

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Commandes Electriques  
Thème

## Contribution à l'étude de l'intégration des énergies renouvelable dans les réseaux électriques

Présenté Par :

- 1) Mr. GUEZZOULI Azzedine
- 2) Mr. CHERITE Yacine

Devant le jury composé de :

Dr. ATTOU Amine M C B UAT.B.B (Ain Temouchent) Président  
Dr. BOUDJELLA fatima zouhra M A B UAT.B.B (Ain Temouchent ) Examineur  
Dr. ADJOU DJ Labiba M A B UAT.B.B (Ain Temouchent ) Encadrant

**Année universitaire 2023/2024**

---

## ***Remerciements***

*Nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, d'avoir appris à nous ce que nous ignorions, de nous avoir donné la santé et tout dont nous avons besoin pour l'accomplissement de cette mémoire de fin d'étude.*

*Nous remercions également D. Adjoudj Labiba à l'université Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité.*

*Nous remercions également les autres membres du jury, et tous les enseignants du département Faculté des Sciences et de la Technologie Département de génie électrique qui ont participé à notre formation pendant tout le cycle universitaire.*

*Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes chers parents, que Dieu les protège.*

*À mes chers frères et toute ma famille.*

*Une dédicace spéciale à tous mes amis, et pour tous  
ceux qui me connaissent.*

*À la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à  
mon binôme.*

G. Azzedine

## *DEDICACE*

*J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail,  
A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de  
vivre*

*Et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.*

*A mon très cher père, pour ses encouragements, son  
Soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin  
que rien*

*N'entrave le déroulement de mes études.*

*A mon frère Ibrahim*

*A ma sœur*

*Et tout qui m'aide et compulse ce travail*

*Et enfin, je remercie mon binôme, Azzedine qui a  
contribué à la*

*Réalisation de ce modeste travail.*

*C.yacine*

## Liste des figures

figure 1. 1 : schema production d'energies [MP14]	7
figure 1.2 : structure maille d'un reseau de transport electrique [AD19]	8
figure 1.3 : reseau de distribution a configuration radiale [AO18]	9
figure 1.4 : reseaux electrique boucles [EB96]	10
figure 1.5 : schema du reseau de production decentralisee d'electricite (a gauche) et du reseau de production d'electricite traditionnelle (a droite) [TTH06].	14
figure 1.6 : des reseaux intelligents tres attendus [AE22]	15
figure 2. 1 : flux de puissance optimal traditionnel[ZL11]	20
figure 2.2 : reseau a n noeuds [HVD14]	22
figure2.3 : matlab simulation in gauss- seidel [DEB94].	27
figure2.4 :matlab simulation in newton-raphson [DEB94].	27
figure2.5 : interface graphique du psat [BOY20]	32
figure 2.6 : fenetre d'accueil du psat [BOY20]	32
figure 3.1 : panneau solaire photovoltaïque [FIS16]	36
figure 3.2 : capteur thermique [DAH12]	36
figure 3.3 : principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique [GR12]	37
figure 3.4 : la biomasse est une energie renouvelable [SM09]	38
figure 3.5 : principe de fonctionnement de centrale de bouillante [BP17]	39
figure 3.6 : conversion de l'energie cinetique du vent [AL18]	39
figure 3.7 : (a) carte annuelle des vents (m/s) a 10m du sol,(b) carte annuelle des vents (m/s) a 10m du sol [DCH11], [DKM06].	40
figure 3.8 : eolienne a vitesse variable basee sur une mada [AL18]	41
figure 4.1. systeme de ieee 9 noeuds avec un parc eolien insere dans psat	54
figure 4.2.vitesse du vent de generateur eoline (m/s).	55
figure 4.3. pertes de puissance active du systeme de test de bus ieee-9 dans differents cas.	55
figure 4.4. pertes de puissance reactive du systeme de test de bus ieee-9 dans differents cas.	56

figure 4.5. profil de tension du systeme test ieee-9 nœuds apres l'insertion du parc eolien.	57
figure 4.6. systeme de test de 30 nœuds apres l'insertion du parc eolieninsere dans psat.	58
figure 4.7. pertes de puissance active du reseau ieee 30noeuds dans les differents cas.	59
figure 4.8. pertes de puissance reactive du reseau ieee 30noeuds dans les differents cas.	60
figure 4.9. l'impact du parc eolien sur le flux de puissance active des lignes	60
figure 4.10. l'impact du parc eolien sur le flux de puissance reactive des lignes	61
figure 4.11. l'amplitude de tension des nœuds dans differents cas de systeme test ieee-30 nœuds.	61
figure 4.12. pertes de puissance active du reseau algerien dans les differents cas.	63
figure 4.13. pertes de puissance reactive du reseau algerien dans les differents cas.	63
figure 4.14. reseau ouest algerien insere dans psat.	64
figure 4.15. topologie du reseau algerien	66
figure 4.16. reseau algerien insere dans psat	69
figure 4.17. pertes actives dans les lignes de transmission du reseau algerien.	70
figure 4.18. pertes reactives dans les lignes de transmission du reseau algerien.	70
figure 4.19. amplitudes de tensions en (p.u.) des nœuds du reseau algerien.	71
figure 4.20. profil de tensions du reseau algerien en presence de la ferme d'eoliennes aux differents emplacements (p.u).	73
figure 4.21. pertes actives avant et apres l'insertion de la ferme d'eoliennes a tebessa 2.	75
figure 4.22. pertes actives avant et apres l'insertion de la ferme d'eoliennes a tebessa 2.	79
figure 4.23. profil de tensions du reseau algerien apres l'optimisation en presence de la ferme d'eoliennes (p.u).	93

## La liste des tableaux

<b>tableau 2. 1.</b> types de nœuds des reseaux eclectiques[RO21] .	23
<b>tableau 4.1.</b> parametres du generateur eolien.	53
<b>tableau 4.2.</b> flux de puissance des lignes du systeme test ieee 9 nœuds dans le cas de base et du systeme avec le parc eolien.	57
<b>tableau 4.3.</b> resultats de simulation des reseaux ieee 9 nœuds et ieee 30 nœuds dans les differents cas.	62
<b>tableau 4.4.</b> resultats de simulation des reseaux algerien dans les differents cas.	65
<b>tableau 4.5.</b> donnees des nœuds de regulation du reseau algerien .	67
<b>tableau 4.6.</b> resultats des puissances generees et des pertes globales du reseau algerien.	68
<b>tableau 4.7.</b> resultats des differents emplacements de la ferme d'eoliennes (wf).	72
<b>tableau4.8.</b> amplitudes de tension avant et apres l'insertion de la ferme d'eoliennes a tebessa-2.	74
<b>tableau 4.9.</b> pertes de transmissions actives et reactives avant et apres l'insertion de la ferme d'eoliennes a tebessa-2.	76
<b>tableau 4.10.</b> puissances actives optimales des generateurs en presence de la ferme d'eoliennes.	77
<b>tableau 4. 11.</b> puissances reactives optimales des generateurs en presence de la ferme d'eoliennes.	78
<b>tableau 4. 12.</b> coefficients du cout et limites de puissances du reseau algerien.	79

---

# La table des matières

---

Liste des figures

Liste des tableaux

---

Introduction général .....-1-

---

## Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

1.1. Introduction.....	-3-
1.2. Bref historique des systèmes électriques.....	-3-
1.3. Définition d'un réseau électrique.....	-4-
1.3.1. Production d'énergie électrique.....	-4-
1.3.2. Transport d'énergies électrique .....	-5-
1.3.3. Distribution et consommation d'énergies électrique.....	-5-
1.4. Types des réseaux électriques.....	-6-
1.4.1. Réseaux de transport .....	-6-
1.4.2. Réseaux de répartition .....	-6-
1.4.3. Réseaux de distribution .....	-7-
1.4.4. Réseaux maillés .....	-7-
1.4.5. Réseaux radiaux .....	-7-
1.4.6. Réseaux bouclés .....	-8-
1.5. Classification des potentiels nominaux .....	-9-
1.6. Conduite et gestion des réseaux électriques.....	-10-

1.7. Problématique de la charge et consommation fatale .....	-11-
1.8. Problème de blackout.....	-12-
1.8.1. Solutions contre le blackout.....	-13-
1.10. Energies renouvelables.....	-14-
1.11. Conclusion.....	-15-
<b>Chapitre II : L'écoulement de puissance</b>	
2.1. Introduction .....	-17-
2.2. Concept général de l'écoulement de puissance.....	-17-
2.3. Les objectifs de l'étude de l'écoulement de puissance.....	-18-
2.4. Écoulement de puissance (Flux de puissance).....	-18-
2.5. L'écoulement de puissance optimal (optimal power flow OPF).....	-19-
2.5.1. Domaines d'application de l'OPF.....	-20-
2.5.1.1. Minimisation du coût de combustible.....	-21-
2.5.1.2. Minimisation des pertes.....	-21-
2.5.1.3. Amélioration du profil de tension.....	-21-
2.5.1.4. Maximisation de la puissance transmissible.....	-21-
2.5.2. Les principaux objectifs de l'écoulement de puissance optimal (OPF).....	-21-
2.6. Méthodes de calcul en général.....	-22-
2.6.1. Formulation des équations de l'écoulement de puissance.....	-22-
2.6.3. Méthodes de calcul d'écoulement de puissance.....	-22-
2.6.4. Méthode de Gauss–Seidel.....	-23-
2.6.5. Méthode de Newton–Raphson.....	-23-
2.6.6. Méthode Découplée Rapide (FDLF).....	-24-

2.6.7. Objectifs les plus importants de l'étude de l'écoulement de puissance.....	-24-
2.6.8. Quelles sont les différences entre la méthode de newton-raphson et celle de gauss-seidel pour le calcul d'écoulement de puissance ?.....	-26-
2.6.9. Comparaison.....	-26-
2.7. L'Optimal Power Flow (OPF) en présence des énergies renouvelables.....	-27-
2.7.1. Utilisation de techniques avancées .....	-30-
2.8. Logiciel PSAT .....	-31-
2.8.1. Méthodes d'analyse.....	-32-
2.8.2. Description de PSAT.....	-33-
2.8.3. Fenêtres et fonctions.....	-33-
2.9. Conclusion.....	-33-
<b>Chapitre III : Energies renouvelables</b>	
3.1. Introduction .....	-35-
3.2. Différents types d'énergies renouvelables .....	-37-
3.2.1. Energie solaire .....	-38-
3.2.2. Energie hydraulique .....	-39-
3.2.3. Biomasse .....	-39-
3.2.4. Energie géothermique .....	-41-
3.2.5. Energie éolienne .....	-42-
3.2.5.1. Ecoulement de puissance d'énergie éolienne .....	-43-

3.2.5.2. Mesurer la puissance des éoliennes .....	-46-
3.2.5.3. Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA).....	-46-
3.3. Défis liés à l'intégration des énergies renouvelables dans le système électrique.....	-47-
3.4. Ecoulement de puissance de l'énergie renouvelable .....	-47-
3.5. Formulation du problème de l'OPF en présence des énergies renouvelables.....	-47-
3.6. Conclusion.....	-51-
<b>Chapitre IV : Simulations et résultats</b>	
4.1. Introduction.....	-52-
4.2. Résultats de calcul de l'écoulement de puissance en présence des énergies renouvelables.....	-52-
4.2.1. Etude sur le réseau test IEEE 9 nœuds .....	-53-
4.2.2. Etude sur le réseau test IEEE 30 nœuds .....	-58-
4.2.3. Etude sur le réseau Ouest Algérien .....	-62-
4.3. Etude sur le réseau Algérien 114 nœuds .....	-65-
4.3.1. Analyse et discussion .....	-68-
4.3.2. Emplacement optimal de la ferme éolienne .....	-71-
4.3.3. Résultats de l'écoulement de puissance optimal (OPF) du réseau Algérien en présence de l'énergie éolienne.....	-76-
4.4. Conclusion.....	-80-

---

Conclusion général.....	-81-
Références bibliographiques.....	83-

# Introduction Générale

# Introduction Générale

L'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques est un enjeu majeur pour la transition écologique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne et solaire, offrent une alternative durable aux énergies fossiles et contribuent à une réduction significative des émissions de CO<sub>2</sub>. Cependant, leur intégration dans les réseaux électriques pose des défis techniques et réglementaires importants.

Les objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de transition écologique nécessitent une augmentation significative de la part des énergies renouvelables dans les réseaux électriques. Selon les projections, les énergies renouvelables devraient représenter plus de 50 % de l'approvisionnement en électricité dans l'Union européenne d'ici 2030. Cependant, cette augmentation pose des défis pour les réseaux électriques, notamment en termes de flexibilité, de gestion de la variabilité des sources d'énergie et de sécurité d'approvisionnement.

L'objectif de cette étude est de contribuer à l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques en explorant les solutions techniques pour améliorer l'écoulement d'énergie électrique.

Pour atteindre ces objectifs, cette étude utilisera une approche combinée de recherche littéraire et de simulation. Cette étude contribuera à l'avancement de la connaissance sur l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques, en proposant des solutions techniques et économique pour améliorer le flux de puissance et le coût de production.

Ce manuscrit comporte quatre chapitres.

- ❖ Le premier chapitre donnera une vision globale sur la topologie des réseaux électrique, qui restent toujours d'actualité. Nous justifierons le besoin d'étudier de nouvelles solutions technologiques. Nous porterons une attention particulière à la production centralisée à partir des énergies renouvelables.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les problèmes de l'écoulement de puissance et l'OPF et leurs applications dans les réseaux électriques. Nous expliquerons pourquoi le logiciel PSAT/MATLAB est

- ❖ utilisé pour l'analyse des réseaux électriques dans nos travaux et en quoi ce logiciel est le plus adapté à notre problématique.
- ❖ Dans le troisième chapitre, nous commencerons par donner un aperçu sur la production à partir des ER au niveau mondiale et en Algérie. Nous présenterons les avantages des ER sur le côté social, environnementale et économique. Nous expliquerons la modélisation des ER utilisés dans notre étude, plus particulièrement le générateur éolien.
- ❖ Dans le dernier chapitre nous choisirons la fonction objective et les contraintes des générateurs éoliens afin de formuler le problème de l'OPF. Finalement, nous présenterons et discuterons les résultats de l'écoulement de puissance et l'OPF avec l'insertion des centrales éoliennes dans les réseaux test et le réseau Algérien réel. Ce chapitre présentera une synthèse des différents résultats, afin de proposer une solution technico-économique basée sur les énergies renouvelables, qui peuvent être réalisable dans la pratique, puisque nous avons un réseau réel. Cette solution vise à renforcer la qualité d'alimentation, minimiser le coût de production et résoudre tous les problèmes du réseau électrique Algérien.
- ❖ Enfin, une conclusion termine ce mémoire.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les réseaux électriques**

## 1.1. Introduction

Les réseaux électriques sont des infrastructures essentielles qui permettent la distribution de l'électricité depuis les centrales de production vers les consommateurs finaux. Ils se composent de différents types de lignes et de postes, tels que la ligne très haute tension (HTB2) et haute tension (HTB) pour le transport à grande échelle, les lignes moyenne tension (HTA) et basse tension (BT) pour la distribution locale. Les réseaux électriques peuvent avoir une structure arborescente ou maillée, cette dernière offrant une meilleure sécurité d'alimentation en cas de défaillance d'un élément du réseau. La qualité de l'électricité, incluant la continuité d'alimentation et la qualité de l'onde de tension, est primordiale et est assurée par les gestionnaires des réseaux publics de transport et de distribution.

Les réseaux électriques domestiques, professionnels, de distribution moyenne et basse tension ainsi que le réseau de répartition jouent des rôles spécifiques dans l'acheminement de l'électricité vers les utilisateurs finaux. L'évolution des usages électriques, comme l'émergence des véhicules électriques et des énergies renouvelables, nécessite une adaptation constante des réseaux.

Ce chapitre donne une vision générale sur la topologie des réseaux électrique, qui est toujours en évolution comme la production d'énergie électrique en conventionnel et à la base des énergies renouvelables, dans le monde et en Algérie. Notre choix s'est porté plus particulièrement sur l'intégration des énergies renouvelables.

## 1.2. Bref historique des systèmes électriques

Les réseaux électriques ont connu une évolution remarquable depuis leur apparition au XIXe siècle, passant par plusieurs phases significatives qui ont contribué à leur expansion et à leur amélioration continue. Voici un résumé historique des réseaux électriques basé sur les informations précédentes :

### **\*Fin XIXe siècle\***

- Thomas Edison met en place les premiers réseaux électriques en courant continu (DC) [BAR14].

### **\*Début XXe siècle\***

- Structure multicouche des réseaux électriques, distinguant le réseau de transport et celui de distribution.

- Expansion rapide des réseaux électriques en France, supplantant le gaz pour l'éclairage public [FON08]. .

### **\*Entre-deux-guerres\***

- Croissance importante des besoins en électricité, conduisant à la mise en place d'importants programmes d'électrification.

- Naissance de la Force Electrique d'Expression (FEE), promouvant un idéal démocratique [FON08]. .

### **\*Après la Seconde Guerre Mondiale\***

- Reconstruction du pays et assise solide de la production, du transport et de la distribution d'électricité.

- Création de la Fédération Nationale des Collectivités Concédantes et des Régies (FNCCR) en 1934, renforçant le pouvoir des collectivités locales.

### **\*Depuis les années 1970\***

- Progressive intégration des sources d'énergie renouvelables dans les réseaux électriques.

- Modernisation des réseaux électriques pour accueillir les énergies renouvelables, participant activement à la transition énergétique [FON08]..

## **1.3. Définition d'un réseau électrique**

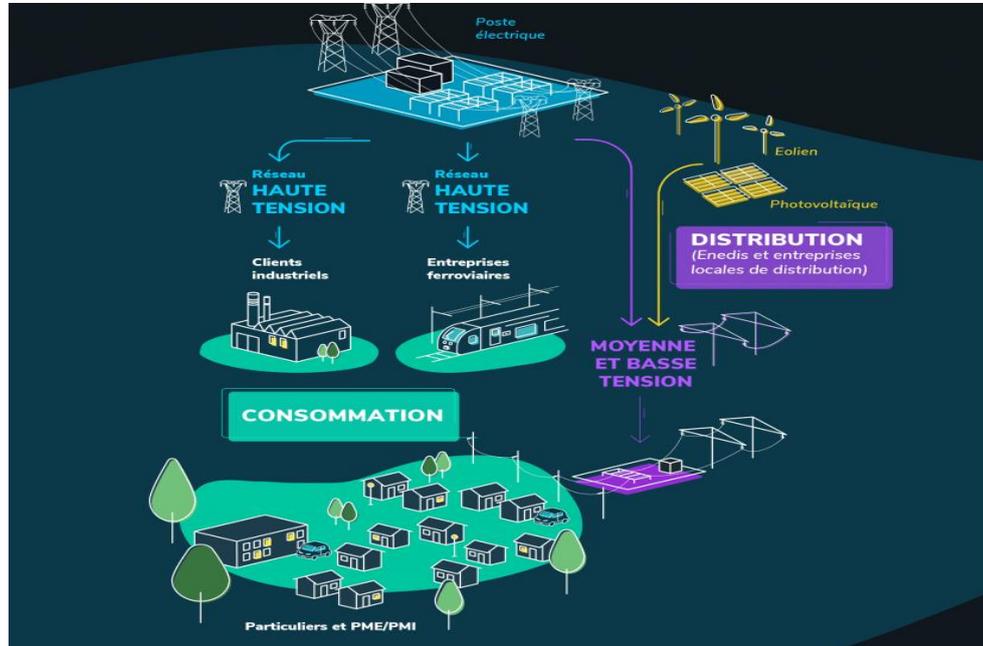
Un réseau électrique se compose de lignes électriques opérant à divers niveaux de tension, interconnectées via des postes électriques. Ces postes facilitent la distribution de l'électricité et sa conversion entre différents niveaux de tension à l'aide de transformateurs. Le réseau électrique est généralement divisé en quatre principales sections : la production, le transport, la distribution et la consommation.

### **1.3.1. Production d'énergie électrique**

La production d'énergie électrique en Algérie provient principalement de trois catégories d'énergies :

**Énergies fossiles :** Le charbon, le gaz naturel et le pétrole sont utilisés pour la production d'électricité, bien que leur importance relative puisse varier [CN22].

**Énergies renouvelables** : Les biomasses, l'hydroélectricité, l'énergie solaire et éolienne sont des sources en développement. En 2021, les biomasses ont produit 13,4 TWh dans la région Pays de la Loire, tandis que l'éolien a contribué à 65 % de l'électricité renouvelable produite dans la même région en 2020[MWM23]..



**Figure 1.1** : schéma Production d'énergies [MP14]

**Énergies nucléaires** : Bien que l'Algérie ne dispose pas de centrales nucléaires opérationnelles pour la production d'électricité, cette source pourrait être envisagée pour diversifier le mix énergétique à l'avenir [MWM23] .

En Algérie, comme dans de nombreux pays, il existe un intérêt croissant pour augmenter la part des énergies renouvelables afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de diversifier les sources d'énergie [MWM23]. .

### 1.3.2. Transport d'énergies électrique

Des centrales nucléaires ou des parcs éoliens aux foyers et autres consommateurs industriels, l'électricité peut parcourir des milliers de kilomètres. Pour la transporter à bon port, le réseau de transport d'électricité est un acteur central et incontournable. Maillage impressionnant du territoire français, il assure à tous et à tout instant l'accès à l'électricité. Un réseau électrique qui doit également faire face aux enjeux de la transition énergétique. Le réseau de transport d'électricité en Algérie est géré par la Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport de l'Electricité (GRTE).

Ce réseau conduit l'électricité depuis les centres de production aux gros industriels et jusqu'aux postes électriques. Il est composé de deux types de lignes pour le transport :

**\*Des lignes à Très Haute Tension (THT, 400 000 et 225 000 volts) :** Ces lignes permettent de transporter de grandes quantités d'énergie en limitant les pertes. Elles facilitent le transport de l'électricité sur de longues distances [BBM17]..

**\*Des lignes à Haute Tension (HT, 90 000 et 63 000 volts) :** Ces lignes sont utilisées pour le transport local et régional d'électricité [BBM17]..

Les ouvrages de tension plus élevées permettent de transporter de l'électricité sur de longues distances et représentent 106 874 kilomètres. Ces lignes sont essentielles pour garantir l'approvisionnement électrique fiable et efficace des consommateurs en Algérie [MWM23].

### 1.3.3. Distribution et consommation d'énergies électrique

Le réseau de distribution en Algérie prend le relais du réseau de transport après les postes de transformation chargés de diminuer la tension. Il achemine l'électricité aux particuliers et aux petites et moyennes entreprises. Le réseau Moyenne Tension (MT, 20 000 volts), long de 622 187 kilomètres, a pour principale mission d'alimenter les postes de distribution. De ces postes, se déploie le réseau Basse Tension (BT, 400 ou 230 volts), long de 701 858 kilomètres dont plus de 260 000 kilomètres sont souterrains. Ce réseau basse tension assure la distribution finale de l'électricité aux consommateurs finaux en Algérie [MLM11]..

Entre ces lignes se trouvent des postes électriques, véritables nœuds électriques, dont les rôles sont multiples :

- Diminuer la tension d'une ligne à l'autre pour permettre son acheminement en répondant aux besoins de tout à chacun, réseau de distribution comme consommateurs. Ce sont les transformateurs.
- Stopper l'acheminement, la distribution en cas d'urgence. C'est le rôle des disjoncteurs.
- Distribuer, diriger, aiguiller l'électricité en alimentant ou en coupant à loisir un circuit en fonction des besoins. Des opérations réalisées grâce aux sectionneurs[MP14] .

## 1.4. Types des réseaux électriques

Les différents types de réseaux électriques sont classés en fonction de leur structure, de leur tension et de leur mode de fonctionnement. Voici une synthèse des types de réseaux électriques mentionnés dans les sources fournies :

### 1.4.1. Réseaux de transport

Ils sont conçus pour transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances à très haute tension (de 150 kV à 800 kV).

Ces réseaux sont constitués de lignes très haute tension (HTB2) et de lignes haute tension (HTB)[JJM77] .

#### **1.4.2. Réseaux de répartition**

Ces réseaux sont à haute tension (de l'ordre de 30 à 150 kV) et assurent la distribution régionale de l'électricité. Ils sont composés des lignes hautes tensions (HTA) et font le lien entre les industries lourdes, les grands consommateurs électriques et le réseau de distribution [JJM77].

#### **1.4.3. Réseaux de distribution**

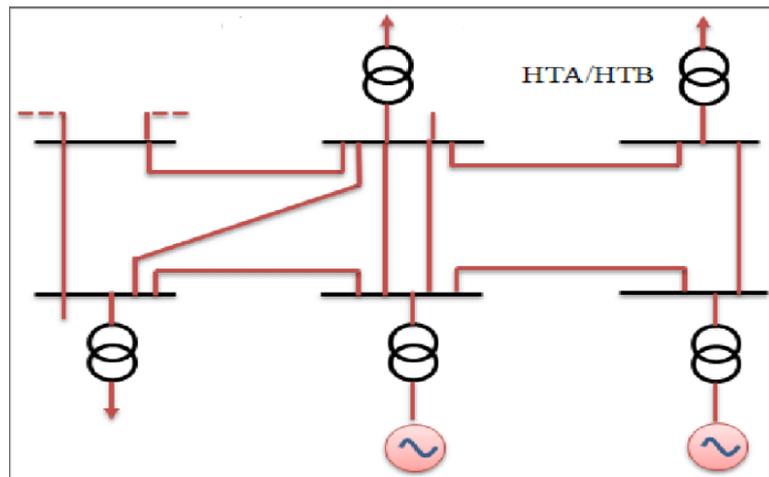
Ils sont à basse tension (230-400 V) et acheminent l'électricité vers les consommateurs finaux, tels que les ménages et les artisans. Les lignes basse tension (BT) font partie du réseau de distribution et sont utilisées pour alimenter les appareils ménagers au quotidien [JJM77].

#### **1.4.4. Réseaux maillés**

Un réseau électrique maillé fonctionne en interconnectant plusieurs postes électriques de manière multiple, créant ainsi un réseau complexe et redondant. Dans un réseau maillé, si une ligne ou un poste électrique rencontre un problème, le courant peut être immédiatement redirigé vers d'autres voies pour assurer la continuité du service.

Cette capacité de redondance permet au réseau de maillage de maintenir la distribution d'électricité même en cas de défaillance d'une partie du réseau.

En outre, les réseaux maillés sont conçus pour limiter les risques de surcharges et d'incidents en définissant des seuils de fonctionnement et des conditions d'exploitation dès leur conception [AD19].

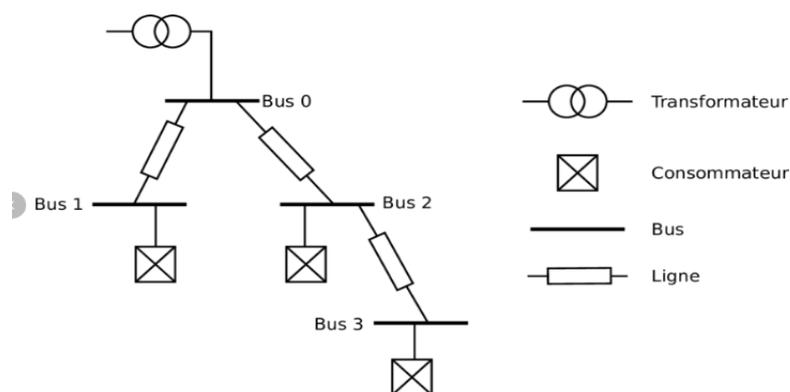


**Figure 1.2 :** Structure maillé d'un réseau de transport électrique [AD19].

#### 1.4.5. Réseaux radiaux

Un réseau électrique radial est une structure de réseau électrique où l'électricité est distribuée à partir d'un point central vers plusieurs points de consommation. Les réseaux radiaux sont généralement utilisés dans les réseaux de distribution de basse et moyenne tension, où la distance entre le point de production et les points de consommation est relativement courte [AO18].

Dans un réseau électrique radial, chaque point de consommation est connecté à un seul point de distribution, ce qui simplifie la conception et la gestion du réseau. Cependant, cela peut également rendre le réseau plus vulnérable aux pannes, car la perte d'un seul point de distribution peut affecter plusieurs points de consommation [AO18].



**Figure 1.3 :** Réseau de distribution à configuration radiale [AO18].

Les réseaux électriques radiaux sont souvent utilisés dans les réseaux de distribution de basse et moyenne tension, où la distance entre le point de production et les points de consommation est relativement courte.

Ils sont également souvent utilisés dans les réseaux de distribution de secours, où la simplicité et la fiabilité sont des facteurs clés [AO18].

En résumé, un réseau électrique radial est une structure de réseau électrique où l'électricité est distribuée à partir d'un point central vers plusieurs points de consommation, sans boucles ou maillages.

Ils sont souvent utilisés dans les réseaux de distribution de basse et moyenne tension, où la distance entre le point de production et les points de consommation est relativement courte [THS11].

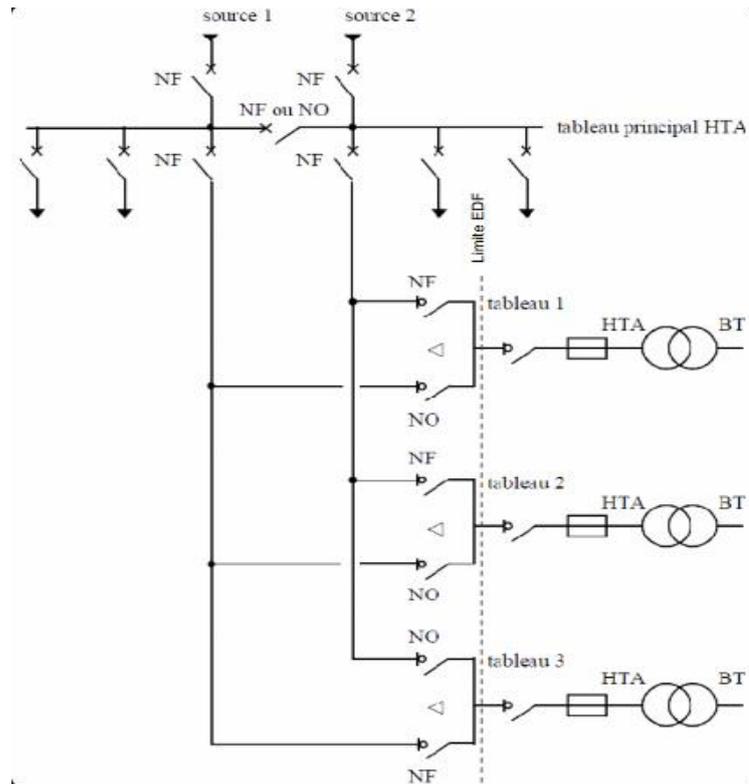
#### **1.4.6. Réseaux bouclés**

Les réseaux électriques bouclés sont une structure topologique où l'énergie est distribuée à partir d'un point central vers plusieurs points de consommation, avec un retour en boucle vers le point de départ.

Cette structure permet une meilleure fiabilité et une meilleure qualité de l'alimentation électrique, car en cas de panne sur une ligne, l'énergie peut être redirigée vers une autre ligne pour assurer la continuité de l'alimentation [ÉB96].

Dans les réseaux électriques bouclés, il y a deux types de courants : le courant alternatif et le courant continu.

Le courant alternatif est utilisé dans les réseaux de transport et de distribution, tandis que le courant continu est utilisé dans les réseaux de transport à très haute tension et dans les réseaux de distribution à haute tension [ÉB96].



**Figure 1.4 :** Réseaux électrique bouclés [ÉB96].

### 1.5. Classification des potentiels nominaux

La classification des potentiels nominaux dans les réseaux électriques est une méthode de classification qui permet de définir les différents niveaux de tension dans un réseau électrique. Cette classification est importante pour garantir la sécurité des personnes et des équipements, ainsi que pour assurer la qualité de l'énergie électrique fournie aux consommateurs. On peut classer les niveaux potentiels nominaux d'un réseau en :

- **Les très basses tensions (TBT) :** correspondent à des tensions inférieures à 50 volts, et plus généralement à 30 volts. Elles sont utilisées pour les jouets électriques et dans des locaux très humides.
- **Les basses tensions (BT)** ont une tension comprise entre 50 et 1000 volts. Elles sont couramment utilisées pour les appareils domestiques et la majorité des appareils industriels[BBM17].
- **Les moyennes tensions (MT) :** comprennent des tensions allant de 1 à 35 kV, voire jusqu'à 60 kV. Elles sont utilisées pour l'alimentation et la distribution de l'énergie électrique, en moyenne distance et dans les réseaux industriels [BBM17] .

- **Les hautes tensions (HT) :** ont une tension de 60 à 220 kV. Elles sont utilisées pour le transport d'énergie à des débits élevés et sur des distances plus longues [BBM17].
- **Les réseaux très hautes tensions (THT) :** ont une tension égale ou supérieure à 400 kV. Ils sont devenus nécessaires en raison de l'augmentation des puissances à transporter sur de plus grandes distances [BBM17].

## 1.6. Conduite et gestion des réseaux électriques

La gestion et l'exploitation des réseaux électriques impliquent divers aspects tels que la distribution, le transport et la surveillance afin d'assurer un approvisionnement en électricité efficace :

- **Protection et interconnexion :** Les réseaux électriques possèdent des systèmes de protection pour se déconnecter en cas de défauts, dans le but de protéger les composants de production, de distribution et de consommation [CE11].
- **Développement historique :** L'interconnexion des réseaux électriques a évolué progressivement, avec la prise de conscience de l'importance d'une norme de fréquence unifiée pour l'interconnexion des réseaux, conduisant à l'adoption de 60 Hz dans la majeure partie des Amériques et de 50 Hz dans le reste du monde [CE11].
- **Paramètres électriques importants :** Une surveillance continue des paramètres tels que la fréquence, la tension, le courant et la puissance de court-circuit est cruciale pour maintenir le réseau et les installations associées dans les limites opérationnelles [CE11].
- **Gestion des réseaux de distribution :** Les réseaux publics de distribution opèrent aux niveaux de tension moyenne et basse, desservant les consommateurs résidentiels, commerciaux et industriels, avec un rôle croissant dans l'intégration des sources d'énergie décentralisées comme l'éolien et le solaire [CE11].
- **Réglementation et supervision :** Les autorités de régulation comme la CRE l'assurent un accès transparent aux réseaux publics d'électricité, surveillent leur fonctionnement et contribuent au développement du marché européen de l'électricité, notamment dans le contexte de l'évolution des paysages énergétiques et de l'intégration des énergies renouvelables [CE11].

- **Systèmes SCADA** : La mise en œuvre de systèmes SCADA/EMS/OMS améliore la fiabilité du réseau, l'acquisition de données, la sécurité des employés et du public, ainsi que le contrôle de la production d'électricité à partir de sources renouvelables, nécessitant du matériel, des logiciels, une infrastructure de communication et un centre de contrôle entièrement équipé[RKY17].
- Ces points soulignent la complexité et l'importance d'une gestion et d'une exploitation efficaces des réseaux électriques pour assurer un approvisionnement fiable et efficient en électricité aux consommateurs, tout en s'adaptant aux besoins et technologies énergétiques en évolution [RKY17].

### 1.7. Problématique de la charge et consommation fatale

Le problème de la charge et de la consommation fatale des réseaux électriques est un sujet complexe qui nécessite une gestion intelligente et une planification appropriée pour garantir un approvisionnement électrique fiable et stable. Les perturbations dans les réseaux électriques peuvent être provoquées par des courts-circuits entre phases, une modification de la forme d'onde des tensions alternatives et un déphasage des courants acceptés dans le réseau.

Ces perturbations peuvent présenter un risque pour le bon fonctionnement du réseau [RY09].

- Lorsque l'ensemble du réseau électrique s'effondre, sa reconstruction peut prendre beaucoup de temps, voire s'avérer impossible si cela prend plus de 48 heures. Les appareils qui contrôlent les réseaux ont une autonomie de 2 à 5 jours, et une fois la batterie épuisée, il faut se rendre sur place pour la redémarrer en synchronisation avec le reste du réseau, sans communications [RY09].
- Les énergies intermittentes, comme l'énergie éolienne et photovoltaïque, peuvent perturber l'équilibre entre l'offre et la demande, rendant plus difficile la gestion du réseau électrique. Les gestionnaires de réseau doivent développer des systèmes de gestion intelligents afin de pouvoir influencer la demande et assurer l'approvisionnement en électricité. En 2013, les énergies éolienne et photovoltaïque, principales sources de production intermittentes, ont respectivement compté pour 2,9% et 0,8% de la production totale d'électricité en France [RY09].
- La part des énergies renouvelables augmente rapidement, et leurs caractéristiques de fonctionnement nécessitent des dispositions

spécifiques sur les réseaux de transport d'électricité pour sécuriser la garantie de fourniture [RY09].

- Dans [JP18] les auteurs abordent les effets d'éviction et les besoins de stockage dans un tel réseau.

## **1.8. Problème de blackout**

Le problème des pannes de courant dans les réseaux électriques peut être résolu par des solutions conventionnelles et contrôlables.

Ces solutions impliquent la mise en œuvre de mesures pour gérer les risques de coupures de courant résultant des interruptions des énergies renouvelables.

Il est crucial de développer des capacités de production contrôlables et flexibles pour compenser les variations de la production d'énergie renouvelable et maintenir un équilibre entre l'offre et la demande d'électricité. Ces solutions traditionnelles incluent la mise en œuvre de systèmes de surveillance et de contrôle des fréquences, l'amélioration des règles de gestion des réseaux et le développement de nouvelles sources de flexibilité pour assurer la sécurité et la stabilité des réseaux électriques face aux risques de coupures de courant [AG23].

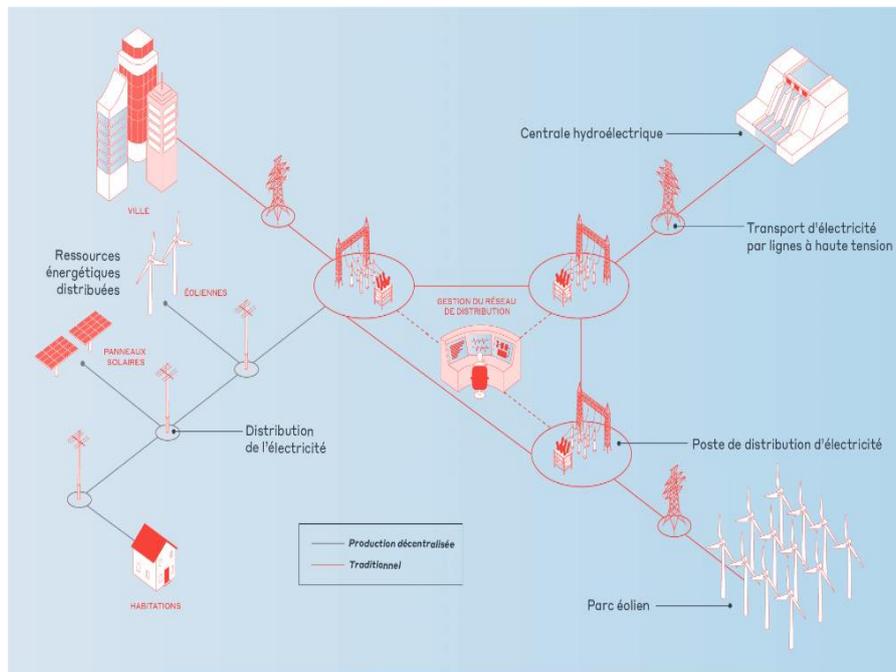
### **1.8.1. Solutions contre le blackout**

En combinant les mesures suivantes, il est possible de prévenir les blackouts conventionnels et de maintenir un approvisionnement électrique fiable et stable [TTH06].

1. Développer des capacités de production pilotables et flexibles pour compenser les variations de production des énergies renouvelables.
2. Mettre en place des systèmes de surveillance et de contrôle des fréquences pour assurer la stabilité du réseau électrique.
3. Améliorer les règles de gestion des réseaux pour anticiper et réagir rapidement aux fluctuations de la demande.
4. Diversifier les sources d'approvisionnement en électricité pour réduire les risques de défaillance d'une source unique.
5. Investir dans des technologies de stockage d'énergie pour lisser les pics de demande et garantir un approvisionnement continu.

## 1.9. Réseaux électriques d'actualité

Les actualités récentes concernant les réseaux électriques, en particulier les smart grids, mettent en lumière plusieurs développements importants. Voici un aperçu des informations pertinentes extraites des sources fournies :



**Figure 1.5 :** Schéma du réseau de production décentralisée d'électricité (à gauche) et du réseau de production d'électricité traditionnelle (à droite) [TTH06].

1. Le développement des réseaux thermiques et des réseaux de chaleur (CAD) est un aspect clé pour fournir de la chaleur et du froid à distance aux bâtiments, favorisant ainsi l'adaptabilité vis-à-vis des sources thermiques et la récupération de chaleur provenant des industries ou infrastructures [EMF12].

2. Les démonstrateurs de smart grids sont des projets en cours visant à rendre les réseaux plus flexibles en exploitant les complémentarités des réseaux de gaz et d'électricité.

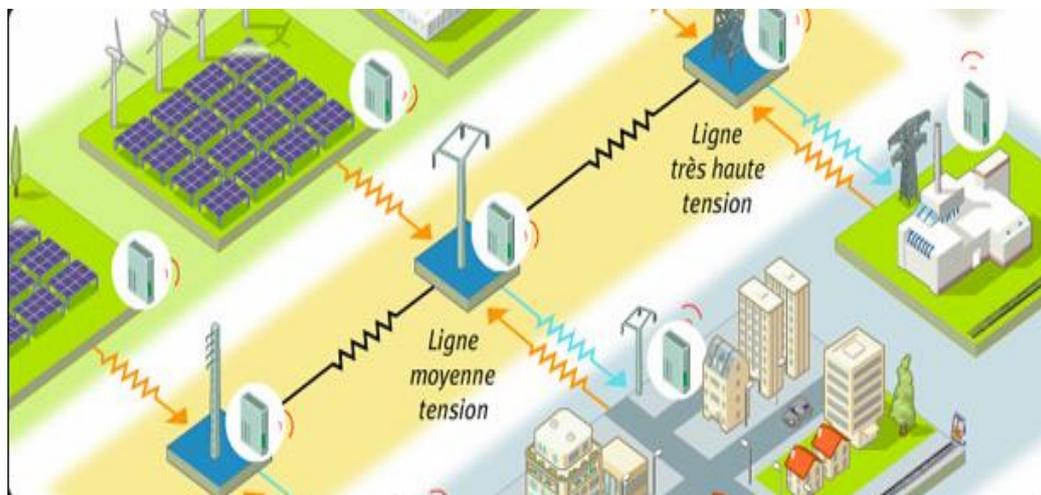
Cependant, malgré des promesses théoriques, les synergies entre les réseaux d'énergies restent techniquement complexes à mettre en œuvre et représentent des défis économiques [EMF12].

3. Les réseaux intelligents (smart grids) sont un enjeu technologique, de gestion des réseaux et économique. Ils nécessitent des marchés et un cadre

réglementaire favorables pour permettre la transmission des signaux économiques pertinents aux acteurs impliqués [EMF12].

**4.** Les actualités du secteur de l'électricité et des réseaux de distribution mettent en avant des thèmes tels que l'efficacité énergétique, les énergies Renouvelables, les smart grids, la maintenance des réseaux, et l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique [EMF12].

En résumé, les actualités récentes mettent en avant l'importance croissante des réseaux thermiques, des smart grids et des synergies entre les réseaux d'électricité et de gaz pour améliorer l'efficacité énergétique et la flexibilité des réseaux électriques.



**Figure 1.6 :** des réseaux intelligents très attendus [AE22]

### 1.10. Energies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui se renouvellent naturellement à un rythme plus rapide que leur consommation, elles sont issues de deux grandes sources naturelles : le Soleil et la Terre [LV05].

Les énergies renouvelables comprennent l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique, marine, géothermique, et issue de la biomasse, ainsi que les biocombustibles [LV05].

Les énergies renouvelables sont considérées comme des solutions de substitution aux combustibles fossiles, contribuant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à diversifier l'approvisionnement énergétique [LV05].

Elles sont également une source d'emplois et de croissance économique, avec des retombées fiscales et des créations d'emplois dans les secteurs de l'ingénierie, de la construction, de l'exploitation et de la maintenance des infrastructures, de l'approvisionnement en bois-énergie, et de la production d'énergies renouvelables [LV05].

### **1.11. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière générale les réseaux électriques en présentant leurs descriptions, classifications et leurs différentes fonctions. Suite à l'augmentation fatale de la consommation d'énergie, l'intégration des énergies renouvelables tendent à être des solutions d'avenir à fin de mieux contrôler et renforcer le système électrique. Pour garantir la continuité de la fourniture, lutter contre le déséquilibre entre la puissance générée et la puissance consommée et satisfaire la totalité d'une demande croissante, des nouveaux systèmes de production non conventionnels à base de renouvelable sont mis à contribution et raccordés au réseau électrique à différents niveaux de tension selon le niveau de la puissance nominale

Le chapitre suivant est consacré à l'étude de l'écoulement de puissance (PF) et le l'écoulement de puissance optimale (OPF), qui est une étape nécessaire pour détecter tous les problèmes liés aux réseaux électriques, avant de trouver une solution efficace basée sur les énergies renouvelables pour soulager le transit de puissance, améliorer le profil des tensions, minimiser les pertes de transmission et le coût de production globale des réseaux électrique.

# **Chapitre II**

## **L'écoulement de puissance**

## 2.1. Introduction

L'écoulement de puissance est une étape fondamentale dans l'analyse et la gestion des réseaux électriques modernes. Son objectif principal est de déterminer les conditions de fonctionnement du système électrique en régime permanent, en termes d'amplitudes de tension et d'angles de phase à chaque nœud du réseau.

Une fois les tensions connues, d'autres quantités peuvent être calculées, comme les flux de puissance réelle et réactive à travers les branches (lignes de transmission et transformateurs), les puissances réactives générées aux nœuds de production, ainsi que les pertes de puissance de transmission.

Les réseaux électriques modernes étant de grande taille et fortement interconnectés, l'analyse de l'écoulement de puissance devient de plus en plus complexe. Cela a conduit à l'utilisation de systèmes informatiques sophistiqués pour effectuer les tâches de planification, d'exploitation et de contrôle des réseaux.

Le problème de l'écoulement de puissance peut être formulé mathématiquement comme un ensemble d'équations algébriques non linéaires. Il est généralement résolu par des méthodes itératives telles que la méthode de Newton-Raphson.

## 2.2. Concept général de l'écoulement de puissance

Le concept général de flux de puissance, également connu sous le nom de « débit de puissance », est un processus crucial pour comprendre comment l'électricité est générée, transmise et consommée au sein d'un système électrique complexe. Il vise à comprendre comment l'énergie électrique est acheminée et distribuée dans un système électrique, en tenant compte des contraintes et limites physiques pour garantir un fonctionnement fiable, efficace et sécurisé du système.

L'analyse du flux de puissance consiste à déterminer les conditions de fonctionnement du réseau en calculant le flux de puissance et la tension à chaque nœud du réseau. Cette analyse aide à établir l'état stable des tensions complexes au niveau du bus réseau, à partir duquel le transfert de puissance active et réactive dans chaque ligne et transformateur est calculé.

En résolvant le problème du flux d'énergie, la stabilité et l'efficacité du système sont assurées, permettant une planification, une exploitation et une gestion optimales des systèmes électriques.

Essentiellement, le concept de flux d'énergie est fondamental à la fois pour la planification et l'exploitation des réseaux électriques, jouant un rôle essentiel pour assurer la distribution fiable et sécurisée de l'énergie électrique afin de répondre efficacement aux besoins industriels, commerciaux et résidentiels [AF23].

### 2.3. Objectifs de l'étude de l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance vise à comprendre comment l'énergie électrique est acheminée et distribuée dans un système électrique complexe, en prenant en compte les contraintes physiques et les limitations, afin d'assurer un fonctionnement fiable, efficace et sécurisé du réseau [KWA08] :

- 1- Déterminer les puissances active et réactive dans les lignes de transmission, en se basant sur certaines considérations liées au récepteur ou au générateur [AB16].
- 2- Calculer les différences de potentiel à chaque nœud ou jeu de barres du réseau [AB16].
- 3- Vérifier qu'aucune ligne n'est surchargée, ce qui pourrait signifier que la ligne est proche de sa stabilité thermique [DA22].
- 4- Surveiller les lignes en cas de ré enclenchement.
- 5- Déterminer l'écoulement de puissance optimal qui conduit à un dispatching optimal en calculant l'état du réseau ( $P$ ,  $Q$ ,  $V$ ,  $\delta$ , etc.) dans des hypothèses données de production et de consommation [KWA08].

### 2.4. Écoulement de puissance (Flux de puissance)

Le concept de « flux de puissance » en génie électrique fait référence au flux d'énergie électrique dans un système. Il s'agit du taux de transfert d'énergie électrique entre une source d'alimentation et une charge. L'analyse et le contrôle de ce flux d'énergie sont essentiels au maintien de la stabilité et de l'efficacité des réseaux électriques.

Divers dispositifs et méthodes sont utilisés pour gérer le flux de puissance, tels que le contrôleur universel de flux de puissance (UPFC), le flux de puissance optimal (OPF) et les analyseurs de puissance.

- Contrôle des Flux de Puissance avec l'UPFC : L'UPFC (Unified Power Flow Controller) est un dispositif universel qui combine trois caractéristiques - impédance, grandeur de tension et angle de phase - pour

contrôler l'écoulement de puissance à travers une ligne de transmission et compenser la puissance réactive dans les réseaux électriques [HA14].

- Flux de Puissance Optimal (OPF) : L'OPF vise à optimiser les valeurs possibles pour maximiser l'efficacité du réseau électrique en minimisant les pertes, maximisant la réserve de puissance réactive, et optimisant la puissance réactive. Il utilise des solveurs et des contraintes définies par l'utilisateur pour atteindre ces objectifs [DUM12].
- Analyseur de Puissance : un analyseur de puissance est utilisé pour mesurer le flux de puissance dans un système électrique, fournissant des données critiques pour l'analyse. Il calcule la puissance en watts (W) en fonction du taux de transfert d'énergie par seconde (J/s). Les analyseurs de puissance avancés peuvent acquérir des signaux électriques, effectuer des calculs intégrés et permettre des analyses complexes, notamment des mesures dans les systèmes AC et DC, une analyse harmonique et une cartographie de l'efficacité [JAM08].
- Analyse de Flux de Puissance avec DIg SILENT Power Factory : Ce logiciel offre diverses méthodes de calcul du flux de puissance, y compris une technique Newton-Raphson AC complète et une méthode linéaire DC. Il permet d'analyser les flux de puissance équilibrés et déséquilibrés, de modéliser des machines asynchrones, et de prendre en compte diverses contraintes pour une optimisation efficace du réseau électrique [BOS16].
- Résolution Exacte du Problème d'Optimisation des Flux de Puissance : c'est la résolution exacte du problème d'optimisation des flux de puissance (OPF) dans un réseau électrique comme la méthode de reformulation appelée RC-OPF pour résoudre efficacement ce problème, en utilisant des techniques de contractions de bornes et des résultats issus de la reformulation optimale [HAL19].

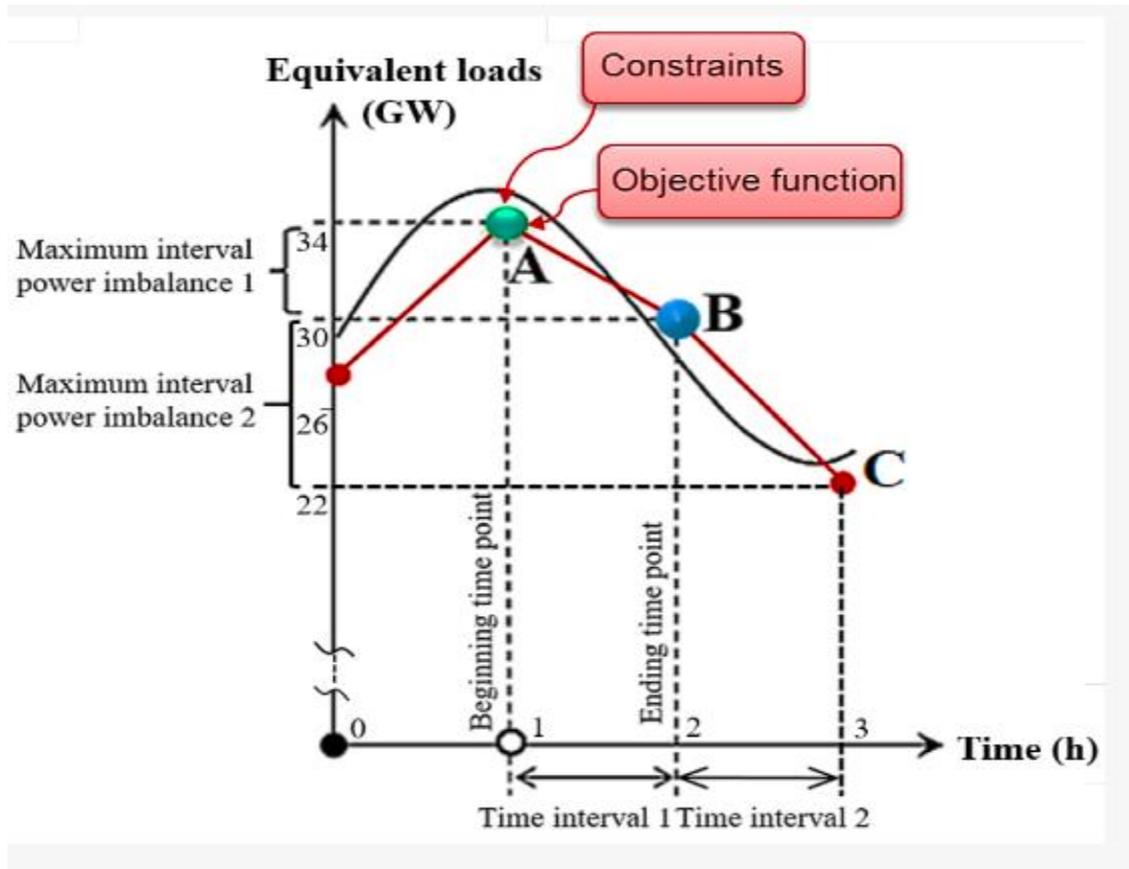
## 2.5. L'écoulement de puissance optimal (optimal power flow OPF)

L'écoulement de puissance optimal (OPF) est un problème crucial dans le fonctionnement des systèmes énergétiques. Il vise à déterminer les puissances optimales à générer par les centrales électriques afin de minimiser les coûts d'exploitation, réduire les pertes de transmission, améliorer le profil de tension et maximiser la puissance transmissible.

Ce processus, également connu sous le nom de dispatching économique, implique l'optimisation des variables de contrôle pour atteindre des objectifs

spécifiques tout en respectant les contraintes physiques et techniques du réseau électrique.

Différentes méthodes d'optimisation, telles que la programmation linéaire, sont utilisées pour résoudre ce problème complexe et essentiel à l'efficacité et à la fiabilité des réseaux électriques [ZL11].



**Figure 2.1 :** Flux de puissance optimal traditionnel [ZL11].

Figure 2.1 représente le flux de puissance optimal traditionnel où la fonction objective et les contraintes sont résolues au point de départ A, et supposent la solution optimale pour répondre à toutes les contraintes du système jusqu'à ce que la répartition soit ajustée au point B pendant l'intervalle de temps [IDE10].

### 2.5.1. Domaines d'application de l'OPF

Les applications de la fonction écoulement de puissance optimal peuvent être classées en applications d'exploitation et celles de planification. Dans le domaine d'exploitation,

On distingue les applications d'ordre économiques et celles d'ordre technique. Dans chaque catégorie on trouve plusieurs applications, dont les plus courantes sont :

### **2.5.1.1. Minimisation du coût de combustible**

L'intérêt étant la minimisation des coûts d'exploitation des réseaux électriques.

La minimisation du coût du combustible est le souci primordial.

Le but étant de trouver les puissances optimales à générer par les centrales de façon à minimiser le coût total du combustible [LA22].

### **2.5.1.2. Minimisation des pertes**

La minimisation des pertes de transmission est considérée comme l'un des objectifs les plus importants [LA22].

### **2.5.1.3. Amélioration du profil de tension**

En général, les tensions sont bornées entre des limites supérieures et inférieures dans les contraintes d'inégalité. Cependant, il existe d'autres formulations où le but est de déterminer les paramètres de contrôle pour minimiser la somme des déviations de tension au niveau des jeux de barres de charge [LA22].

### **2.5.1.4. Maximisation de la puissance transmissible**

Maximiser le transfert de puissance est un objectif appréciable pour les systèmes interconnectés. Il peut aider à minimiser les coûts d'exploitation des systèmes électriques en plus d'autres avantages tel que l'amélioration de la fiabilité. Cet objectif est mieux géré par un ajustement optimal des sources de puissance réactives [LA22].

## **2.5.2. Les principaux objectifs de l'écoulement de puissance optimal (OPF)**

- Minimisation du coût total de production
- L'OPF vise à déterminer les réglages optimaux des générateurs pour minimiser les coûts de combustible et d'exploitation du système électrique.
- Minimisation des pertes de transmission [DA22].
- L'OPF cherche à réduire les pertes d'énergie dans les lignes et transformateurs du réseau électrique [DA22].
- Amélioration du profil de tension.
- L'OPF permet d'optimiser les tensions aux nœuds du réseau afin de les maintenir dans des limites acceptables.
- Maximisation de la puissance transmissible [DA22].
- L'OPF peut être utilisé pour augmenter la capacité de transfert d'énergie du réseau.

- Minimisation du délestage de charges [DA22].
- L'OPF peut être employé pour réduire au minimum la déconnexion forcée de charges en cas de contraintes de sécurité [DA22].

En résumé, l'OPF est un outil essentiel pour exploiter le système électrique de manière économique et sûre en optimisant les réglages des générateurs et les autres éléments de contrôle.

## 2.6. Méthodes de calcul en général

### 2.6.1. Formulation des équations de l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent. Un modèle mathématique de ce système doit être déterminé pour pouvoir résoudre le problème de l'écoulement des puissances. Considérons le schéma représentatif du réseau de la figure suivante :

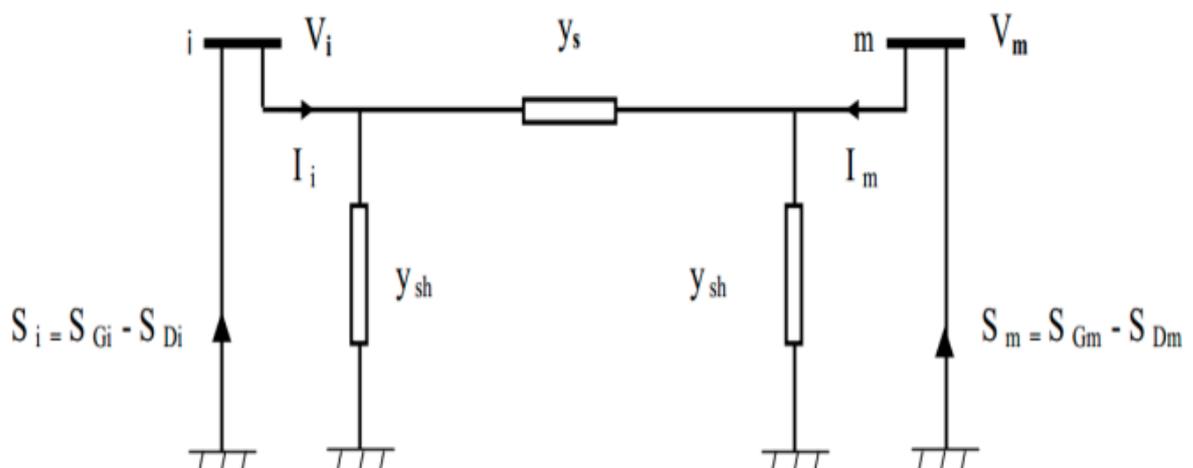


Figure 2.2: Réseau à n nœuds[HVD14]

La puissance apparente au nœud « i » est donnée par la relation suivante [HVD14] :

$$S_i = V_i I_i^* \quad (1)$$

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} = P_{Gi} - P_{Di} - jQ_{Gi} - jQ_{Di} \quad (2)$$

### 2.6.2. Types de nœuds des réseaux électriques.

Le tableau 2.1 représente les différents types de nœuds des réseaux électriques

**Tableau 2.1** : types de nœuds des réseaux éclectiques [RO21].

Type de nœuds	Variables connues	Variables inconnues
<b>PQ</b>	Les puissances active et réactive (P, Q)	Tension amplitude et angle de ( $V, \delta$ )
<b>PV</b>	Puissance active et la tension (P, V)	Angle de phase de tension et puissance réactive ( $\delta, Q$ )
<b>Référence</b>	Tension amplitude et angle de phase ( $V, \delta$ )	Le courant, Les puissances active et réactive (P,Q)

### 2.6.3. Méthodes de calcul d'écoulement de puissance

Le calcul d'écoulement de puissance est une étude en régime permanent du réseau électrique qui consiste à déterminer, en premier lieu, à chaque jeu de barres, l'amplitude et la phase de la tension ainsi que les puissances active et réactive injectées.

Connaissant les tensions (amplitude et phase) aux jeux de barres ainsi que les puissances injectées (active et réactive), nous pouvons calculer, en deuxième lieu, les courants et les puissances dans les lignes [MOU12].

Les deux méthodes les plus utilisées sont la méthode de Newton-Raphson et la méthode de Gauss-Seidel. La méthode de Newton-Raphson résout le problème d'écoulement de puissance en utilisant un système d'équations non linéaires. Elle est généralement plus rapide que la méthode de Gauss-Seidel, mais nécessite le calcul de la matrice jacobienne.

La méthode de Gauss-Seidel est une méthode itérative plus simple à mettre en œuvre, mais converge plus lentement que la méthode de Newton-Raphson, surtout pour les grands réseaux.

Il existe également la méthode de l'écoulement de puissance découplé rapide (FDLF), qui découple les équations actives et réactives pour accélérer les calculs, au prix d'une précision légèrement moindre.

Pour les réseaux de distribution à fort rapport R/X, la méthode de balayage avant-arrière peut être plus adaptée.

Enfin, les réseaux neuronaux artificiels ont aussi été utilisés pour résoudre le problème d'écoulement de puissance, avec des performances intéressantes en termes de temps de calcul.

### 2.6.4. Méthode de Gauss–Seidel

Cette méthode est inspirée de la méthode de Gauss et s'est évoluée dans le temps grâce à des travaux de recherche effectués. La méthode de Gauss–Seidel est utilisée pour la résolution des systèmes de petite taille.

La formule de la tension dans les nœuds PQ est donnée par :

$$V_i^{k+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left( \frac{P_i - jQ_i^k}{(V_i^k)^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{k+1} - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^k \right) \quad (3)$$

Les angles et les puissances seront déduits par le biais de la formule :

Dans chaque itération, le vecteur de tension obtenu qui remplacera l'ancienne valeur, c'est-à-dire :

$V_i^{k+1}$  remplace  $V_i^k$  Le processus se termine une fois que :

$$\Delta V_i^{k+1} = V_i^{k+1} - V_i^k < \epsilon \quad (4)$$

Où  $\epsilon$  représente la tolérance.

La méthode de Gauss–Seidel accélérée (par relaxation) est apparue, pour un gain de temps de calcul et un nombre d'itérations minimal, en introduisant un coefficient d'accélération  $\alpha$  tel que :

$$V_{i_{acc}}^{k+1} = V_i^k + \alpha \Delta V_i^k \quad (5)$$

### 2.6.5. Méthode de Newton–Raphson

La méthode de Newton-Raphson est très utilisée en pratique pour l'écoulement de puissance et pour n'importe quel système, de grande ou petite taille. Le choix des valeurs initiales de tension est important. Plus, elles sont proches de la solution, plus vite est la convergence.

Pour un réseau de  $n$  nœuds, le système est de dimension de  $2(n-1) \times 2(n-1)$ .

### 2.6.6. Méthode Découplée Rapide (FDLF)

En anglais : Fast Decoupled Load Flow, c'est une méthode améliorée et simplifiée à base de Newton–Raphson.

A partir de la méthode de Newton-Raphson qui a montré que la moitié des éléments de la matrice jacobienne en coordonnées polaires représentent un

couplage faible, des approximations sont faites pour simplifier le modèle. L'équation de découplage donne (A) :

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{|V|} \\ \frac{\Delta Q}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (6)$$

A et C étant des sous-matrices jacobienues. Le découplage de Newton réduit la non-linéarité du système. La FDLF est venue par des mises à jour et des approximations. L'équation (A) devient :

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{|V|} \\ \frac{\Delta Q}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B' & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -B'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (7)$$

B' et B'' représentent des sous matrices de la matrice sus ceptance B après avoir fixé certaines hypothèses.

Le calcul avec cette méthode est similaire de point de vue algorithmique avec la méthode NR en coordonnées polaires, le découplage assure que la matrice jacobienne soit creuse à moitié (remplisse par des zéros pour des raisons de simplification, elle est généralement utilisée dans le cas de problème de surcharge (outage) ou pour des régions qui disposent des lignes dont le quotient inductance – résistance très faible ( $R/X \gg \gg 0$ ) [SLI09].

En résumé, le choix de la méthode dépend principalement de la taille et des caractéristiques du réseau électrique à étudier, ainsi que des performances souhaitées en termes de précision et de temps de calcul.

### 2.6.7. Objectifs les plus importants de l'étude de l'écoulement de puissance

- 1- La détermination des puissances réactives et actives dans la ligne de transmission basée sur certaines considérations à priori associées au récepteur ou au générateur [SLI12].
- 2- Calcul des différences de potentiel à chaque nœud ou jeu de barre (bus en terminologie anglo-saxon) [DEB94].
- 3- Vérifier qu'aucune ligne n'est surchargée. La surcharge peut signifier que la ligne est proche de la stabilité thermique [SLI12].
- 4- Surveillance de la ligne en cas de ré-enclenchement [DEB94].

5- Détermination de l'écoulement de puissance spécifique qui conduit à un dispatching optimum en calculant l'état du réseau ( $P$ ,  $Q$ ,  $V$ ,  $\delta$ ...) dans des hypothèses données de production et de consommation. [CAP05]

$P$ : puissance active injectée ou soutirée,  $Q$ : puissance réactive injectée ou soutirée,  $V$  : module de la tension,  $\delta$  : déphasage de la tension.

### **2.6.8. Quelles sont les différences entre la méthode de newton-raphson et celle de gauss-seidel pour le calcul d'écoulement de puissance ?**

La méthode de Newton-Raphson et la méthode de Gauss-Seidel sont deux approches couramment utilisées pour résoudre le problème d'écoulement de puissance dans les réseaux électriques.

Les différences entre ces deux méthodes sont essentielles pour comprendre les avantages et les limitations de chaque approche dans le contexte du calcul d'écoulement de puissance.

#### **✓ Newton-Raphson**

La méthode de Newton-Raphson est une méthode itérative qui utilise le développement de Taylor pour approximer la fonction à minimiser. Elle est basée sur l'estimation initiale de la solution et utilise la matrice jacobienne pour ajuster cette estimation à chaque itération.

Cette méthode est considérée comme la plus raffinée et la plus importante pour l'analyse de l'écoulement de puissance, car elle offre une convergence rapide et une précision élevée [WHE00].

#### **✓ Gauss-Seidel**

Séquentielle Gauss-Seidel est également une méthode itérative qui résout les équations d'écoulement de puissance en utilisant une approche séquentielle.

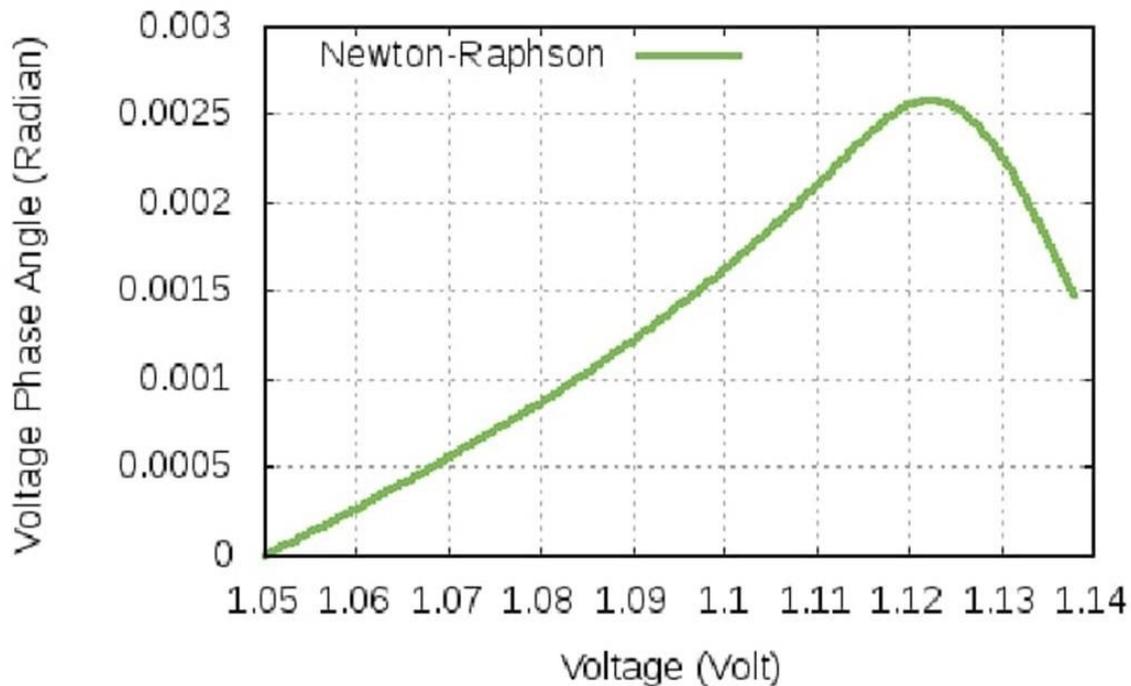
Elle est plus simple à mettre en œuvre que la méthode de Newton-Raphson, mais nécessite plus d'itérations pour atteindre la solution finale, ce qui peut rendre la méthode plus lente pour les réseaux de grande taille [FRA13].

### **2.6.9. Comparaison**

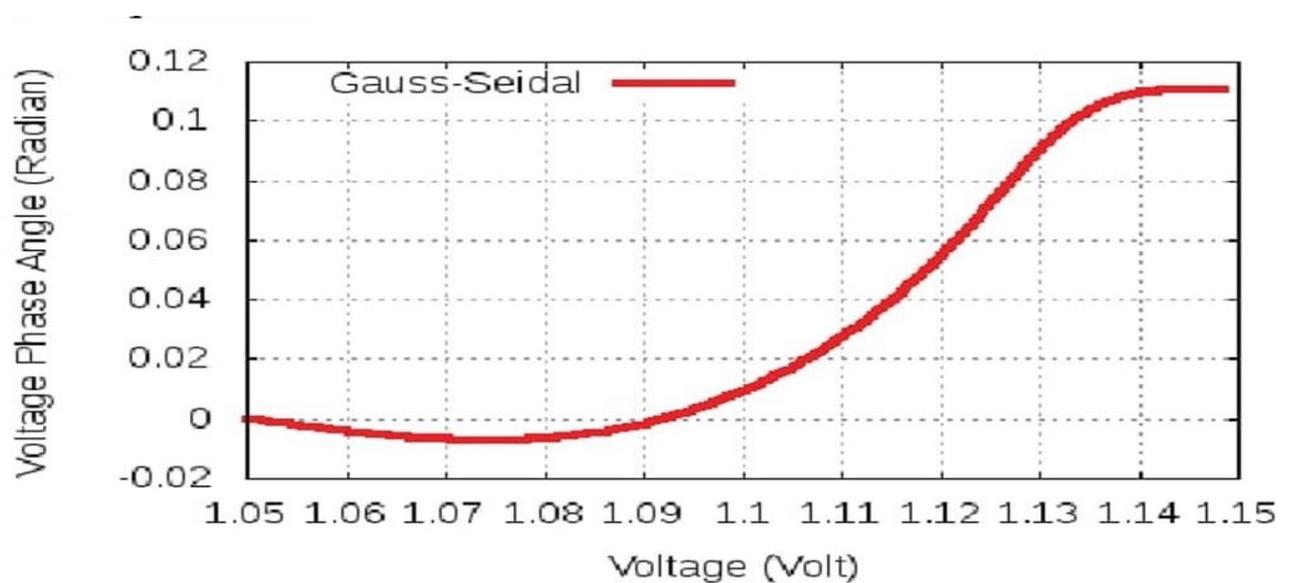
La méthode de Newton-Raphson est plus rapide et plus précise que la méthode de Gauss-Seidel, mais nécessite un calcul plus complexe de la matrice jacobienne.

La méthode de Gauss-Seidel est plus simple à mettre en œuvre, mais peut nécessiter plus d'itérations pour atteindre la solution finale.

Le choix de la méthode dépendra de la taille et des caractéristiques du réseau électrique à étudier, ainsi que des performances souhaitées en termes de précision et de temps de calcul.



**Figure 2.3:** Matlab simulation in Gauss- Seidel [DEB94].



**Figure 2.4:** Matlab simulation in Newton-Raphson [DEB94].

## 2.7. Optimal Power Flow (OPF) en présence des énergies renouvelables

Le problème de la répartition optimale des puissances est un problème d'optimisation dont l'objectif est de minimiser le coût total de la production de la puissance d'un réseau électrique. Le problème de l'écoulement de puissance optimal est donné sous une forme standard d'optimisation avec contraintes d'égalités et d'inégalités comme suit [AL18] :

Min.  $F(x, u)$  (fonction objective)

Selon

$g_i(x, u) = 0, i=1, 2, 3, \dots, n$  (contraintes d'égalité)

Et

$h_j(x, u) \leq 0, j=1, 2, 3, \dots, m$  (contraintes d'inégalité)

Où  $x$  : vecteur des variables d'état ;  $u$  : vecteur des variables à contrôler.

### a) Fonction objective

Cette fonction reflète le besoin de minimiser le coût total de la production des puissances actives. On suppose que le coût individuel de chaque centre de production dépende uniquement de la génération de la puissance active :

$$F = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) \quad (8)$$

Le coût individuel de chaque générateur thermique peut être exprimé comme suit :

$$F_i(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi}^2 + c_i P_{Gi}^3 \quad (9)$$

Où  $P_{Gi}$  est la puissance active générée par le générateur thermique au nœud  $i$ ,  $N_G$  est le nombre de générateurs thermiques;  $a_i$ ,  $b_i$  et  $c_i$  sont les coefficients de coût du combustible.

### b) Contraintes d'égalités

Ces contraintes sont l'image des lois physiques gouvernant le système électrique. Elles sont représentées par les équations non linéaires de l'écoulement de puissance. Il faut que la somme des puissances active et réactive injectées dans chaque jeu de barres soit égale à zéro.

$$\Delta P_i = 0 = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{Gi} + P_{Di} \quad (10)$$

$$\Delta Q_i = 0 = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{Gi} + Q_{Di} \quad (11)$$

### c) Contraintes d'inégalités

En pratique, on ne doit pas dépasser les limites des éléments physiques du réseau électrique tels que les générateurs, les transformateurs à prises de charge, et les transformateurs de phase. En plus des contraintes sur les puissances actives à chaque générateur qui a une influence directe sur la fonction coût, on peut citer d'autres contraintes d'inégalités : Les puissances actives et réactives générées qui sont limitées par des bornes inférieures et supérieures :

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (12)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad (13)$$

Les transformateurs à prises de charge ont des déviations max. et min. du niveau de tension par rapport à la tension nominale. De même les transformateurs à angles de phase ont des décalages max. et min. des phases des tensions. Les deux types de transformateurs forment les contraintes d'inégalités suivantes :

$$t_{ij}^{min} \leq t_{ij} \leq t_{ij}^{max} \quad (14)$$

$$\alpha_{ij}^{min} \leq \alpha_{ij} \leq \alpha_{ij}^{max} \quad (15)$$

Pour maintenir la sécurité du système électrique, les lignes de transport et les transformateurs de puissances ont des limites sur le transit de puissance apparente. Ces limites sont dues aux pertes thermiques dans les conducteurs, et/ou la stabilité du système. Elles sont représentées par une contrainte d'inégalité, qui limitera le carré de puissance en MVA d'un transformateur ou d'une ligne de transport.

$$|S_{ij}|^2 \leq |S_{ij}^{max}|^2 \quad (16)$$

Pour garder la qualité de service électrique et la sécurité du système, les niveaux de tension des jeux de barres doivent toujours être entre leurs limites max. et min. Ces limites exigent encore l'addition des contraintes d'inégalités.

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (17)$$

Donc il y'a " $n$ " contraintes d'égalités et " $m$ " contraintes d'inégalités et le nombre des variables du problème est égal à la taille du vecteur des variables de contrôle (y compris puissances active et réactive générées, niveaux de tension des jeux de barres, prises des transformateurs... etc.).

L'Optimal Power Flow (OPF) en présence des énergies renouvelables est un domaine crucial pour l'intégration efficace de ces sources d'énergie dans les réseaux électriques. Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, introduisent des défis en raison de leur nature intermittente et non contrôlable. L'OPF vise à optimiser la production et la distribution d'électricité tout en tenant compte de ces sources variables [BA23] [BM22].

Dans ce contexte, l'OPF doit prendre en considération la variabilité des énergies renouvelables pour garantir l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité. Cela implique d'ajuster la production des centrales conventionnelles et des sources renouvelables pour maintenir la stabilité du réseau et minimiser les coûts opérationnels [BA23] [BM22]. Les méthodes de calcul de l'OPF en présence d'énergies renouvelables intègrent des modèles de prévision de la production des sources renouvelables, des contraintes de réseau, des coûts de production, et des objectifs de performance énergétique et environnementale.

Ces calculs visent à optimiser la production d'électricité tout en respectant les contraintes opérationnelles et environnementales [BA23] [BM22].

Des études ont montré que les algorithmes avancés d'intelligence artificielle tels que l'algorithme de moulage visqueux (SMA) et l'optimisation des colonies de fourmis (ALO) sont efficaces pour résoudre le problème OPF avec l'énergie éolienne stochastique et les systèmes FACTS-HVDC, conduisant à une amélioration des performances du système et à une optimisation des coûts [BUS21].

L'intégration de sources d'énergie renouvelables, en particulier l'énergie éolienne, a démontré des améliorations significatives de l'efficacité et de l'efficacité globales des systèmes électriques [BM22].

En résumé, l'OPF en présence des énergies renouvelables est essentiel pour assurer une transition énergétique réussie vers un système électrique plus durable, fiable et efficace, en exploitant pleinement le potentiel des sources d'énergie propres et renouvelables.

### **2.7.1. Utilisation de techniques avancées**

Des approches basées sur l'intelligence artificielle, telles que les algorithmes de moule visqueux (SMA) et d'optimisation de fourmis (ALO), peuvent être intégrées à l'OPF pour résoudre les problèmes complexes liés à l'intégration des énergies renouvelables

Minimisation des coûts de production :  
L'OPF peut être utilisé pour minimiser le coût total de production en optimisant la planification des unités thermiques et éoliennes, permettant ainsi une intégration efficace des énergies renouvelables dans le mix énergétique [BA23].

- Optimisation de la gestion des réseaux : En présence d'énergies renouvelables intermittentes et variables, l'OPF permet d'optimiser la coordination entre la production et la consommation d'électricité, assurant un équilibre constant entre l'offre et la demande [CD07]
- Utilisation de techniques avancées : Des approches basées sur l'intelligence artificielle, telles que les algorithmes de moule visqueux (SMA) et d'optimisation de fourmis (ALO), peuvent être intégrées à l'OPF pour résoudre les problèmes complexes liés à l'intégration des énergies renouvelables [BA23].
- Considération des contraintes du réseau : L'OPF prend en compte diverses contraintes telles que les tensions, les puissances actives/réactives, les limites des transformateurs, etc., pour garantir un fonctionnement stable et sécurisé du réseau électrique tout en maximisant l'utilisation des énergies renouvelables [BA23].

## **2.8. Logiciel PSAT**

Le logiciel PSAT (Power System Analysis Toolbox) est un logiciel destiné à l'analyse et l'étude des réseaux électriques.

Il est développé sous MATLAB par Mr. Federico Milano. PSAT est une boîte à outils qui est dédiée pour l'analyse statique, l'analyse dynamique et le contrôle des réseaux électriques.

Le logiciel PSAT a des interfaces graphiques pour le système et les paramètres de réglage de routine, il inclut l'écoulement de puissance basé sur la méthode de Newton Raphson [BOY20].

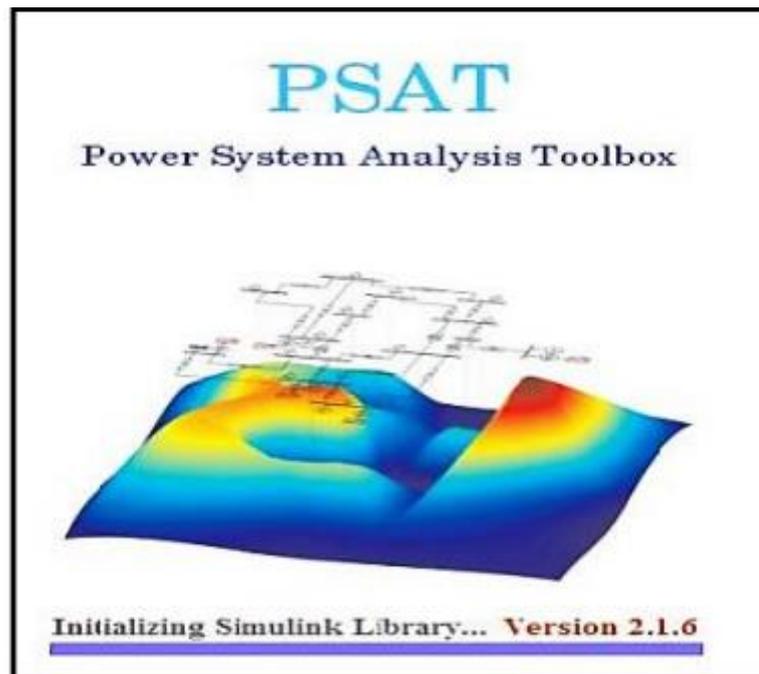


Figure 2.5 : Interface graphique du PSAT [BOY20].

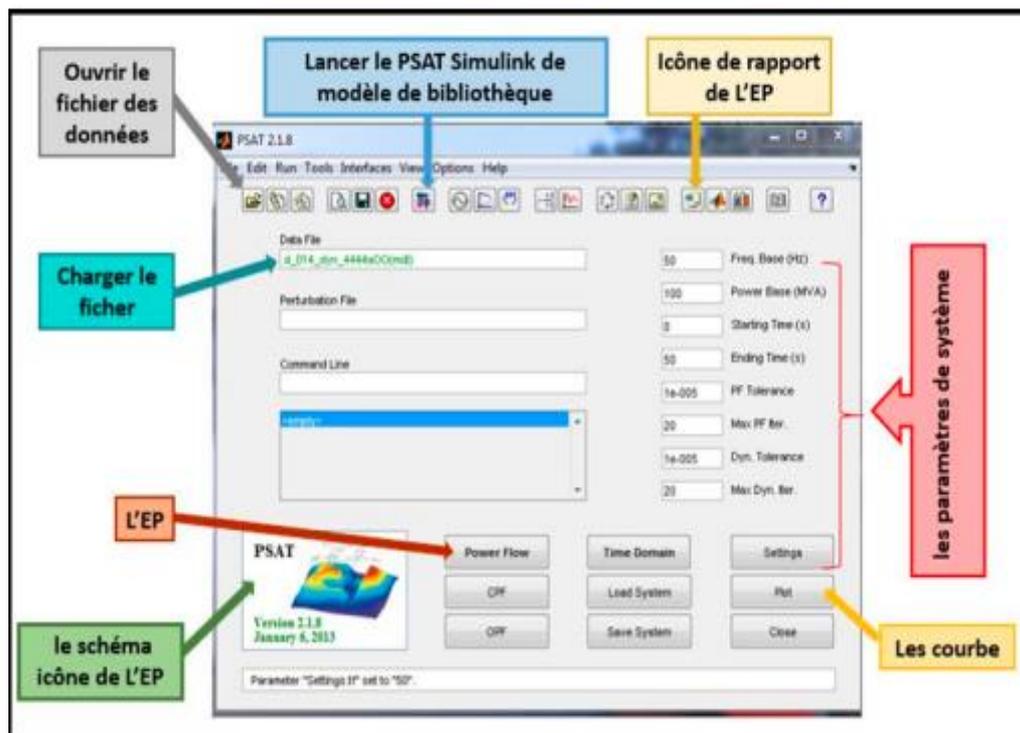


Figure 2.6 : Fenêtre d'accueil du PSAT [BOY20].

### 2.8.1. Méthodes d'analyse :

PSAT utilise la méthode de Newton-Raphson pour résoudre l'écoulement de puissance dans le réseau électrique.

Cette méthode itérative permet de calculer les tensions, les angles de phase et les flux de puissance dans le réseau [IJE13].

PSAT peut également effectuer d'autres analyses statiques et dynamiques, comme l'analyse de stabilité des petits signaux et la simulation temporelle [BM17].

Le logiciel offre des fonctions d'optimisation, notamment l'écoulement de puissance optimal (OPF) et l'écoulement de puissance continu (CPF), permettant d'optimiser le fonctionnement du réseau [BM17].

### 2.8.2. Description de PSAT

- PSAT est un logiciel libre et open-source, fonctionnant sur les plateformes Matlab et GNU/Octave [AB16].
- Il dispose d'une interface graphique complète et d'un éditeur de réseau basé sur Simulink, permettant de dessiner facilement les schémas électriques [AB16].
- La bibliothèque Simulink de PSAT contient de nombreux blocs représentant les différents éléments d'un réseau électrique (barres, charges, machines, etc.) [DA22].

### 2.8.3. Fenêtres et fonctions

La fenêtre principale de PSAT permet d'accéder à toutes les fonctionnalités du logiciel, comme le lancement des analyses, la visualisation des résultats et la configuration des paramètres [AB16].

- PSAT offre des outils pour effectuer l'écoulement de puissance, l'analyse de stabilité, l'optimisation, etc. Ces fonctions peuvent être lancées à partir de menus, de boutons ou de raccourcis dans l'interface [BA17].
- Le logiciel fournit également des exemples de réseaux électriques prédéfinis, facilitant la prise en main et les tests [BA17].

En résumé, PSAT est un outil complet et performant pour l'analyse et l'optimisation des systèmes électriques, avec de nombreuses fonctionnalités avancées accessibles via une interface graphique conviviale.

## 2.9. Conclusion

La conclusion tirée de l'étude du flux d'énergie dans les réseaux électriques souligne l'importance de l'optimisation du flux d'énergie pour une transmission et une distribution efficace de l'énergie.

Diverses méthodes, telles que la méthode de Newton-Raphson et la méthode de Gauss-Seidel, sont utilisées pour résoudre les problèmes de flux de puissance. L'optimisation des flux d'énergie implique de minimiser les coûts de production tout en répondant à différentes contraintes. De plus, la recherche souligne l'importance de protéger les systèmes électriques contre les incidents qui pourraient entraîner des conséquences catastrophiques, soulignant la nécessité d'un réseau de transport d'énergie sécurisé et stable.

# **Chapitre III**

## **Energies**

### **renouvelables**

### **3.1. Introduction :**

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou des ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituées les plus rapidement qu'elles ne sont consommées. Elles s'opposent aux énergies fossiles comme le gaz, le charbon ou le pétrole, qui proviennent de la décomposition de matières organiques sur des millions d'années.

Les principales sources d'énergies renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et la biomasse. Elles présentent l'avantage d'avoir un faible impact environnemental, en émettant très peu de gaz à effet de serre. De plus, elles sont réparties de manière plus égale sur la planète que les énergies fossiles.

Cependant, les énergies renouvelables peuvent aussi avoir des inconvénients, comme leur intermittence qui dépend des conditions météorologiques, ou leur coût d'installation encore élevé.

Des efforts sont nécessaires pour améliorer leur rentabilité et leur intégration dans les réseaux électriques.

Malgré ces défis, le développement des énergies renouvelables est essentiel pour réduire la dépendance aux énergies fossiles et lutter contre le changement climatique. De nombreux pays se sont fixé des objectifs ambitieux en termes de part des énergies renouvelables dans leur mix énergétique.

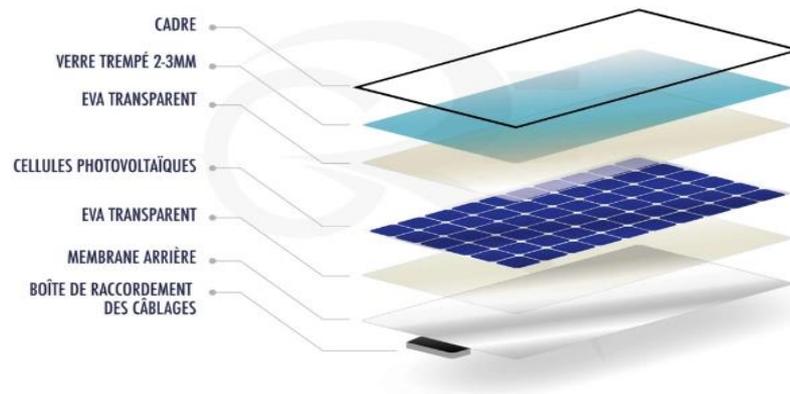
## **3.2. Différents types d'énergies renouvelables**

### **3.2.1. Energie solaire**

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable qui permet de produire de l'électricité et de la chaleur à partir du rayonnement du soleil. Il existe deux principales technologies pour exploiter l'énergie solaire :

- **Energie solaire photovoltaïque**

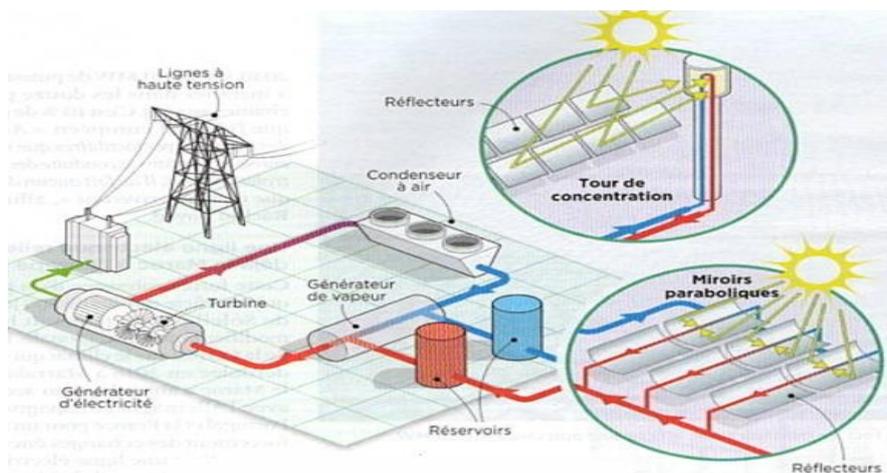
Les panneaux solaires photovoltaïques convertissent directement la lumière du soleil en électricité grâce à des cellules photovoltaïques. Cette technologie permet de produire de l'électricité de manière propre et renouvelable [FIS16].



**Figure 3.1** : panneau solaire photovoltaïque [FIS16]

- **Energie solaire thermique**

Les capteurs solaires thermiques captent la chaleur du soleil pour chauffer un fluide et produire de la vapeur. Cette vapeur peut ensuite être utilisée pour produire de l'électricité ou fournir de la chaleur directement [DAH12].



**Figure 3.2** : capteur thermique [DAH12]

Les avantages de l'énergie solaire sont nombreux : [RH79]

- C'est une énergie renouvelable, propre et inépuisable.
- Elle ne produit pas d'émissions de gaz à effet de serre.
- Les coûts d'installation ont fortement diminué ces dernières années.
- Elle peut être utilisée à différentes échelles, du particulier à l'industriel.

Cependant, l'énergie solaire présente aussi quelques inconvénients :

- Elle dépend des conditions météorologiques (ensoleillement).
- Le stockage de l'électricité produite reste encore un défi.
- Les coûts d'installation peuvent être élevés, bien qu'ils baissent.

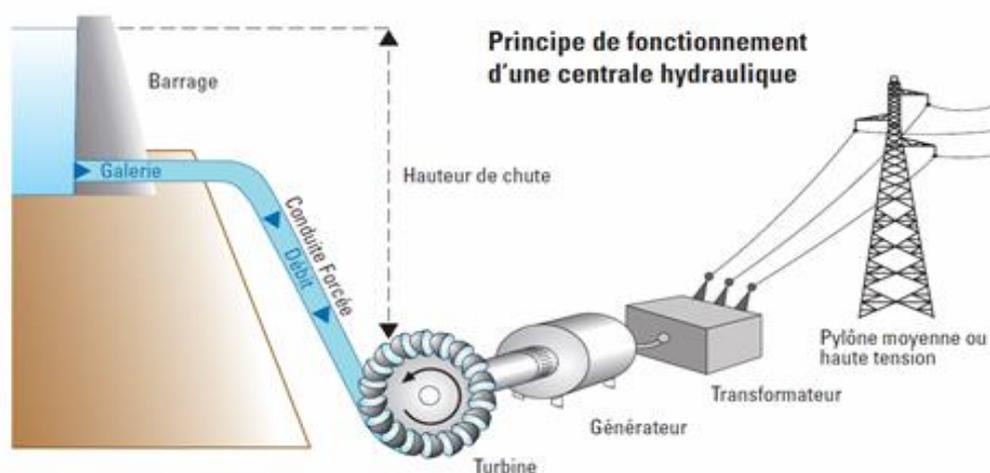
Malgré ces défis, l'énergie solaire est considérée comme une source d'énergie prometteuse pour l'avenir, en particulier dans les régions bénéficiant d'un bon ensoleillement [RH79].

### 3.2.2. Energie hydraulique

Le principe de base d'une centrale hydroélectrique est de convertir l'énergie potentielle de l'eau stockée dans un barrage ou un réservoir en énergie électrique. Voici les principales étapes :

- Le barrage retient l'eau d'un cours d'eau (fleuve, rivière) et crée un lac de retenue, formant ainsi un stock d'eau.
- L'eau stockée est acheminée via un canal de dérivation ou une conduite forcée jusqu'à la centrale, située en contrebas du barrage.
- La force de la chute d'eau entraîne la rotation d'une turbine hydraulique.
- La turbine entraîne à son tour un alternateur qui produit du courant électrique.
- Un transformateur élève la tension du courant électrique produit pour permettre son injection dans le réseau électrique à haute tension.

Les centrales hydroélectriques se différencient selon la hauteur de chute d'eau (faible, moyenne ou haute) et leur capacité de stockage (au fil de l'eau, d'écluse ou à réservoir). Les avantages de l'hydroélectricité sont son caractère renouvelable, son faible coût de fonctionnement et sa flexibilité pour répondre aux variations de la demande électrique [GR12].



**Figure 3.3 :** principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique [GR12]

### 3.2.3. Biomasse

La biomasse est une source d'énergie renouvelable qui provient de la matière organique d'origine végétale ou animale. Elle peut prendre différentes formes :

- Biomasse solide : bois, déchets végétaux, résidus agricoles, etc.
- Biomasse liquide : biocarburants comme le bioéthanol ou le biodiesel
- Biomasse gazeuse : biogaz issu de la fermentation de matières organiques.

La biomasse permet de produire de l'énergie sous forme de chaleur, d'électricité ou de carburants, par combustion, gazéification ou méthanisation [SM09].

Ses principaux avantages sont :

- C'est une énergie renouvelable et locale, qui contribue à réduire la dépendance aux énergies fossiles.
- Elle n'émet pas ou peu de CO<sub>2</sub> lors de sa combustion, car le CO<sub>2</sub> dégagé est compensé par celui absorbé pendant la croissance des végétaux.
- Elle permet de valoriser des déchets organiques.

Cependant, la biomasse présente aussi des défis, comme les coûts de production élevés, les risques de conflits d'usage des terres cultivables, et la nécessité d'une gestion durable des ressources [SM09].

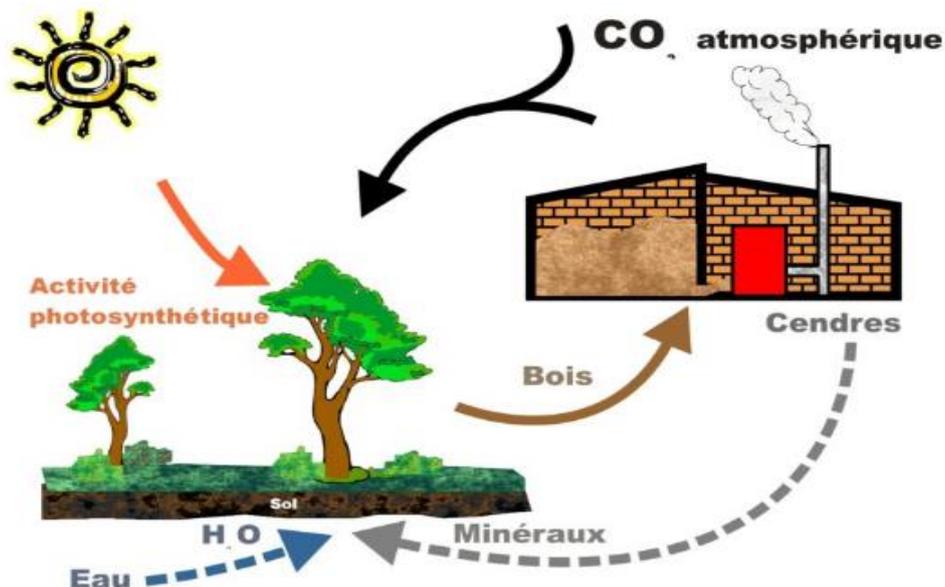


Figure 3.4 : La biomasse est une énergie renouvelable [SM09]

### 3.2.4. Energie géothermique

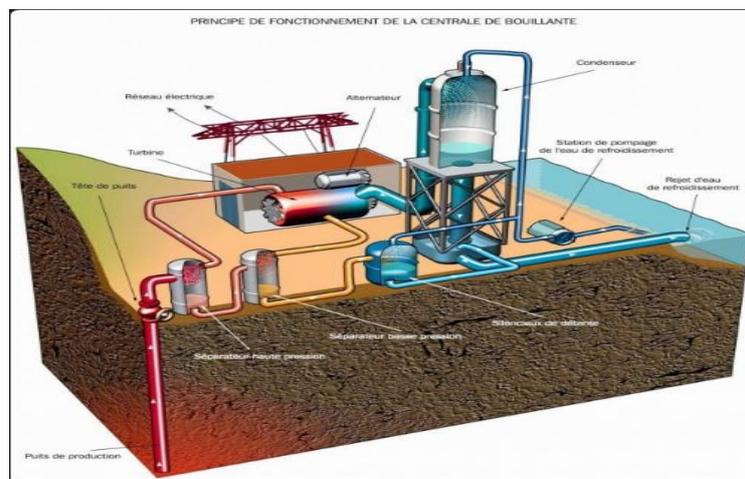
L'énergie géothermique est une forme d'énergie renouvelable qui provient de la chaleur stockée sous la surface de la Terre.

Cette chaleur est générée principalement par la décomposition naturelle de certains éléments radioactifs, ainsi que par la chaleur résiduelle suite à la formation de la Terre il y a des milliards d'années [BP17].

L'énergie géothermique peut être exploitée pour produire de l'électricité et de la chaleur pour diverses applications. Elle peut être extraite sans brûler de combustibles fossiles et émet peu de CO<sub>2</sub>. Ses principaux avantages sont sa disponibilité continue, son faible coût d'exploitation et son faible impact environnemental [BP17].

Il existe différentes technologies pour exploiter l'énergie géothermique, comme les centrales à vapeur sèche, à flashage ou binaires. La plupart des futures centrales géothermiques devraient être de type binaire.

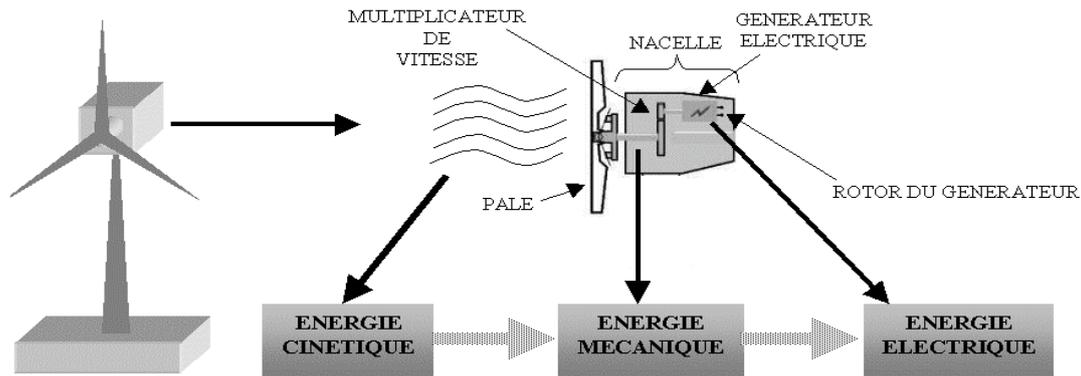
Bien que l'énergie géothermique présente de nombreux avantages, elle pose aussi quelques défis environnementaux liés à l'émission de certains gaz et à l'élimination des fluides géothermiques [BP17].



**Figure 3.5** : principe de fonctionnement de centrale de bouillante [BP17]

### 3.2.5. Energie éolienne

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui exploite la force du vent pour produire de l'électricité. Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique grâce à des générateurs.



**Figure 3.6 :** Conversion de l'énergie cinétique du vent [AL18].

Principaux avantages de l'énergie éolienne :

- C'est une énergie propre, renouvelable et inépuisable qui ne produit pas de gaz à effet de serre.
- Le vent, matière première, est gratuit et disponible partout dans le monde.
- Les éoliennes occupent peu d'espace au sol, préservant les terres agricoles.
- L'éolien offshore présente un fort potentiel avec des vents plus constants en mer.

L'Algérie dispose d'un important potentiel éolien, estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable, soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007.

Les régions les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes sont situées au sud-ouest du Sahara, comme Tindouf, In Salah et Adrar. Ce pendant, l'exploitation de ce potentiel se heurte à des contraintes techniques et économiques, comme l'éloignement des zones ventées et l'absence de connexion au réseau électrique national [DNK10].

La première tentative de raccordement d'éoliennes au réseau électrique en Algérie remonte à 1957, avec l'installation d'un prototype de 100 kW sur le site de Grand Vent. Depuis, le développement de l'éolien a été lent, avec seulement une première ferme éolienne de 10 MW installée à Adrar en 2014.

Néanmoins, le gouvernement algérien a fixé des objectifs ambitieux pour l'éolien, visant 1000 MW à moyen terme (2015-2020) et 5010 MW à l'horizon 2030. Cela nécessitera des investissements importants et la mise en place de politiques favorables au développement de cette filière [DOG14].

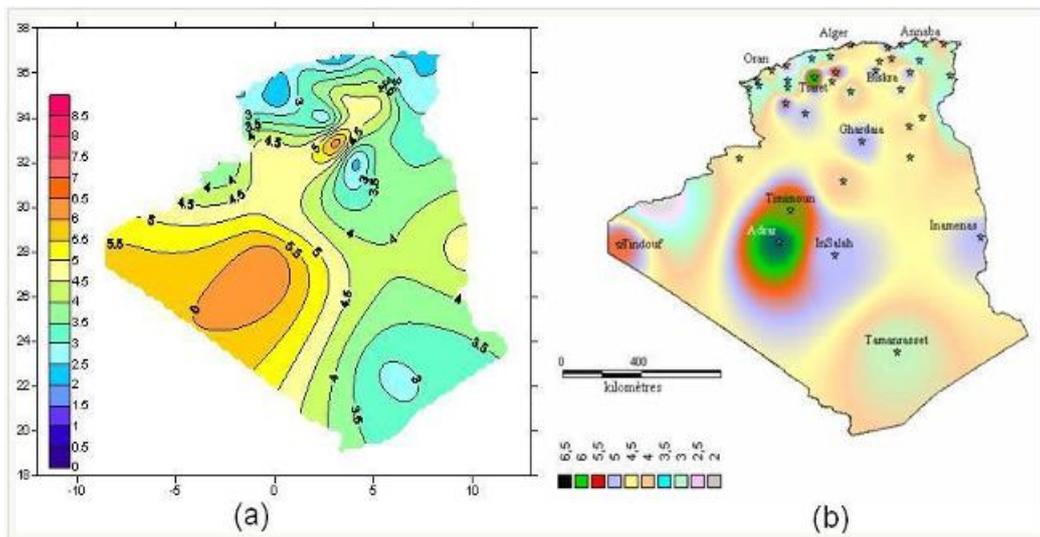
L'Algérie dispose donc d'un fort potentiel éolien, mais son exploitation reste encore limitée malgré les efforts entrepris. Des défis techniques, économiques et réglementaires doivent encore être relevés pour permettre un véritable essor de l'énergie éolienne dans le pays.

### 3.2.5.1. Ecoulement de puissance d'énergie éolienne

L'écoulement de puissance de l'énergie éolienne est influencé par plusieurs facteurs, notamment la vitesse du vent et la surface balayée par le rotor de l'éolienne.

La production d'énergie éolienne varie presque avec le cube de la vitesse du vent, ce qui signifie que de petites variations de la vitesse du vent peuvent avoir un impact significatif sur la production d'électricité.

De plus, le facteur de charge d'une éolienne, qui correspond à sa production annuelle divisée par sa production théorique, est un indicateur important de son efficacité. Il est essentiel de prendre en compte ces paramètres pour évaluer et optimiser l'écoulement de puissance de l'énergie éolienne.



**Figure 3.7 :** (a) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par [DCH11].

(b) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par [DKM06]

L'élaboration de l'ensemble des Atlas éoliens par les chercheurs de l'EPST CDER, a été effectuée par des analyses statistiques en utilisant des distributions, afin d'ajuster les données collectées auprès de l'Office National de la Météorologie (ONM).

Bien que le nombre de points de mesures répartis sur l'ensemble du territoire national soit relativement faible par rapport à la grande surface du pays, les cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER restent sans doute une base de référence pour les différents acteurs du secteur socio-économique qui prévoient le développement de cette énergie dans l'Algérie [PNY16].

### 3.2.5.2. Mesurer la puissance des éoliennes

La puissance d'une éolienne se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$P = 1/2 \times \rho \times S \times V^3 \quad (1)$$

Où P est la puissance de l'éolienne (en watts),  $\rho$  est la masse volumique de l'air (en kg/m<sup>3</sup>), S est la surface balayée par les pales (en m<sup>2</sup>), V est la vitesse du vent (en m/s).

Les éléments les plus importants pour déterminer la puissance d'une éolienne sont :

- Le diamètre du rotor, car le rotor est la partie tournante de l'éolienne
- La vitesse du vent, car la puissance varie avec le cube de la vitesse du vent

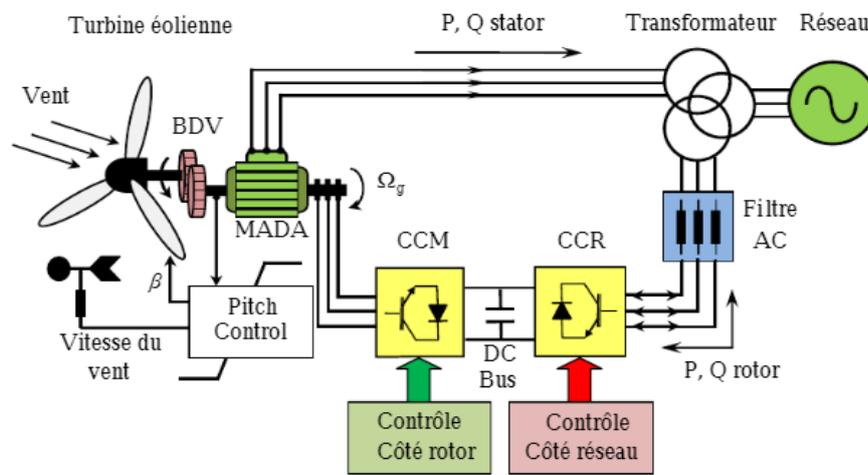
La puissance de sortie de l'éolienne est très variable en fonction de nombreux autres paramètres :

- La zone géographique et les conditions météorologiques (température, pression, humidité)
- La structure de l'éolienne (taille du mât, diamètre du rotor, nombre de pales)
- Le rendement mécanique entre la turbine et le rotor
- Le rendement des aérogénérateurs

En pratique, la puissance théorique maximale n'est que rarement atteinte, car l'énergie éolienne est intermittente et nécessite des conditions de vent optimales. Les éoliennes ont donc une puissance nominale qui correspond à leur production dans des conditions idéales [DNH18].

### 3.2.5.3. Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA)

La génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) est la technologie la plus utilisée, en raison de ses performances supérieures, telles que l'efficacité de transfert élevée d'énergie et le contrôle flexible. La MADA offre plusieurs avantages tels que le contrôle découplé de puissances actives et réactives [AL18].



**Figure 3.8 :** Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA [AL18].

La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur ou une boîte de vitesse (BDV). Le stator de la MADA est directement raccordé au réseau électrique, tandis que son rotor est connecté au réseau mais via un filtre triphasé de courant et deux convertisseurs statiques bidirectionnels triphasés commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), mis en cascade à travers un bus continu.

L'intérêt majeur de ce système éolien réside dans le fait que le convertisseur côté rotor ou bien coté MADA «CCM» et le convertisseur côté réseau «CCR», transférant la puissance de glissement et l'acheminant vers le réseau électrique, ne sont dimensionnés que pour une partie de la puissance nominale de la MADA. Pour cette structure, les équations de la MADA en termes des axes de «d» et de «q» en négligeant les flux transitoires du stator et du rotor peuvent être écrites comme suit [AL18]: Pour le circuit du stator:

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} + (x_s + x_m) i_{qs} + x_m i_{qr} \quad (2)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} - (x_s + x_m) i_{ds} + x_m i_{dr} \quad (3)$$

Pour le circuit du rotor:

$$v_{dr} = -R_r i_{dr} + (1 - \omega)((x_r + x_m)i_{qr} + x_m i_{qs}) \quad (4)$$

$$v_{qr} = -R_r i_{qr} + (1 - \omega)((x_r + x_m)i_{dr} + x_m i_{ds}) \quad (5)$$

Où  $v_{ds}$  et  $v_{qs}$  sont les tensions des axes  $d$  et  $q$  du stator,  $v_{dr}$  et  $v_{qr}$  sont les tensions des axes  $d$  et  $q$  du rotor,  $i_{dr}$  et  $i_{qr}$  sont les courants des axes  $d$  et  $q$  du rotor,  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$  sont les courants des axes  $d$  et  $q$  du stator,  $R_s$  et  $R_r$  sont les résistances du stator et du rotor,  $x_s$  est la réactance du stator,  $x_r$  est la réactance du rotor,  $x_m$  est la réactance mutuelle et  $\omega$  est la vitesse du rotor.

En supposant un modèle de convertisseur sans perte, la puissance active du convertisseur coïncide avec la puissance active du rotor. La puissance réactive injectée dans le réseau peut être approchée en négligeant la résistance du stator et en supposant que l'axe  $d$  coïncide avec le flux maximal du stator. Par conséquent, les puissances injectées dans le réseau peuvent être écrites comme suit [AL18]:

$$P = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \quad (6)$$

$$Q = -\frac{x_m v i_{dr}}{x_s + x_m} - \frac{v^2}{x_m} \quad (7)$$

Où  $v$  est l'amplitude de la tension du réseau.

### 1. Modèle de la turbine éolienne

Le couple mécanique de la turbine éolienne  $T_m$  est calculé en utilisant la vitesse du vent  $v_w$  (m/s) comme suit :

$$T_m = \frac{P_w}{\omega} \quad (8)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \rho C_p A v_w^3 \quad (9)$$

D'où  $\omega$  est la vitesse du rotor,  $P_w$  est la puissance mécanique extraite du vent,  $\rho$  est la densité de l'air ( $kg/m^3$ ),  $C_p$  est le coefficient de puissance et  $A$  est la surface du rotor ( $m^2$ ).

Le couple électrique  $T_e$  et le lien mathématique entre  $T_m$  et  $T_e$  résulte:

$$T_e = x_m (i_{qr} i_{ds} - i_{dr} i_{qs}) \quad (10)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \quad (11)$$

Avec  $H$  est l'inertie du rotor.

## 2. Modèle de la vitesse du vent

Afin de modéliser la vitesse instantanée du vent  $V_w(t)$ , on suppose qu'elle se compose de quatre composantes comme suit: Vitesse moyenne et initiale du vent  $V_{wa} (m/s)$ ; composante de rampe  $V_{wr}(t)$ ; composante de rafale  $V_{wg}(t)$  et la turbulence de la vitesse du vent  $V_{wt}(t)$ . La vitesse du vent  $V_w(t)$  peut être exprimée comme suit:

$$V_w(t) = V_{wa} + V_{wr}(t) + V_{wg}(t) + V_{wt}(t) \quad (12)$$

La composante de rampe du vent est définie par l'amplitude  $A_{wr}$  et les temps de début  $t_{sr}$  et de fin  $t_{er}$ :

$$\begin{aligned} t < t_{sr} : V_{wr}(t) &= 0 \\ t_{sr} \leq t \leq t_{er} : V_{wr}(t) &= A_{wr} \frac{(t-t_{sr})}{(t_{er}-t_{sr})} \\ t > t_{er} : V_{wr}(t) &= A_{wr} \end{aligned} \quad (13)$$

La composante de rafale du vent est définie par l'amplitude  $A_{wg}$  et les temps de début  $t_{sg}$  et de fin  $t_{eg}$ :

$$\begin{aligned} t < t_{sg} : V_{wg}(t) &= 0 \\ t_{sg} \leq t \leq t_{eg} : V_{wg}(t) &= \frac{A_{wg}}{2} (1 - \cos(2\pi \frac{t-t_{sg}}{t_{eg}-t_{sg}})) \\ t > t_{eg} : V_{wg}(t) &= A_{wg} \end{aligned} \quad (14)$$

La composante de turbulence du vent est décrite par une densité spectrale de puissance comme suit [AL18]:

$$S_{wt} = \frac{\frac{1}{(\ln(\frac{h}{z_0}))^2} \times I V_{wa}}{(1 + 1.5 \frac{I f}{V_{wa}})^{\frac{5}{3}}} \quad (15)$$

D'où  $f$  est la fréquence électrique,  $h$  (mètres) est la hauteur de la tour de l'éolienne (mètres),  $l$  est l'échelle de la longueur de la turbulence ( $= 20 h$  pour  $h < 30$  mètres et  $600$  mètres pour  $h > 30$  mètres),  $z_0$  (mètres) est la longueur de rugosité. La densité spectrale est ensuite convertie dans une série de cosinus de domaine temporel [AL18].

$$V_{wr}(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{S_{wr}(f_i) \Delta f} \cos(2\pi f_i t + \varphi_i + \Delta\varphi) \quad (16)$$

D'où  $f_i$  et  $\varphi_i$  sont la fréquence et la phase initiale du  $i^{\text{ème}}$  composant de fréquence,  $\varphi_i$  représente les phases aléatoires ( $\varphi_i \in [0, 2\pi]$ ). L'étape de fréquence devrait être  $\Delta f \in (0.1, 0.3)$  Hz. Enfin,  $\Delta\varphi$  est un petit angle de phase aléatoire introduit pour éviter la périodicité du signal de turbulence.

### 3.3. Défis liés à l'intégration des énergies renouvelables dans le système électrique

Les défis liés à l'intégration des énergies renouvelables dans le système électrique sont multiples et complexes :

- Gestion de l'intermittence : Les énergies renouvelables, telles que l'éolien et le solaire, sont intermittentes par nature, ce qui signifie que leur production varie en fonction des conditions météorologiques.
- Intégrer efficacement ces sources d'énergie intermittentes dans le réseau électrique nécessite des solutions de stockage et de gestion de l'intermittence [MG09].
- Adaptation des réseaux électriques : Les réseaux électriques doivent être adaptés pour accueillir une part croissante d'énergies renouvelables décentralisées et variables. Cela implique des investissements dans les infrastructures et des ajustements pour garantir la stabilité et la fiabilité du réseau [MG09].
- Flexibilité et gestion de la demande : L'intégration des énergies renouvelables nécessite une plus grande flexibilité du système électrique pour s'adapter aux variations de la production. Cela peut impliquer des mécanismes de modulation de la demande, des solutions de stockage et une meilleure coordination entre les acteurs du réseau [NM22].
- Coûts et rentabilité : L'intégration des énergies renouvelables peut entraîner des coûts supplémentaires liés aux investissements dans les

infrastructures et aux technologies de gestion. Il est essentiel de trouver un équilibre entre la rentabilité des énergies renouvelables et la stabilité financière du système électrique.

En résumé, les défis liés à l'intégration des énergies renouvelables dans le système électrique incluent la gestion de l'intermittence, l'adaptation des réseaux électriques, la flexibilité du système et la gestion des coûts pour assurer une transition énergétique efficace et durable.

### **3.4. Ecoulement de puissance de l'énergie renouvelable**

L'écoulement de puissance de l'énergie renouvelable dans les réseaux électriques est un processus crucial pour l'intégration efficace de ces sources d'énergie intermittentes. Lorsque les éoliennes ou d'autres sources d'énergie renouvelable produisent de l'électricité, cette énergie est injectée dans le réseau électrique pour être distribuée aux consommateurs.

Les réseaux électriques doivent être capables de gérer ces fluctuations de production en temps réel pour maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité [LA22].

Pour faciliter cet écoulement de puissance, des technologies de gestion de l'énergie sont utilisées, telles que les systèmes de stockage d'énergie, les réseaux intelligents et les dispositifs de régulation de la tension.

Ces technologies permettent d'optimiser la distribution de l'électricité produite par les éoliennes et autres sources d'énergie renouvelable, contribuant ainsi à assurer la stabilité et la fiabilité du réseau électrique [LA22].

En résumé, l'écoulement de la puissance de l'énergie renouvelable dans les réseaux électriques implique l'intégration efficace de la production d'électricité provenant des éoliennes et d'autres sources renouvelables, en utilisant des technologies avancées pour garantir un approvisionnement stable et fiable en électricité.

### **3.5. Formulation du problème de l'OPF en présence des énergies renouvelables**

Dans ce travail, l'objectif principal du problème de l'écoulement de puissance optimal en présence des énergies renouvelables est la minimisation du coût total de puissance active générée par des unités de productions, tout en satisfaisant les contraintes d'égalité et les contraintes d'inégalités.

#### **a) Fonction objective**

La fonction objective à minimiser regroupe le coût de production active des centrales thermiques, centrales solaires photovoltaïques et centrales éoliennes comme suit [AL18]:

$$F_T = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gti}) + \sum_{i=1}^{N_S} F_i(P_{Gsi}) + \sum_{i=1}^{N_W} F_i(P_{Gwi}) \quad (17)$$

D'où  $N_w$  est le nombre de générateurs éoliens,  $N_G$  est le nombre de générateurs thermiques,  $N_S$  est le nombre de générateurs photovoltaïques.

### 1) Coût du combustible du générateur conventionnel

Le modèle de coût du combustible  $F_i(P_{Gti})$  du générateur thermique peut être exprimé comme suit:

$$F_i(P_{Gti}) = a_i + b_i P_{Gti} + c_i P_{Gti}^2 \quad (18)$$

D'où  $P_{Gti}$  est la puissance active générée par le générateur thermique au nœud  $i$ ,  $a_i, b_i$  et  $c_i$  sont les coefficients de coût du combustible.

### 2) Coût de fonctionnement du générateur photovoltaïque

Le modèle de coût linéaire du générateur solaire photovoltaïque  $F_i(P_{Gsi})$  peut être donné par [AL18]:

$$F_i(P_{Gsi}) = d_{si} P_{Gsi} \quad (19)$$

D'où  $P_{Gsi}$  représente la puissance active du générateur photovoltaïque au nœud  $i$  et  $d_{si}$  représente le coefficient de coût direct du générateur photovoltaïque.

### 3) Coût de fonctionnement du générateur éolien

Selon [AL18], la fonction de coût linéaire  $F_i(P_{Gwi})$  assumée pour le parc éolien est donnée comme suit:

$$F_i(P_{Gwi}) = d_{wi} P_{Gwi} \quad (20)$$

D'où  $P_{Gwi}$  représente la puissance active du générateur éolien au nœud  $i$  et  $d_{wi}$  représente le coefficient de coût direct du générateur éolien.

### b) Contraintes d'égalités

Ces contraintes sont l'image des lois physiques gouvernant le système électrique.

Elles sont représentées par les équations non linéaires de l'écoulement de puissance. Il faut que la somme des puissances active et réactive injectées dans chaque jeu de barres soit égale à zéro.

$$\Delta P_i = 0 = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{Gi} + P_{Di} \quad (21)$$

$$\Delta Q_i = 0 = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{Gi} + Q_{Di} \quad (22)$$

### c) Contraintes d'inégalités

Les contraintes d'inégalité incluent les contraintes de générations thermiques, de sécurité et les contraintes des énergies renouvelables :

1) **Contraintes de génération:** Les puissances actives et réactives des générateurs thermiques sont limitées par leurs limites inférieures et supérieures comme suit :

$$P_{Gti}^{min} \leq P_{Gti} \leq P_{Gti}^{max} \quad (23)$$

$$Q_{Gti}^{min} \leq Q_{Gti} \leq Q_{Gti}^{max} \quad (24)$$

Où  $P_{Gii}^{\min}$  et  $P_{Gii}^{\max}$  sont les puissances actives minimales et maximales du générateur thermique  $i$ ;  $Q_{Gii}^{\min}$  et  $Q_{Gii}^{\max}$  sont les puissances réactives minimales et maximales du générateur thermique  $i$ .

2) **Contraintes de sécurité:** les contraintes de tensions aux jeux de barres comme suit :

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (25)$$

Où  $V_i^{\min}$  et  $V_i^{\max}$  sont les limites de tension minimale et maximale au nœud  $i$ .

Les lignes de transport et les transformateurs de puissances ont des limites sur le transit de puissance apparente  $S_{ij}$ . Elles sont représentées par une contrainte d'inégalité, qui limitera le carré de puissance en MVA d'un transformateur ou d'une ligne de transport.

$$\left| S_{ij} \right|^2 \leq \left| S_{ij}^{\max} \right|^2 \quad (26)$$

3) **Contraintes des énergies renouvelables:** Les puissances actives et réactives des générateurs photovoltaïques et éoliens sont limitées par leurs limites inférieures et supérieures comme suit:

$$0 \leq P_{Gsi} \leq P_{Gsi}^{\max} \quad (27)$$

$$Q_{Gsi}^{\min} \leq Q_{Gsi} \leq Q_{Gsi}^{\max} \quad (28)$$

$$0 \leq P_{Gwi} \leq P_{Gwi}^{\max} \quad (29)$$

$$Q_{Gwi}^{\min} \leq Q_{Gwi} \leq Q_{Gwi}^{\max} \quad (30)$$

D'où  $P_{Gsi}^{\max}$  représente la puissance active maximale du générateur photovoltaïque  $i$  et  $P_{Gwi}^{\max}$  représente la puissance maximale active du générateur éolien  $i$ .  $Q_{Gsi}^{\min}$  et  $Q_{Gsi}^{\max}$  sont les puissances réactives minimales et maximales du générateur photovoltaïque  $i$ ,  $Q_{Gwi}^{\min}$  et  $Q_{Gwi}^{\max}$  sont les puissances réactives minimales et maximales du générateur éolien  $i$ .

**Remarque :** Les sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne dépendent fortement des conditions météorologiques et des zones géographiques.

L'énergie renouvelable (éolienne ou solaire) est consommée à chaque fois qu'elle est disponible et la demande de charge restante est satisfaite par les autres générateurs du système [AL18]. Dans le calcul de l'OPF, le générateur (éolien ou photovoltaïque) sera introduit comme une fonction de coût, mais avec une puissance déjà connue ou attendue, de sorte que la puissance générée par le parc renouvelable, possède une puissance déjà planifiée et calculée à partir d'une courbe de vent ou du soleil quotidienne et qui ne sera pas affectée par l'OPF.

### 3.6. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude des énergies renouvelables. La première partie de ce chapitre commence par donner un aperçu sur la production à partir des énergies renouvelables au niveau mondiale et en Algérie.

Ce chapitre présente aussi les avantages des énergies renouvelables dans les réseaux électriques et il explique la modélisation des générateurs basés sur l'énergie renouvelable.

Dans ce chapitre une étude sur le problème de l'OPF en présence de fermes basées sur l'énergie renouvelable est présentée. Ensuite, la fonction objective et les contraintes sont choisies afin de formuler le problème d'optimisation.

# **Chapitre IV**

## **Simulations et résultats**

## 4.1. Introduction

Avec le développement de l'énergie éolienne et l'augmentation de la capacité des parcs éoliens, l'interaction entre les parcs éoliens et le système électrique est devenue de plus en plus évidente [AJI12]. En raison de l'inquiétude croissante concernant les émissions de CO<sub>2</sub>, les systèmes d'énergies renouvelables et en particulier la production d'énergie éolienne ont suscité un grand intérêt ces dernières années [TME12].

Utiliser pleinement l'énergie éolienne pour produire de l'électricité peut non seulement réduire la pollution de l'environnement, mais également réduire le coût du carburant du système électrique [GON09]. De nos jours, grâce aux progrès importants de l'électronique de puissance, le contrôle des machines électriques à courant alternatif a connu un développement considérable et des possibilités d'application [OSH13]. Le générateur à induction à double alimentation (DFIG) est une sorte d'éolienne à fréquence constante et à vitesse variable qui peut produire de la puissance réactive lorsqu'il ne fonctionne pas en mode facteur de puissance constant et peut être utilisé comme une alimentation en énergie réactive pour un parc éolien [DUA13].

Ce travail représente une étude sur l'insertion du parc éolien dans les réseaux test de IEEE-9 nœuds et de IEEE-30 nœuds et étudie l'application de l'approche proposée sur des données de réseau réel.

Le réseau Algérien (400kV, 220kV et 60kV) est retenu pour étude et différents cas ont été simulés dans un outil puissant de simulation qui est le Power System Analyse Toolbox (PSAT).

PSAT est une boîte à outils MATLAB pour l'analyse des systèmes électriques et le contrôle a été conçu par Van fretti et Milano [SLI13].

## 4.2. Résultats de calcul de l'écoulement de puissance en présence des énergies renouvelables

Dans ce chapitre, différentes études sont sélectionnées pour augmenter le flux de puissance et obtenir une meilleure qualité de puissance du système.

Pour comparer l'impact du parc éolien sur les systèmes de test IEEE-9 nœuds et IEEE-30 nœuds, des cas de simulation peuvent être appliqués dans PSAT 2.1.8 en utilisant la méthode Newton-Raphson.

Un parc éolien d'une capacité de 600 MVA / 69 kV comprenant 300 éoliennes a été connecté au nœud le plus critique en créant un autre nœud via un transformateur.

Le vent a été modélisé comme la distribution Weibull proposée par Milano. F (2005) en prenant en compte la nature composite du vent qui comprenait des filtres moyen, rampe, rafale, turbulence et passe-bas ont été utilisés pour lisser les variations de vitesse du vent[SRE10]. Les paramètres du générateur éolien et du vent sont donnés dans le tableau 4.1.

**Tableau4.1.**Paramètres du générateur éolien.

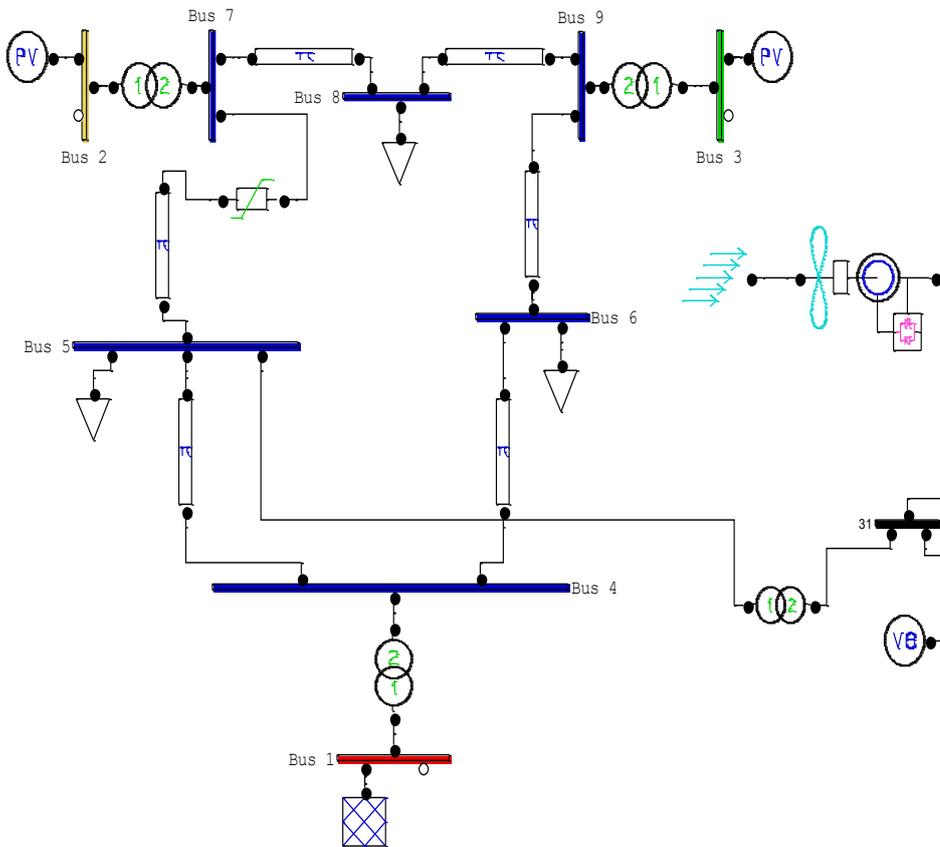
Paramètres	Valeurs
Puissance, tension et fréquence de base [MVA, kV, Hz]	[2, 69, 50]
Résistance du stator $R_s$ , réactance du stator $X_s$ [p.u, p.u.]	[0.01, 0.10]
Résistance du rotor $R_r$ , réactance du rotor $X_r$ [p.u, p.u.]	[0.01, 0.08]
Réactance de magnétisation $X_m$ [p.u.]	[3.00]
Gain de contrôle $K_p$ , constant du temps $T_p$ [p.u,s]	[10, 3]
Gain de contrôle de tension $K_v$ , constant de temps de contrôle de puissance $T_e$ [p.u, s]	[10, 0.01]
Nombre de pôles, rapport boîte de vitesse [int, -]	[4, 1/89]
Longueur de pale, nombre [m, int]	[75.00, 3]
$P_{max}$ et $P_{min}$ [p.u, p.u.]	[1.00, 0.00]
$Q_{max}$ et $Q_{min}$ [p.u, p.u.]	[0.7, -0.7]
Nombre de générateurs	300
Vitesse du vent nominal, densité de l'air [m/s, kg/m <sup>3</sup> ]	[5, 1.225]
Constante de temps de filtrage, temps d'échantillonnage [s, s]	[4, 0.1]
Constants de Weibull C and K	[20, 2]
Constants de la rampetsr, ter and Awr [s, s, m/s]	[5, 15, 1]
Constants de rafaletsg, teg and Awg [s, s, m/s]	[5, 15, 0]

#### 4.2.1.Etude sur le réseau test IEEE 9 nœuds

Le réseau test de IEEE 9 nœuds représente une partie du système 3-Machines 9-nœuds du Western System Coordinating Council (WSCC).

Fondamentalement, ce système à 9 nœuds contient 3 générateurs, 9 nœuds et 3 charges et les niveaux de tension KV de base vont de 16,5 kV à 230 kV, la charge du système est de 315 MW et 115 Mvar [ALH00].

La figure 4.1 montre le système de test de bus IEEE 9 avec un parc éolien inséré dans PSAT.

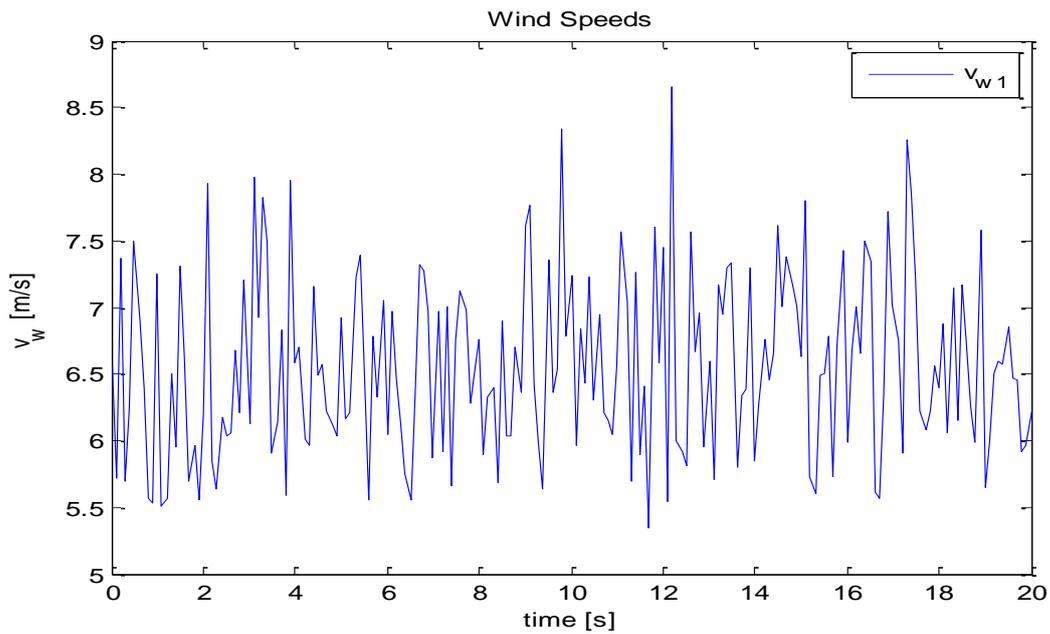


**Figure 4.1 :** Système de IEEE 9 nœuds avec un parc éolien inséré dans PSAT.

La simulation du flux de puissance montre le nœud de tension le plus approprié et le plus critique du système. Le parc éolien a été connecté au nœud 5 avec une valeur basse tension de 0,99563 p.u en créant un transformateur avec un rapport de tension primaire et secondaire (69 kV/230 kV).

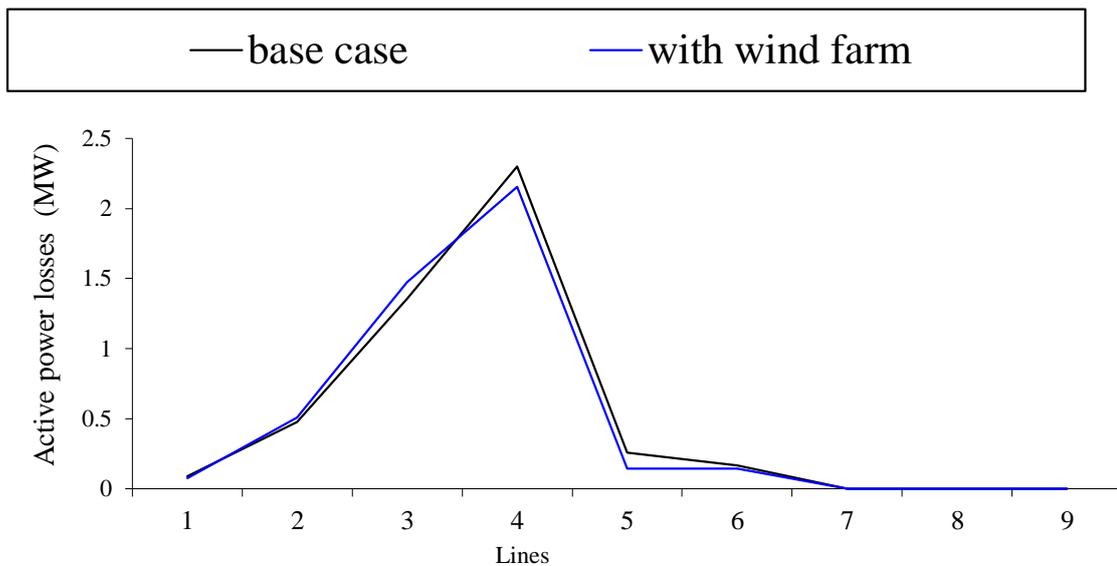
D'après les résultats, le parc éolien a injecté 21,2202 MW et 0,4748 MVar. La figure 4.2 représente la vitesse du vent de DFIG (m/s).

Les variables algébriques comme la référence de tension de DFIG prennent la valeur de 1,0003271 p.u, la vitesse du rotor =0,43707784 p.u, la puissance mécanique extraite du vent  $P_w = 0,21220295$  p.u et la variable statique comme prend la valeur de 0,43707784 p.u.



**Figure 4.2.** Vitesse du vent de générateur éolien (m/s).

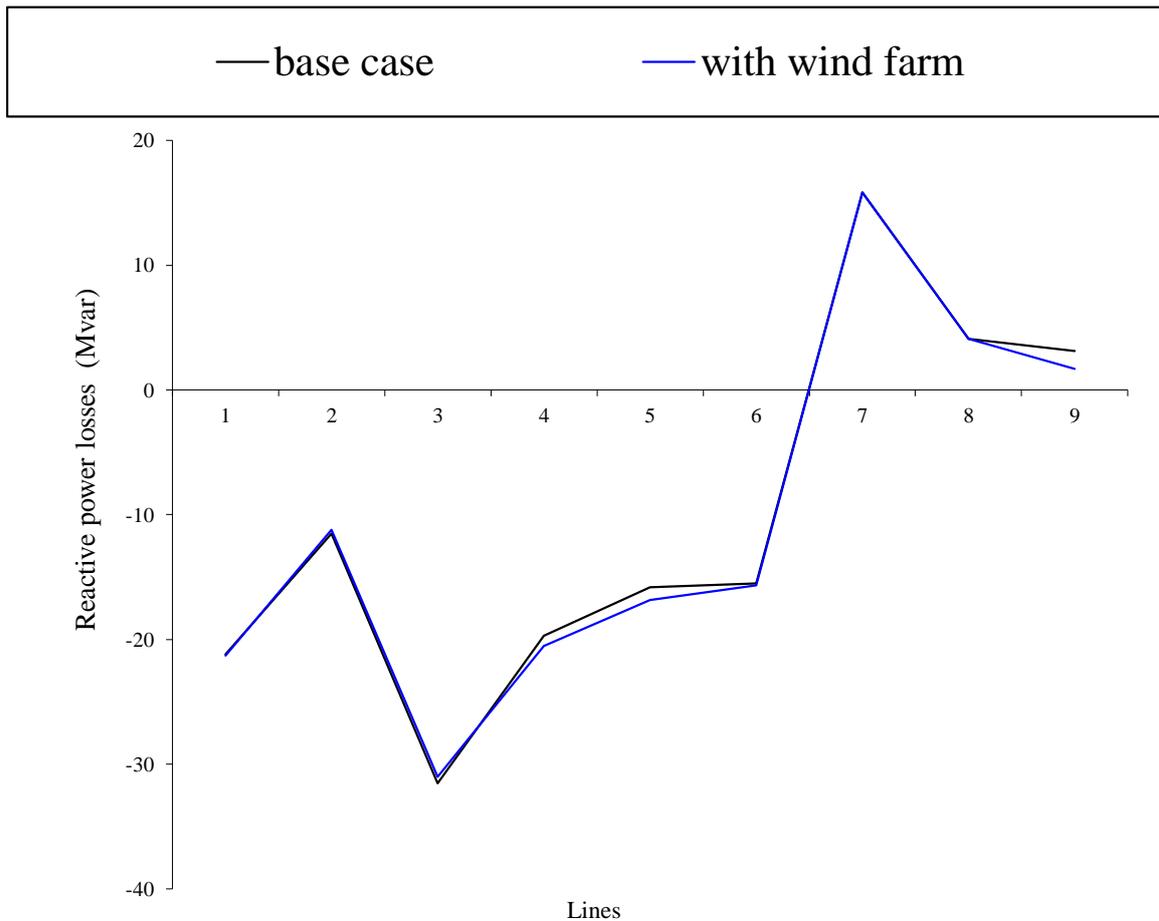
D'après les résultats représentés dans la figure 4.3, le parc éolien diminue les pertes actives de la ligne 4 de 2,2999 MW à 2,1544 MW, de la ligne 5 de 0,2575 MW à 0,1418 MW et de la ligne 6 de 0,1664 MW à 0,1440 MW.



**Figure 4.3.** Pertes de puissance active du système de test de bus IEEE-9 dans différents cas.

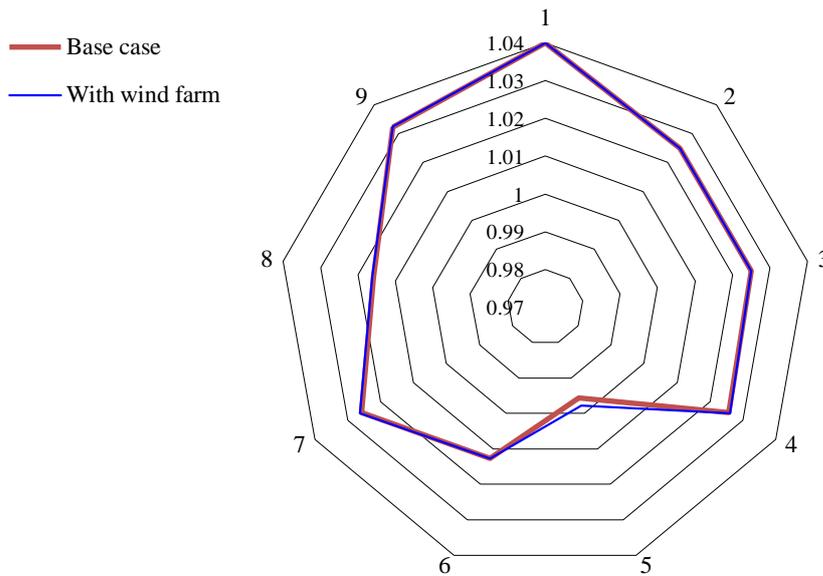
La figure 4.4 montre qu'après l'insertion du parc éolien, les pertes de puissance réactive de la ligne 4 diminuent de -19,6935 MVar à -20,5086 MVar, la ligne 5 de -15,7941 MVar à -16,8209 MVar et la ligne 9 de 3,1227 MVar à 1,7031 MVar.

Le tableau 4.2 représente le flux de puissance des lignes du système test IEEE 9 nœuds dans le cas de base et du système avec le parc éolien.



**Figure 4.4.** Pertes de puissance réactive du système de test de bus IEEE-9 dans différents cas.

La figure 4.5 montre le profil de tension du système test IEEE-9 nœuds après l'insertion du parc éolien.



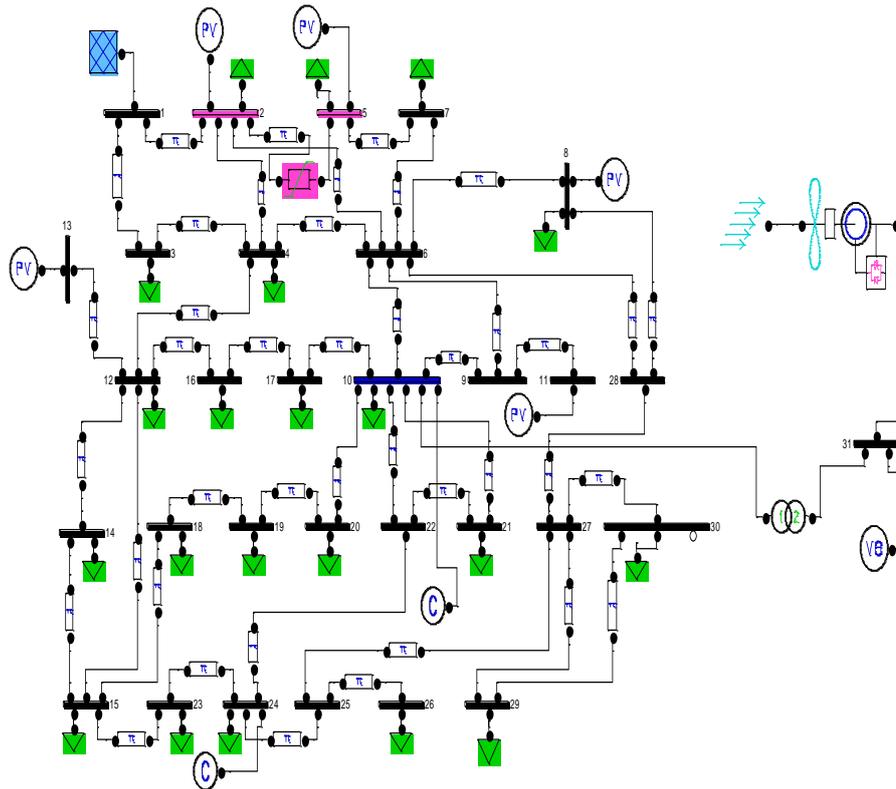
**Figure 4.5 :** Profil de tension du système test IEEE-9 nœuds après l'insertion du parc éolien.

**Tableau4.2 :** Flux de puissance des lignes du système test IEEE 9 nœuds dans le cas de base et du système avec le parc éolien

Cas			Cas de base		Avec parcéolien	
From Bus	To Bus	Line	P <sub>FLOW</sub> (MW)	Q <sub>FLOW</sub> (MVar)	P <sub>FLOW</sub> (MW)	Q <sub>FLOW</sub> (MVar)
Bus 9	Bus 8	1	24.183414	3.11951022	21.5137286	3.18407815
Bus 7	Bus 8	2	76.3798662	-0.79733307	79.0695069	-0.71493367
Bus 9	Bus 6	3	60.816586	-18.0748373	63.4862714	-18.3674937
Bus 7	Bus 5	4	86.6201338	-8.38082021	83.9304931	-9.28382852
Bus 5	Bus 4	5	-40.6798375	-38.6872517	-22.0486945	-39.2014257
Bus 6	Bus 4	6	-30.5372628	-16.5433668	-27.9884655	-17.3563325
Bus 2	Bus 7	7	163	6.65365602	163	5.82690877
Bus 3	Bus 9	8	85	-10.8597089	85	-11.0850393
Bus 1	Bus 4	9	71.6410215	27.045928	50.3230922	25.7998096

#### 4.2.2. Etude sur le réseau test IEEE 30 nœuds

Le système IEEE 30 nœuds comprend 34 lignes de transmission, 21 nœuds de charge, 6 nœuds de génération et 2 condensateurs fixes. La charge du système est maintenue constante à 283,4 MW et 126,2 MVar avec une base de 100 MVA, une base de 135 KV et une fréquence de 60 Hz [ALH00]. La figure 4.6 montre le système de test de 30 nœuds inséré dans PSAT.



**Figure 4.6 :** Système de test de 30 nœuds après l'insertion du parc éolien inséré dans PSAT.

Pour le système de test de bus IEEE 30, le meilleur choix pour l'insertion d'un parc éolien est le nœud de compensation 10 et sa valeur de tension est de 0,96406 pu. Les puissances active et réactive injectées par le parc éolien sont respectivement de 66,6760348 MW et 1,124227 MVar.

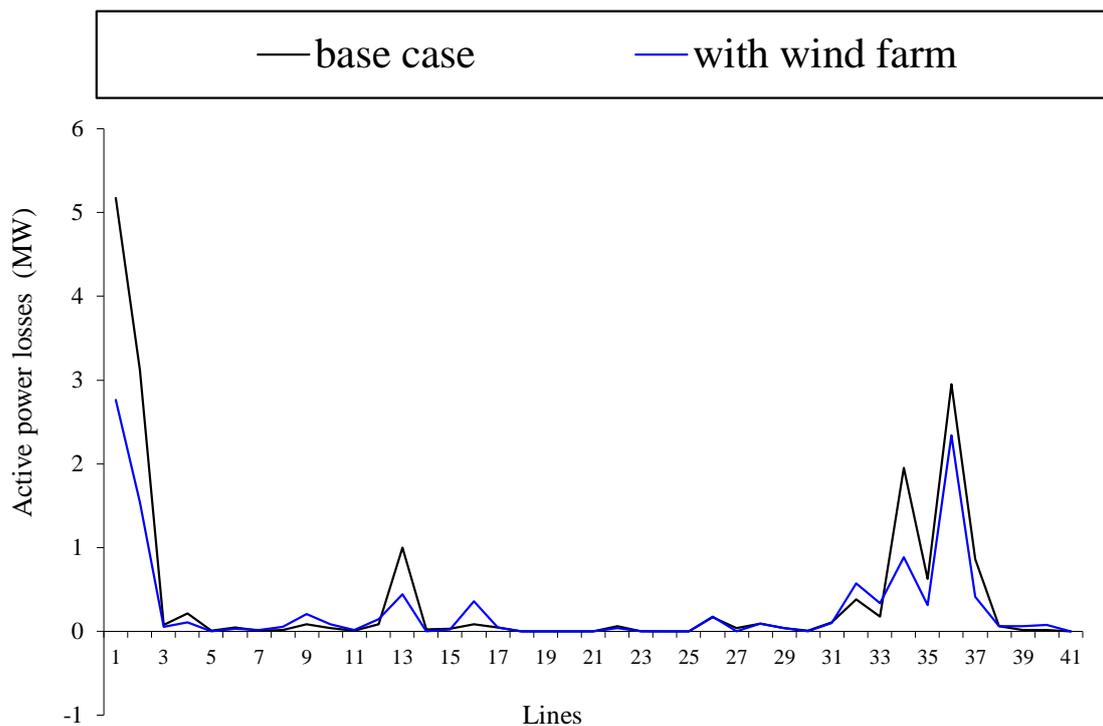
Le parc éolien réduit les pertes actives de la ligne 1 de 5,1734 MW à 2,7632 MW, de la ligne 13 de 1,00128 MW à 0,4407 MW, de la ligne 34 de 1,9489 MW à 0,8884 MW, de la ligne 36 de 2,9543 MW à 2,3425 MW et de la ligne 37 de 0,8597 MW à 0,4147 MW comme le montre la figure 4.7.

Après l'intégration du parc éolien, les pertes de puissance réactive de la ligne 1 diminuent de 12,5757 MVar à 5,3562 MVar, de la ligne 2 de 9,1792 MVar à 3,4071 MVar, de la ligne 3 de 1,1035 MVar à -0,6161 MVar, de la ligne 18 de 1,3723 MVar à 0,0425 MVar, ligne 21 de 1,5984 MVar à 0,01838 MVar, ligne 24 de 4,6831 MVar à 1,66088 MVar, ligne 34 de 3,942731 MVar à 0,71495 MVar, ligne 36 de 10,210192 MVar à 7,63871 MVar et ligne 37 de 2,0322 MVar à 0,74995 MVar.

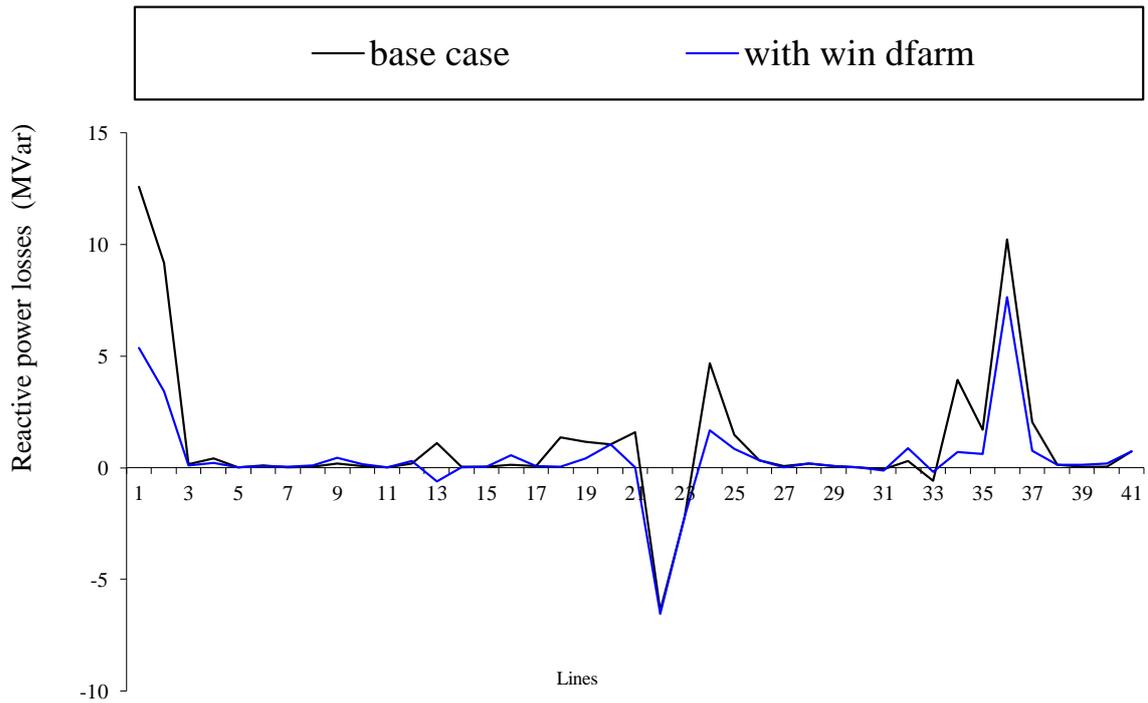
La figure 4.8 montre l'impact du parc éolien sur les pertes réactives du système de test de bus IEEE-30.

Pour mieux comprendre, les figures 4.9 et 4.10 présentent respectivement l'impact du parc éolien sur le flux de puissance des lignes actives et réactives.

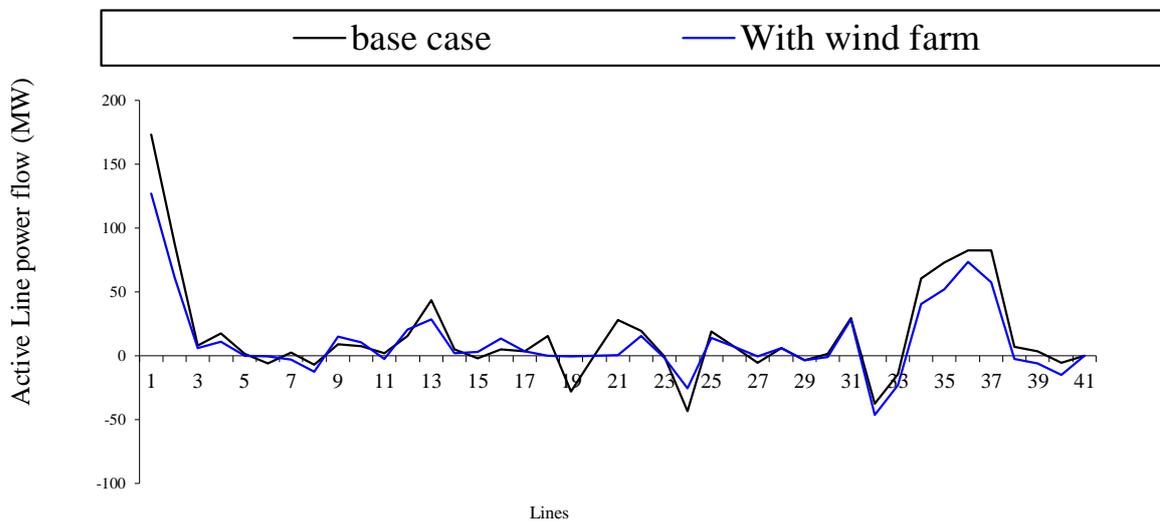
La figure 4.11 montre l'amplitude de tension des nœuds dans différents cas de système test IEEE-30 nœuds.



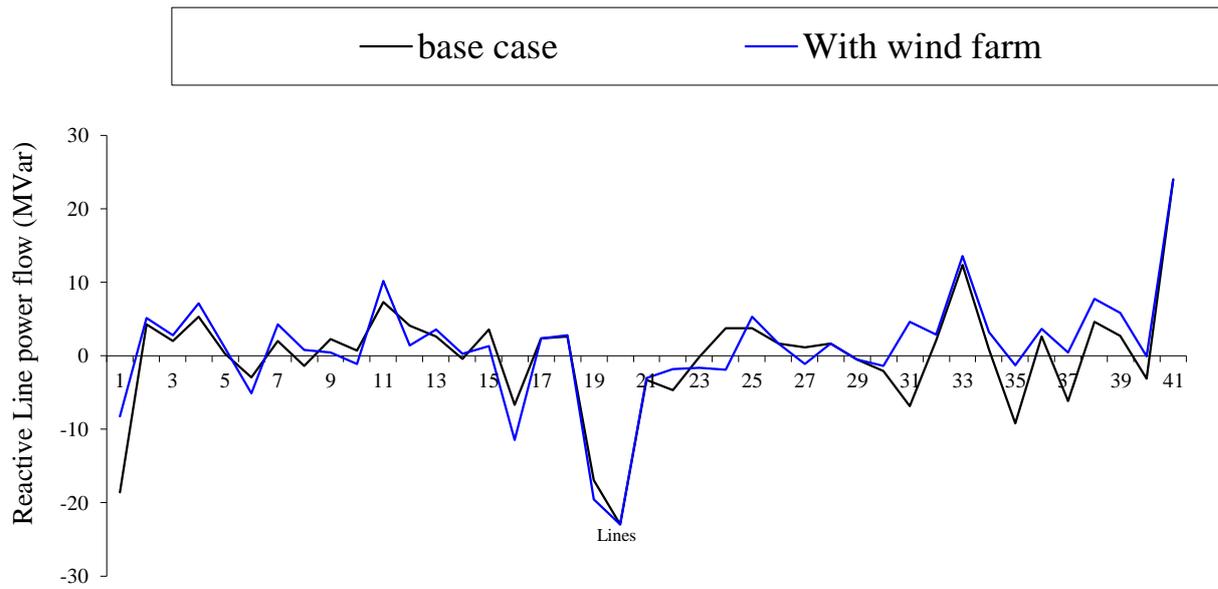
**Figure 4.7.** Pertes de puissance active du réseau IEEE 30noeuds dans les différents cas.



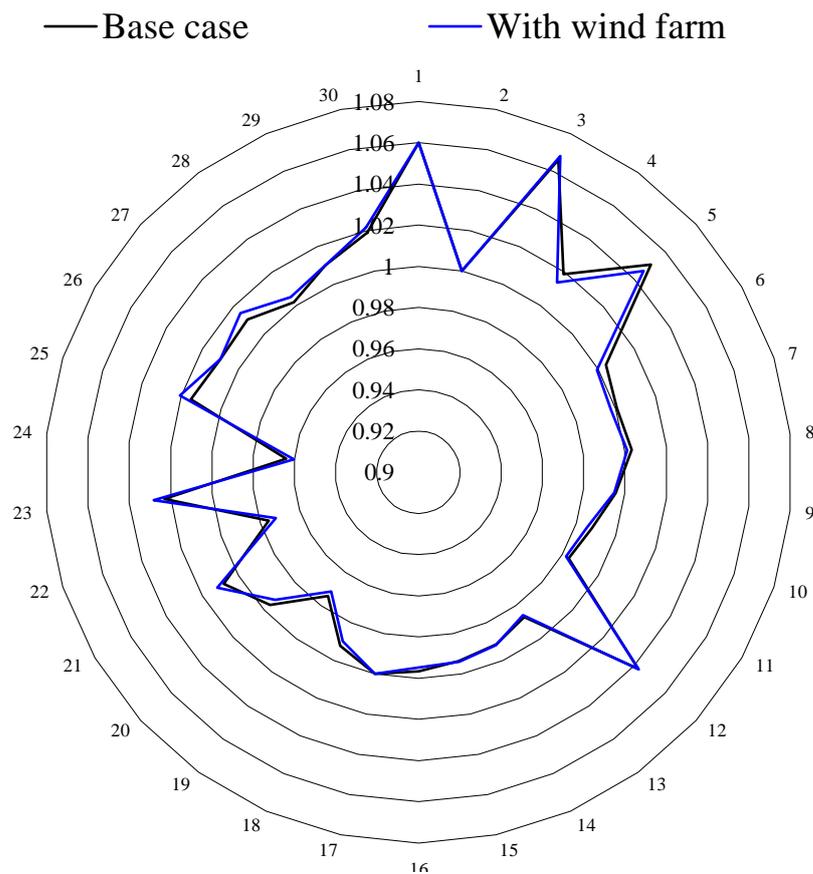
**Figure 4.8.** Pertes de puissance réactive du réseau IEEE 30noeuds dans les différents cas.



**Figure 4.9.** L'impact du parc éolien sur le flux de puissance activedes lignes



**Figure 4.10.** L’impact du parc éolien sur le flux de puissance réactive des lignes



**Figure 4.11 :** L’amplitude de tension des nœuds dans différents cas de système test IEEE-30 nœuds.

**Tableau 4.2 : Résultats de simulation des réseaux IEEE 9 nœuds et IEEE 30 nœuds dans les différents cas**

systemtest IEEE-9 nœuds						
Cas	génération Totale		Pertes totales		Génération de Slack bus	
	$P_G(\text{MW})$	$Q_G(\text{MVar})$	$P_L(\text{MW})$	$Q_L(\text{MVar})$	$P_S(\text{MW})$	$Q_S(\text{MVar})$
Cas de base	319.641	22.8399	4.641	-92.1601	71.641	27.0459
Avec parc éolien	319.5434	21.0165	4.5434	-93.9835	50.3231	25.7998
systemtest IEEE-30 nœuds						
Cas	génération Totale		Pertes totales		Génération de Slack bus	
	$P_G(\text{MW})$	$Q_G(\text{MVar})$	$P_L(\text{MW})$	$Q_L(\text{MVar})$	$P_S(\text{MW})$	$Q_S(\text{MVar})$
Cas de base	301.014	172.5027	17.614	46.2427	261.014	-14.3798
Avec parc éolien	295.2316	152.8488	11.8316	26.5888	188.5556	-3.0583

### 4.2.3. Etude sur le réseau Ouest Algérien

Le système Algérien (400 kV, 220 kV et 60 kV) est retenu pour notre étude avec une base de 100 MVA et une fréquence de 50 Hz. La charge du système est maintenue constante à 1 686,24 MW et 664,67 Mvar.

Le système comprend 138 branches (lignes et transformateurs), 102 nœuds, 7 nœuds de génération et 3 condensateurs fixes.

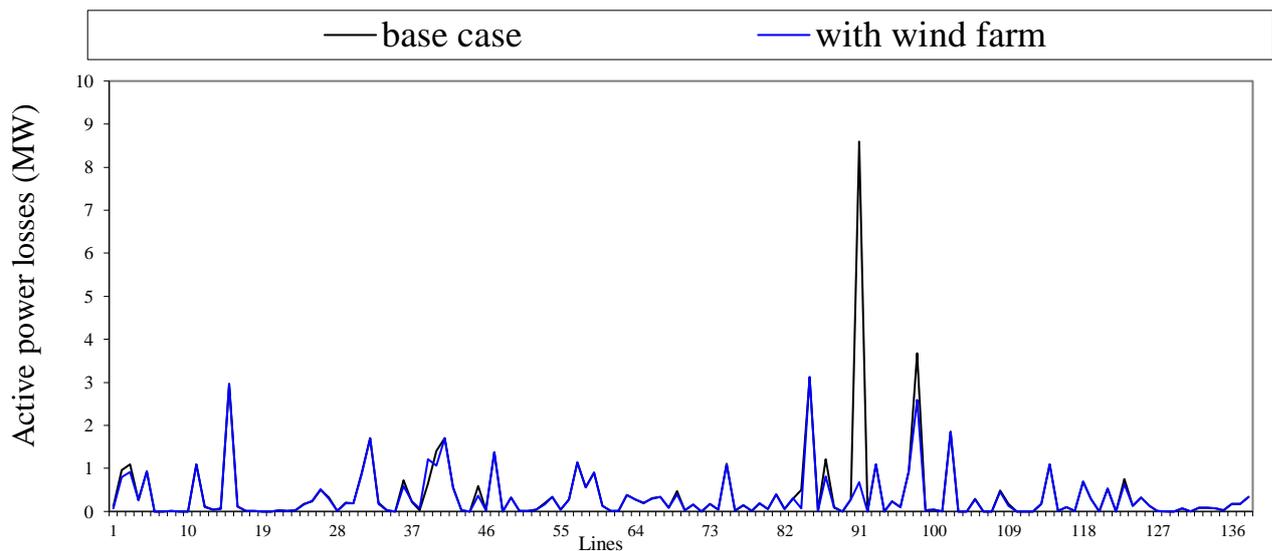
La figure 4.14 représente le réseau ouest Algérien inséré dans PSAT. D'après les résultats des flux de puissance, la ligne la plus provoquant des pertes importantes est la ligne N°91 (nœuds 73-39).

Le nœud 85 enregistre la basse tension (0,7769 p.u), l'amplitude de tension du nœud 73 est (0,78676 p.u) et ce nœud est indiqué comme la position optimale pour la connexion du parc éolien.

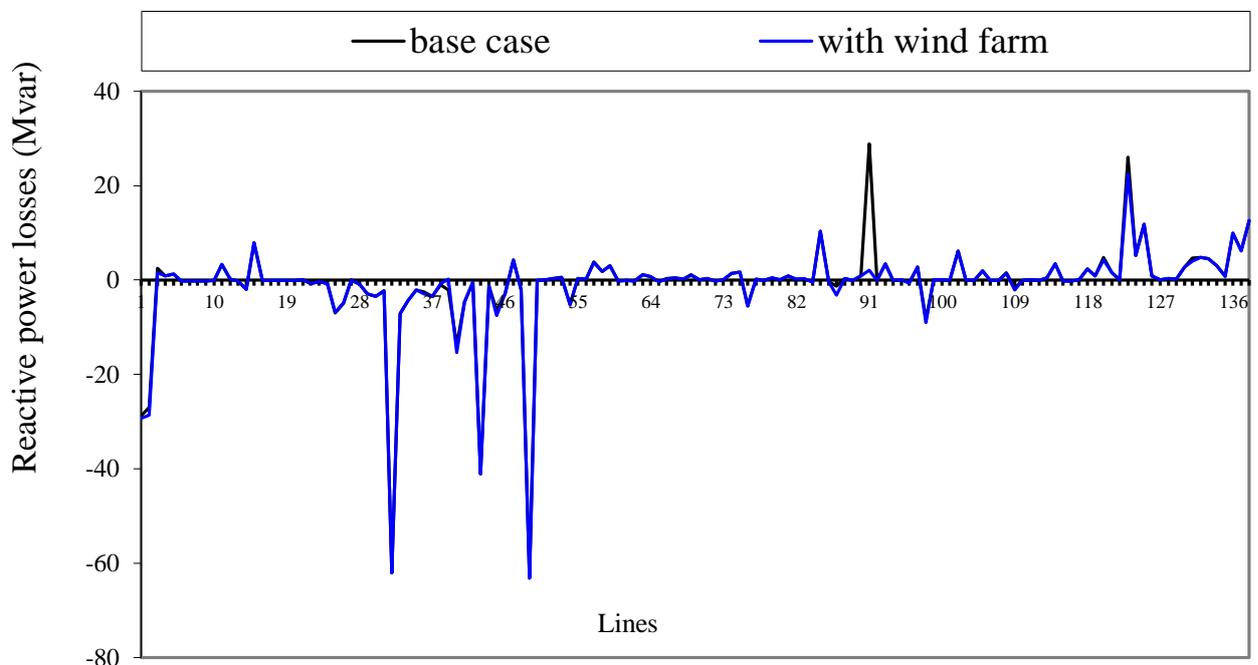
Le parc éolien d'une capacité de 600 MVA / 690 V comprenant 300 éoliennes, fréquence de 50 Hz, résistance du stator ( $R_s$ ) de 0,00488 p.u, réactance de fuite du stator ( $X_{ls}$ ) de 0,09241 p.u, résistance du rotor ( $R_r$ ) de 0,00549 p.u, rotor réactance de fuite ( $X_{lr}$ ) de 0,09955 p.u et réactance magnétisante ( $X_m$ ) de 3,95279 p.u.

Le parc éolien est connecté au nœud 73 en créant un autre bus via un transformateur et le vent a été modélisé comme la distribution Weibull proposée par Milan. F (2005). Les puissances active et réactive injectées par le parc éolien sont respectivement de 48,1522 MW et 12,9803 MVar.

Les figures 4.12 et 4.13 représentent respectivement les pertes de puissance active et réactive du réseau ouest algérien dans différents cas.



**Figure 4.12.** Pertes de puissance active du réseau Algérien dans les différents cas.



**Figure 4.13 :** Pertes de puissance réactive du réseau Algérien dans les différents cas.

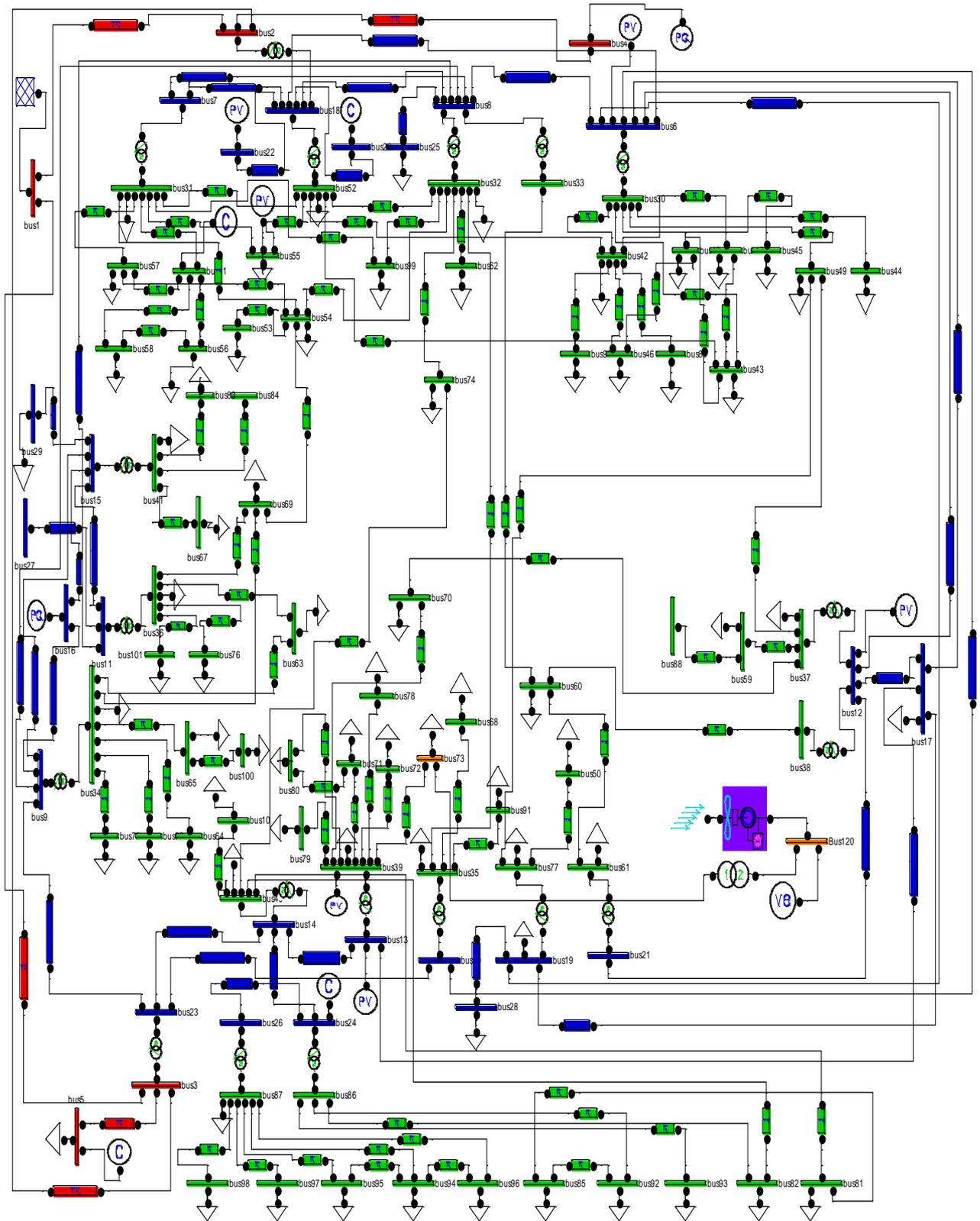


Figure 4.14 : Réseau ouest Algérien inséré dans PSAT

**Tableau 4.3 : Résultats de simulation des réseaux Algérien dans les différents cas**

Cas	génération Totale		Pertes totales		Génération de Slack bus	
	$P_G(\text{MW})$	$Q_G(\text{MVar})$	$P_L(\text{MW})$	$Q_L(\text{MVar})$	$P_S(\text{MW})$	$Q_S(\text{MVar})$
Cas de base	1742.5594	540.24321	56.3127	-124.4270	493.5594	-62.2165
Avec parc éolien	1734.0791	506.8012	45.91310	-158.7648	436.9279	-59.2654

Après l'intégration du parc éolien au réseau Algérien, les pertes de puissance active de la ligne 2 diminuent de 0,96 MW à 0,7991 MW, de la ligne 91 de 8,59 MW à 0,6823 MW et de la ligne 98 de 3,669 à 2,5894 MW.

Le parc éolien réduit les pertes de puissance réactive de la ligne 91 de 28,87 MVar à 2,091 MVar.

La simulation a été illustrée par l'utilisation d'un des logiciels les plus récents qui est le logiciel PSAT. Ce dernier a été appliqué sans aucun échec ni instabilité en simulation.

Cette partie consacrée à l'intégration des parcs éoliens, nous avons conclu que l'utilisation des parcs éoliens présente des avantages significatifs en réduisant la production et les pertes de puissance actives et réactive dans les systèmes en fonction des besoins du réseau.

L'approche proposée a également été appliquée au réseau Algérien et, à partir des résultats présentés dans ce travail, on peut conclure que l'intégration de l'éolienne améliore le flux d'énergie et résout le problème des pertes.

### 4.3. Etude sur le réseau Algérien 114 nœuds

Cette partie représente l'étude du réseau réel Algérien (HT et THT) 220 kV, 90 kV et 60 kV (Voir figure 4.15) avec une puissance de base de 100 MVA et une fréquence de 50 Hz. La charge du système est maintenue constante à 3627 MW et 2070 MVar.

Le système est constitué de 173 branches (lignes et transformateurs), 114 nœuds et 15 nœuds générateurs (Voir Tableau 4.4).

Le nœud N°1 (MERSAT EL HADJADJ 1) représente le nœud de référence.

Avec la forte croissance de la demande électrique durant ces dernières années et les grandes distances entre les systèmes électriques, de 200 à 1000 km, l'alimentation des régions sud isolées pose des problèmes techniques et économiques sérieux. Afin d'améliorer le fonctionnement du réseau de transport Algérien, plusieurs solutions ont été envisagées par la Sonelgaz soit par la construction des nouvelles lignes comme la ligne de Saida-Naama et la ligne de Naama-Bechar ou par la construction des nouvelles centrales électriques.

Dans le cas de la région de Bechar, où il n'y pas de source locale de combustible, une étude faite par la Sonelgaz montre la nécessité d'interconnecter cette région avec le réseau national par le biais d'une ligne Saida-Bechar via Ain-Sefra (Naama) de 520 km à 220 kV.

Cette ligne radiale qui prend son départ de la sous-station de Saida, est constituée d'une seule ligne de section 411 mm<sup>2</sup> entre Saida et Ain-Sefra (270 km) et une double ligne entre Ain-Sefra et Bechar (250 km) [SAL08].

En effet, la longueur importante de ces lignes de transport entraîne l'apparition des pertes de transmission dans le réseau électrique.

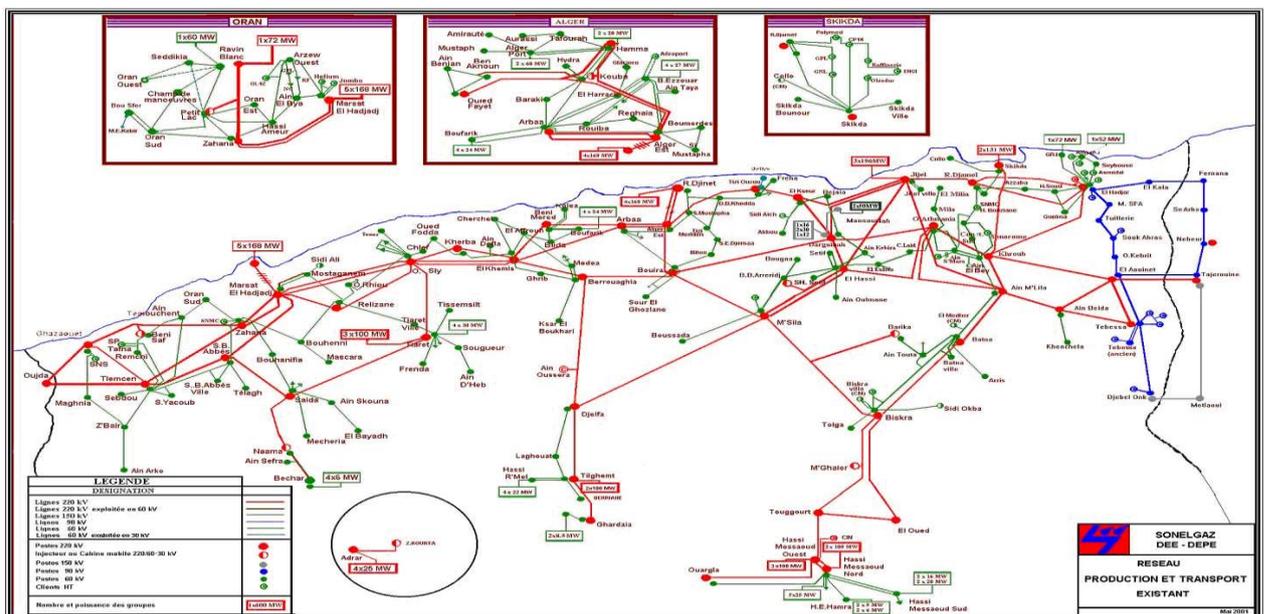


Figure 4.15 : Topologie du réseau Algérien [SAL13].

**Tableau 4.4** : Données des Nœuds de Régulation du réseau Algérien [SAL08].

Noeud N°	Nom du noeud	V(p.u)	Q <sup>min</sup> (Mvar)	Q <sup>max</sup> (Mvar)
5	MERSAT EL HADJADJ 2	1,0500	20	200
11	TIARET	1,0500	-50	100
15	RAVIN BLANC	1,0400	0	100
17	ALGER EST 1	1,0800	0	400
19	ALGER PORT	1,0300	0	60
22	BAB EZZOUAR	1,0400	0	50
52	BOUFARIK	1,0500	0	50
80	EL HADJAR 1	1,0800	0	60
83	SKIKDA	1,0500	-50	200
98	DARGUINA	1,0500	0	50
100	JIJEL	1,0800	0	270
101	M'SILA	1,0800	-50	200
109	TILGHEMT	1,0500	-50	100
111	H.MESSAOUD NORD	1,0200	-50	155

Malgré les solutions trouvées par l'état, le problème de la charge reste toujours et certaines questions restent en suspens sur l'étude de l'écoulement de puissance optimal.

Notre étude cherchera à traiter les problèmes du réseau Algérien et trouver des solutions technico-économiques pour renforcer la qualité d'alimentation.

Le présent travail procédera à :

- ▶ Modéliser et analyser le réseau Algérien;
- ▶ Trouver les problèmes liés à l'écoulement de puissance, le profil de tensions et la répartition économique des puissances.

Pour déterminer tous les problèmes de ce réseau réel, le flux de puissance est calculé par la méthode de Newton Raphson qui nous permet de trouver les pertes actives et réactives dans les lignes de transmission, la génération totale, les pertes totales du réseau et le profil de tension dans les différents nœuds.

Figure (4.16) illustre le réseau Algérien inséré dans PSAT. Tableau (4.5) montre les résultats de l'analyse de flux de puissance de ce réseau dans le cas de base avec les conditions initiales du système. L'analyse de flux de puissance avec la méthode de NR a convergé après 9 itérations en 0,29 secondes.

**Tableau 4.5 :** Résultats des puissances générées et des pertes globales du réseau Algérien.

Generations totales		Pertes totales		Génération du nœud de référence	
$P_G$ (MW)	$Q_G$ (MVar)	$P_L$ (MW)	$Q_L$ (MVar)	$P_S$ (MW)	$Q_S$ (MVar)
3695,0852	1900,7077	68,0852	-169,2923	575,0852	308,7927

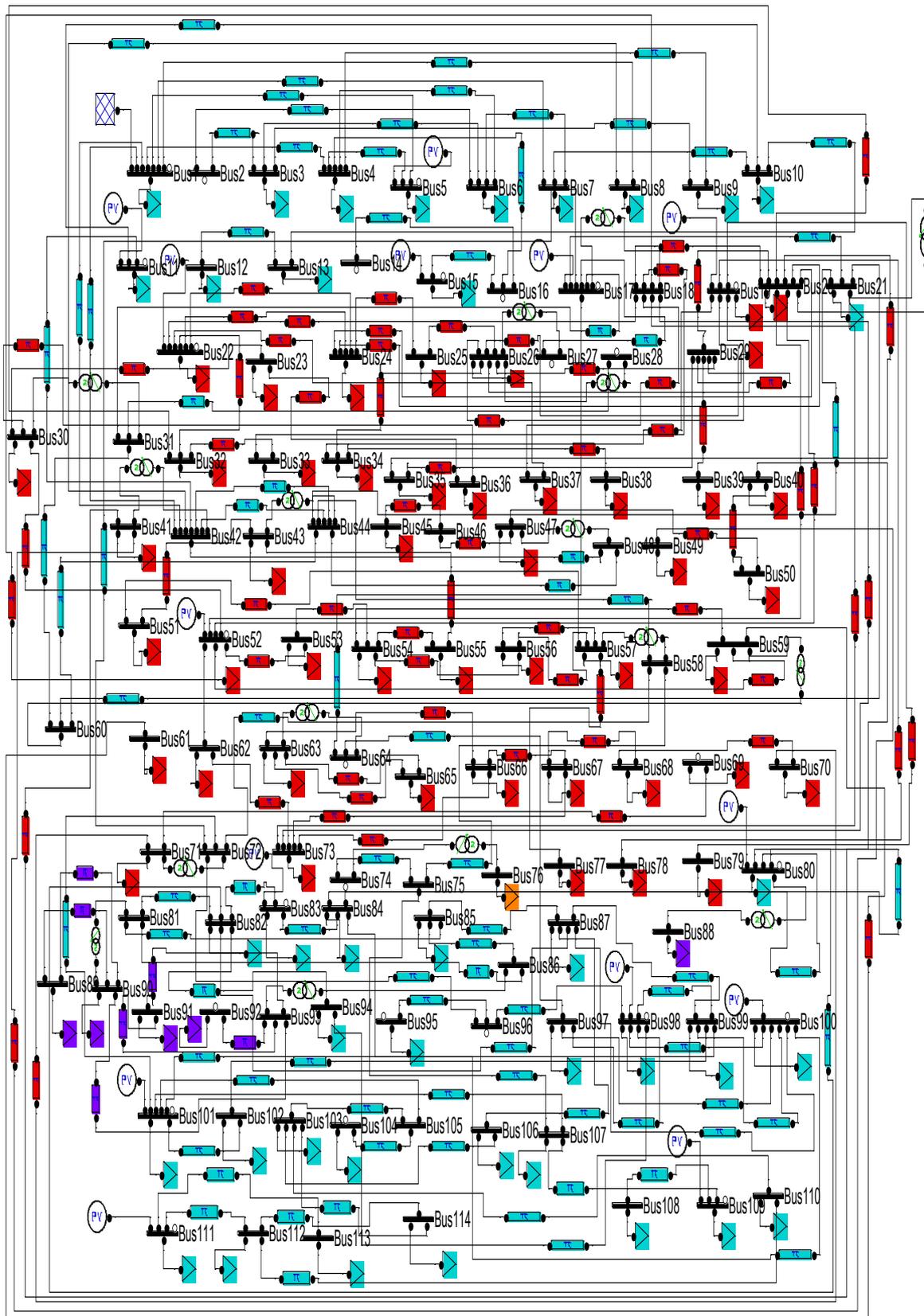
D'après les résultats dans le Tableau 4.5, les productions totales de puissance active  $P_G$  et réactive  $Q_G$  sont respectivement 3695,0852 MW et 1900,7077 MVar.

Les pertes totales de puissance active  $P_L$  et réactive  $Q_L$  obtenues par cette méthode sont respectivement 68,0852 MW et -169,2923 MVar.

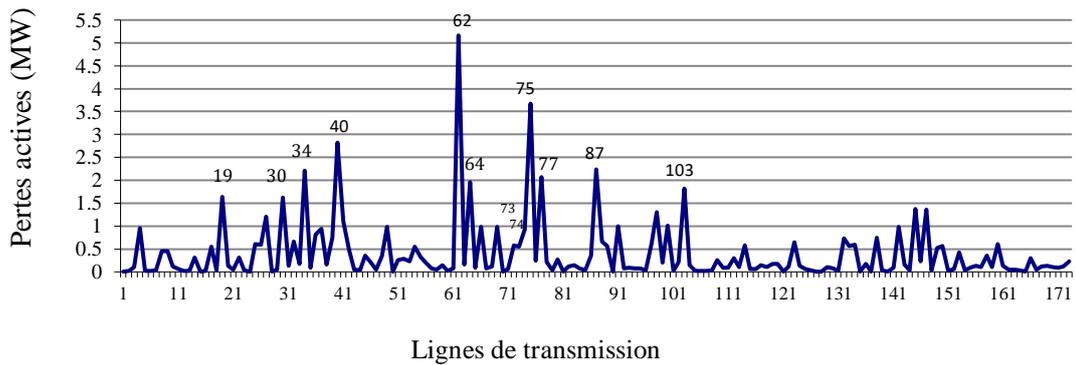
#### 4.3.1. Analyse et discussion

Nous avons utilisé les figures 4.17 et 4.18 pour déterminer les lignes qui provoquent les plus grandes quantités de pertes dans la pratique. En ce qui concerne les allures des pertes actives et réactives dans ces figures, nous remarquons que le réseau souffre d'un problème de pertes actives et réactives au niveau des lignes suivantes :

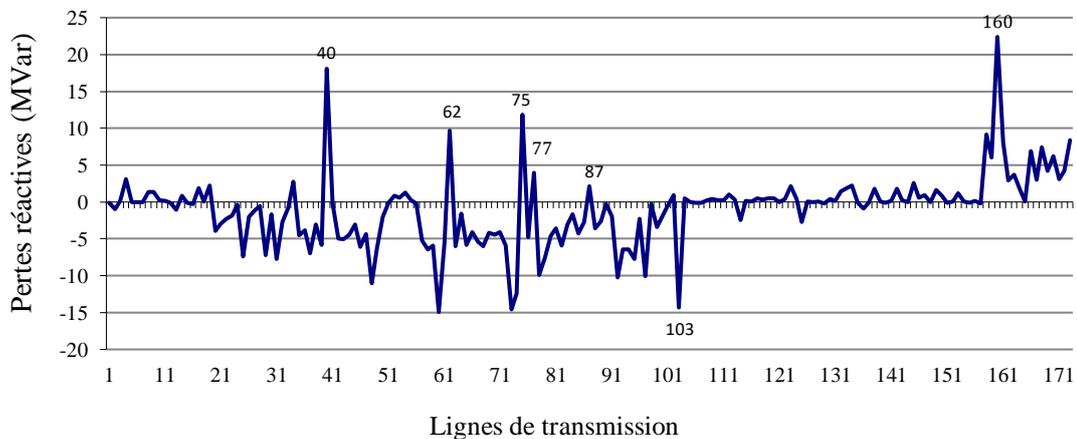
- ligne N° 40 : AIN MLILA- JIJEL (nœuds 87-100),
- ligne N° 62 : DJELFA- TILGHEMT (nœuds 107-109),
- ligne N° 75 : ALGER EST 1- LARBAA 2 (nœuds 17-21),
- ligne N° 87 : BOUIRA 2- M'SILA (nœuds 72-101),
- ligne N° 103 : MERSAT EL HADJADJ 1- OUED SLY 2 (nœuds 1-42),
- ligne N° 77 : ALGER EST 1 - OULED FAYET 2 (nœuds 17-31),
- ligne N° 34 : EL KHROUB - SKIKDA (nœuds 82-83),
- ligne N° 64 : TOUGGOURT- H.MESSAOUD NORD (nœuds 112-111),
- ligne N° 30 : EL AOUINET 1- EL KHROUB (nœuds 81-82),
- ligne N° 19 : AIN BEIDA- AIN MLILA (nœuds 85-87),
- Ligne N°73 : BECHAR -AIN-SEFRA (nœuds 12-13),
- Ligne N°74 : SAIDA-AIN-SEFRA (nœuds 10-13).



**Figure 4.16 : Réseau Algérien inséré dans PSAT**



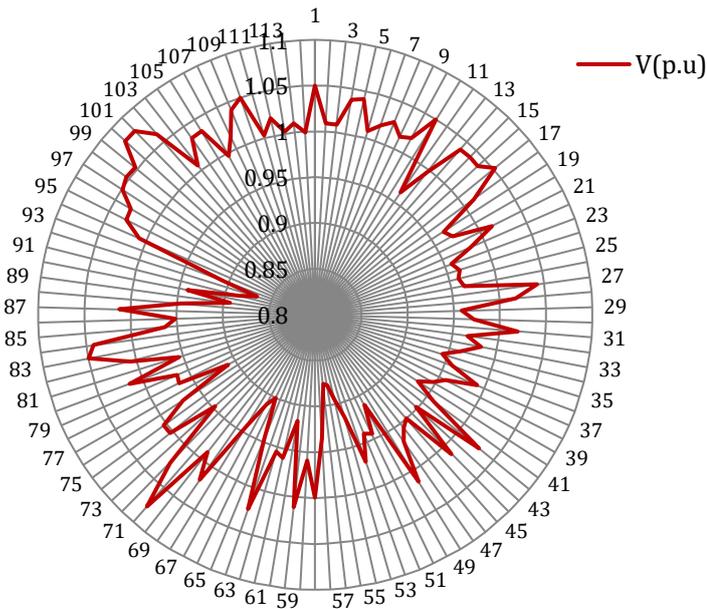
**Figure 4.17 :** Pertes actives dans les lignes de transmission du réseau Algérien.



**Figure 4.18 :** Pertes réactives dans les lignes de transmission du réseau Algérien.

La figure 4.19 illustre les amplitudes de tensions des différents nœuds du réseau Algérien. D'après une première lecture de cette figure, nous remarquons que le réseau a un problème de chute de tension au niveau des nœuds suivants :

- Nœud N° 54 : EL AFFROUN (0,8947 p.u),
- Nœud N° 55 : CHERCHEL (0,87755 p.u),
- Nœud N° 56 : MEDEA(0,876158 p.u),
- Nœud N° 89 : SOUK AHRAS (0,893132 p.u),
- Nœud N° 91 : TEBESSA 2(0,884589 p.u),
- Nœud N° 92 : DJEBEL ONK (0,86595 p.u).



**Figure 4.19 :** Amplitudes de tensions en (p.u.) des nœuds du réseau Algérien.

Après avoir détecté tous les problèmes du réseau Algérien, la partie suivante présente la formulation de notre problème d'optimisation.

#### 4.3.2. Emplacement optimal de la ferme éolienne

Dans cette étude, la ferme d'éoliennes est installée dans les sites les plus ventés du réseau Algérien : TEBESSA-2, AIN SAFRA (NAAMA), OUARGLA et BISKRA sur la base des résultats des études de potentiels éoliens menées par le Ministère de l'Énergie, conjointement avec l'ASAL, le CDER et l'ONM.

Pour trouver l'emplacement optimal de la ferme d'éoliennes, on s'intéressera à l'insertion de cette dernière dans les quatre sites, en gardant les mêmes paramètres, puis en sélectionnera l'emplacement qui donne les pertes totales du réseau les plus faibles après l'analyse de l'écoulement de puissance.

Le parc éolien d'une capacité de 50 MVA/69 kV comprenant 25 éoliennes (25× 2 MVA) a été connecté au réseau Algérien à travers un transformateur avec un rapport de tension (69/220 kV) en créant un autre nœud (69 kV).

La ferme d'éoliennes est choisie pour effectuer des études dans quatre sites différents comme suit:

- **Tébessa-2** : Latitude  $35^{\circ},4$ , longitude  $8^{\circ},1$ , et la vitesse annuelle moyenne du vent est 3,5 m/s.
- **Ain safra** : Latitude  $32^{\circ},8$ , longitude  $-0^{\circ},6$ , et la vitesse annuelle moyenne du vent est 5,4 m/s.
- **Ouargla** : Latitude  $31^{\circ},9$ , longitude  $5^{\circ},4$ , et la vitesse annuelle moyenne du vent est 4,9 m/s.
- **Biskra** : Latitude  $34^{\circ},8$ , longitude  $5^{\circ},7$ , et la vitesse annuelle moyenne du vent est 4,2 5,3 m/s [CHE11].

Le tableau 4.6 résume les résultats du flux de puissance par la méthode de Newton Raphson des quatre emplacements de la ferme d'éoliennes dans le réseau Algérien.

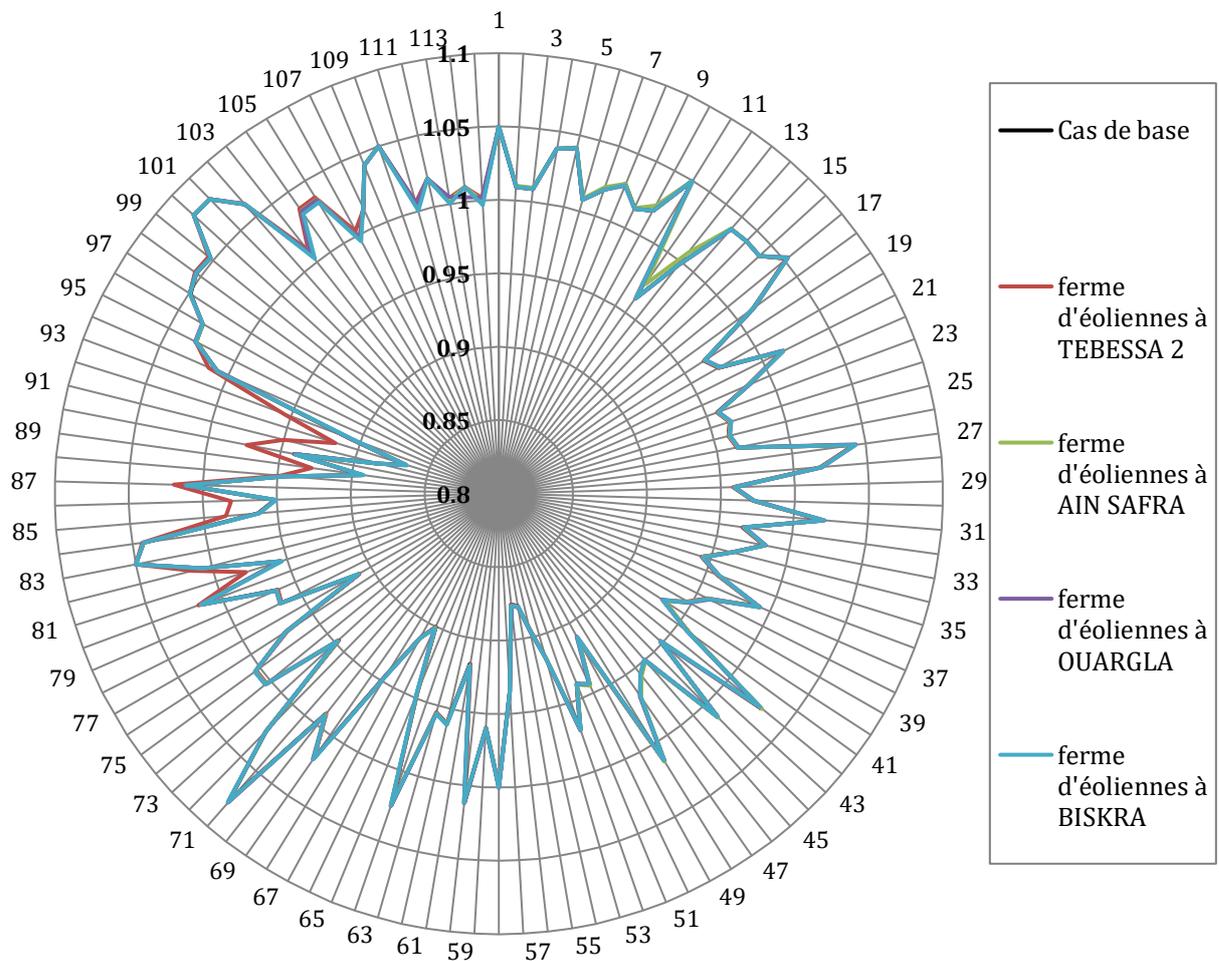
**Tableau 4.6** Résultats des différents emplacements de la ferme d'éoliennes (WF).

	Générations totales		Pertes totales		Puissances de WF	
	$P_G(\text{MW})$	$Q_G(\text{MVar})$	$P_L(\text{MW})$	$Q_L(\text{MVar})$	$P_w(\text{MW})$	$Q_w(\text{MVar})$
<b>Cas de base (Sans WF)</b>	3695,0852	1900,7077	68,0852	-169,2923	-	-
<b>WF à TEBESSA 2</b>	3693,5454	1891,6588	66,5454	-178,3413	31,2456	24,514
<b>WF à AIN SAFRA</b>	3693,1282	1893,0634	66,1282	-176,9366	34,1961	-4,5593
<b>WF à OUARGLA</b>	3693,6888	1894,0427	66,6888	-175,9573	30,0476	0,75153
<b>WF à BISKRA</b>	3694,8682	1899,896	67,8682	-170,104	20,3203	0,02247

D'après le tableau 4.6, on voit clairement que l'emplacement de la ferme d'éoliennes à AIN SAFRA donne les pertes et les générations actives les plus faibles, comparé aux autres emplacements. On constate aussi que l'emplacement de la ferme d'éoliennes à TEBESSA-2, donne les pertes et les générations réactives les plus faibles, comparé aux autres emplacements.

Les fermes d'éoliennes connectées à OUARGLA et BISKRA diminuent d'une manière remarquable les générations et les pertes totales du réseau Algérien.

La figure 4.20 illustre l'influence de la ferme d'éoliennes connectée aux différents emplacements sur le profil de tension du réseau Algérien.



**Figure 4.20** Profil de tensions du réseau Algérien en présence de la ferme d'éoliennes aux différents emplacements (p.u).

D'après cette figure, on remarque que la puissance réactive injectée par la ferme d'éoliennes à TEBESSA-2 traite le problème de chute tension aux nœuds N°89, N°91 et N°92 et améliore le profil de tensions aux nœuds N°81, N°85, N°86, N°90 et N°93.

On constate aussi que les autres emplacements n'améliorent pas le profil de tension. Pour mieux visualiser l'influence de l'énergie éolienne sur le système, le tableau 4.7 présente les amplitudes de tensions (*en p.u*) des nœuds avant et après l'insertion de la ferme d'éoliennes à TEBESSA-2.

Selon l'étude du flux de puissance du réseau Algérien avec l'insertion de l'énergie éolienne, on peut dire que le site idéal pour la ferme d'éoliennes est au niveau de la région de TEBESSA-2. Cet emplacement permet de diminuer les pertes du réseau et traiter le problème de chute de tension aux différents nœuds.

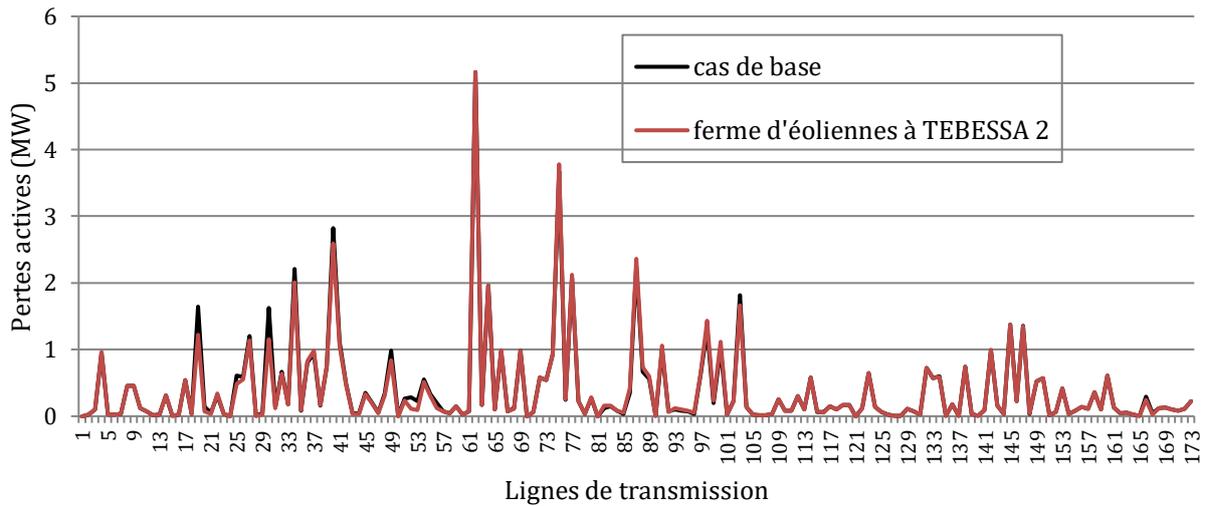
**Tableau 4.7** Amplitudes de tension avant et après l'insertion de la ferme d'éoliennes à TEBESSA-2.

Nœud N°	Nom du nœud	Cas de base (p.u)	WF à TEBESSA-2 (p.u)
81	EL AOUINET 1	0,9545	0,9789
85	AIN BEIDA	0,9633	0,9849
86	TEBESSA 1	0,9512	0,9810
89	SOUK AHRAS	0,8931	0,9276
90	EL AOUINET 2	0,9410	0,9735
91	TEBESSA 2	0,8845	0,9500
92	DJEBEL ONK	0,8659	0,9157
93	TEBESSA 3	0,9073	0,9546

D'après les résultats illustrés dans le tableau 4.6, la ferme d'éoliennes à TEBESSA-2 diminue les pertes actives totales de 68,0852 MW à 66,5454 MW (profit de 1,5398 MW) et les pertes réactives totales de -169,2923 MVar à -178,3413 MVar (profit de 9,049 MVar).

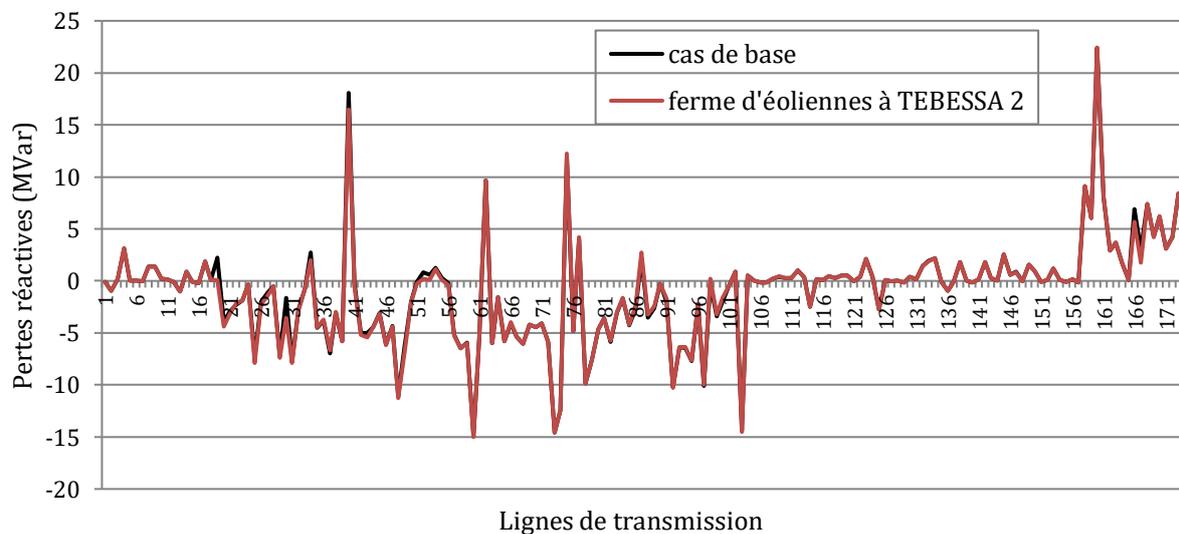
La puissance éolienne diminue la génération thermique active totale du système de 3695,0852 MW à 3693,5454 MW, et la génération thermique réactive totale de 1900,7077 MVar à 1891,6588 MVar.

En ce qui concerne les allures des pertes actives et réactives du réseau Algérien, d'après la figure 4.21, nous remarquons que l'insertion de la ferme d'éoliennes diminue les pertes actives de la ligne N°19, ligne N°30, ligne N°34, ligne N°40 et ligne N°103.



**Figure 4.21.** Pertes actives avant et après l'insertion de la ferme d'éoliennes à TEBESSA 2.

D'après la figure 4.22, il est clair que l'insertion de la ferme d'éoliennes diminue les pertes réactives de la ligne N°19, ligne N°30, ligne N°34, ligne N°40 et ligne N°168.



**Figure 4.22.** Pertes réactives avant et après l'insertion de la ferme d'éoliennes à TEBESSA 2.

Pour mieux visualiser l'influence de l'énergie éolienne sur la réduction des pertes de transmission, le tableau 4.8 présente les valeurs de pertes actives et réactives dans les lignes avant et après l'insertion de la ferme d'éoliennes.

**Tableau 4.8** Pertes de transmissions actives et réactives avant et après l'insertion de la ferme d'éoliennes à TEBESSA-2.

Du nœud	Au nœud	Ligne N°	Cas de base (MW)	WF à TEBESSA-2 (MW)
AIN BEIDA	AIN MLILA	19	1,643123	1,2225
EL AOUINET1	EL KHROUB	30	1,621377	1,1588
EL KHROUB	SIKIDA	34	2,209326	2,01181
AIN MLILA	JIJEL	40	2,826653	2,5888
MERSAT EL HADJADJI	OUED SLY 2	103	1,819971	1,6629
Du nœud	Au nœud	Ligne N°	Cas de base (MVar)	WF à TEBESSA-2 (MVar)
AIN BEIDA	AIN MLILA	19	2,260307	0,1163
EL AOUINET1	EL KHROUB	30	-2,750846	-3,5143
EL KHROUB	SIKIDA	34	2,709156	1,9760
AIN MLILA	JIJEL	40	18,081927	16,4561
OUED SLY 2	OUED SLY 1	168	7,408786	7,3822

#### 4.3.3. Résultats de l'écoulement de puissance optimal (OPF) du réseau Algérien en présence de l'énergie éolienne

Cette partie présente une étude sur le flux de puissance optimal (l'OPF) du réseau électrique Algérien 114 nœuds en présence des énergies renouvelables (énergie éolienne), les limites de puissances actives et réactives ainsi que les coefficients des fonctions du coût des générateurs thermiques sont présentés dans le Tableau (4.11)).

Cette étude vise à réduire le coût de production total du réseau, la génération thermique et les pertes de puissance totales avec l'insertion des énergies renouvelables.

Le problème de l'OPF est résolu par la méthode du point intérieur pour évaluer l'influence des générateurs éoliens sur la réduction du coût de génération et les pertes totales ainsi que l'amélioration du profil de tension.

Dans cette section, le coût de production active est considéré comme une fonction objective et les cas de simulation sont réalisés à l'aide de PSAT/MATLAB.

Les tensions des générateurs et des nœuds de charge sont limités comme suit :

$$1 p.u \leq V_{Gi} \leq 1,1 p.u$$

$$0,9 p.u \leq V_{Li} \leq 1,1 p.u$$

Cette partie présente l'étude de l'OPF du réseau Algérien en présence de la ferme d'éoliennes (2 MVA×25) à TEBESSA2, l'OPF est appliqué en tenant compte du coefficient de coût du générateur éolien ( $d_{wi}= 25 \$/MWh$  [GIE12]).

La fonction objective à minimiser représente la somme du coût de production des générateurs thermiques et le coût de production du générateur éolien.

Les puissances actives et réactives du générateur éolien sont limitées par leurs limites inférieures et supérieures comme suit:

$$0 \leq P_{Gwi} \leq 50MW$$

$$-70MVar \leq Q_{Gwi} \leq 70MVar$$

Les solutions optimales du réseau Algérien en présence du générateur éolien sont présentées dans les tableaux 4.9 et 4.10. La ferme d'éoliennes connectée à TEBESSA-2 injecte 50 MW et 46,7951 MVar.

**Tableau 4.9** Puissances actives optimales des générateurs en présence de la ferme d'éoliennes.

Variables	Min	Max	Cas de base	WF à TEBESSA-2
P <sub>G1</sub> (MW)	135	1350	431,518384	431,3201
P <sub>G5</sub> (MW)	135	1350	430,881542	430,6857
P <sub>G11</sub> (MW)	10	100	99,9999999	100
P <sub>G15</sub> (MW)	30	300	181,688725	181,5915
P <sub>G17</sub> (MW)	135	1350	434,55101	434,3012
P <sub>G19</sub> (MW)	34,5	3450	188,580271	188,461
P <sub>G22</sub> (MW)	34,5	3450	186,066292	185,9508
P <sub>G52</sub> (MW)	34,5	3450	183,983479	183,8751
P <sub>G80</sub> (MW)	34,5	3450	185,450164	185,2161
P <sub>G83</sub> (MW)	30	300	183,499257	183,2626
P <sub>G98</sub> (MW)	30	300	183,510189	183,3166
P <sub>G100</sub> (MW)	60	600	599,999999	600
P <sub>G101</sub> (MW)	20	200	200	200
P <sub>G109</sub> (MW)	10	100	99,9999999	100
P <sub>G111</sub> (MW)	10	100	99,9999998	100
P <sub>Gw</sub> TEBESSA2(MW)	0	50	-	50
Coût (\$/h)			<b>18062,7548</b>	<b>18047,3592</b>
Pertes (MW)			<b>62,729</b>	<b>60,981</b>

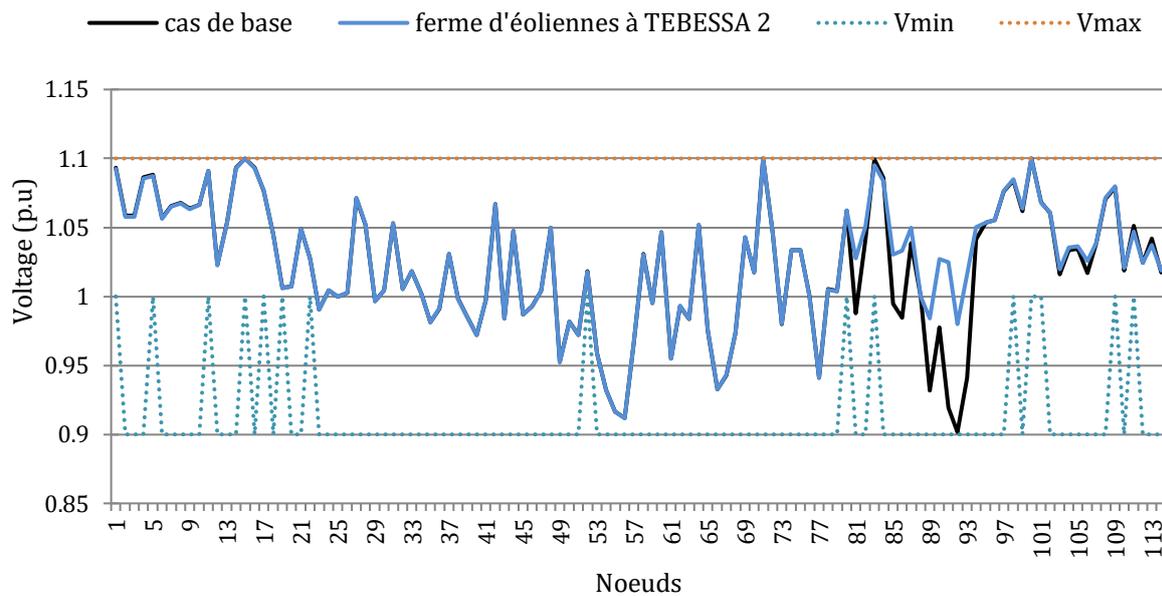
**Tableau 4.10** Puissances réactives optimales des générateurs en présence de la ferme d'éoliennes.

Variables	Min	Max	Cas de base	WF à TEBESSA-2
Q <sub>G1</sub> (MVar)	20	400	270,843028	271,1219
Q <sub>G5</sub> (MVar)	20	200	199,999999	200
Q <sub>G11</sub> (MVar)	-50	100	96,2791496	96,2754
Q <sub>G15</sub> (MVar)	0	100	79,3416114	78,88
Q <sub>G17</sub> (MVar)	0	400	329,856253	331,7218
Q <sub>G19</sub> (MVar)	0	60	59,9999999	60
Q <sub>G22</sub> (MVar)	0	50	49,9999999	50
Q <sub>G52</sub> (MVar)	0	50	49,9999999	50
Q <sub>G80</sub> (MVar)	0	60	59,9999999	60
Q <sub>G83</sub> (MVar)	-50	200	194,919594	169,8643
Q <sub>G98</sub> (MVar)	0	50	49,9999863	44,9244
Q <sub>G100</sub> (MVar)	0	270	157,895166	144,1325
Q <sub>G101</sub> (MVar)	-50	200	85,8371856	76,1372
Q <sub>G109</sub> (MVar)	-50	100	31,0768573	31,2285
Q <sub>G111</sub> (MVar)	-50	155	79,1221184	76,56
<b>Q<sub>GW</sub> TEBESSA2(MVar)</b>	<b>-70</b>	<b>70</b>	<b>-</b>	<b>46,7951</b>

Le coût de production total est diminué jusqu'à 18047,3592 \$/h avec l'intégration du générateur éolien, ce coût est moins élevé par rapport au cas de base (18062,7548), ce qui implique que nous pouvons économiser (15,3956 \$/h) par l'insertion de cette énergie.

De la même manière, les pertes actives sont diminuées de 62,729 MW à 60,981 MW (profit de 1,748 MW). On remarque aussi que la production active et réactive optimale des générateurs thermique est diminuée après l'insertion de la ferme d'éoliennes.

La figure 4.23 illustre le profil de tensions du réseau Algérien après l'optimisation en présence de la ferme d'éoliennes. On constate que l'énergie réactive générée par la ferme d'éoliennes à TEBESSA-2, améliore considérablement le profil de tension des nœuds faibles.



**Figure 4.23 :** Profil de tensions du réseau Algérien après l'optimisation en présence de la ferme d'éoliennes (p.u).

**Tableau 4.11 :** Coefficients du coût et limites de puissances du réseau Algérien.

Noeud N°	$P_{Gi}^{\min}$ (MW)	$P_{Gi}^{\max}$ (MW)	$Q_{Gi}^{\min}$ (MVar)	$Q_{Gi}^{\max}$ (MVar)	a (\$/h)	b (\$/MWh)	c. $10^{-4}$ (\$/MW <sup>2</sup> h)
1	135	1350	20	400	0	1,5000	0,0085
5	135	1350	20	200	0	1,5000	0,0085
11	10	100	-50	100	0	2,5000	0,0170
15	30	300	0	100	0	2,5000	0,0170
17	135	1350	0	400	0	1,5000	0,0085
19	34.5	3450	0	60	0	2,5000	0,0170
22	34.5	3450	0	50	0	2,5000	0,0170
52	34.5	3450	0	50	0	2,5000	0,0170
80	34.5	3450	0	60	0	2,5000	0,0170
83	30	300	-50	200	0	2,5000	0,0170
98	30	300	0	50	0	2,5000	0,0170
100	60	600	0	270	0	2,0000	0,0030
101	20	200	-50	200	0	2,0000	0,0030
109	10	100	-50	100	0	2,5000	0,0170
111	10	100	-50	155	0	2,5000	0,0170

#### **4.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, une étude sur le problème de l'écoulement de puissance optimal est présentée pour réduire le coût de production du réseau Algérien en présence d'énergie éolienne, tout en considérant le coût de production des énergies renouvelables.

D'après les résultats obtenus, l'intégration du générateur éolien dans l'emplacement optimal peut participer efficacement à la réduction des pertes actives dans les lignes de transmission et spécialement les pertes causées par la grande longueur de la ligne de transmission qui relie les régions isolées avec le réseau national.

D'autre part, l'emplacement optimal de la ferme d'éoliennes à TEBESSA peut éliminer la chute de tensions aux nœuds critiques, minimiser les pertes et améliorer le profil de tensions aux différents nœuds de charge éloignés des centrales de production.

L'installation des générateurs éoliens donne un profit économique très important par rapport au cas de base. Les résultats sont très satisfaisants ce qui encourage l'intégration des énergies renouvelables pour remplacer les combustibles fossiles et produire l'électricité de manière propre et plus durable.

## Conclusion générale

Nos travaux se concentrent sur l'étude de l'apport des énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne et son intégration au réseau électrique. Dans le premier chapitre, nous avons présenté les réseaux électriques en général, en décrivant leurs descriptions, classifications et fonctions diverses.

L'intégration des énergies renouvelables est considérée comme une solution d'avenir pour améliorer le contrôle et renforcer le système électrique.

Pour lutter contre le déséquilibre entre l'énergie produite et l'énergie consommée, et répondre à la demande croissante, de nouveaux systèmes de production non traditionnels sont utilisés, basés sur des sources d'énergie renouvelables et connectés au réseau électrique à différents niveaux de tension en fonction du niveau d'énergie nominal.

Dans le deuxième chapitre, nous avons discuté de certaines méthodes de l'écoulement de puissance pour améliorer efficacement la qualité d'énergie. Parmi ces méthodes, figurent la méthode de Newton-Raphson et la méthode de Gauss-Seidel, utilisées pour résoudre les problèmes de flux de puissance. L'écoulement de puissance optimal(OPF) implique de minimiser les coûts de production tout en satisfaisant diverses contraintes.

Notre thématique mettant en lumière les énergies renouvelables, nous avons consacré le troisième chapitre à étudier les différents types d'énergies renouvelables, en donnant un aperçu de la production des énergies renouvelables dans le monde et en Algérie. Ce chapitre présente également les avantages des énergies renouvelables dans les réseaux électriques et explique la modélisation des générateurs basés sur les énergies renouvelables.

Le quatrième chapitre présente une étude sur l'amélioration des flux de puissance pour réduire les coûts de production du réseau électrique Algérien en intégrant l'énergie éolienne. Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude du problème de l'OPF en présence des énergies renouvelables. Ensuite, la fonction objective et les contraintes sont choisies afin de formuler le problème d'optimisation.

Les résultats ont montré que l'intégration d'éoliennes dans des emplacements idéaux peut réduire efficacement les pertes actives dans les lignes de transport, en particulier celles causées par la longueur de la ligne de transport reliant les zones isolées au réseau national.

De plus, l'emplacement optimal du parc éolien à Tébessa peut éliminer les chutes de tension aux nœuds critiques et améliorer le profil de tension aux différents nœuds de charge éloignés des centrales de production.

L'installation d'éoliennes procure un bénéfice économique très important par rapport au cas de base, ce qui encourage l'intégration des énergies renouvelables pour remplacer les combustibles fossiles et produire de l'électricité de manière propre et durable.

## Références bibliographiques

[AAF21] Abderrahmane Abdoun ,Feriel Achour « Etude de l'Écoulement de Puissance et Résolution par des Techniques Intelligentes », M'emoire de projet de fin d'etude en vue d'obtention du diplôme Ingenieur d'état en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 2021.

[AB16] Antoine BEAUDRY « Simulateur d'écoulement de puissance en régime triphasé », mémoire présenté à l'école de technologie supérieure comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise avec mémoire en génie électrique ,2016

[AB16] Ashutosh Bhadoria<sup>1</sup>, Dhananjay Bhadoria<sup>2</sup> “ Power Flow Analysis using P-SAT” , International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering ,2016

[AD19]André Divenot « Une nouvelle méthode de calcul des réseaux maillés » Compagnie Générale des Eaux, Paris,2019.

[AF23] Mr. Abu Arrah Feda Mr. Jaradat Bade « Étude de l'écoulement de puissance sécuritaire dans Les réseaux de transport de l'énergie électrique » Mémoire de Master , Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1,2023.

[AG23] Gérer le risque de *black-out* Pour une application du modèle du péril commun Antoine Goutaland, Charlotte Demonsant, Armand Hatchuel, Kevin Levillain, Blanche Segrestin, Gérald Vignal Dans Revue française de gestion 2023/2 (N° 309), pages 101 à 117.

- [AJI12] A. Jiapaer, G. Zeng, S. Ma, H. Xie, Y. Tong, M. Huang. Study on Capacity of Wind Power Integrate into Power Grid Based on Static Voltage Stability. 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP); 17-20 June 2012; Hong Kong , pp. 855-859.
- [AL18] ADJOU DJ Labiba , « Contribution à l'étude de l'OPF du réseau Algérien basée sur les énergies renouvelables et les FACTS » , la these de doctorat , UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES Faculté de Génie Electrique Département D'Electrotechnique,2018
- [ALH00] A. Al-Hinai. Voltage collapse prediction for interconnected power systems. Master of Sciences in Electrical Engineering. College of Engineering and Mineral Resources at west Virginia university, Morgantown, west Virginia, 2000.
- [AO18] Arouna Oloulade, Adolphe Moukengue Imano, Antoine Vianou, Herman Tamadaho. Optimisation multi-critère du placement d'un D-STATCOM dans un réseau de Distribution par les Colonies de Fourmis. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. ffhal-02983369
- [BA23] BOUCHENNE Abdelaziz -AMMARI Khaled « Effet de taux d'intégrations des sources renouvelables sur l'optimisation d'un réseau électrique », master academique, universite kasdi merbah ouargla,2023.
- [BAR14] P.Barbier, « Etude et justification des courants de contact induits par les lignes à haute tension dans le parc résidentiel Belge et leurs incidences sur la population », thèse de doctorat, Université de Liège, 2014.
- [BBM17] Benrezzak Bariza, Mehimda Feyrouz « Detection Et Classification Des Defauts De Courts-Circuits Dans Une Ligne Tht Par Les Reseaux De

Neurones Artificiels » , Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master,ain témouchent,2017

[BM17] BOURENANE Med Adnane, LAYACHI djelloul « Amélioration de la stabilité transitoire d'un réseau électrique New England par systems FACTS et Application sur le réseau Hassi Berkine », master academique, universite kasdi merbah ouargla,2017.

[BOS16] O. Bossi, «Contribution au dimensionnement et à la gestion par optimisation de systèmes de stockage

d'énergie pour les réseaux électriques ferroviaires», thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2016.

[BOY20] BOUCHERIT Yassmine SEBAA Manal « Analyse et amélioration de la stabilité des réseaux électriques sous l'environnement PSAT », MÉMOIRE DE MASTER, Université Mohamed Khider de Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie Département de génie électrique,2020.

[CAP05] F. Capitanescu, M. Glavic, L. Wehenkel, «An interior-point method based optimal power flow», in: ACOMEN Conference, Ghent, Belgium, pp. 18, June, 2005.

[CE11] Code de l'énergie > Partie législative (Articles L100-1 à L731-1) > LIVRE 03 ; Les dispositions relatives a l'électricité > TITRE 02 :Le transport et la distribution > chapitre 01 : Le transport ,2011.

[CN22]Données d'Ember sur la consommation d'électricité ,Ibid ,Données d'Ember pour l'année2022 , <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/electricite/>

[DA22] Dali Ali Ismail, Dali Ali Ahmed Ramzi « Analyse des réseaux électrique par le logiciel PSAT », MÉMOIRE DE MASTER, Université Mohamed Khider

de Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie Département de génie électrique,2022.

[DAH12] Dr Abderrahmane HAMIDAT Directeur de Recherche Directeur de la Division Solaire Thermique et Géothermie « Le solaire thermique en Algérie: Histoire et perspectives »,2012.

[DEB94] Y. C. Wu, A. S. Debs, R. E. Marsten, « A Direct Nonlinear Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flows », IEEE Transactions on Power Systems, 9, No. 2, pp. 876-883, 1994.

[DNH18]DAAOU NEDIARI Hafida, Maître de Recherche Division Energie Eolienne – CDER « L'énergie éolienne en Algérie »,2018.

[DUM12] S. Duman, U. Güvenç, Y. Sönmez, N. Yörükeren, «Optimal power flow using gravitational search algorithm», Energy Conversion and Management, 59, pp. 86–95, 2012

[DUA13]R.C. Duan, F. H. Wang, Z. B. Ling, Z. J. Jin. Dynamic optimal reactive power compensation control strategy in wind farms of DFIG. IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES), 21-25 July 2013; Vancouver, BC, pp. 1 – 5.

[ÉB96]Éric Bernauer « Les réseaux de neurones et l'aide au diagnostic : un modèle de neurones bouclés pour l'apprentissage de séquences temporelles » Thèse de doctoratEtablissement(s) : Toulouse 3 ,1996.

[EMF12] Emmanuel Marty, Franck Rebillard, Stéphanie Pouchot, Thierry Lafouge « Diversité et concentration de l'information surle web Une analyse à grande échelle des sites d'actualité français »,Dans Réseaux 2012/6 (n°176), pages 27 à 72 Éditions La Découverte.

[FRA13]

[FIS16] Prepared by Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE AG Freiburg, 17 November 2016 [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)

[FON08] M. A. Fontela Garcia, « Interaction des réseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisée », thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, 2008.

[GIE12] D. Gielen, « Renewable Energy Technologies: Cost Analysis of wind power »,

International Renewable Energy Agency (IRENA),

[http://www.irena.org/publications/2012/Jun/Renewable-Energy-Cost-Analysis--](http://www.irena.org/publications/2012/Jun/Renewable-Energy-Cost-Analysis--Wind-)

[-Wind-](http://www.irena.org/publications/2012/Jun/Renewable-Energy-Cost-Analysis--Wind-)  
Power , 2012.

[GR12] GINOCCHIO Roger, VIOLLET Pierre-Louis Directeur de Collection : EDF R&D ,2012.

[GON09] C. Gonggui, C. Jinfu, D. Xianzhong. power flow and Dynamic optimal power flow including wind farms. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN &#39;09); 6-7 April 2009; Nanjing , pp. 1 – 6.

[HVD14] «IEEE 09 Bus System», Manitoba HVDC Research Centre, a division of Manitoba Hydro

International Ltd. PSCAD: [https://hvdc.ca/uploads/knowledge\\_base/ieee\\_9\\_bus\\_technical\\_note.pdf?t=1460659065](https://hvdc.ca/uploads/knowledge_base/ieee_9_bus_technical_note.pdf?t=1460659065) , 30 December 2014.

[IDE10] R. Idema, D. J. P. Lahaye, C. Vuik, L. van der Sluis, «Fast Newton load flow», in Proc. 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conf. Expo., pp. 1–7, Apr. 2010.

[JAM08] J. A. Momoh, « Electric Power System Applications of Optimization», Livre: Second Edition, CRC Press, Series: Power Engineering (Willis), 2008.

[JCD19] Jean-Claude Duperrin, Michel Godet. Méthode de hiérarchisation des éléments d'un système : essai de prospective du système de l'énergie nucléaire dans son contexte sociétal. [Rapport de recherche] Centre national de l'entrepreneuriat(CNE); CEA. 1973, 63 p., figures.Ffhal-02185432

[JJM77]J. J. MAUGIS » Étude de réseaux de transport et de distribution de fluide RAIRO ». Recherche opérationnelle, tome 11, no 2 (1977), p. 243-248

[KWA08] Y. Lee Kwang, M. A. El-Sharkawi, « Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power System », by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2008

[LA22]LAIB Abderaouf « Écoulement de Puissance Optimal Intelligent d'un Système de Puissance » Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Électrotechnique , 2022

[LS07] L. Stoyanov 1, G. Notton et V. Lazarov « Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables », Faculté d'Ingénierie Electrique (B1.12), Université Technique de Sofia, Boulevard K1., Ohridski, 1000 Sofia, Bulgarie Equipe Energies Renouvelables, Laboratoire SPE UMR, CNRS 6134, Université de Corse, Centre Scientifique de Vignola, Route des sanguinaires, 2000 Ajaccio, France,2007.

[LV05] Ionel Vechiu, modelisation et analyse de l'integration des energies renouvelables dans un reseau autonome. Energie électrique. Université du Havre, 2005. Français. ffNNT : ff. fftel-00179164f.

[MDR09] M.daniel RAOUL, Sénateur de Maine-et- Loire « Lignes à haute et très haut tention »,2009

[MG09] MASSON Gaëtan « Enjeux et Défis de l'intégration de Productions Décentralisées et Renouvelables sur les Réseaux Electriques »Mémoire de Fin d'Etude ,En vue de l'obtention du grade académique de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement Année Académique 2008-2009

[MLM] Ministère De L'énergie Et Des Mines > Le Ministere > Electricite Et Gaz >Préambule <HTTPS://WWW.ENERGY.GOV.DZ/?RUBRIQUE=ELECTRICITE-ET-GAZ>

[MOU12].

[MP14]Marc Petit, Seddik Bacha, Xavier Guillaud, Hervé Morel, Dominique Planson, et al.. Les réseaux HVDC multi-terminaux : des défis multiples en génie électrique. 1er Symposium de Génie Électrique (SGE 2014), Jul 2014, Cachan, France. ffhal-01065154f.

[MWM23]Malgorzata Wiatros-Motyka Senior Electricity Analyst Ember<https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/>

[OT22] OTMANE TASDA , REBBAT AHLEM « L'impact du programme d'amélioration du réseau électrique sur l'augmentation des capacités énergétique dans la wilaya Tizi-Ouzou » Mémoire de fin de cycle En vue d'obtention du diplôme de Master en économie et finances locales,2022.

[OSH13]A. S. Oshaba, E. S. Ali, Speed Control of Induction Motor Fed from Wind Turbine via Particle Swarm Optimization Based PI Controller. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Vol. 5, No. 18, May 2013, pp. 4594-4606.

[PNY16]Prof. Nouredine YASSAA, Directeur de l'EPST CDER et Dr. Said DIAF, Directeur Adjoint « Bilan de la recherche scientifique, du développement technologique et de l'innovation de l'EPST CDER » ,2016.

[RK21] Ramzi Kouadri, Auteur ; Linda Slimani, Directeur de thèse « Contribution à l'optimisation de l'intégration des énergies renouvelables au réseau électrique en présence des dispositifs FACTS-HVDC », primé Editeur : Sétif Université Ferhat Abbas faculté de Technologie département d'électrotechnique, 2021

[RKY17] Raogo Kabore, Yvon Kermarrec, Philippe Lenca. Revue des systèmes de détection d'anomalies dans les réseaux SCADA et attaques internes.

INFORSID 2017 : 35eme congrès de l'INFormatique des ORganisations et Systèmes d'Information et de Décision , May 2017, Toulouse, France. pp.1 - 6. ffhal-01573498f .

[RO21] Rouag Oussama Siradj Eddine ,Zaouali Sami Chiheb Eddine « Les Méthodes de l'écoulement de puissance », Université Badji Mokhtar Annaba FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR, 2021.

[RY09] Yann Riffonneau. gestion des flux énergétique dans un système photovoltaïque avec stockage connecter au réseau – Application à l'habitat. Energie électrique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français. ffNNT : ff. fftel-00458260.

[SAL08] A. Salem, «Différentes Techniques de Planification de l'Énergie Réactive dans les Réseaux Electriques», thèse de doctorat, école nationale polytechnique d'Alger, 2008.

[SAL13] A. Salhi, D. Naimi, T. Bouktir, «Fuzzy Multi-Objective Optimal Power Flow Using

Genetic Algorithms Applied to Algerian Electrical Network», Advances In Electrical And

Electronic Engineering, 11, No. 6, pp. 443-454, 2013

[SLI09] L. Slimani, «Contribution à l'application de l'Optimisation par des Méthodes Métaheuristiques à l'Ecoulement de Puissance Optimal dans un environnement de l'électricité dérégulé», Thèse de Doctorat, Université de Setif, 2009

[SLI12] L. Slimani, T. Bouktir, «Optimal Power Flow Solution of the Algerian Electrical Network using Differential Evolution Algorithm », *Telkomnika*, 10, No.2, pp. 199-210, June 2012.

[SRE10]S. Sreedharan, W. Ongsakul, J. G. Singh. Maximization of instantaneous wind penetration using particle swarm optimization. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol.2, 2010, pp. 39-50.

[TTH06] Thi Thu Hà Pham. influences de la production decentralisee sur la gestion des infrastructures critiques des reseaux de puissance. *Energie électrique*. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006. Français. ffNNT : ff. fftel-00174846.

[ZL11] Mr Zellouma Laid Mr Labbi Yacine « Ecoulement de Puissance optimal Par la méthode du Simplexe », Mémoire de fin d'Etude Pour l'Obtention du diplôme de : Ingénieur d'Etat en Electrotechnique , Centre Universitaire d'El-Oued,2011.

.

.

.