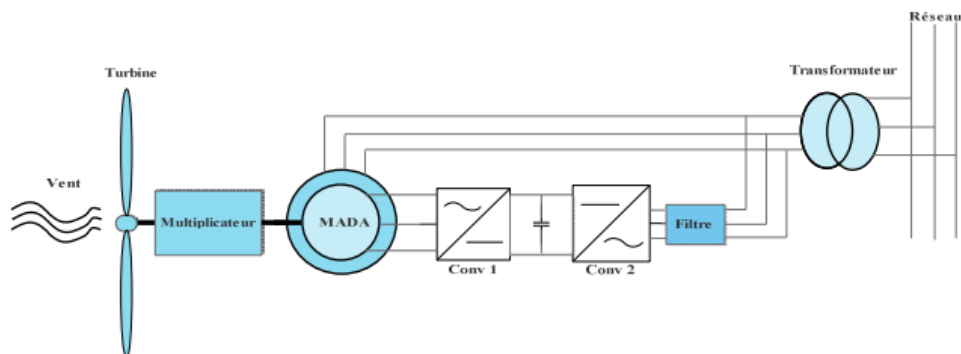
### A. Éolienne basée sur une machine asynchrone

- ✓ *Éolienne basée sur une machine asynchrone à cage* : Un générateur à induction à cage d'écureuil (figure II.10) peut fonctionner à des vitesses variables à l'aide d'un convertisseur de puissance pour produire de l'énergie sur une large plage de vitesses de vent [30].



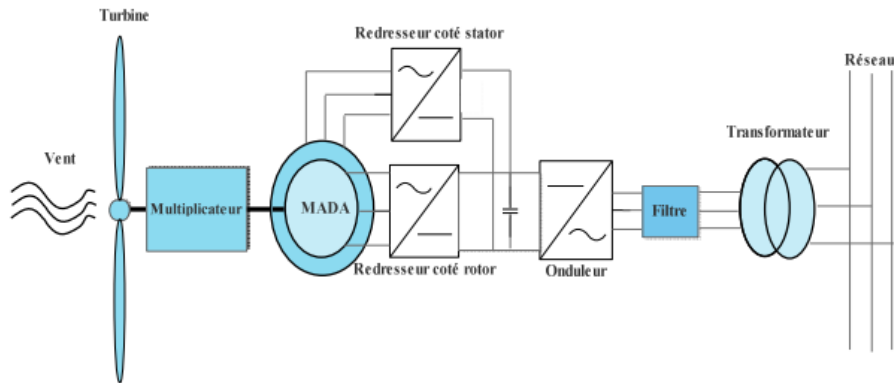
**Fig.II.10:** Éolienne basée sur une GAS à cage alimentée au stator par un convertisseur AC/DC/AC

- ✓ *Éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation partiellement interfacée avec le réseau* : La machine asynchrone doublement alimentée (MADA) a suscité un intérêt particulier surtout en tant que génératrice dans le domaine de l'énergie éolienne. Pour les éoliennes utilisant la MADA, le stator de la génératrice est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques comme montré sur la figure II.11 [26].



**Fig.II.11:** Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation partiellement interfacée avec le réseau

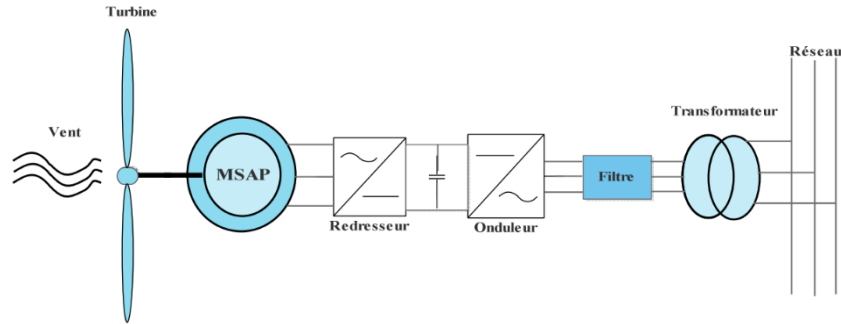
- ✓ **Éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation complètement interfacée avec le réseau :** Une autre structure d'éolienne basée sur la MADA (machine asynchrone à double alimentation) est également envisagée dans l'industrie éolienne. Cette structure, appelée éolienne à double alimentation, permet une meilleure adaptation de la production d'électricité aux conditions météorologiques variables. Comme montré sur la figure II.12 [26].



**Fig.II.12:** Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation complètement interfacée avec le réseau

### **B. Éolienne basée sur une machine synchrone à aimants permanents :**

Les éoliennes basées sur des génératrices asynchrones à rotor bobiné (figure II.13) nécessitent l'utilisation de bagues/balais et d'un multiplicateur, ce qui induit des coûts de maintenance élevés. Pour réduire ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles. Elles sont couplées directement à la turbine éolienne, sans multiplicateur. Ce type de conception permet d'éviter l'utilisation de bagues/balais et de multiplicateur, et donc de réduire significativement les coûts de maintenance [26].



**Fig.II.13** : Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone à grand nombre de paires de pôles

## II.9. Intégration de l'énergie éolienne aux systèmes électriques

Les progrès réalisés en matière de libéralisation du marché de l'électricité et de développement de la production décentralisée ont conduit à de nouveaux problèmes scientifiques et techniques. Ces problèmes sont liés aux nouveaux types de sources, distribuées géographiquement et se développant rapidement. Cependant, l'intégration de l'éolien dans le système suppose à la fois une architecture de marché spécifique et des capacités de transport du réseau régional en rapport avec la puissance éolienne installée [29].

L'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau de distribution est un sujet important pour les opérateurs de réseau électrique. Dans certains pays, une partie de la puissance éolienne raccordée au réseau est intégrée aux réserves de puissance dont disposent les opérateurs pour ajuster, à la hausse ou à la baisse, la fréquence du réseau [23]. Une autre considération importante est la gestion de la stabilité du réseau. L'énergie éolienne peut créer des fluctuations de tension et de fréquence sur le réseau, ce qui peut affecter la qualité de l'énergie fournie aux consommateurs. Les gestionnaires de réseau doivent donc mettre en place des systèmes de régulation de la tension et de la fréquence pour assurer la stabilité du réseau.

En résumé, l'intégration de l'énergie éolienne dans un réseau de distribution peut présenter des défis, mais avec une planification et une gestion adéquate, il est possible de l'intégrer de manière fiable et efficace dans le système énergétique.

## II.10. Impacts de l'intégration d'un système éolien dans le réseau

Le raccordement un système électrique quelconque a un impact non négligeable qui dépend de la technologie utilisée, et aussi du type de réseau. En général on peut dire que plus le taux de pénétration est important plus l'impact de l'intégration des énergies renouvelable dans les réseaux est significatif. On peut distinguer des impacts locaux qui concernent tous les

---

types de réseaux et les impacts globaux qui concernent en particulier les réseaux de transports interconnectés et les réseaux insulaires [31].

### II.10.1. Impacts Locaux

Ce sont les impacts qui se produisent dans le point de raccordement de l'unité. Les impacts locaux sont en général indépendants du taux de pénétration global des unités de production des énergies dans le système. Ils concernent deux principaux aspects, la capacité d'accueil du réseau et la qualité de tension [26] :

#### A. Sur le plan de tension

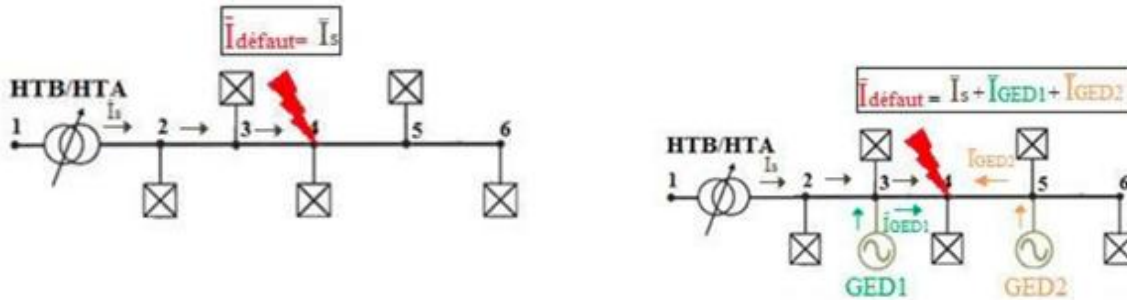
Les impacts sur la tension de telles productions vont être différents selon le type de réseaux auxquels elles sont connectées, selon la nature du réseau, les caractéristiques du poste source, le point de raccordement et la puissance injectée par l'éolienne. La tension peut être élevée au point de raccordement, pouvant même dépasser la limite admissible. La gestion du plan de tension a pour objet de maîtriser les chutes de tension active et réactive qui sont croissantes de l'amont vers l'aval tout en assurant le respect des obligations contractuelles ou réglementaires. L'intégration de l'énergie éolienne provoque les fluctuations suivantes [26] :

- ✓ **Creux de tension** : Avec les technologies classiques, en cas de creux de tension, les éoliennes se protègent généralement en se déconnectant du réseau plus rapidement que les autres moyens de production [4].
- ✓ **Flicker** : ces variations sont dues aux fluctuations de la vitesse du vent, aux limites mécaniques de l'éolienne [4].
- ✓ **Harmonique** : Suivant les technologies utilisées, les éoliennes peuvent donc générer des harmoniques [32]. Et les niveaux d'harmoniques dépendent de la technologie de convertisseurs utilisée [4].

#### B. Court-circuit

L'impact de l'éolienne sur le courant de court-circuit (figure II.14) dépend de plusieurs facteurs, tels que la taille de l'éolienne, la technologie utilisée, la configuration du réseau, etc. Il est donc important de prendre en compte ces facteurs pour évaluer l'impact réel de l'éolienne sur le courant de court-circuit. Il est important de s'assurer aussi que les niveaux maximaux autorisés pour les différents appareils du réseau et des câbles ne sont pas dépassés, ainsi que la capacité d'interruption du réseau. En effet, le dépassement de ces valeurs peut entraîner un risque de détérioration du matériel, voire de dysfonctionnement du réseau [26].

La figure II.14 illustre l'impact de production décentralisée sur le courant de court-circuit. Sans la présence des générateurs décentralisés à gauche et avec leurs présences à droite .



**Fig.II.14:** Impacts de production décentralisée sur le courant de court-circuit

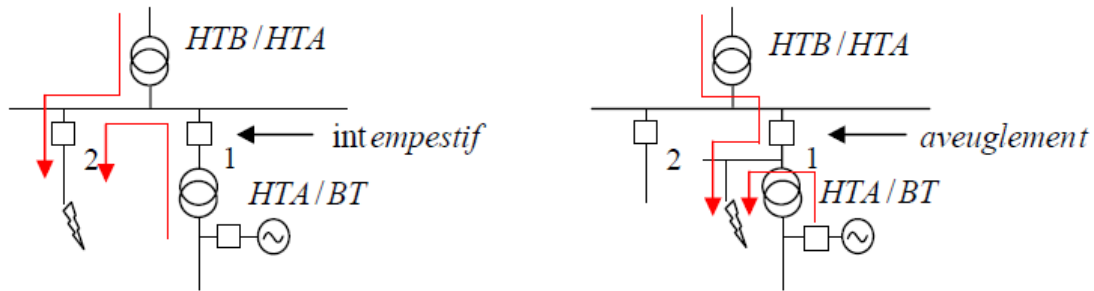
### C. Plan de protection

Le raccordement de la production d'énergie renouvelable peut entraîner des variations du sens ou de l'amplitude des courants en régime permanent, des variations des courants de court-circuit, des modifications de la tension et des variations des impédances mesurées.

Différents aspects doivent être considérés en plus du risque de dépassement du pouvoir de coupure des organes de protection, le raccordement d'une ferme éolienne peut :

- ✓ Affecter la sensibilité du plan de protection (non détection de certains défauts);
- ✓ Affecter sa sélectivité (déconnexion de parties de réseau plus grandes que nécessaire pour l'élimination d'un défaut);
- ✓ Provoquer des déclenchements intempestifs de portions saines du réseau;
- ✓ Perturber les dispositifs de localisation de défauts installés sur les réseaux de distribution [4].

La figure (II.15) illustre un exemple de problèmes de déclenchement intempestif (à gauche) et de l'aveuglement de la protection (à droite).



**Fig.II.15:** Problème de déclenchement intempestif des protections

### II.10.2. Impacts globaux

A part les impacts locaux qui ont des effets dans le voisinage du point de raccordement, Les unités de production des énergies renouvelables peuvent avoir des impacts plus globaux à l'échelle d'une région surtout si elles sont raccordées au réseau de transport ou dans les réseaux insulaires.

#### A. Impact sur le fonctionnement des systèmes

La problématique majeure liée à l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux est de deux ordres :

- ✓ La variabilité de la production d'énergie renouvelable 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. Des capacités de production de réserve contrôlables sont alors nécessaires pour pallier à ces variations, en particulier pour satisfaire la demande en période de pointe;
- ✓ L'incertitude sur les prévisions météorologiques induisant une incertitude sur la production. Cette problématique est plus marquée pour la production éolienne car les prévisions de vitesse de vent sont moins fiables que celles de l'ensoleillement.

Les deux aspects cités plus haut ont trait à des impacts liés surtout à la réalisation de l'équilibre production-consommation à divers horizons temporels. Outre ces préoccupations, restent celles liées à la sécurité du réseau du point de vue global [29].

#### B. Capacité de transport

La capacité des lignes et des postes est limitée. Cette limitation peut constituer dans le cas de l'éolien un problème aigu, car les lieux de production (sites ventés) sont souvent éloignés des lieux de consommation. L'adaptation et le renforcement des postes peuvent concerner les

---

postes HTA-HTB suite au développement de l'éolien dans le réseau de distribution (modification des protections, augmentation de la puissance de court-circuit...). Afin d'éviter la congestion des lignes de transport et d'assurer la sécurité du réseau, de nouvelles lignes devraient être construites en particulier aux interconnexions entre les réseaux gérés par des opérateurs différents [33].

### **C. Impacts sur le sens de transit de puissance**

L'introduction de productions décentralisées d'énergie renouvelable dans les niveaux de tension inférieurs peut conduire à une injection de puissance dans le sens contraire, c'est-à-dire, de la distribution vers le transport. Cela peut entraîner des défis pour la conception et la maintenance des équipements de protection du réseau électrique, qui doivent être bidirectionnels pour gérer ces flux de puissance inverses.

Les réseaux de distribution sont souvent surdimensionnés pour faire face à l'accroissement de la consommation d'énergie. Cependant, lorsque le taux de pénétration des productions décentralisées augmentera, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales. Les équipements de protection doivent alors être en mesure de détecter et de gérer ces congestions pour éviter des perturbations dans le réseau électrique [26].

### **D. Dispatching**

L'impact de l'intégration des énergies renouvelables sur la gestion prévisionnelle du parc de production est principalement dû à la variabilité et à l'incertitude de la production renouvelable. Les erreurs de prédiction peuvent entraîner des fluctuations importantes dans la production d'électricité, ce qui peut compliquer la tâche des gestionnaires de réseau pour maintenir l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.

Les deux principaux aspects qui influencent cet impact sont le dispatching, c'est-à-dire la gestion des différentes sources de production d'électricité, et l'exploitation du parc de production, y compris sa durée de vie, sa charge partielle et les arrêts/démarrages [29].

---

**II.11. Conclusion**

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable prometteuse qui présente des avantages considérables, mais qui nécessite également une gestion soignée pour minimiser son impact sur l'environnement et les communautés locales. Avec une technologie en constante amélioration et une utilisation judicieuse, l'énergie éolienne peut jouer un rôle important dans la transition vers un système énergétique plus durable et respectueux de l'environnement.

Dans ce chapitre, nous avons donné, une vision globale sur les énergies renouvelables et particulière sur l'énergie éolienne, où nous avons exposé les différents problèmes rencontrés de son intégration au réseau électrique.



CHAPITRE III

SIMULATION ET

INTERPRÉTATION DES

RÉSULTATS

## Chapitre III. Simulation et interprétation des résultats

### III.1. Introduction

Afin d'évaluer l'impact des productions décentralisées « PD » à base de ressources renouvelables et les changements qu'elles apportent sur le plan de tension dans un réseau électrique. Une simulation sera effectuée sur un réseau de distribution est avec une architecture radiale.

En premier lieu, nous allons évaluer les tensions aux différents nœuds ainsi que les chutes de tension et les pertes de puissances dans les branches. Par la suite, nous allons intégrer une ferme éolienne dans le réseau à deux emplacements spécifiques, à savoir, au niveau du nœud qui présentera la chute de tension la plus importante et au niveau d'un nœud de départ des ramifications. Les paramètres tension et puissances seront évalués après cette insertion afin d'évaluer l'impact causé sur le plan de tension et sur le sens de transit des puissances dans les branches.

### III.2. Présentation du réseau étudié

Le réseau radial étudié est d'une tension nominale de 11kV. C'est un réseau test fortement chargé, constitué de 11 branches et 11 charges de puissances totales actives et réactives de (20 MW) et (8 MVar) respectivement, comme illustré sur la figure III.1. Les paramètres du réseau sont donnés en annexe.

La simulation est effectuée sous 'Matlab-Simulink-Sim Power System' sans et avec la présence de la production éolienne pour voir l'impact de celle-ci sur le plan de tension et le flux de puissance réseau. La régulation de la tension sera aussi faite par une compensation shunt pour améliorer le profil de la tension.

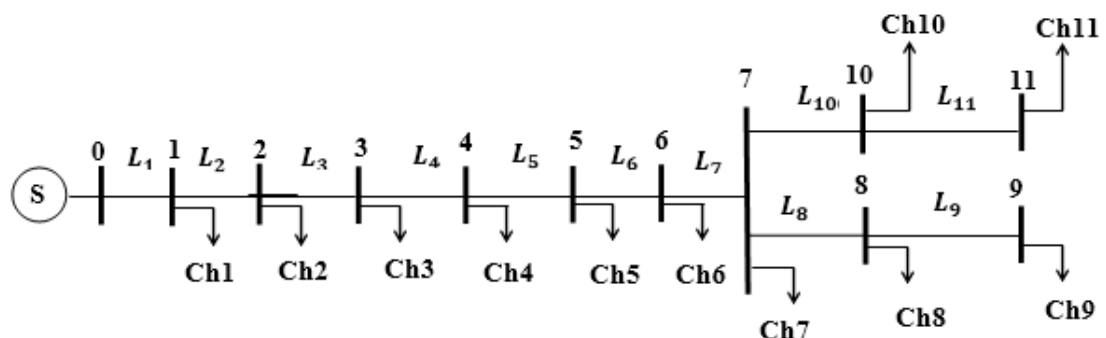
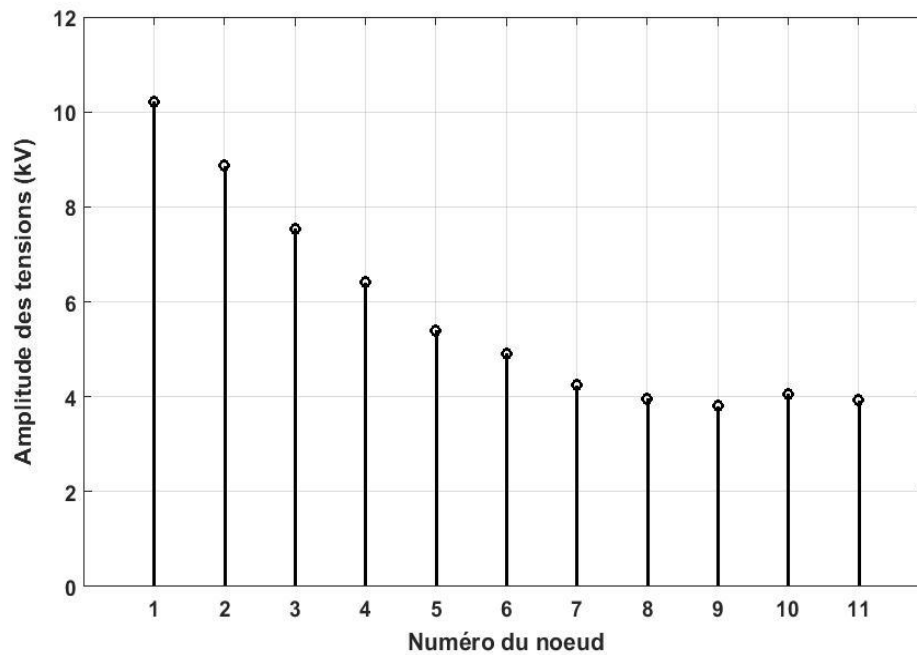


Fig.III.1: Topologie du réseau électrique étudié

### III.2.1. État du réseau sans la présence de la production éolienne

Cette section sera consacrée à l'évaluation de l'amplitude des tensions aux nœuds (figure III.2) et chutes de tension dans les différentes branches du réseau (figure III.3), ainsi que le sens de transit du flux de puissances (figure III.4), avant l'insertion de la production éolienne.



**Fig.III.2:** Amplitude des tensions aux différents nœuds

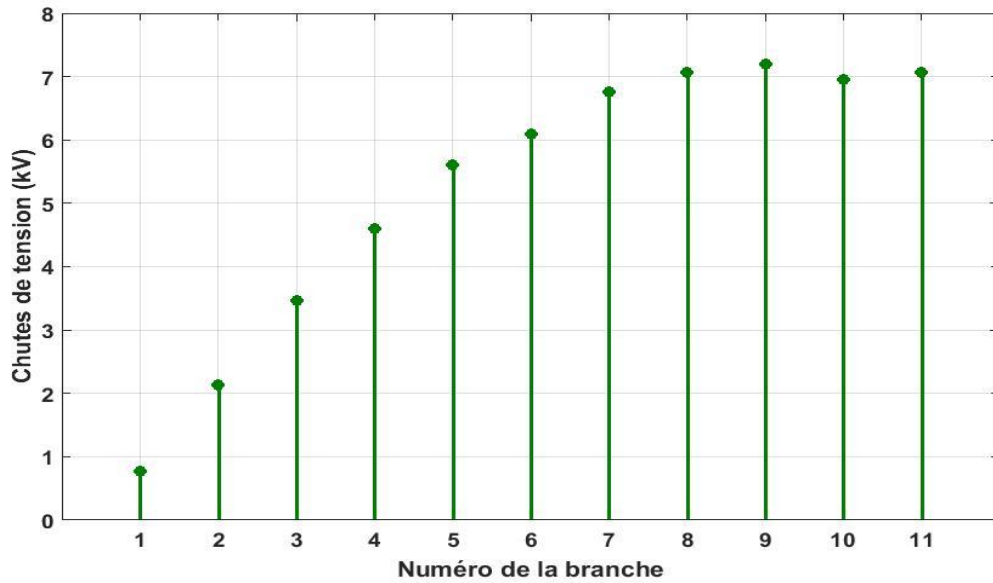


Fig.III.3: Cumul des chutes de tension de la source dans les branches

Flux de puissance active provenant de la source  
 Flux de puissance réactive provenant de la source

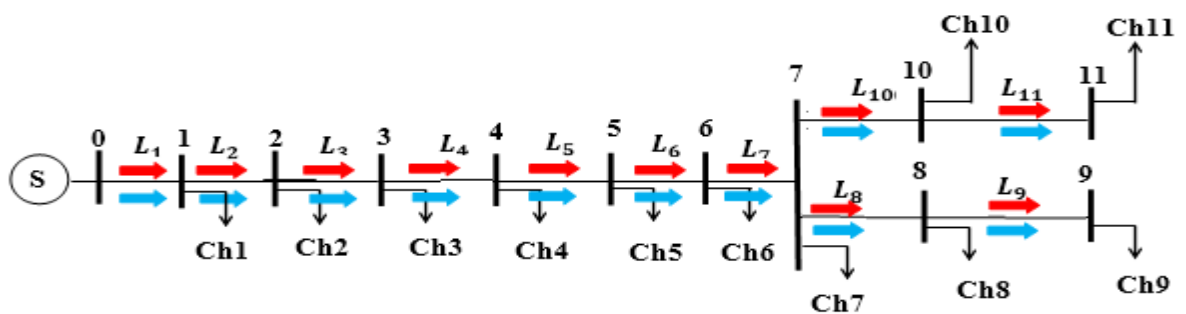


Fig.III.4: Sens du flux des puissances active et réactive

### Interprétation des résultats

D'après la figure III.2 la tension aux différents nœuds diminue en fonction de la distance qui la sépare de la source, et cela se produit à cause des chutes de tension dans le réseau.

On remarque dans la figure III.3 que le réseau test présente de fortes chutes de tension qui dépasse la tolérance acceptée ( $\pm 10\%$ ), car c'est un réseau qui est fortement chargé. La valeur de la tension la plus faible est enregistrée dans le nœud 9 qui est de l'ordre de 3801V équivalente à une chute de tension cumulée de 7199V, cela est dû à la forte demande des charges en puissances active et réactive qui se traduit par un transit de forts courants à travers les branches

ce qui engendre des chutes importantes du niveau de tension. La figure III.4 illustre le sens traditionnel du flux de puissance qui est unidirectionnel de la source vers les différentes charges.

### III.2.2. Etat du réseau avec insertion d'une production éolienne

Cette partie sera consacrée à l'insertion de la production éolienne dans deux emplacements différents qui sont le nœud 9, parce qu'il présente la chute de tension la plus élevée et le nœud 7 qui est le départ de la ramification. Les résultats obtenus par ces deux simulations permettront de choisir l'emplacement idéal par rapport aux chutes de tension, aux pertes de puissances actives totales dans le réseau et cela pour différents taux d'intégration.

#### A. Premier scénario : Impact sur le plan de tension

La production éolienne est connectée au nœud 7 puis au nœud 9, en générant une puissance active, à un taux d'intégration variable d'une manière linéaire allant de 5% à 45% par rapport à la puissance totale demandée par les charges. Une évaluation des grandeurs du réseau, à savoir, les tensions aux nœuds, les chutes de tension et les puissances transitées à travers les branches ainsi que les pertes de puissances, sera effectuée.

Les résultats de simulation après l'insertion de la ferme éolienne au nœud 7 puis 9 sont présentés dans les figures III.5, III.6 et III.7.

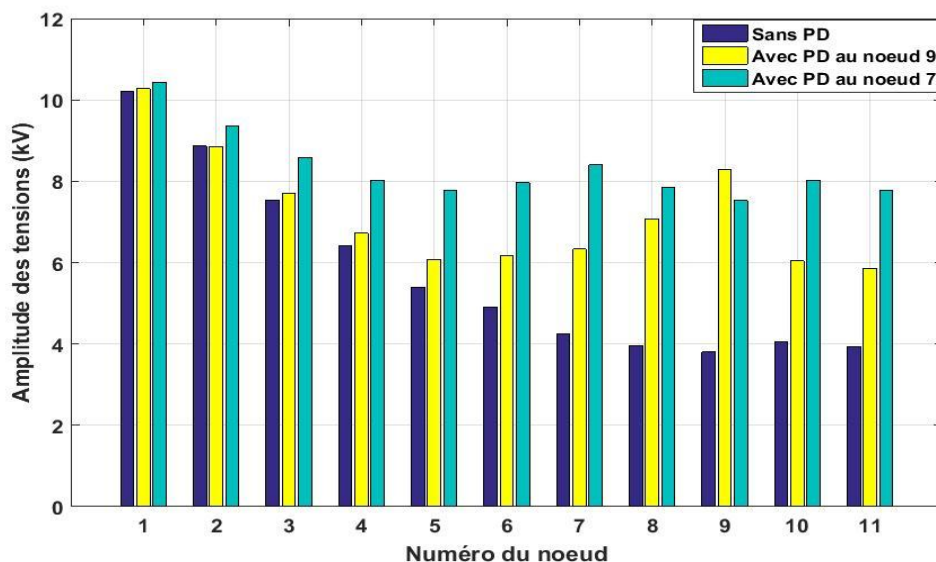
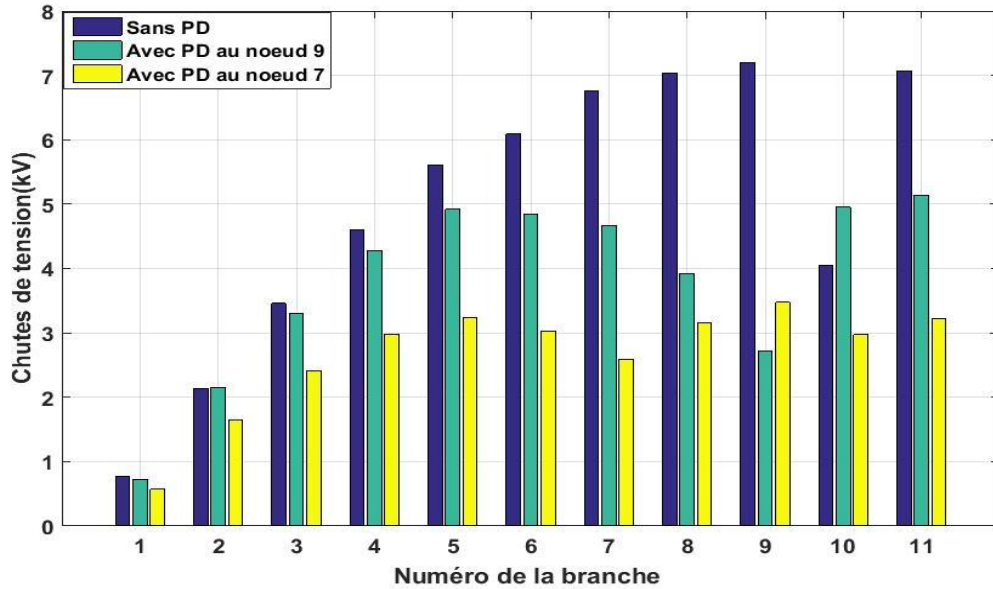
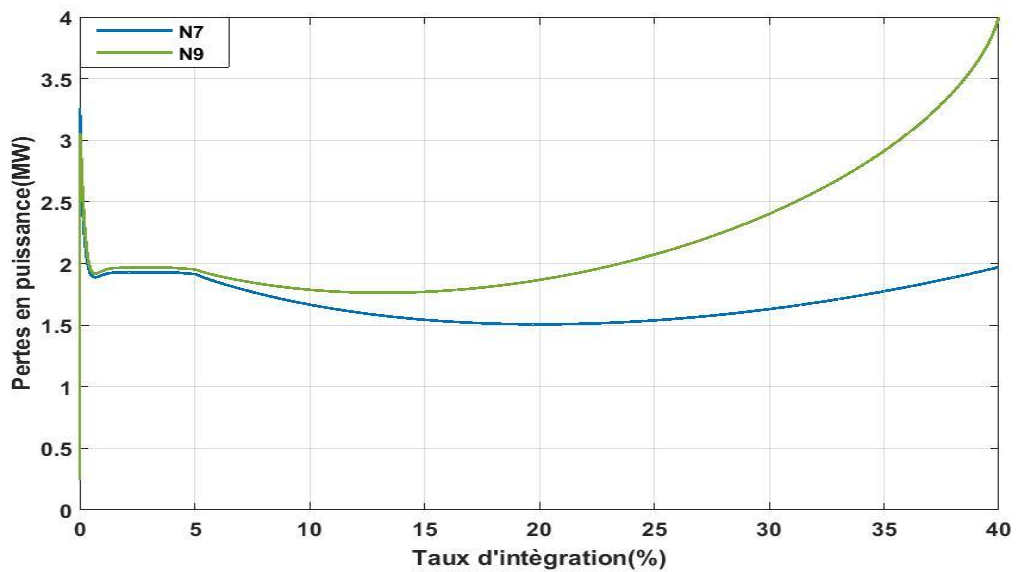


Fig.III.5: Amplitude des tensions aux nœuds avant et après l'insertion de la PD



**FigIII.6:** Chutes de tension dans les branches avant et après l'insertion de la PD



**Fig.III.7:** Evolution des pertes de puissance active en fonction du taux d'intégration

### Interprétation des résultats

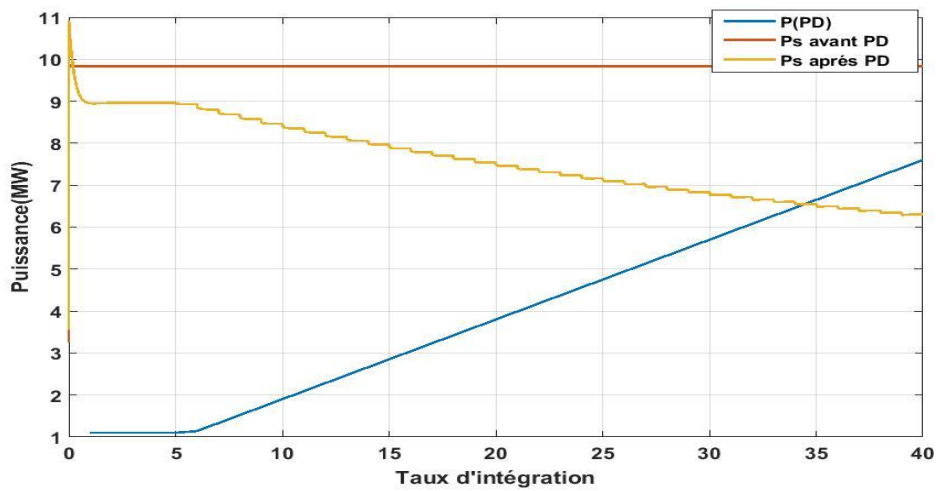
La figure III.5 montre une amélioration du plan de tension sur l'ensemble du réseau après intégration de la production éolienne au nœud 7 par rapport à son emplacement au nœud 9 et à état initial du réseau. Cette situation a engendrée une diminution des chutes de tension cumulées dans les branches comme il est bien illustré sur la figure III.6.

La figure III.7 montre que l'emplacement optimal de la production éolienne par rapport aux pertes actives totales est le nœud 7 qui enregistre les plus faibles.

On se basant sur les résultats obtenus, on conclue que le meilleur emplacement est au niveau du nœud 7.

### **B. Deuxième scénario : Impact sur le flux de puissances**

Après avoir déterminé l'emplacement optimal de la production éolienne, cette dernière sera injectée pour différents taux d'intégration afin d'évaluer son influence sur le sens du transit des puissances et sur la puissance injectée par le poste source. Les résultats sont représentés dans les figures III.8 à III.13.



**FigIII.8:** Evolution des puissances injectées par la ferme éolienne et le poste source avant et après l'insertion

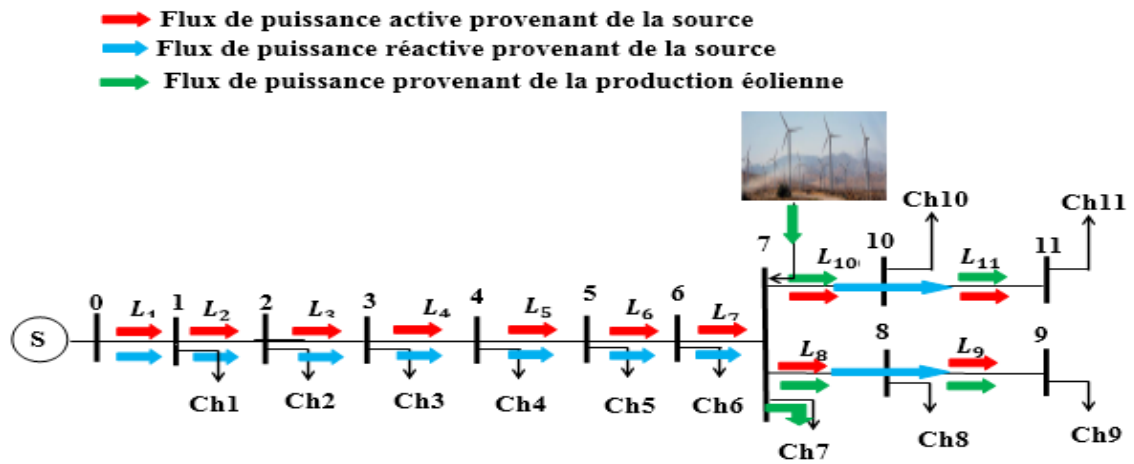


Fig. III.9: Flux de puissances après insertion de la PD à un taux d'intégration de 20%

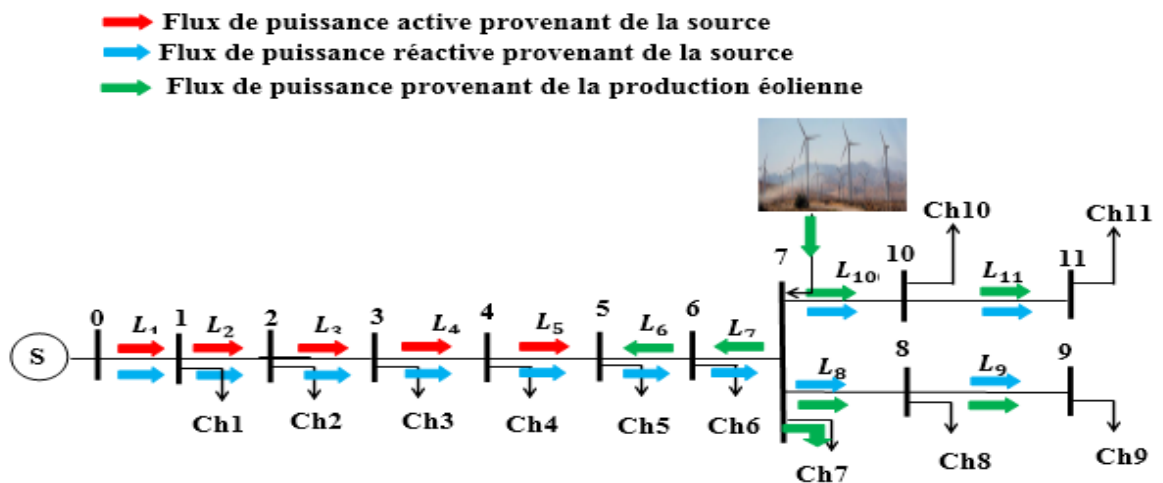


Fig.III.10: Flux de puissance après insertion de la PD à un taux d'intégration de 30%



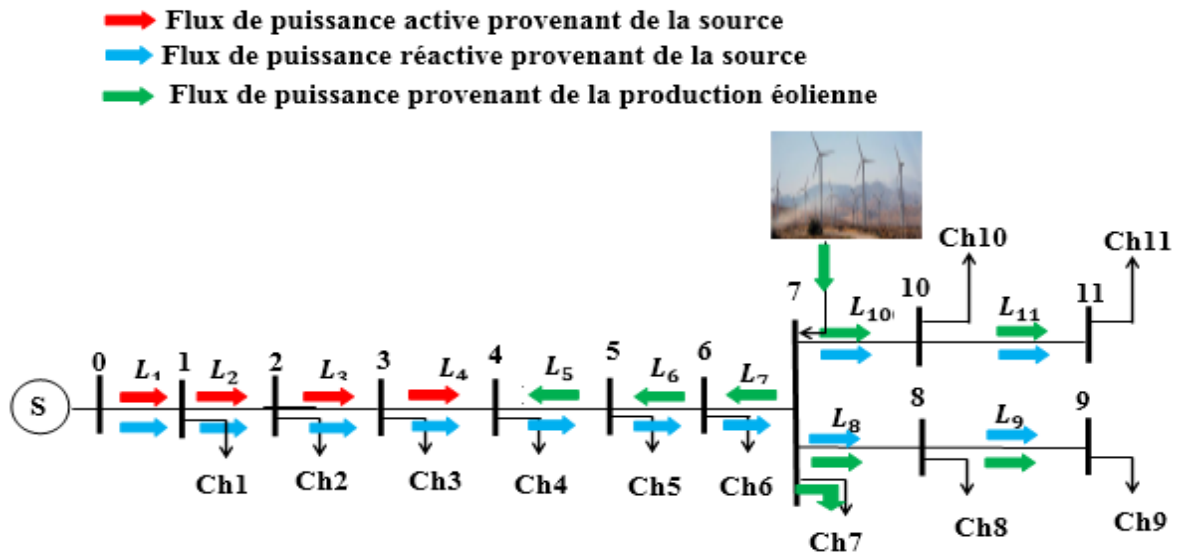


Fig.III.11: Flux de puissance après insertion de la PD à un taux d'intégration de 40%

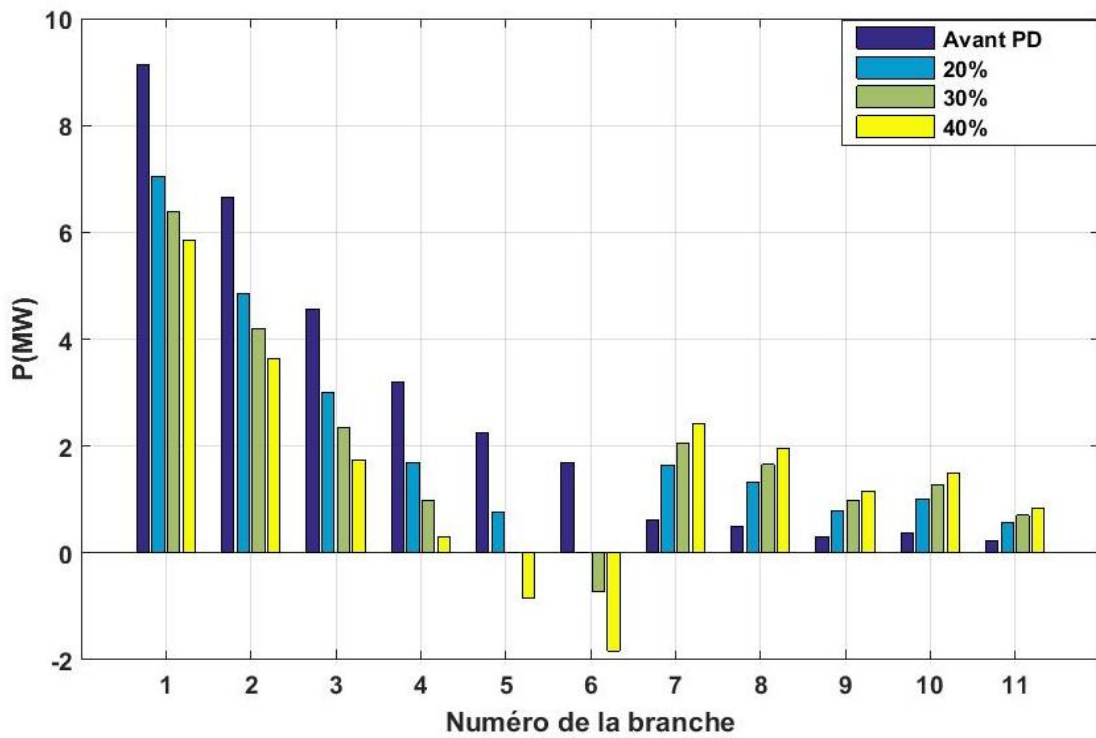
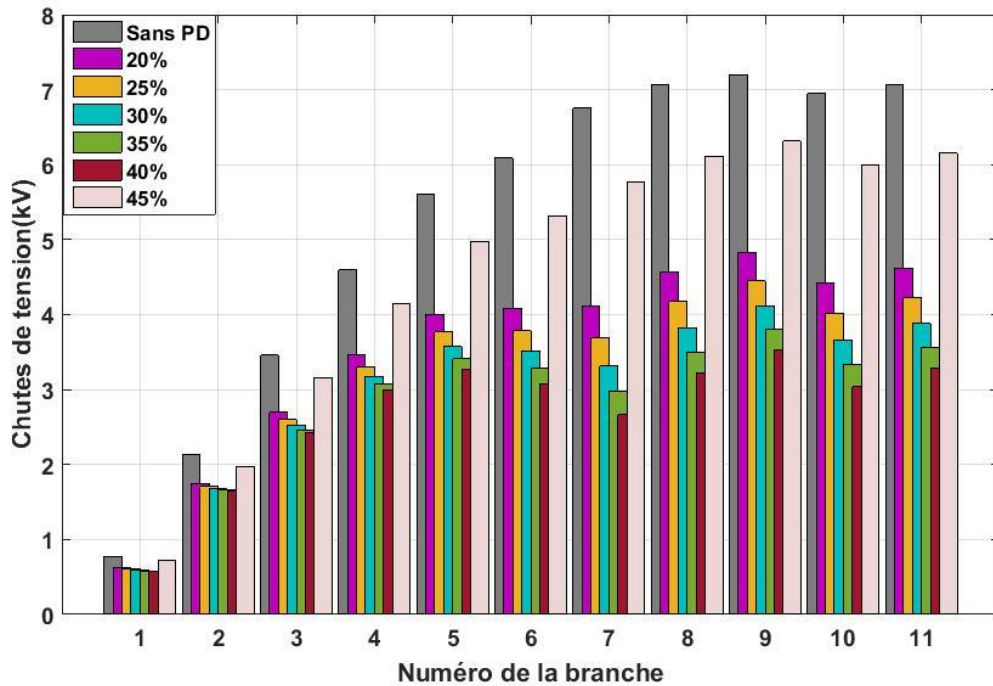


Fig.III.12: Puissances transitées dans les branches avant et après insertion pour différents taux d'intégration



**FigIII.13:** Cumul des chutes de tension pour différents taux d'intégration

### Interprétation des résultats

Il est bien illustré sur la figure III.8 que la puissance délivrée par le poste source diminue avec l'augmentation de la puissance injectée par la ferme éolienne de telle sorte à garantir l'équilibre entre la production et la consommation, la source est alors soulagée.

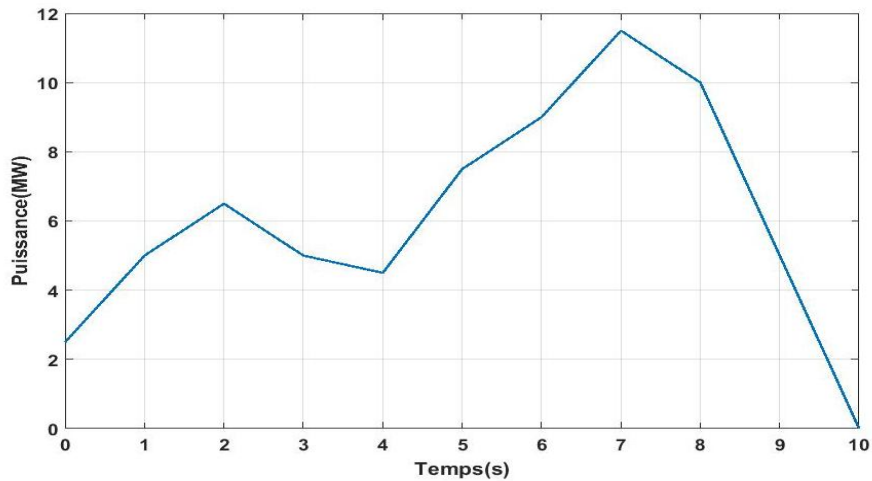
D'après les figures III.9 à III.12, qui représentent le sens du flux de puissances actives transitées dans les lignes en fonction du taux d'intégration, on remarque que pour un taux d'intégration de 20%, la production éolienne délivre une puissance aux charges se trouvant en aval du nœud de son emplacement. Les charges de 7 à 11 sont donc alimentées par la source et par la production éolienne simultanément. À un taux de 30%, on constate un inversement du flux de puissance sur les lignes 7 et 6, c'est-à-dire que la production éolienne a satisfait toutes les charges qui se trouvent en aval et le surplus de puissances servira à alimenter les charges se trouvant en amont du nœud de connexion. À un taux de 40%, l'inversement du flux de puissance va atteindre la ligne 5.

La figure III.13 montre une diminution des chutes de tension avec l'augmentation du taux d'intégration de la production éolienne jusqu'à un taux de 40%, au-delà de cette valeur un comportement inverse est enregistré avec l'augmentation des chutes des tensions. Le taux

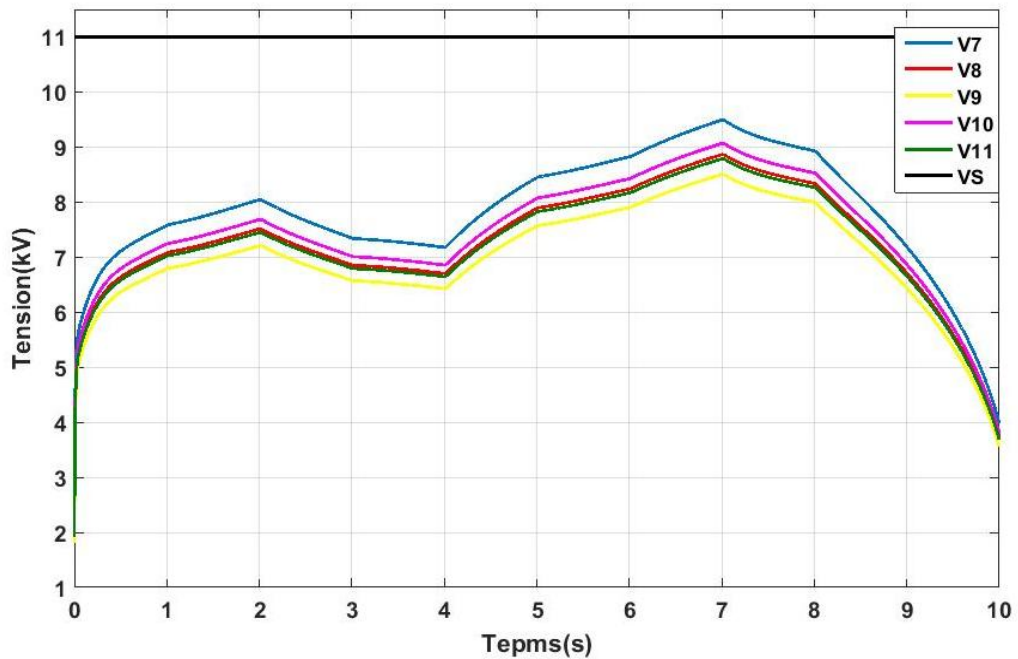
d'intégration optimal par rapport aux pertes actives totales est de 20%, alors que si on ne considère que les chutes de tension, le taux optimal est situé aux alentours de 40%.

### C. Troisième scénario : Réglage de la tension par compensation de l'énergie réactive

Cette section va se porter sur la problématique de réglage de tension en insérant une puissance éolienne variable, et porter le profil de tension à une marge tolérable en compensant la puissance réactive. Les résultats sont représentés dans les figures III.14 à III.17.



**Fig. III.14:** Puissance injectée par l'éolienne



**Fig. III.15:** Tensions aux nœuds avant compensation

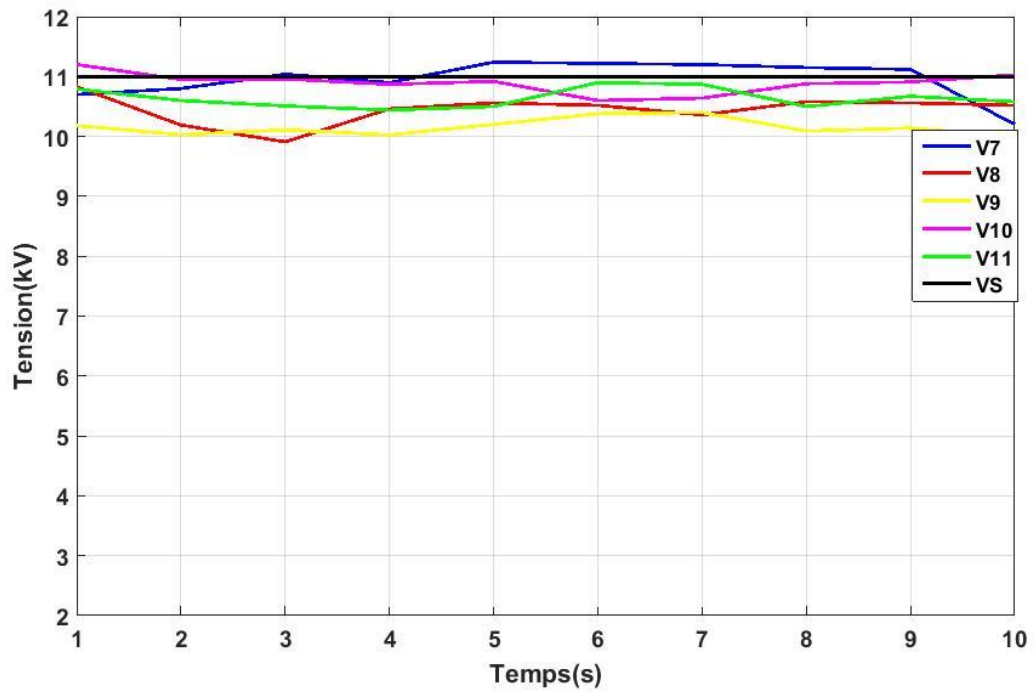


Fig.III.16: Tensions aux nœuds après compensation

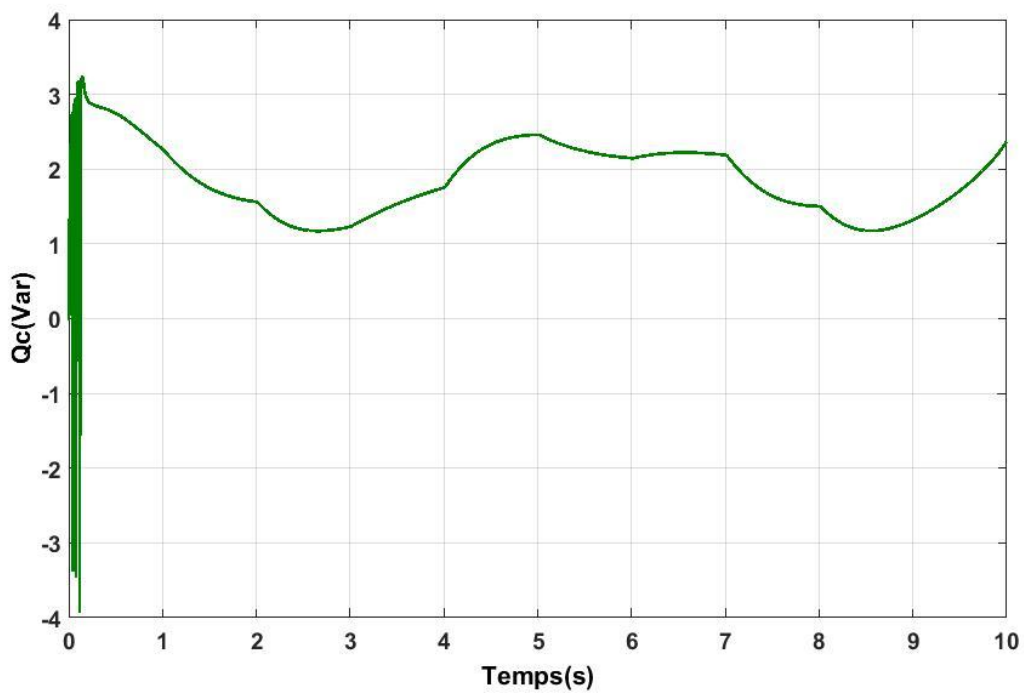


Fig.III.17: Puissance réactive de compensation

### **Interprétation des résultats**

D'après les figures III.14 et III.15 on remarque que les tensions aux différents nœuds suivent l'allure de la puissance éolienne injectée, c'est-à-dire la tension est l'image du vent (puissance éolienne). En comparant ces courbes, on constate que la présence de la ferme dans le réseau a une influence remarquable sur la tension du nœud de connexion, qui subit les plus grandes variations, ainsi que sur les nœuds voisins à celui-ci, qui sont également affectés par ces variations. Mais en revanche, la puissance injectée de la ferme qui est de forme fluctuante influe négativement sur le profil de la tension.

La figure III.1 montre l'évolution de la puissance réactive de compensation injectée au point de connexion de la ferme. Cette puissance réactive a un comportement inverse à celui de la puissance injectée par la ferme éolienne. On remarque qu'après la compensation le profil de la tension est amélioré et s'est rapproché de la tension de référence surtout au nœud de connexion.

### **III.3. Conclusion**

Dans ce qui précède, on conclut que la production éolienne contribue à l'amélioration du profil de la tension en augmentant le niveau de tension dans les différents nœuds du réseau et en diminuant les chutes de tension cumulées dans les branches.

La production décentralisée participe à l'alimentation des charges connectées au même nœud de connexion et les charges qui vont se trouver en aval en fonction de son taux d'intégration en gardant le sens traditionnel du flux de puissance, c'est-à-dire, de l'amont vers l'aval. Si la puissance injectée par la PD est supérieure à la somme des puissances des charges au nœud de connexion et en aval, on a enregistré le scénario de l'inversement du sens de flux de puissance et dans ce cas, la PD va alimenter aussi les charges qui se trouvent en amont proche de sa connexion en fonction de son taux d'intégration. C'est ainsi qu'elle soulage la source tout en maintenant l'équilibre entre la production et la consommation. La compensation de l'énergie réactive permet d'améliorer et d'affiner d'une manière considérable le profil de la tension

## Conclusion générale

La tension du réseau électrique est un paramètre crucial pour assurer la stabilité et la fiabilité de l'approvisionnement en électricité. Avec la croissance de l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne. Il est essentiel de comprendre comment les éoliennes peuvent être intégrées de manière efficace et sûre dans les réseaux électriques existants. Dans ce mémoire, nous avons étudié le réglage de la tension d'une ferme éolienne connectée au réseau électrique de distribution.

Notre étude a montré que les réseaux électriques de distribution constituent un élément clé de l'infrastructure énergétique, et que la stabilité de la tension est essentielle pour assurer leur efficacité et leur fiabilité. Nous avons également identifié les différents modes de réglage de la tension qui peuvent être utilisés pour maintenir la stabilité du réseau électrique, et nous espérons que cette recherche contribuera à améliorer la compréhension de la façon dont les réseaux électriques de distribution peuvent être optimisés pour répondre aux besoins énergétiques actuels et futurs.

Par la suite, nous avons exposé des généralités sur l'énergie éolienne, ainsi que les différents modes de sa connexion aux réseaux électriques et les impacts environnementaux potentiels de cette source d'énergie renouvelable. Notre étude a montré que l'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable importante et prometteuse, avec des avantages significatifs en termes de durabilité et de fiabilité. Cependant, nous avons également identifié des défis et des impacts environnementaux potentiels liés à l'énergie éolienne, qui doivent être pris en compte lors de l'intégration de cette source d'énergie dans les réseaux électriques existants.

Le premier problème concerne l'évaluation des tensions aux différents nœuds du réseau électrique ainsi que des chutes de tension et des pertes de puissance dans les branches qui est une étape importante pour déterminer la capacité de ce réseau à intégrer une ferme éolienne. Cette évaluation permet d'identifier les zones du réseau qui pourraient nécessiter des améliorations pour permettre l'intégration de l'énergie éolienne. Le second est sur l'intégration de la ferme éolienne à des emplacements spécifiques du réseau, c'est-à-dire, au niveau du nœud présentant la chute de tension la plus importante et au niveau d'un nœud de départ des

ramifications, ce qui a permis d'évaluer l'impact de cette intégration sur le plan de tension et sur le sens de transit des puissances dans les branches.

Le travail a été subdivisé en trois parties essentielles :

- ✓ Réseau à son état initial sans la présence de la ferme éolienne ;
- ✓ Réseau avec l'intégration d'une ferme éolienne à des emplacements différents et à des taux d'intégration différents ;
- ✓ Régulation de la tension et amélioration du profil des tensions aux nœuds par compensation.

Dans chaque partie, nous avons évalué l'amplitude des tensions aux nœuds et les chutes de tension dans les différentes branches, ainsi que le sens de transit du flux de puissances.

Les résultats des simulations nous ont montré que l'insertion des unités de production permet d'apporter une amélioration sur le niveau de la tension, et contribuer à la réduction des pertes en ligne, et cela dépendra de leur emplacement dans le réseau et de leur taux de pénétration. La compensation a prouvé son efficacité dans l'amélioration du profil et du niveau de la tension aux différents nœuds tout en respectant les tensions limites autorisées par le gestionnaire du réseau.

Nous souhaitons que ce modeste travail soit exploité sur un réseau plus large comprenant plusieurs fermes éoliennes dispersées, avec l'optimisation de leurs emplacements dans le réseau et l'insertion des dispositifs de compensation plus flexibles, à savoir les FACTS, pour une meilleure intégration dans le réseau.

# ANNEXE



## ANNEXE

## Données du réseau étudié

Les données des lignes et des nœuds du réseau test sont regroupées dans les tableaux (III.1) et (III.2) pour une tension de référence de  $V_S = 11kV$

Tab.III.1 : Données des lignes

Ligne		R( $\Omega$ )	X( $\Omega$ )
L1	0-1	1.1233	0.4127
L2	1-2	2.0140	1.6000
L3	2-3	2.7463	1.2000
L4	3-4	2.6900	1.6000
L5	4-5	2.9000	1.7000
L6	5-6	1.9053	0.4170
L7	6-7	2.9233	1.7270
L8	7-8	2.5050	1.9400
L9	8-9	2.5550	1.4940
L10	7-10	2.1200	1.7850
L11	10-11	2.457	1.8550

Tab.III.2 : données des charges

Charge	Puissance active(kW)	Puissance réactive (kVar)
1	1840	460
2	1980	740
3	1790	446
4	1598	840
5	1610	600
6	1780	810
7	1500	425
8	1500	700
9	2500	900
10	1200	550
11	1700	850

### Données de la ferme éolienne

Les données de la ferme éolienne sont représentés dans les tableaux Tab III.3 et Tab III.4

Tab.III.3 : données de la ferme de l'allure croissante en fonction du taux d'intégration

Taux d'intégration	Puissance injectée(MW)	Taux d'intégration	Puissance injectée(MW)
0	1.1	22	4.36954
1	1.1	23	4.55952
2	1.1	24	4.7495
3	1.1	25	4.93948
4	1.1	26	5.12946
5	1.13988	27	5.31944
6	1.32986	28	5.50942
7	1.51984	29	5.6994
8	1.70982	30	5.88938
9	1.8998	31	6.07936
10	2.08978	32	6.26934
11	2.27976	33	6.45932
12	2.46974	34	6.6493
13	2.65972	35	6.83928
14	2.8497	36	7.02926
15	3.03968	37	7.21924
16	3.22966	38	7.40922
17	3.41964	39	7.5992
18	3.60962	40	7.78918
19	3.7996		
20	3.98958		
21	4.17956		

Tab III.4 : données de la ferme de l'allure variable en fonction du temps

Temps(s)	Puissance injectée(MW)
0	2.5
1	5
2	6.5
3	5
4	4.5
5	7.5
6	9
7	11.5
8	10
9	5

## *Références Bibliographiques*

[1] N. Hadjsaid, ‘‘ Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur ‘‘, Thèse Hall, Université de Grenoble, 2011.

[2] M. Boutebel, ‘‘ Intégration des D-FACTS aux réseaux électriques de distribution ‘‘, mémoire fin d’étude, Université A. Mira Bejaia, 2014.

[3] A. Gaillard, ‘‘Système éolien basé sur une MADA : contribution à l’étude de la qualité de l’énergie électrique et de la continuité de service ‘‘, thèse doctorat, 2010.

[4] N. Aouzellag, ‘‘Contribution à l’Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Électriques liée à l’Intégration des Générateurs Éoliens ‘‘, thèse de doctorat, Université A. Mira Bejaia, 2012.

[5] T.T.H Pham, ‘‘ Influences de la Production Décentralisée sur la Gestion des Infrastructures Critiques des Réseaux de Puissance’’, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.

[6] G. Rami, ‘‘ Contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d’énergies connectées au réseau électrique de distribution ‘‘, Thèse de doctorat de l’INPG, 2006.

[7] M.Cécile, A.Hérault, ‘‘Architectures des Réseaux de Distribution du Futur en présence de Production Décentralisée’’, Sciences de l’ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2009.

[8] N. Aouzellag, ‘‘Réseaux Électriques’’, cours de Licence 3 Électrotechnique, Université A. Mira Bejaia.

[9] C. Prévé, R. Jeannot, ‘‘Guide de conception des réseaux électriques industriels : Les architectures des réseaux’’ n° :6883 427/A, 1997.

[10] N. Aouzellag, ‘‘Production centralisée et décentralisée’’, cours de Master I Réseaux Electriques, Université A. Mira Bejaia, 2022.

[11] R. Natarajan, ‘‘Power System Capacitors’’, Edition Taylor et Francis, 2005.

[12] S. Gerbex, ‘‘Métaheuristiques Appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électriques’’, thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, 2003.

[13] H. Rachida, "Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Électrique", Mémoire de Magister, École Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran, 2009.

[14] A. Alibi, "Contrôle des Réseaux Électriques par les Systèmes FACTS : (Flexible AC Transmission Systems)", Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2009.

[15] L. Alliouache, D.Hamza, "Contrôle de la puissance en présence de la production décentralisée", projet de fin d'études, Université A. Mira Bejaia, 2020.

[16] M. Medjana, M.Z. Mahmoudi, "Calcul d'écoulement de puissance dans un réseau électrique avec la présence de l'UPFC", projet de fin d'études, Université A. Mira Bejaia, 2007.

[17] A. Oloulade, "Contribution à l'optimisation multicritère du fonctionnement d'un réseau électrique de distribution par le placement optimal de dispositifs FACTS et la reconfiguration de sa topologie", Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi (UAC), 2019.

[18] E.G.Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", thèse Doctorat de l'Université Henri Poincaré Nancy-I, 2003.

[19] L.Khelfat, "Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée", mémoire fin d'étude, université Badji Mokhtar Annaba, 2017.

[20] N.Hadjsaid, "Les réseaux électriques de distribution de la production décentralisée aux Smart Grids", édition Lavoisier.2010.

[21] <https://www.terrafutura.info/>, "qu'est-ce-que-l-eolien-offshore", consulté le 19/05/2023.

[22] <https://www.futura-sciences.com/>, "Éoliennes en mer (offshore)", consulté le 23/05/2023.

[23] <https://www.edf.fr/groupe-edf>, "Une éolienne produit de l'électricité grâce au vent. Sa force actionne les pales du rotor, qui met en mouvement un alternateur", consulté le 23/05/2023.

[24] S.Ziraoui, "Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau", mémoire fin d'étude, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2017.

[25] <https://classe-export.com/>, "Une percée historique de l'énergie éolienne dans le monde en 2021", consulté le 24/05/2023.

[26] H.Nawa, ‘‘ Intégration des énergies éoliennes dans le réseau électrique ‘’, mémoire fin d’étude, Université 8 Mai 1945 – Guelma 2019.

[27] N. Laverdure, ‘‘ Sur l’intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ‘’, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG, 2005.

[28] O. Aouchenni, ‘‘ Amélioration de l’intégration de la production éolienne dans les réseaux électriques ‘’, thèse doctorat, Université A. Mira Bejaia 2017.

[29] H. Bayem, ‘‘Apport des méthodes probabilistes aux études d’intégration des énergies renouvelables aux systèmes électriques’’, Thèse de doctorat, École Doctorale des Sciences et Technologies de l’Information, des Télécommunications et des systèmes d’Orsay ,2009.

[30] M. Si Brahim, ‘‘Étude d’un système de conversion de l’énergie éolienne à base de la machine asynchrone’’, Thèse de doctorat de l’université de Tizi-Ouzou, 2015.

[31] A. Vergnol, ‘‘ Intégration dans le réseau électrique et le marché de l’électricité de production décentralisée d’origine renouvelable : gestion des congestions locales ‘’, thèse doctorat , L’école Centrale de Lille, 2010.

[32] A. Davingny, ‘‘Participation aux Services Système de Fermes d'Eoliennes à Vitesse Variable Intégrant du Stockage Inertiel d'Energie’’, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies, Lille, 2007.

[33] A. Teninge, ‘‘Participation aux Services Système de Parcs Eoliens Mixtes : Application en Milieu Insulaire’’, Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.

## **Résumé**

Ce travail propose une étude sur le contrôle de la tension après intégration d'une ferme éolienne dans un réseau électrique, il est subdivisé en trois grands axes. Le premier représente l'état de l'art sur les réseaux électriques elle examine les différents types de réseaux électriques existants ainsi que les différentes techniques de contrôle de la tension. Les recherches récentes et les avancées technologiques dans ce domaine sont également étudiées. La deuxième partie du mémoire concentre sur les généralités concernant l'énergie éolienne. Elle explore les principes fondamentaux de l'énergie éolienne ainsi que les avantages et les défis associés à cette source d'énergie renouvelable. La troisième partie du mémoire présente une simulation détaillée faite sur un réseau de distribution radial, Les paramètres de simulation et les scénarios étudiés sont décrits en profondeur. Les résultats de la simulation sont ensuite interprétés en mettant en évidence les effets des différentes stratégies de contrôle de la tension sur la stabilité du réseau et la qualité de l'électricité produite.

## **Abstract**

This work proposes a study on the control of the tension after integration of a wind farm in an electrical network, it is subdivided into three main axes. The first represents the state of the art on electrical networks, it examines the different types of existing electrical networks as well as the different voltage control techniques. Recent research and technological advances in this area are also reviewed. The second part of the thesis concentrates on the generalities concerning wind energy. It explores the fundamentals of wind energy as well as the benefits and challenges associated with this renewable energy source. The third part of the thesis presents a detailed simulation made on a radial distribution network. The simulation parameters and the scenarios studied are described in depth. The simulation results are then interpreted by highlighting the effects of different voltage control strategies on the stability of the network and the quality of the electricity produced.