

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTROTECHNIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Réseau Électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Etude optimale d'un réseau électrique IEEE 14 noeuds

Présenté par : *GUESSOURI Abdelaziz*

FENGHOUR Ayoub

Encadrant : *MESBAH Tarek*

Professeur

UBMA

Jury de Soutenance :

NAIDJI Mourad	Dr	Université	Président
MESBAH Tarek	Prof	Université	Encadrant
HAMED Mostefa	Dr	Université	Examinateur

Résumé

Ce mémoire traite de l'étude optimale du réseau électrique IEEE 14 nœuds avec intégration des énergies renouvelables. Dans un contexte de transition énergétique, l'objectif principal est d'analyser l'impact de l'insertion de sources renouvelables (solaire, éolien) sur la stabilité du réseau, notamment à travers le profil de tension. L'étude repose sur une modélisation détaillée des composants du réseau et sur des simulations réalisées à l'aide des logiciels PSAT et PowerWorld. Les résultats montrent que l'intégration maîtrisée des énergies renouvelables peut améliorer la qualité de service, réduire les pertes et contribuer à un fonctionnement plus durable du système électrique.

remerciment

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, je remercie mon encadrant M.MESBAH Tarek, pour ses conseils précieux, son accompagnement rigoureux et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Je tiens également à remercier l'ensemble du corps enseignant et les responsables du Master pour la qualité de la formation reçue, ainsi que les collègues et amis qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus sincères à ma famille pour leur patience, leur soutien moral constant et leur confiance.

sommaire

Résumé

Remerciement

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale.....01

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

I.1. Introduction.....	5
I.2. Définition réseau électrique.....	5
I.3. Fonctionnement du réseau électrique.....	6
I.4. Structure générale des réseaux électriques	6
I.4.1 Production	6
I.4.2 Transport	7
I.4.3 La répartition	7
I.4.4 La distribution.....	7
I.5. Topologies des réseaux électriques	8
I.6. Les éléments constitutifs d'un réseau électrique.....	9
I.6.1 Les générateurs.....	9
I.6.2 Les lignes électriques.....	10
I.6.3 Les postes de transformation	10
I.6.4 Les postes d'interconnexion, d'alimentation et de distribution.....	11
I.7. Perturbations du réseau électrique.....	12
I.7.1 Creux detension.....	12
I.7.2 Harmonique.....	12

II.7.3 Surtensions.....	13
II.7.4 Fluctuations de tension.....	14
II.7.5 Déséquilibres.....	15
II.7.6 Coupures de Tension (Interruptions).....	15
II.8. Ecoulement de puissance.....	16
II.9. Conclusion	17

Chapitre II : Généralités sur les énergies renouvelables

II.1.Introduction	19
II.2. Définition des énergies renouvelables.....	19
II.3.Importance des énergies renouvelables dans le contexte énergétique actuel....	20
II.4. Avantages et inconvénients.....	21
II.5. Principales sources d'énergies renouvelables	23
II.5.1. L'énergie éolienne.....	23
II.5.2.L'énergie solaire	25
II.5.3. L'énergie hydraulique.....	27
II.5.4. L'énergie géothermique	29
II.5.5. La biomasse	31
II.6. Intégration des ENR dans les réseaux électriques.....	32
II.7. Les énergies renouvelables en Algérie.....	36
II.8. Conclusion.....	44

Chapitre III : Étude du réseau IEEE 14 nœuds

III.1. Présentation du réseau IEEE 14 nœuds.....	46
III.1.1 Description de la Topologie du Système	46
III.1.2 Les données du système.....	48
III.3. Plateformes de simulation utilisées.....	51
III.4. Cas normal : Réseau standard.....	54
III.5. Conclusion.....	56

Chapitre IV : Intégration des énergies renouvelables dans le réseau IEEE 14 nœuds

III.1. Introduction.....	58
III.2. Réseau IEEE 14 nœud avec évolutions des charges.....	58
III.3. Intégration d'une source solaire au nœud 13.....	61
III.4. Intégration d'une source solaire au nœuds 3, 9 et 13.....	64
III.5. Augmentation de puissance intégrée d'une source solaire au nœuds.....	67
III.6. Intégration d'une source éolienne au nœuds 3, 9 et 13.....	70
III.7. Conclusion.....	73
 Conclusion générale.....	 75
 Bibliographique.....	 76

Liste des tableaux

Tableau (II-1) : Potentiel solaire en Algérie.

Tableau (II-2) : Parc de production hydroélectrique en Algérie.

Tableau (III.1) : Les caractéristiques de réseau 14 JB

Tableau (III.2) : Données des jeux de barres du réseau IEEE standard à 14 nœuds.

Tableau (III.3) : Données des lignes de transport du réseau IEEE standard à 14 nœuds.

Tableau (III.4) : Données des générateurs du réseau IEEE standard à 14 nœuds.

Tableau (III.5) : coefficients de coût des générateurs.

Tableau (III.6) : Résultats de réseau IEEE 14 nœud cas normal.

Tableau (IV.1) : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau de chargés en fonctionnel l'évolution des charges.

Tableau (IV.2) : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 13).

Tableau (IV.3) : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 3, 9 et 13).

Tableau (IV.4) : Résultats de réseau IEEE14 après l'augmentation de puissance injecté.

Tableau (IV.5) : Résultats de réseau IEEE14 avec intégration des sources éolienne.

Tableau (IV.5) : Comparaison des coûts horaires et annuels selon différents scénarios d'injection d'énergie dans le réseau

Liste des figures

Fig (I.1) : Structure des réseaux électriques

Fig (I.2) : Topologies des réseaux électriques

Fig (I.3) : Les lignes électriques

Fig (I.4) : Les postes de transformation

Fig (I.5) : Forme d'onde d'un creux de tension

Fig (I.6) : Harmoniques

Fig (I.7) : Exemple de surtension

Fig (I.8) : Fluctuations de tension.

Fig (I.9) : Déséquilibre de tension

Fig (I.10) : Forme d'onde d'une coupure de tension

Fig (II.1) : Emplois liés aux énergies renouvelables

Fig (II.2) : Principe de fonctionnement d'une éolienne

Fig (II.3) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Fig (II.4) : Schéma de Fonctionnement d'une Centrale Hydroélectrique

Fig (II.5) : Schéma des Différents Niveaux d'Énergie Géothermique

Fig (II.6) : Les Diverses Sources de Biomasse pour la Production d'Énergie

Fig (II.7) : Moyenne annuelle de l'énergie reçue en Algérie

Fig (II.8) : Carte des vents en Algérie.

Fig (II.9) : Carte des sources thermales en Algérie.

Fig (III.1) ; Schéma du Réseau IEEE 14 nœuds

Fig (III.2) : La première fenêtre de PSAT

Fig (III.3) : La fenêtre principale du PSAT

Fig (III.4) : La fenêtre principale du Powerworld

Fig (III.5) : Le réseau IEEE14 nœud standard par logiciel PSAT

Fig (III.6) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau

Fig (III.7) : Résultats de réseau IEEE 14 nœud cas normal de powerworld

Fig (IV.1) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau

Fig (IV.2) : Résultats de réseau IEEE 14 nœud cas évolutions des charges de powerworld

Fig (IV.3) : Le réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 13) par logiciel PSAT

Fig (IV.4) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau

Fig (IV.5) : Le réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 13) par logiciel powerworld

Fig (IV.6) : Résultats de réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 13) de powerworld

Fig (IV.7) : Le réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 3, 9 et 13) par logiciel PSAT

Fig (IV.8) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau

Fig (IV.9) : Le réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 3, 9 et 13) par logiciel powerworld

Fig (IV.10) : Résultats de réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 3, 9 et 13) de powerworld

Fig (IV.11) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau

Fig (IV.12) : Le réseau IEEE14 après l'augmentation de puissance injectée par logiciel powerworld

Fig (IV.13) : Résultats de réseau IEEE14 après l'augmentation de puissance injectée de powerworld

Fig (IV.14) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau

Fig (IV.15) : Le réseau IEEE14 avec intégration des sources éolienne par logiciel powerworld

Fig (IV.16) : Résultats de réseau IEEE14 avec intégration des sources éolienne de powerworld



Introduction générale

Introduction Générale

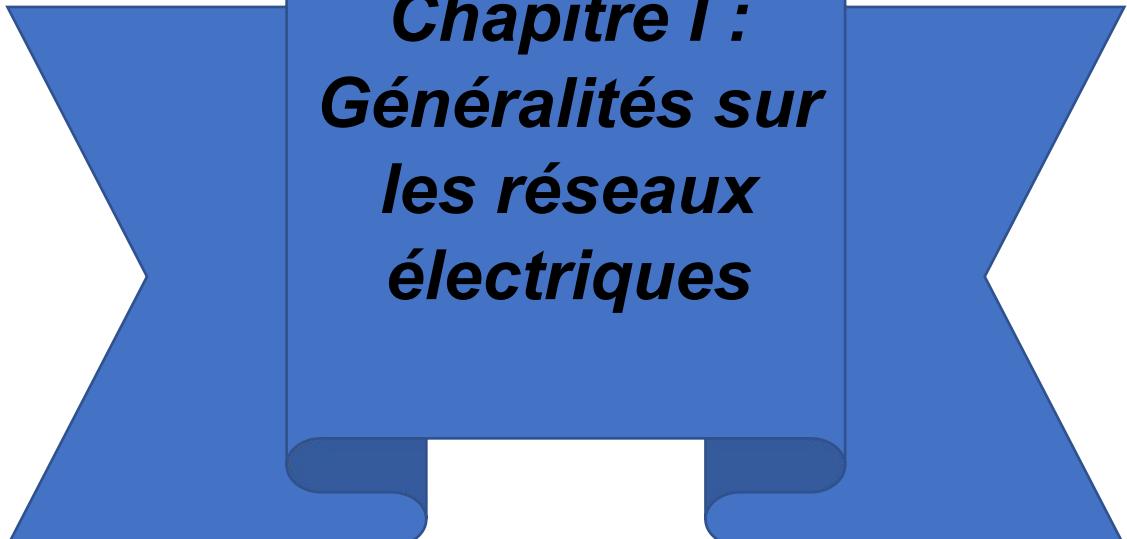
Ces dernières années, le secteur de la production d'énergie électrique a été bousculé à bien des égards, notamment en raison de l'augmentation de la demande en énergie, de l'épuisement des réserves d'énergies fossiles, ainsi que des préoccupations d'ordre environnemental. Au regard de ces enjeux, le développement des énergies renouvelables (ENR) ainsi que leur conduite à travers les réseaux électriques existants sont devenus des axes majeurs de développement pour nombre de pays. En effet, ces sources d'énergie renouvelables, telles que le solaire ou l'éolien, présentent de nombreux atouts parmi lesquels leur caractère propre, inépuisable et respectueux de l'environnement, mais soulèvent aussi de nouveaux défis techniques liés à leur coût, leur intermittence, ou leur caractère décentralisé.

L'intégration des ENR dans les réseaux électriques conventionnels constitue un exercice délicat pour lequel une planification, une modélisation, et des outils de simulations précis sont nécessaires afin de maintenir la stabilité, la robustesse, et la performance des réseaux électriques. C'est pour cette raison que l'utilisation de réseaux tests comme le réseau IEEE 14 bus ou 14 nœuds, constitue une base très intéressante pour étudier cet impact sur le réseau en termes de sources renouvelables à planter. Bien qu'il s'agisse d'un réseau très simplifié, le réseau IEEE 14 Bus reste très utilisé dans la littérature scientifique pour traiter plusieurs types de problème en Distribution et en Transport : des calculs d'écoulement de puissance, des problèmes d'optimisation ou encore des études de stabilité.

Dans ce sens, ce travail s'inscrit dans cette dynamique, et aura pour objectif d'étudier l'impact de l'intégration des ENR dans un système électrique de transport sur le cas du réseau IEEE 14 nœuds, à travers différentes simulations réalisées sur powerworld puis sur PSAT. Il s'agira de trouver les emplacements ainsi que les puissances optimales des sources renouvelables dans le réseau pour minimiser les pertes, améliorer la profile et la stabilité du réseau.

La première partie de ce mémoire traite d'une présentation générale des caractéristiques des énergies renouvelables (EnR), suivie des enjeux de leur insertion. La deuxième partie est consacrée à la modélisation du réseau IEEE 14 nœuds, au fonctionnement nominal et aux plateformes de simulation. Enfin, la dernière partie est dédiée à l'ensemble ENR, à l'analyse des résultats obtenus et à l'optimisation de leur insertion pour améliorer leurs performances dans l'avenir.

Ainsi, ce mémoire se veut participer, à son échelle, aux travaux en cours pour une transition énergétique vers un réseau plus intelligent, plus flexible durable



***Chapitre I :
Généralités sur
les réseaux
électriques***

I.1. Introduction

Dans le cadre de l'analyse des réseaux électriques, les systèmes tests normalisés jouent un rôle fondamental pour la validation des méthodes de calcul, l'évaluation des performances des outils logiciels et la simulation de différents scénarios d'exploitation. Le réseau IEEE 14 nœuds constitue l'un de ces systèmes de référence, largement utilisé dans les études académiques et industrielles pour son équilibre entre simplicité et complexité représentative des réseaux réels.

Ce réseau modélise une petite portion de système de transmission comprenant des nœuds de charge, nœuds de production, lignes de transmission, transformateurs avec réglage de tension, ainsi qu'un nœud slack. Il est particulièrement adapté à l'étude de l'écoulement de puissance, de la stabilité de tension et de l'intégration des énergies renouvelables.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter les paramètres et la structure du réseau IEEE 14 nœuds, puis modéliser ses principaux composants. Nous analyserons ensuite le profil de tension dans l'ensemble du système, en nous appuyant sur différents outils logiciels pour simuler et visualiser son comportement dans divers scénarios.

I.2. Définition réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble complexe et interconnecté de lignes de transmission, de sous-stations, de transformateurs, et d'autres composants qui travaillent ensemble pour transporter et distribuer de l'électricité du point de production jusqu'aux consommateurs finaux. Il s'agit d'un système critique nécessitant une gestion sophistiquée pour équilibrer en temps réel la production et la consommation d'électricité.

I.3. Fonctionnement du réseau électrique

Le système électrique national se structure en trois niveaux hiérarchiques : les réseaux de transport à très haute tension (400 et 225 kV), assurant l'acheminement de l'énergie depuis les grands centres de production vers les zones de forte consommation ; les réseaux de répartition à haute tension (90 et 63 kV), qui prennent en charge la distribution régionale de l'électricité vers les points de livraison ; et enfin, les réseaux de distribution, qui fournissent directement l'énergie aux usagers finaux via des lignes à moyenne tension (entre 1 kV et 60 kV) ou à basse tension (inférieure à 1 kV), à l'exception de certains grands consommateurs industriels directement raccordés aux réseaux HT ou THT.

I.4. Structure générale des réseaux électriques

De façon très générique, un réseau électrique est toujours dissocié en quatre grandes parties : la production, le transport, la répartition et la distribution.

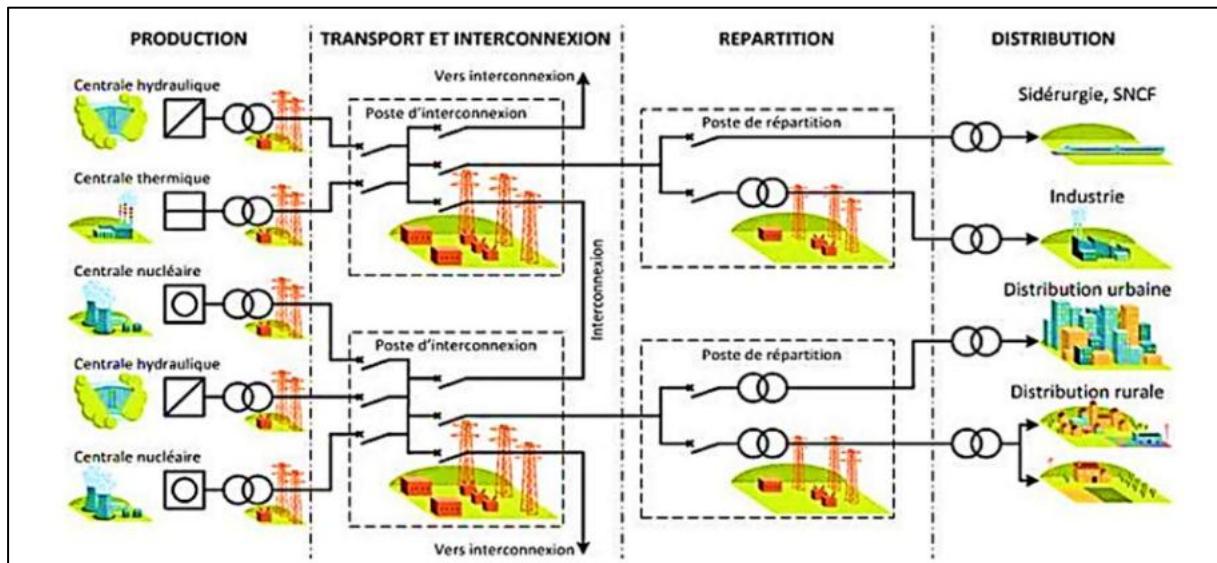


Fig (I.1) : Structure des réseaux électriques

I.4.1. Production

Elle consiste en la génération de l'ensemble de la puissance active consommée par le réseau tout entier. En grande majorité, les tensions associées à cette production sont produites sous la forme de systèmes triphasés par l'intermédiaire d'alternateurs entraînés à partir de divers types de sources d'énergie dites « primaires »

Les sources primaires varient d'un pays à l'autre, exemple en Algérie le gaz naturel couvre plus de 70% de la production, en France, 75% d'électricité est d'origine nucléaire. En générale, chaque source de production (centrale électrique) regroupe plusieurs groupes turbo-alternateurs pour assurer la disponibilité pendant les périodes de maintenance.

I.4.2. Transport

Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de production auprès des lieux de consommation. Un alternateur produit la puissance électrique sous moyenne tension (12 à 15 kV), et elle est injectée dans le réseau de transport à travers des postes de transformation pour être transmise sous haute ou très tension afin de réduire les pertes dans les lignes. Le niveau de la tension de transport varie selon les distances et les puissances transportées, plus les distances sont grandes plus la tension doit être élevée, la même chose pour la puissance. Par exemple, le réseau de transport en Algérie utilise une tension de 220 kV (voir 400 kV pour certaines lignes dans le sud notamment), le réseau européen utilise 400 kV, et le réseau nordaméricain 735 kV.

I.4.3. La répartition

Les réseaux de répartition ont pour fonction de faire la liaison entre le réseau de transport et les réseaux de distribution. La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation à partir des postes d'interconnexion THT/HT(MT) et sert fournir les gros consommateurs industriels sous haute ou moyenne tension, et à répartir les puissances dans différentes régions rurales ou urbaines. La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 25 kV et 275 kV.

I.4.4. La distribution

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs commerciales, industrielles et résidentielles.

IL existe deux sous niveaux des tensions :

Le réseau de distribution HT

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de répartition aux points de moyenne consommation (postes de distribution publique MT/BT et postes de livraison aux abonnés à moyenne consommation). La structure est de type aérien ou souterrain.

Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre quelques kilovolts et 40 kV.

Le réseau de distribution BT

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution HT aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique. Ce réseau permet d'alimenter un nombre très élevé de consommateurs correspondant au domaine domestique. Contrairement aux réseaux de transport et de répartition, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solution technique à la fois selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population. Sa structure, de type aérien ou souterrain, est souvent influencée par l'environnement. Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 100 et 440 V.

I.5. Topologies des réseaux électriques

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

Réseau maillé

Cette topologie est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voire continentale.

Réseau bouclé

Cette topologie est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés.

Réseau radial

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

Réseau arborescent

Cette structure est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain où la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT.

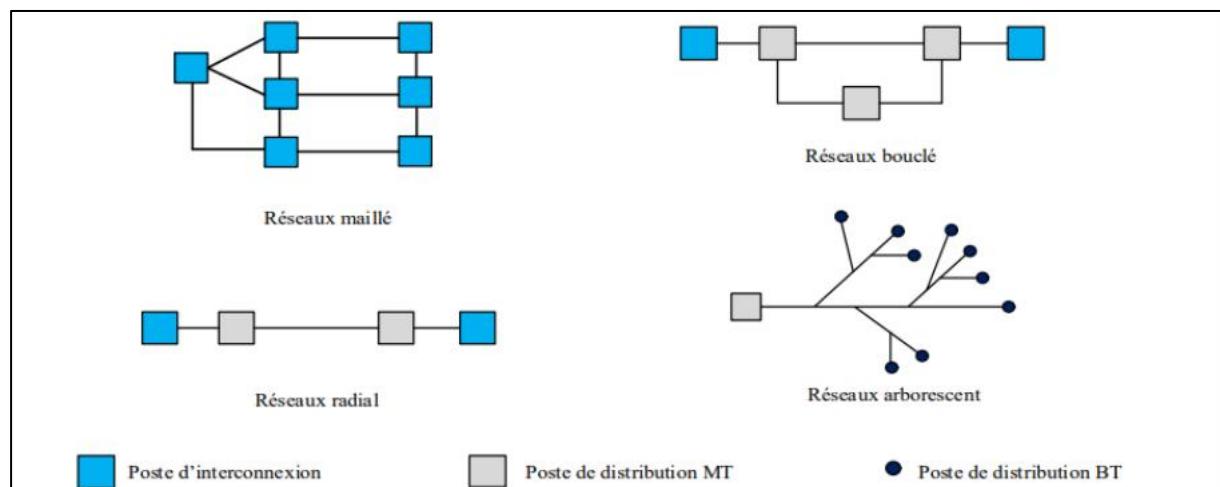


Fig (I.2) : Topologies des réseaux électriques

I.6. Les éléments constitutifs d'un réseau électrique

I.6.1. Les générateurs

Les générateurs constituent l'un des composants fondamentaux d'un réseau électrique. Leur rôle principal est de convertir une forme d'énergie primaire non électrique (telle que l'énergie hydraulique, thermique, etc.) en énergie électrique.

Ils sont répartis à différents points du réseau et ont pour fonction de fournir une puissance déterminée à une tension prédéfinie.

I.6.2. Les lignes électriques

Une ligne électrique est composée d'un ensemble de conducteurs, d'isolants et d'accessoires divers, dont la fonction est d'acheminer l'énergie électrique depuis les unités de production (centrales électriques) vers les zones de consommation (zones urbaines, habitations, complexes industriels, etc.).

Les conducteurs sont généralement fabriqués à partir de matériaux comme l'aluminium, le cuivre ou le bronze.

Les isolants, quant à eux, peuvent être solides (porcelaine, verre, papier isolant, plastique), combinés à des milieux gazeux (air, SF_6) ou liquides (huile isolante).



Fig (I.3) : Les lignes électriques

I.6.3. Les postes de transformation

Un poste de transformation est une infrastructure essentielle du réseau électrique. Il regroupe divers équipements tels que des transformateurs, des dispositifs de protection (disjoncteurs, sectionneurs, parafoudres, etc.), ainsi que des instruments de mesure et de contrôle.

À la sortie des centrales, ces postes permettent d'élever la tension de production (moyenne tension) vers des niveaux plus élevés (haute ou très haute tension), indispensables pour assurer le transport de l'électricité sur de longues distances dans des conditions économiques optimales.

Par la suite, cette tension élevée est progressivement abaissée par d'autres postes de transformation afin d'alimenter successivement les réseaux de répartition, puis les réseaux de distribution en basse tension, destinés aux consommateurs finaux.



Fig (I.4) : Les postes de transformation

I.6.4. Les postes d'interconnexion, d'alimentation et de distribution

L'interconnexion des réseaux de transport d'électricité permet le transfert d'énergie entre différents territoires. Elle joue un rôle fondamental en garantissant une alimentation électrique mutuelle entre des systèmes de production qui peuvent avoir des niveaux d'autonomie variables, notamment en cas de défaillance soudaine de l'un d'eux.

Cette interconnexion renforce la solidarité entre pays voisins et offre une diversification des sources de production. Ce regroupement, appelé foisonnement, améliore la sécurité d'approvisionnement et réduit les risques de coupures généralisées.

Par ailleurs :

Les infrastructures existantes doivent être modernisées pour permettre l'intégration efficace des nouvelles sources d'énergie renouvelable.

Le développement des échanges interrégionaux d'énergie contribue à stimuler la concurrence et à améliorer le fonctionnement global du marché de l'électricité.

I.7. Perturbations du réseau électrique

I.7.1. Creux de tension

Un creux de tension se caractérise par une diminution temporaire de l'amplitude de la tension, comprise entre 10 % et 90 % de la tension nominale, sur une durée allant de 10 millisecondes à quelques secondes. Lorsque la baisse dépasse 90 %, le phénomène est alors considéré comme une coupure brève. Ces creux peuvent être provoqués par des phénomènes naturels tels que la foudre, par des défauts au sein des installations électriques ou des réseaux publics, ou encore lors de manœuvres d'enclenchement impliquant des courants de forte intensité, comme dans le cas de moteurs ou de transformateurs.

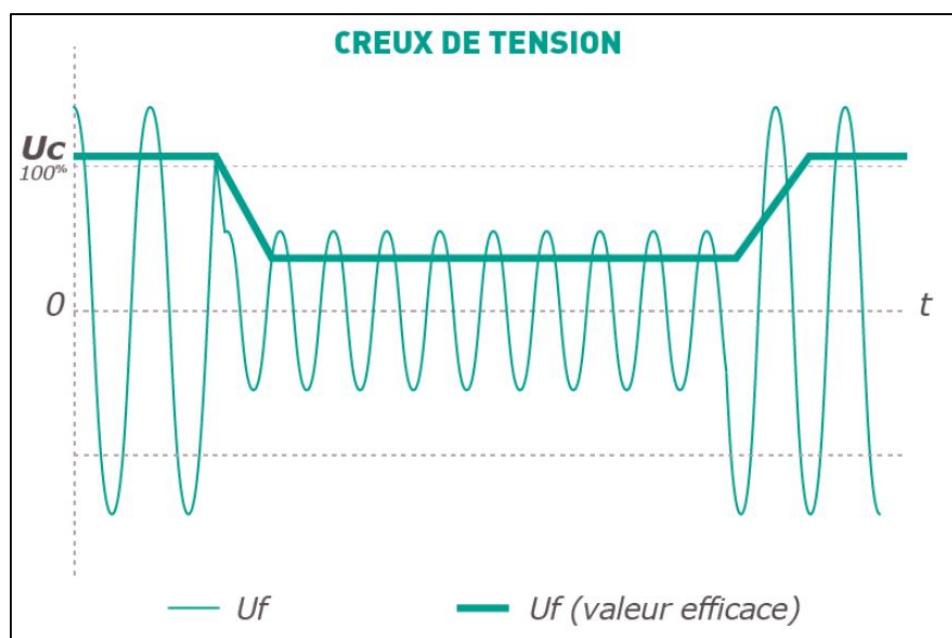


Fig (I.5) : Forme d'onde d'un creux de tension

I.7.2. Harmonique

Les harmoniques désignent des composantes de tension ou de courant dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau électrique. On distingue généralement deux catégories d'harmoniques :

Les harmoniques de courant, engendrées par la présence de charges non linéaires telles que les dispositifs d'éclairage fluorescent, les fours à arc, les redresseurs ou encore les variateurs électroniques de vitesse. Ces équipements se comportent comme des sources de courant harmonique.

Les harmoniques de tension, provenant du réseau lui-même, sont souvent dues à de légères imperfections de fabrication dans les enroulements des équipements électrotechniques, notamment les machines tournantes et les transformateurs, qui ne génèrent pas de tension parfaitement sinusoïdale. Ces perturbations peuvent être assimilées à des sources de tension harmonique.

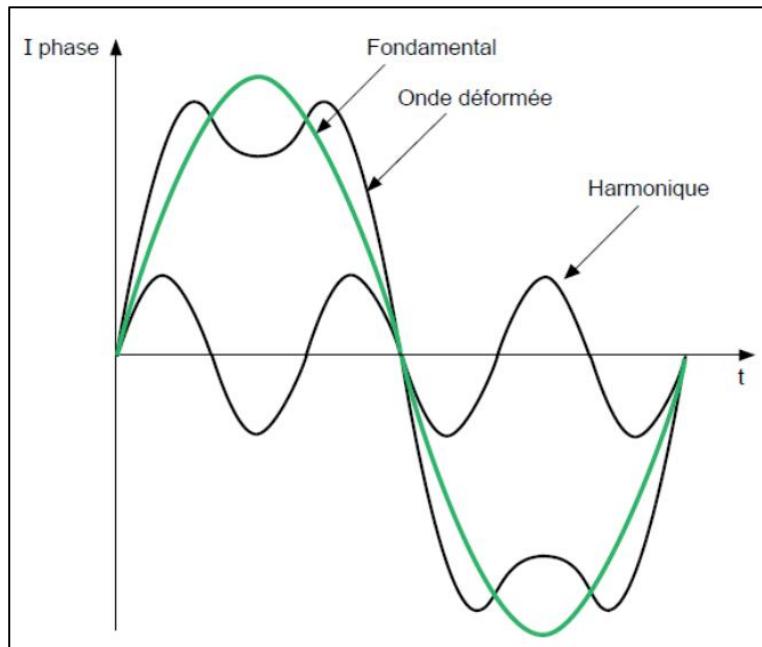


Fig (I.6) : Harmoniques

I.7.3. Surtensions

Les surtensions sont des phénomènes transitoires, caractérisés par des dépassements aléatoires et de courte durée de la tension nominale du réseau. Généralement inférieurs à une seconde, ces épisodes de surtension résultent principalement de trois sources :

Les décharges atmosphériques, notamment la foudre.

Les opérations de manœuvre sur le réseau, telles que la coupure de courants de court-circuit ou l'enclenchement de lignes à vide.

Les dysfonctionnements du réseau, incluant les variations brusques de charge ou les phénomènes de résonance.

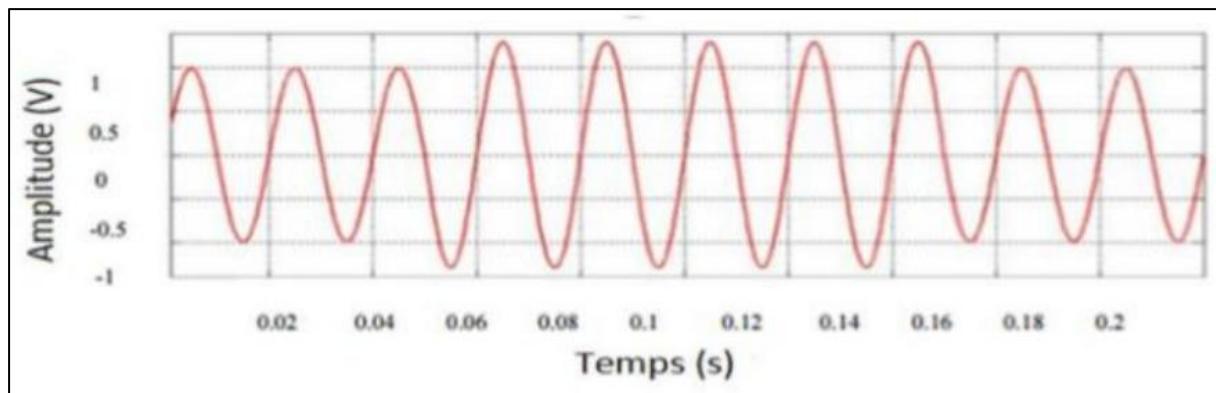


Fig (I.7) : Exemple de surtension

I.7.4. Fluctuations de tension

Le terme flicker désigne les variations rapides et de courte durée de la tension dans un réseau électrique, susceptibles d'entraîner un scintillement perceptible des sources lumineuses, notamment les ampoules. Ces fluctuations de tension sont généralement induites par des variations rapides de la puissance absorbée, elles-mêmes causées par le fonctionnement d'équipements à forte charge dynamique, tels que les fours à arc ou les machines à souder.

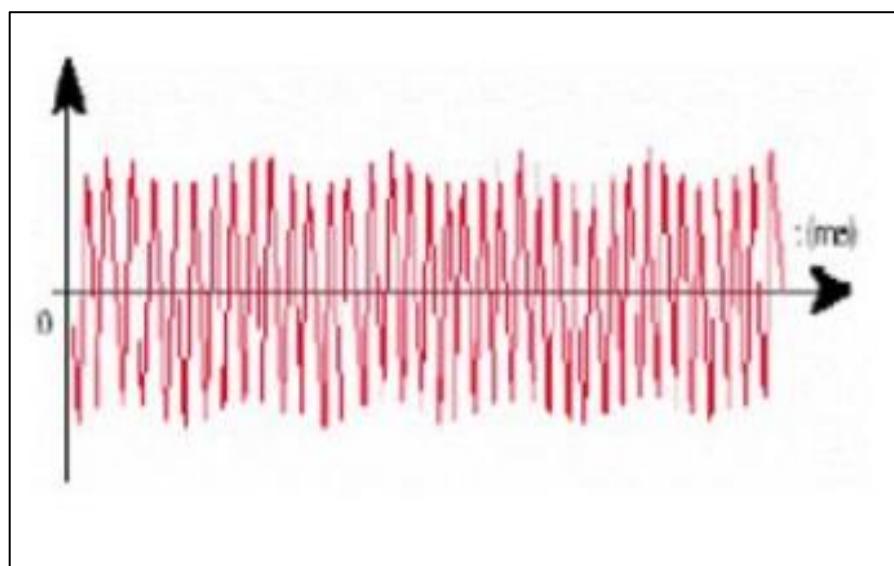


Fig (I.8) : Fluctuations de tension.

I.7.5. Déséquilibres

On parle de déséquilibre dans un système triphasé lorsque les trois tensions ne présentent pas des amplitudes égales et/ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres, ou encore lorsque la somme vectorielle des tensions n'est pas nulle. Un réseau électrique triphasé initialement équilibré, lorsqu'il alimente une charge triphasée déséquilibrée, peut engendrer un déséquilibre de tension, principalement dû à la circulation de courants asymétriques à travers les impédances du réseau.

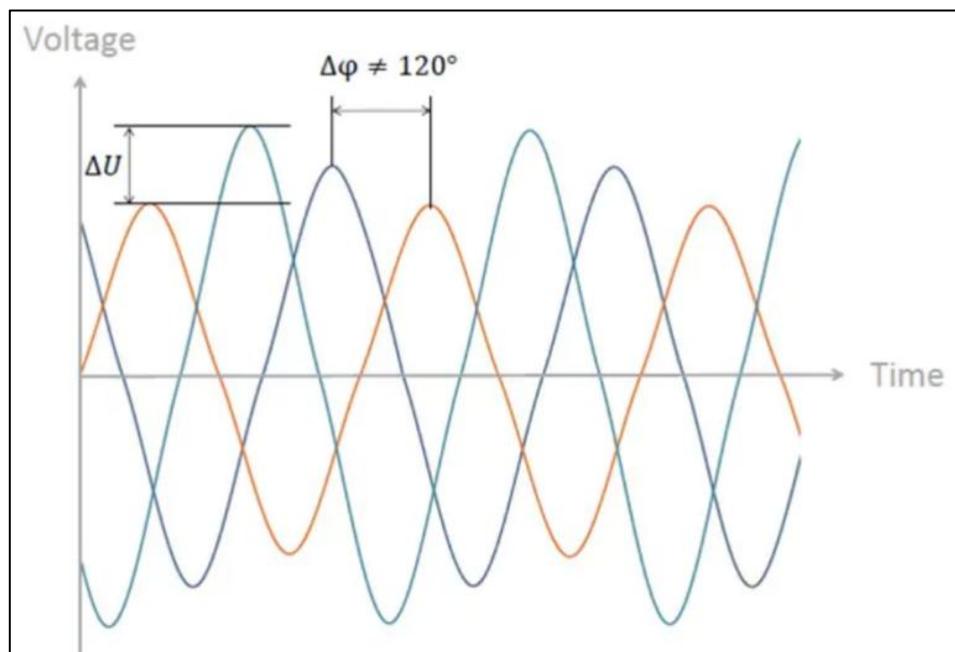


Fig (I.9) : Déséquilibre de tension

I.7.6. Coupures de Tension (Interruptions)

Les coupures de tension, également appelées interruptions d'alimentation, constituent l'une des perturbations les plus critiques du réseau électrique. Elles se traduisent par une disparition totale de la tension à un point donné du réseau pendant une durée variable. Ce phénomène affecte aussi bien les systèmes domestiques que les installations industrielles sensibles.

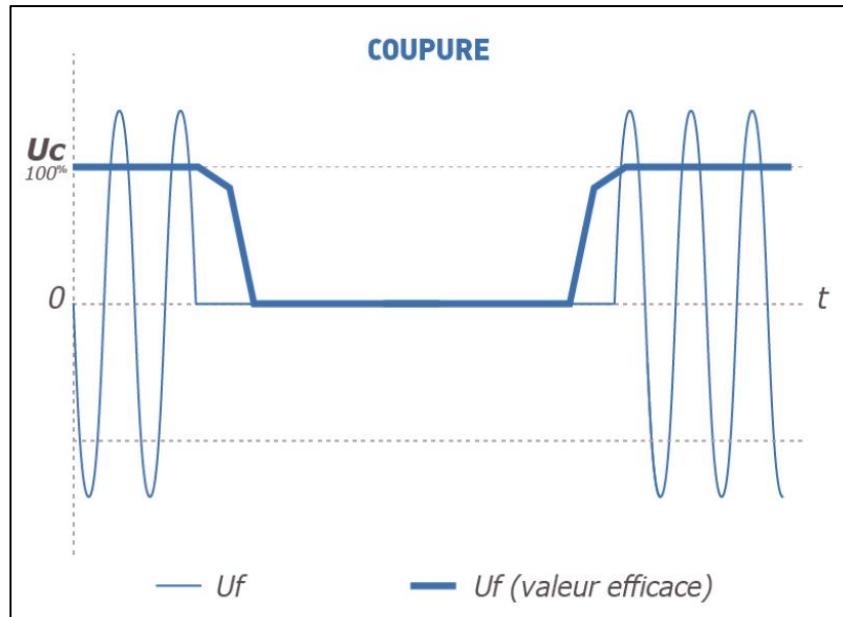


Fig (I.10) : Forme d'onde d'une coupure de tension

I.8. Écoulement de puissance

Définition de l'écoulement de puissance.

L'analyse du flux de puissance permet d'évaluer toutes les magnitudes d'un système électrique en état normal équilibré et en régime stable. Ces grandeurs représentent les tensions aux nœuds, les puissances introduites aux nœuds et celles qui traversent les lignes.

Il incombe au gestionnaire du réseau de définir le point d'opération pour l'écoulement de puissance en tenant compte des caractéristiques du réseau : la demande en électricité, les capacités de production, les chiffres concernant les flux d'énergie circulant sur les lignes de transport, ainsi que les amplitudes et phases des tensions.

Concept général de l'écoulement de puissance

L'analyse de flux de puissance est utilisée pour établir en situation permanent, les tensions complexes des jeux de barres. De ce point de départ, on peut ensuite déterminer les transferts de puissance active et réactive au niveau des lignes et des transformateurs.

Finalement, on procède au calcul des courants et des puissances qui circulent dans les lignes ainsi que de celles produites par les sources.

Problème de l'écoulement de puissance

Le calcul du flux de puissance implique l'identification de tous les flux de puissance et tensions dans un réseau qui contient un certain nombre de charges.

On attribue à chaque nœud du système quatre paramètres : la puissance active et réactive, ainsi que l'amplitude et la phase de la tension. Parmi ces quatre magnitudes, seules deux sont établies à un nœud, les deux autres étant calculées.

I.9. Conclusion

Ce chapitre a posé les fondements nécessaires à la compréhension du fonctionnement et de la structure d'un réseau électrique. Les éléments clés d'un système de puissance (générateurs, lignes de transport, transformateurs et charges) y ont été décrits. Par ailleurs, la classification, la topologie et les usages des réseaux ont permis de replacer le réseau IEEE à 14 nœuds dans un contexte plus large.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation détaillée de ce réseau, qui servira de base aux simulations et analyses d'optimisation développées dans ce mémoire.



***Chapitre II :
Généralités sur
les énergies
renouvelables***

II.1.Introduction

Face à la raréfaction progressive des ressources fossiles et aux préoccupations croissantes concernant les émissions de gaz à effet de serre, la transition vers des sources d'énergie durables est devenue une nécessité mondiale. Dans ce contexte, les énergies renouvelables apparaissent comme une solution clé pour assurer un approvisionnement énergétique respectueux de l'environnement et soutenable.

Les sources renouvelables, telles que le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la géothermie ou la biomasse, reposent sur des phénomènes naturels continuellement régénérés. Contrairement aux sources classiques, leur exploitation génère peu ou pas d'émissions de CO₂. Cependant, leur intégration dans les réseaux électriques soulève des défis spécifiques, notamment leur caractère variable et intermittent, ainsi que les exigences en matière d'équilibrage instantané entre offre et demande.

Ce chapitre dresse un aperçu des principales formes d'énergies renouvelables, de leurs mécanismes de production, de leurs atouts et limites, ainsi que des problématiques liées à leur intégration dans les systèmes électriques actuels. Cette base permet de mieux appréhender les impacts techniques et économiques de leur introduction dans un réseau de type IEEE 14 bus, analysé dans les sections ultérieures.

II.2.Définition des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (EnR) sont des énergies « provenant de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation ». À l'échelle du temps humain, ces sources d'énergie, telles que le vent, le soleil et l'eau, sont considérées comme inépuisables. En renouvellement constant, abondantes, illimitées, et ne produisant que très peu de CO₂, elles permettent de produire de l'électricité, de la chaleur, du froid, du gaz, du carburant et du combustible. On les trouve partout sur notre planète : sous terre, en mer, en altitude et dans l'air.

II.3. Importance des énergies renouvelables dans le contexte énergétique actuel

Dans un contexte mondial marqué par la crise climatique, la volatilité des marchés énergétiques et la pression croissante sur les ressources naturelles, les énergies renouvelables jouent un rôle central dans la transformation des systèmes énergétiques vers plus de durabilité, de résilience et d'indépendance. Elles sont désormais considérées comme des piliers fondamentaux de la transition énergétique engagée dans la plupart des pays.

1. Réduction des émissions de gaz à effet de serre

Les énergies renouvelables permettent une production d'électricité à très faible émission de CO₂, contrairement aux énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), fortement émettrices de gaz à effet de serre. Le développement massif des ENR est ainsi un levier essentiel pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris visant à limiter le réchauffement climatique à +1,5 °C.

2. Sécurité énergétique et indépendance

La dépendance énergétique vis-à-vis des combustibles fossiles importés constitue une vulnérabilité majeure pour de nombreux pays. En exploitant des ressources locales comme le soleil, le vent ou l'eau, les énergies renouvelables permettent de renforcer l'indépendance énergétique, tout en réduisant la sensibilité aux chocs géopolitiques ou économiques.

3. Développement économique et emploi

Le secteur des énergies renouvelables est un moteur de croissance économique, notamment dans les pays en développement. Il génère des millions d'emplois à travers le monde, dans la fabrication, l'installation, la maintenance et la gestion des infrastructures énergétiques renouvelables. Ce développement favorise également l'accès à l'électricité dans les zones rurales ou isolées, contribuant ainsi à la réduction de la pauvreté énergétique.

4. Flexibilité et décentralisation des systèmes énergétiques

Les technologies renouvelables, notamment le solaire photovoltaïque et les petites éoliennes, permettent de décentraliser la production énergétique, facilitant ainsi l'émergence de micro-réseaux, d'autoconsommation, et de systèmes plus résilients aux perturbations. Cette évolution s'accompagne du développement du stockage d'énergie, de la digitalisation des réseaux (smart grids) et de nouveaux modèles économiques (communautés énergétiques locales).

En somme, les énergies renouvelables ne se limitent pas à une simple alternative technique : elles s'inscrivent dans une réforme globale du système énergétique mondial, intégrant des dimensions environnementales, économiques, sociales et géopolitiques.

II.4. Avantages et inconvénients

Gratuites, disponibles et presque illimitées : les énergies renouvelables ont de nombreux avantages et s'avèrent essentielles à la transition énergétique... mais également des limites, qui doivent être prises en compte lors de leur installation et de leur utilisation.

Les avantages des énergies renouvelables

L'avantage principal des énergies renouvelables est leur faible impact environnemental. Le soleil, le vent, l'eau ou le bois produisent du CO₂ de manière naturelle, mais leur exploitation n'augmente pas leur impact carbone. Ce sont des ressources accessibles gratuitement, omniprésentes et presque illimitées - tant que la météo est au rendez-vous.

Exploiter ces énergies durables et renouvelables permet de contribuer à la neutralité carbone à l'échelle individuelle mais aussi au sein des entreprises ou des industries, qui peuvent utiliser les EnR pour leur consommation. Recourir aux EnR est une garantie d'économie sur les factures, car il est possible de ne consommer que ce qui est produit, ou de revendre le surplus, sans augmenter pour autant son bilan carbone.

D'un point de vue économique, le développement des filières EnR est un atout pour l'emploi local et les territoires. En 2021, les EnR représentaient près de 102 000 emplois à temps plein, dont environ la moitié concernent l'étude, la fabrication et l'installation des dispositifs d'énergies renouvelables.

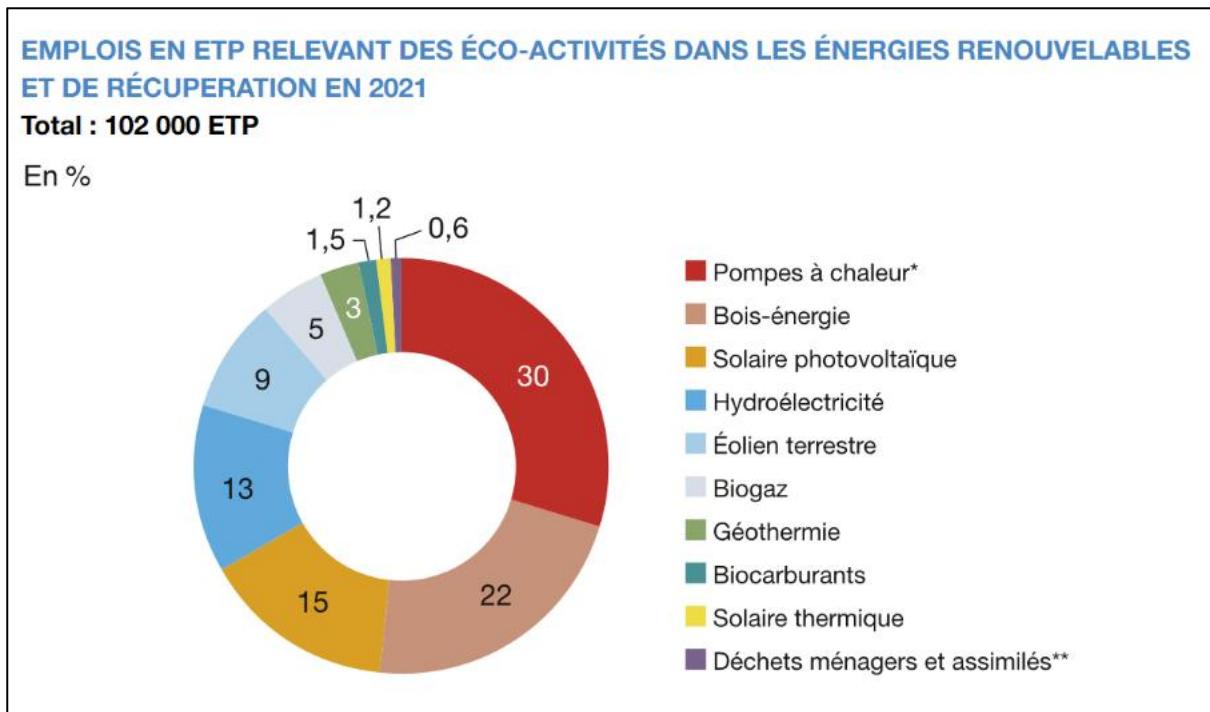


Fig (II.1) : Emplois liés aux énergies renouvelables

Les inconvénients des énergies renouvelables

Malgré leurs nombreux avantages, les énergies renouvelables ont également leurs limites. La première est le fait qu'elles sont dépendantes des aléas naturels et particulièrement de la météo. L'éolien et le solaire sont des énergies dites intermittentes, c'est-à-dire que leur disponibilité varie et qu'il n'est pas possible de la contrôler. L'énergie solaire n'est disponible qu'en journée et dépend du taux d'ensoleillement : en hiver, ou lors de journées trop nuageuses, elle n'est ainsi pas ou peu exploitable. L'énergie éolienne dépend du vent qui souffle : si le temps est calme, les pâles des éoliennes ne tournent pas et ne produisent donc pas d'électricité.

Au-delà des caprices météorologiques, l'installation des infrastructures nécessaires à l'exploitation de ces énergies peut se révéler très coûteuse, que ce soit pour les particuliers ou le développement de grands projets. Des mesures d'aide et de subvention existent mais les montants nécessaires restent élevés par rapport à l'utilisation des énergies fossiles.

Enfin, même si elles sont naturelles, ces énergies ne sont pas complètement vertes. Des conséquences environnementales indirectes y sont attachées, notamment dans le processus de fabrication des technologies ou des infrastructures d'exploitation, comme l'utilisation de terres ou de métaux rares (par exemple pour les aimants dans les éoliennes off-shore). De plus, certaines installations EnR ne sont pas entièrement recyclables, telles que les pâles des éoliennes en raison des polymères et des fibres qui les constituent, et les cadres en plastique des panneaux solaires.

II.5. Principales sources d'énergies renouvelables

II.5.1. L'énergie éolienne (terrestre ou maritime)

L'énergie éolienne consiste à produire de l'énergie grâce à la transformation de l'énergie cinétique du vent en courant électrique. Les éoliennes, composées d'un mât, de pâles et d'un générateur, peuvent être installées sur terre (on-shore) ou en pleine mer (off-shore).

En 2023, l'énergie éolienne représentait 11,3% de la consommation électrique française. Avec 2 354 parcs éoliens sur l'ensemble du territoire et le développement de l'éolien off-shore au large des côtes, cette machinerie complexe qui tourne au gré du vent est en pleine croissance.

Principe de fonctionnement de la centrale éolienne

L'énergie éolienne est produite grâce à la force exercée par le vent sur des pales fixées à un rotor.

Dans sa configuration la plus commune, le rotor comporte trois pales tournant autour d'un axe horizontal. Le diamètre qu'elles balaiennent varie de 80 à plus de 200 mètres. Plus les pales sont longues, plus la capacité de production d'électricité est importante.

En tournant, le rotor entraîne un générateur qui produit de l'énergie électrique. Dans les éoliennes de conception classique, le générateur nécessite une vitesse de rotation entre 1 000 et 2 000 tours par minute, alors que les pales tournent plus lentement (entre 5 et 25 tours par minute). Dans ces éoliennes, un multiplicateur (ou boîte de vitesse) est installé entre le rotor et le générateur pour augmenter la vitesse de rotation. Il existe aussi des machines de conception plus récente, à entraînement direct, dont les générateurs fonctionnent avec une vitesse de rotation variable (de 5 tours à 2000 tours par minute) et qui n'utilisent pas de multiplicateur. L'ensemble constitué par le multiplicateur et le générateur forme la nacelle.

La nacelle est installée au sommet d'un mât mesurant entre 50 et plus de 200 m de haut. Un système permet de l'orienter pour que le rotor et les pales soient toujours face au vent. Les éoliennes fonctionnent généralement à des vitesses de vent comprises généralement entre 10 et 90 km/h. Au-delà de cette vitesse maximum, elles s'arrêtent automatiquement pour éviter tout accident.

L'énergie électrique produite par le générateur est acheminée le long du mât via des câbles jusqu'à un transformateur, avant d'être injectée dans le réseau électrique par des câbles souterrains.

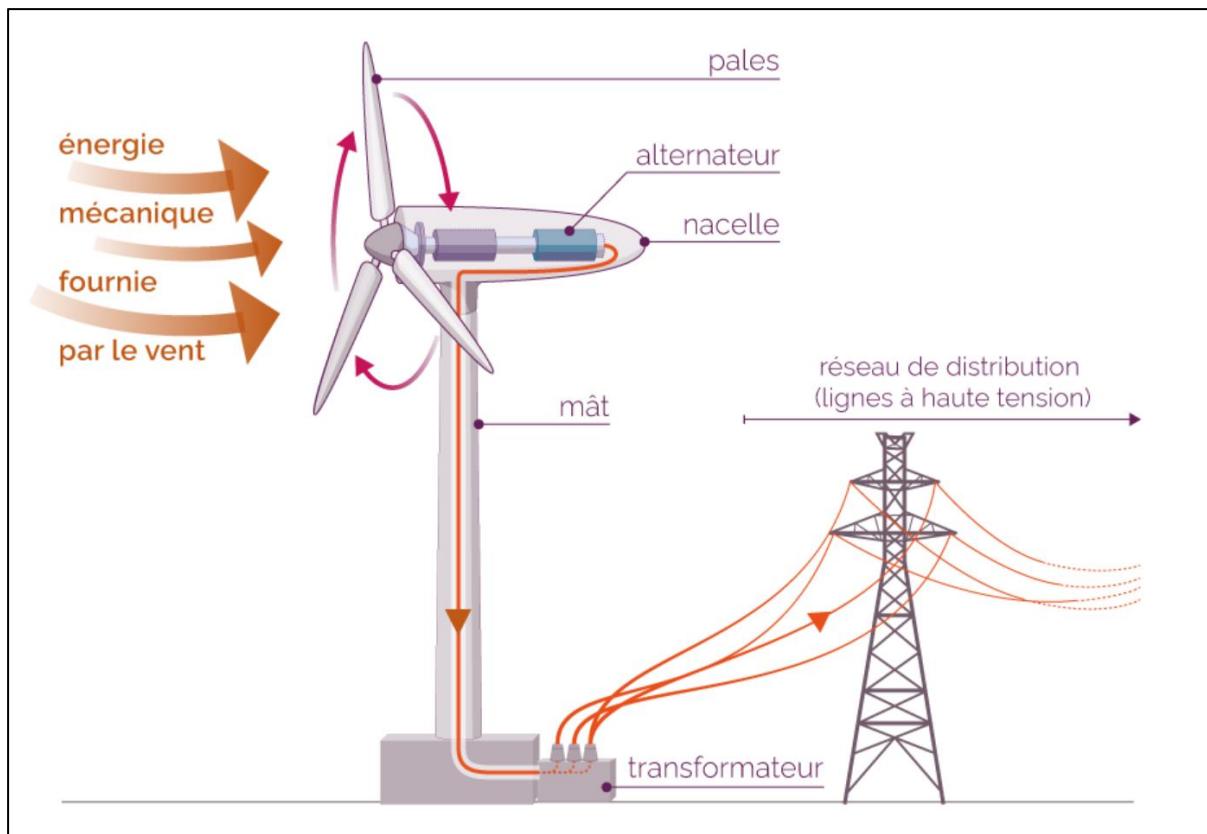


Fig (II.2) : Principe de fonctionnement d'une éolienne

II.5.2. L'énergie solaire (photovoltaïque, thermique et thermodynamique)

L'énergie solaire provient de la captation des rayons du soleil par des panneaux photovoltaïques (qui produisent de l'électricité) ou par une technologie thermique (qui génère de la chaleur) sous forme de panneaux ou de chauffe-eau. Enfin, le solaire thermodynamique utilise la concentration optique (à l'aide de miroirs) et la chaleur concentrée des rayonnements solaires pour produire de l'électricité dans une centrale. L'avantage de l'énergie solaire tient donc dans cette capacité à produire à la fois de la chaleur ou de l'électricité selon la technologie employée.

Les panneaux solaires peuvent être installés de manière individuelle sur des toits ou en ombrière, mais il existe aussi des centrales solaires capables de produire de l'électricité ou de la chaleur en plus grande quantité et de redistribuer cette énergie sur un réseau dédié. Au premier trimestre 2023, la production d'origine solaire s'élève à 3,6 Térawattheure (1 milliard de kilowattheures), contre 3,2 TWh au premier trimestre 2022. La production solaire représente 2,7 % de la consommation électrique française. Cette part est en hausse de 0,5 point par rapport au premier

trimestre 2022, selon le Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires.

Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons de la lumière, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Les électrons sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se créé. Une couche anti-reflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface.

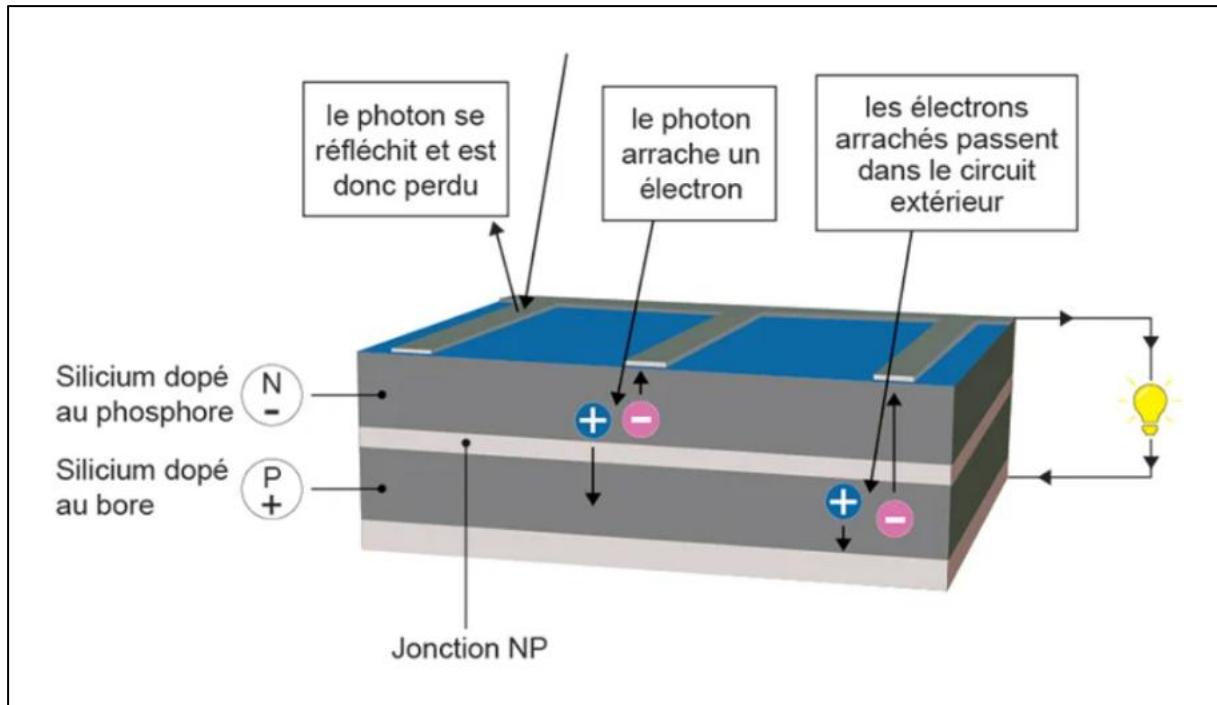


Fig (II.3) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

II.5.3. L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique utilise l'énergie et le mouvement de l'eau pour produire de l'électricité à travers une centrale hydroélectrique. Cette centrale est composée d'un barrage, construit pour former un réservoir d'eau. Une fois libérée, l'eau passe par des turbines qui convertissent l'énergie cinétique en énergie mécanique, puis en électricité. En 2022, l'énergie hydraulique comptait pour 11,1% de la production électrique de la France.

Le fonctionnement des centrales hydrauliques

Le principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique repose entièrement sur la force de l'eau. C'est grâce à cette force qu'est activée une turbine capable de produire de l'électricité. Pour faire de l'électricité, vous aurez besoin :

D'une retenue d'eau

On installe un barrage qui sert à bloquer un cours d'eau : un fleuve ou une rivière. Se forme ensuite ce que l'on appelle « un lac d'accumulation ». Cette eau ainsi stockée peut alors être redirigée en direction de notre fameuse centrale hydroélectrique.

D'une centrale hydroélectrique

En bas de notre barrage se trouve donc cette centrale. L'eau accumulée en amont peut être acheminée vers des conduites pour la rejoindre. Le débit, associé à la hauteur de la chute permet d'actionner une turbine.

D'une turbine et d'un alternateur

L'actionnement de la turbine crée ce que l'on appelle de « l'énergie mécanique ». Une énergie très vite transformée en énergie électrique grâce à un alternateur. Plus la chute est importante, plus le débit et la force de l'eau le seront aussi et plus la puissance de la centrale sera élevée.

D'un transformateur

Ce n'est pas tout à fait terminé. En effet, l'énergie électrique produite par la turbine n'est pas suffisante pour être dirigée vers le réseau électrique. Avant qu'elle ne rejoigne les lignes à haute tension cette énergie doit passer par un transformateur. Celui-ci a la charge d'élever la tension du courant.

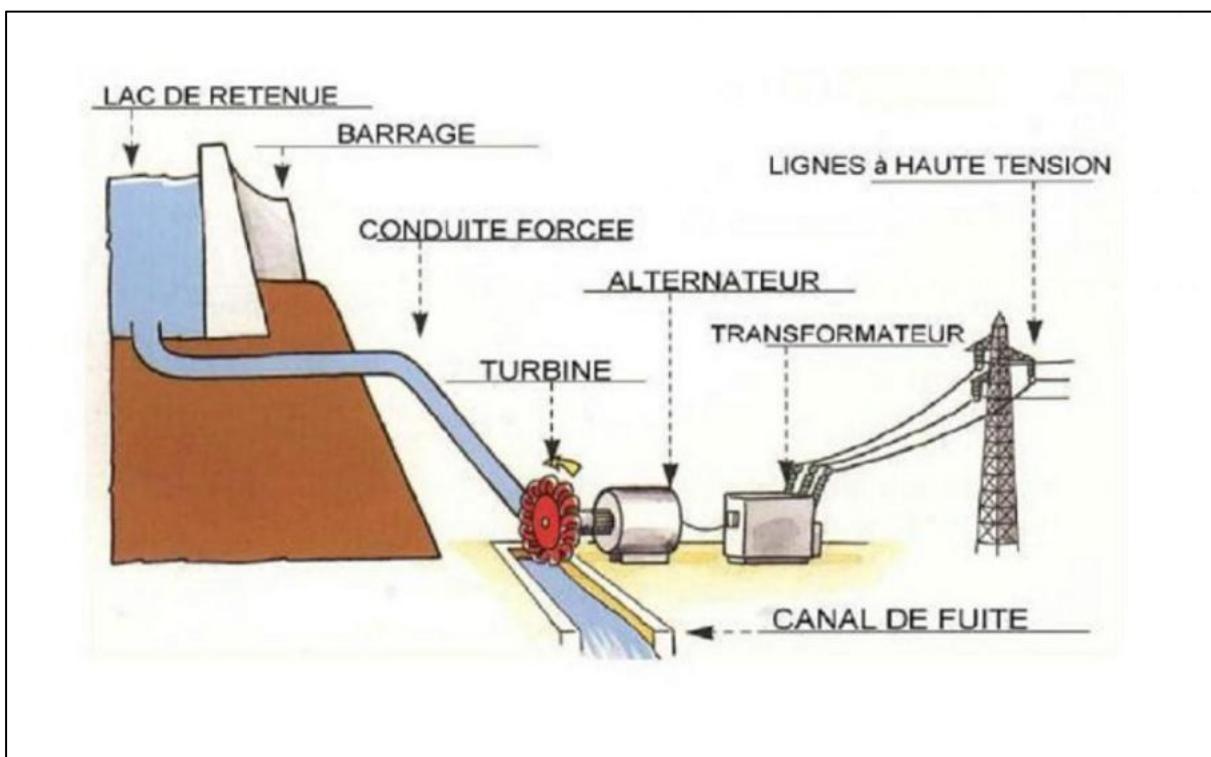


Fig (II.4) : Schéma de Fonctionnement d'une Centrale Hydroélectrique

II.5.4. L'énergie géothermique

L'énergie géothermique consiste à tirer profit de l'énergie dérivée de la chaleur interne de la Terre. Des centrales permettent d'extraire cette chaleur depuis les nappes phréatiques et de la transformer en vapeur permettant de faire tourner une turbine, laquelle active un alternateur qui génère un courant électrique.

Il existe différentes manières d'exploiter l'énergie géothermique. Dans les premiers 200 mètres de profondeur, les technologies de la géothermie valorisent l'inertie thermique du sol, c'est-à-dire la stabilité en température du sol, plutôt que son niveau de température. Lorsque l'hiver arrive, le sol se refroidit moins vite que l'air extérieur et constitue donc un réservoir de chaleur. En été, il conserve de la fraîcheur alors que la température de l'air augmente.

Cette énergie est captée pour alimenter une pompe à chaleur (PAC), qui la transforme et la transmet à un niveau de température compatible avec des émetteurs (radiateurs, planchers chauffants, ventilo-convecteurs). Avec la géothermie de surface, de façon durable, on peut produire notamment du froid, du frais, de la chaleur et de l'eau chaude sanitaire, pour répondre à des besoins résidentiels, tertiaires, agricoles, industriels, ...

Il existe différents types de gisements géothermaux classés suivant leur énergie.

On distingue généralement :

La géothermie très basse énergie (température inférieure à 30°C) :

Elle concerne les aquifères peu profonds d'une température inférieure à 30°C, température très basse qui peut cependant être utilisée pour le chauffage et la climatisation si l'on adjoint une pompe à chaleur.

La géothermie basse énergie (température entre 30 et 90°C) :

Appelée également basse température ou basse enthalpie, elle consiste en l'extraction d'une eau à moins de 90°C dans des gisements situés entre 1 500 et 2 500 mètres de profondeur. L'essentiel des réservoirs exploités se trouve dans les bassins sédimentaires de la planète car ces bassins recèlent généralement des roches poreuses (grès, conglomérats, sables) imprégnées d'eau.

La géothermie moyenne énergie (température entre 90 et 150°C) :

La géothermie de moyenne température ou moyenne enthalpie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 90 et 150°C. Elle se retrouve dans les zones propices à la géothermie haute énergie, mais à une profondeur inférieure à 1000 m. Elle se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs allant de 2000 à 4000 mètres

La géothermie haute énergie (température supérieure à 150°C) :

La géothermie haute enthalpie ou haute température concerne les fluides qui atteignent des températures supérieures à 150°C. Les réservoirs, généralement localisés entre 1500 et 3000 mètres de profondeur, se situent dans des zones de gradient géothermal anormalement élevé.

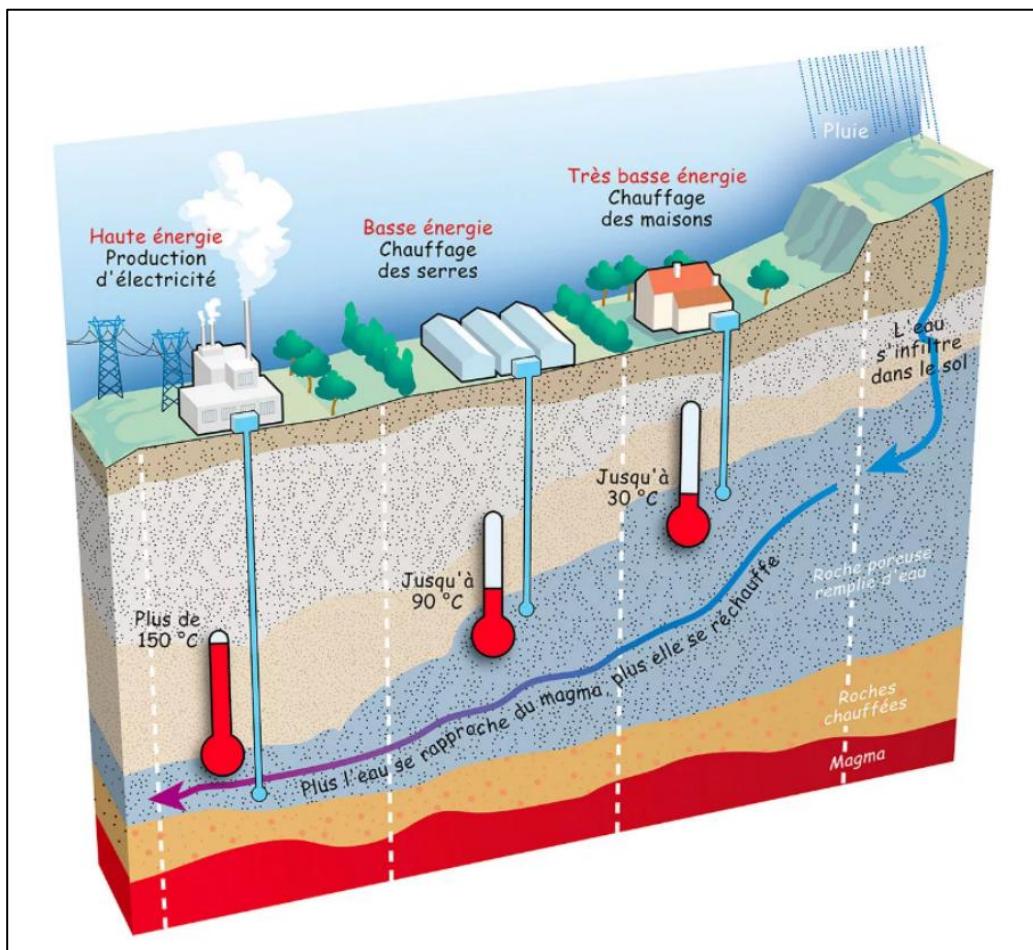


Fig (II.5) : Schéma des Différents Niveaux d'Énergie Géothermique

II.5.5. La biomasse

La biomasse est une énergie issue de la combustion ou la transformation chimique de matières organiques. Il existe trois catégories de biomasse, qui prennent trois formes différentes : le bois (solide), le biogaz (gazeux) et les biocarburants (liquide). La principale méthode de valorisation est la combustion de bois dans des centrales biomasse, mais il existe également une « voie humide » qui utilise la méthanisation, et la production de biocarburants, effectuée à partir de sucres de betterave ou de blé.

La biomasse-énergie est la principale source d'énergie renouvelable en France : elle représente plus de 55 % de la production d'énergie finale en 2020 et contribue donc significativement à réduire notre consommation d'énergies fossiles. (En tenant compte qu'elle sert à 92 % à produire de la chaleur).

La biomasse est classifiée en trois types :

Solides : cette catégorie regroupe le bois (copeaux, granulés, écorces, sciures, bûches, etc.), les déchets agricoles (paille, lisier) ou les déchets organiques (déchets ménagers, résidus alimentaires) et les animaux (reste d'êtres vivants dans le sol).

Liquides : cette catégorie regroupe les huiles végétales (colza, soja, tournesol) les bioalcools (obtenus par la fermentation alcoolique de glucose ou amidon), les boues d'épuration, etc. Ces deux premières matières sont utilisées comme solution de chauffage économique et la production électrique.

Gazeux : cette catégorie regroupe les biogaz, gaz naturel, les biocarburants, solvants, qui sont utilisés comme force motrice de déplacement.



Fig (II.6) : Les Diverses Sources de Biomasse pour la Production d'Énergie

II.6. Intégration des ENR dans les réseaux électriques

L'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique est un grand défi pour les gestionnaires de réseaux électriques. En effet, les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire et éolienne, sont des sources intermittentes et décentralisées, ce qui soulève des questions sur les modèles traditionnels de production et de distribution d'énergie.

1. Caractéristiques de l'ENR

Les énergies renouvelables diffèrent des énergies traditionnelles sous plusieurs aspects principaux :

Variabilité : La production dépend du soleil, du vent ou des précipitations, ce qui la rend instable et difficile à prévoir à court terme.

Décentralisation : Contrairement aux centrales thermiques centralisées ou aux centrales nucléaires, les énergies renouvelables sont généralement distribuées dans la région (comme les panneaux solaires sur les toits et les éoliennes rurales).

Injection bidirectionnelle : Le réseau doit gérer l'injection d'énergie à partir de plusieurs points de production, et pas seulement des grandes centrales électriques.

2. Nécessité d'équipements d'interface (onduleurs, contrôleurs)

L'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques nécessite des équipements spécifiques appelés équipements d'interface. Ceux-ci assurent la conversion, la régulation et la synchronisation de l'énergie produite avec le réseau électrique.

a) Onduleurs

Les onduleurs sont des dispositifs électroniques essentiels pour convertir le courant continu (DC) produit par certaines sources renouvelables (comme les panneaux photovoltaïques ou les batteries) en courant alternatif (AC) compatible avec le réseau électrique. Ils remplissent plusieurs fonctions :

Conversion DC/AC : Rend l'énergie utilisable par les appareils domestiques ou injectable dans le réseau.

Suivi du point de puissance maximale (MPPT) : Optimise la puissance produite par les panneaux solaires en suivant le point de rendement maximal.

Synchronisation réseau : Assure que la fréquence et la tension de l'énergie injectée soient en phase avec celles du réseau.

Protection du système : Détection d'îlotage, surtensions, surintensités, etc.

Injection de puissance réactive : Certains onduleurs avancés peuvent fournir ou absorber de la puissance réactive, améliorant la régulation de tension du réseau.

Il existe plusieurs types d'onduleurs : centralisés, string (par chaîne de panneaux), micro-onduleurs, ou hybrides (solaire + batterie).

b) Contrôleurs

Les contrôleurs jouent un rôle fondamental dans la gestion dynamique des sources d'énergie renouvelable et de leur interaction avec le réseau ou la charge locale. Ils assurent :

La régulation de la tension et de la fréquence.

La priorisation des sources d'énergie (ex. : solaire avant diesel dans un micro-réseau).

La gestion de la charge (réduction ou délestage en cas de déficit d'énergie).

La coordination avec le stockage (charge/décharge des batteries).

La communication avec d'autres composants intelligents du réseau (smart grid, SCADA).

Dans un contexte de réseaux isolés ou de micro-réseaux, les contrôleurs permettent une exploitation optimisée et une stabilité accrue face à la variabilité des ressources renouvelables.

3. Défis de l'intégration

L'intégration d'une grande quantité d'énergie renouvelable peut affecter la stabilité et la performance d'un réseau électrique autonome. Lors d'un projet d'intégration de sources d'énergie renouvelable sur un réseau isolé, les impacts suivants doivent être considérés :

La diminution du niveau de courant de court-circuit disponible.

La diminution de la capacité de production d'énergie réactive (var).

La diminution de la réserve d'énergie tournante.

Niveau de courant de court-circuit

La majorité des systèmes d'énergie renouvelable fournissent beaucoup moins de courant lors d'un court-circuit comparativement à une génératrice diesel. Cette réduction du niveau de défaut disponible peut provoquer les effets suivants :

Les éléments des protections de surintensité (disjoncteur et fusible) peuvent être retardés ou devenir complètement inopérants.

La coordination des protections peut être compromise.

Le niveau d'énergie lors d'un défaut d'arc électrique peut-être augmenté.

La régulation de tension peut être affectée.

La distorsion de la tension peut être augmentée affectant ainsi la qualité de l'onde de l'alimentation électrique.

Capacité de production d'énergie réactive (var)

Les sources d'énergie renouvelable peuvent être grandement limitées en puissance réactive (var), réduisant ainsi la capacité de démarrer des moteurs et de magnétiser des transformateurs

Réserve d'énergie tournante

L'intégration de sources d'énergie renouvelable provoque en général une diminution importante de la réserve d'énergie tournante disponible puisque les génératrices avec moteur diesel ne sont pas conçues pour fonctionner à faible niveau de charge et que certaines devront être arrêtées. Par conséquent, des pannes du réseau électrique pourraient être plus fréquentes et la stabilité de fréquence pourrait être grandement affectée.

La génération d'énergie et la charge d'un réseau électrique doivent être égales en tout temps afin d'éviter des pannes et des variations de fréquence. Également, il est très difficile de contrôler la puissance de sortie d'une éolienne ou d'un panneau solaire, laquelle dépend directement de la source d'énergie renouvelable.

4.Les solutions

Les solutions peuvent différer selon qu'il s'agisse du réseau d'une communauté ou celui d'un site industriel ou minier, car les besoins et la nature des charges sont très différents. Les solutions suivantes peuvent être envisagées afin de réduire les impacts liés à l'intégration de sources d'énergie renouvelable :

Intégration d'un compensateur synchrone pour augmenter le niveau de défaut, régulariser la tension et fournir de l'énergie réactive.

Surdimensionnement de l'onduleur des systèmes d'énergie renouvelable afin d'augmenter le niveau de défaut.

Implantation d'une stratégie de contrôle des sources d'énergie, combinée à une gestion active des charges afin d'assurer la stabilité du réseau.

Utilisation de relais de protection modernes, intégrant les nouvelles technologies et assurant une élimination rapide et sélective des défauts de faible amplitude.

Élimination des fusibles de gros calibre non compatibles avec les sources d'énergie renouvelable.

Intégration d'un système de stockage d'énergie ayant des performances et une autonomie adéquate pour assurer la stabilité et la continuité de service du réseau.

I.7.Les énergies renouvelables en Algérie

Au cours des dix dernières années, l'Algérie a engagé une transition énergétique en adoptant une politique volontariste orientée vers les énergies renouvelables. Cette stratégie vise à exploiter les ressources naturelles abondantes du pays, diversifier le bouquet énergétique national et favoriser un modèle économique plus durable.

Un programme national a ainsi été lancé pour la période 2011-2030, avec pour objectif l'installation d'environ 22 000 MW de capacité renouvelable. Parmi ceux-ci, 12 000 MW seront destinés à satisfaire la demande domestique, tandis que 10 000 MW sont prévus pour l'export. Toutefois, cette ambition exportatrice reste conditionnée par la sécurisation de contrats à long terme, l'identification de partenaires fiables et l'accès à des financements internationaux.

Le solaire constitue l'atout majeur du pays en matière d'énergie renouvelable. Il est perçu comme un moteur de croissance, à travers la promotion de filières industrielles locales et la création d'emplois. À côté de cette ressource dominante, l'Algérie exploite également, de manière plus limitée, le potentiel de l'éolien, de la biomasse, de la géothermie et de l'hydroélectricité, avec des projets pilotes et des fermes éoliennes en développement.

L'engagement algérien en faveur des énergies renouvelables répond aux impératifs environnementaux et à la nécessité de préserver les réserves fossiles. Le solaire, tant thermique que photovoltaïque, occupe une place centrale dans cette stratégie, avec un objectif de couvrir plus de 37 % de la production nationale d'électricité à l'horizon 2030. L'éolien devrait en représenter environ 3 %, tandis que d'autres technologies, telles que la biomasse ou la géothermie, font l'objet d'expérimentations ciblées, notamment pour des applications comme le dessalement d'eaux saumâtres.

Potentiel d'énergie solaire en Algérie

Grâce à sa position géographique privilégiée, l'Algérie bénéficie de l'un des potentiels solaires les plus importants au monde. En effet, la durée d'ensoleillement dépasse 2 000 heures par an sur la quasi-totalité du territoire, atteignant même jusqu'à 3 900 heures par an dans les régions des Hauts Plateaux et du Sahara.

L'ensoleillement quotidien moyen sur une surface horizontale de 1 m² est estimé à environ 5 kWh, ce qui correspond à une énergie solaire annuelle reçue de l'ordre de 1 700 kWh/m²/an dans le nord du pays, et jusqu'à 2 263 kWh/m²/an dans les zones sahariennes.

Tableau (II-1) : Potentiel solaire en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh /m ² /an)	1700	1900	2650

La distribution de l'énergie reçue en Algérie, en moyenne annuelle, est donnée par la figure ci-dessous. Elle présente les différents niveaux énergétiques qui donnent ainsi un découpage du pays en régions isoénergétiques.

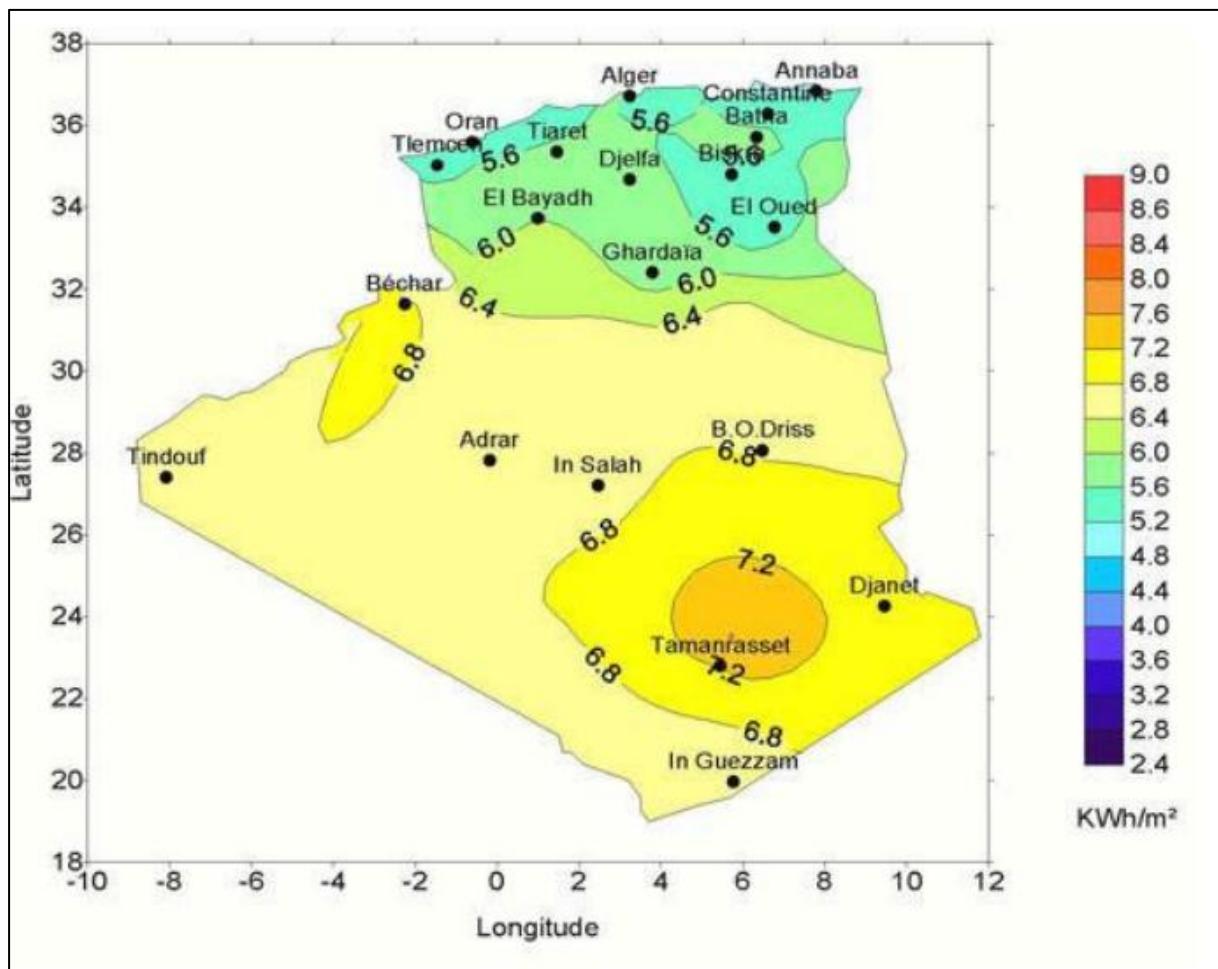


Fig (II.7) : Moyenne annuelle de l'énergie reçue en Algérie

Le Programme national de développement des énergies renouvelables (EnR), lancé en 2011 et révisé en 2015, vise à atteindre, à l'horizon 2030, une capacité installée de 22 000 MW destinée exclusivement à la consommation locale. Pour y parvenir, le programme mise sur un large éventail de technologies, avec une prédominance du photovoltaïque (13 575 MW) et de l'éolien (5 010 MW). Le reste de la capacité projetée est réparti entre d'autres filières telles que le thermo-solaire (CSP), la biomasse, la cogénération et la géothermie.

Ce choix technologique diversifié reflète la volonté des autorités de mobiliser tous les moyens disponibles pour maximiser la production d'électricité renouvelable, en réponse à un déclin anticipé des ressources fossiles. Toutefois, comme l'ensemble de ces filières produisent exclusivement de l'électricité, des situations de concurrence peuvent émerger entre elles, au lieu d'une complémentarité, notamment lorsque plusieurs sources d'énergie coexistent dans une même zone géographique.

Dans un tel contexte, deux ou plusieurs technologies peuvent exploiter simultanément un même champ énergétique (par exemple, le solaire ou le vent), ce qui rend leur cohabitation difficile. Des choix économiques et stratégiques doivent alors être faits pour privilégier la technologie la plus rentable et la mieux adaptée aux conditions locales.

C'est notamment le cas pour les deux filières principales du programme – le photovoltaïque et l'éolien – mais ce raisonnement peut également s'étendre aux autres sources d'énergie renouvelable incluses dans le plan national.

Potentiel L'énergie éolienne en Algérie

À la suite de la révision du Programme national des énergies renouvelables en 2015, la capacité prévue pour l'énergie éolienne a été portée de 2 000 MW à 5 010 MW, faisant de cette filière la deuxième plus importante après le photovoltaïque, et reléguant les autres sources (CSP, biomasse, géothermie, etc.) à des positions plus marginales.

Cette montée en puissance de l'éolien s'explique principalement par la baisse significative du coût moyen de production du kilowattheure (kWh), qui en fait aujourd'hui l'une des solutions les plus compétitives parmi les énergies renouvelables. En effet, selon les prévisions de l'Energy Information Administration (EIA) – agence du Département de l'Énergie des États-Unis – pour l'année 2022 (valeurs exprimées en dollars constants de 2015), les coûts moyens de production du kWh sont les suivants:

Géothermie : 0,0423 \$/kWh

Éolien : 0,0736 \$/kWh

Électricité conventionnelle : 0,0726 \$/kWh

Photovoltaïque : 0,1253 \$/kWh

Thermo-solaire (CSP) : 0,2390 \$/kWh

Les coûts de production de l'énergie éolienne, souvent fondés sur des retours d'expérience étrangers, ne reflètent pas les réalités algériennes. Ces références proviennent majoritairement de pays bénéficiant à la fois d'un savoir-faire technologique avancé et de régimes de vent favorables, avec des vitesses annuelles dépassant 9 m/s. À l'inverse, la vitesse moyenne du vent en Algérie ne dépasse généralement pas 6 m/s, ce qui se traduit par des coûts bien plus élevés pour développer cette filière, d'autant plus que l'expertise locale reste limitée, malgré l'installation d'un parc piloté de 10 MW à Adrar.

La production d'une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Ainsi, une hausse de 5 m/s à 10 m/s entraîne une multiplication par huit de la production. Appliqué aux conditions algériennes, cela signifie que les coûts estimés dans des régions à 9 m/s doivent être multipliés par environ 3,8 pour s'adapter à une vitesse moyenne de 6 m/s. De surcroît, les conditions sahariennes — chaleur, poussière et corrosion — alourdissent les charges d'exploitation et raccourcissent la durée de vie des équipements, ce qui rend l'éolien nettement moins compétitif que le photovoltaïque dans ces zones.

Le potentiel éolien du sud algérien reste donc modeste, bien qu'il coïncide avec un des gisements solaires les plus importants au monde. Étant donné que ces deux sources produisent le même vecteur énergétique, à savoir l'électricité, seule la plus compétitive est susceptible de s'imposer. En l'occurrence, le solaire s'avère mieux adapté. L'argument selon lequel l'éolien peut produire la nuit est insuffisant, compte tenu de la forte variabilité des vents nocturnes.

Certes, une complémentarité entre solaire et éolien existe ailleurs, comme en Allemagne, où chaque filière occupe des régions géographiquement distinctes : l'éolien au nord, le photovoltaïque au sud. En Algérie, en revanche, les deux ressources sont souvent présentes sur les mêmes zones, ce qui accentue la concurrence technologique. Dans une logique d'optimisation des investissements, l'éolien devient donc, dans bien des cas, redondant.

Depuis 2014, l'Algérie a mis en service un projet éolien pilote de 10 MW à Adrar et un parc solaire de 1,1 MW à Ghardaïa, complétés par d'autres installations photovoltaïques. L'analyse de leurs performances respectives permettra d'orienter les choix futurs. Il faut toutefois souligner que certaines régions du nord, telles que les massifs montagneux ou les vallées étroites, peuvent offrir un gisement éolien intéressant, avec une insolation moindre. Dans ces cas spécifiques, l'éolien pourrait jouer un rôle d'appoint au solaire.

Un article publié en septembre 2016 dans *Liberté* soulevait plusieurs limites du programme national des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, un retard important dans sa mise en œuvre et un rythme insuffisant pour atteindre l'objectif des 22 000 MW prévus à l'horizon 2030, dont seulement la moitié serait réalisable dans les délais. Par ailleurs, la part des renouvelables dans la consommation électrique projetée pour 2030 serait de 27 %, avec une économie espérée de 300 milliards de m³ de gaz. Cependant, cette estimation repose sur des prévisions trop optimistes, notamment pour l'éolien.

Les estimations initiales de production éolienne (16,19 TWh/an) s'inspiraient de sites marocains bien plus venteux. En ajustant ces chiffres à une vitesse moyenne de 6 m/s en Algérie, la production chuterait à 6,83 TWh/an. Ainsi, la production totale du programme passerait de 46,84 TWh/an à 34,47 TWh/an. Par conséquent, la part des renouvelables dans la consommation nationale passerait de 27 % à 20,3 %, et l'économie de gaz sur 25 ans tomberait à 210 milliards de m³. Si seulement 50 % du programme est mis en œuvre, cette économie ne représenterait plus que 1,5 % du mix énergétique.

Dans ces conditions, il apparaît plus approprié de parler de transition électrique plutôt que de réelle transition énergétique. D'autant plus que le coût total du programme dépasserait 100 milliards de dollars, tandis que les économies de gaz espérées ne rapporteraient que 40 à 50 milliards selon les prix actuels, ce qui soulève la question de la viabilité économique de cette stratégie.

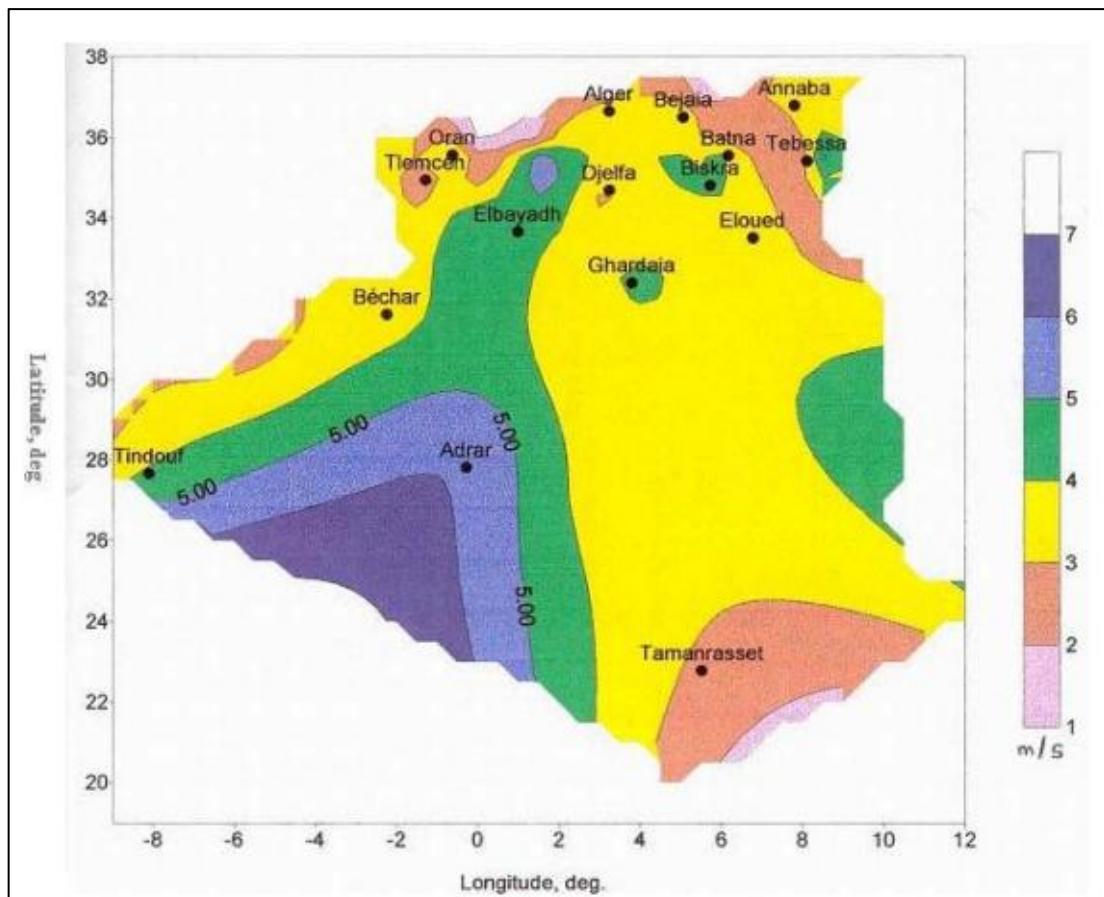


Fig (II.8) : Carte des vents en Algérie.

Potentiel de l'énergie géothermique

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysiques a permis d'élaborer une carte géothermique préliminaire. Cette analyse a permis d'inventorier plus de 200 sources thermales situées dans la partie nord du pays. Environ un tiers de ces sources (soit 33 %) présentent des températures supérieures à 45 °C. Certaines d'entre elles, notamment dans la région de Biskra, atteignent des températures élevées pouvant aller jusqu'à 118 °C.

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

Zone de Relizane et Mascara ;

Zone d'Aïne Boucif et Sidi Aïssa ;

Zone de Guelma et Djebel El Onk.

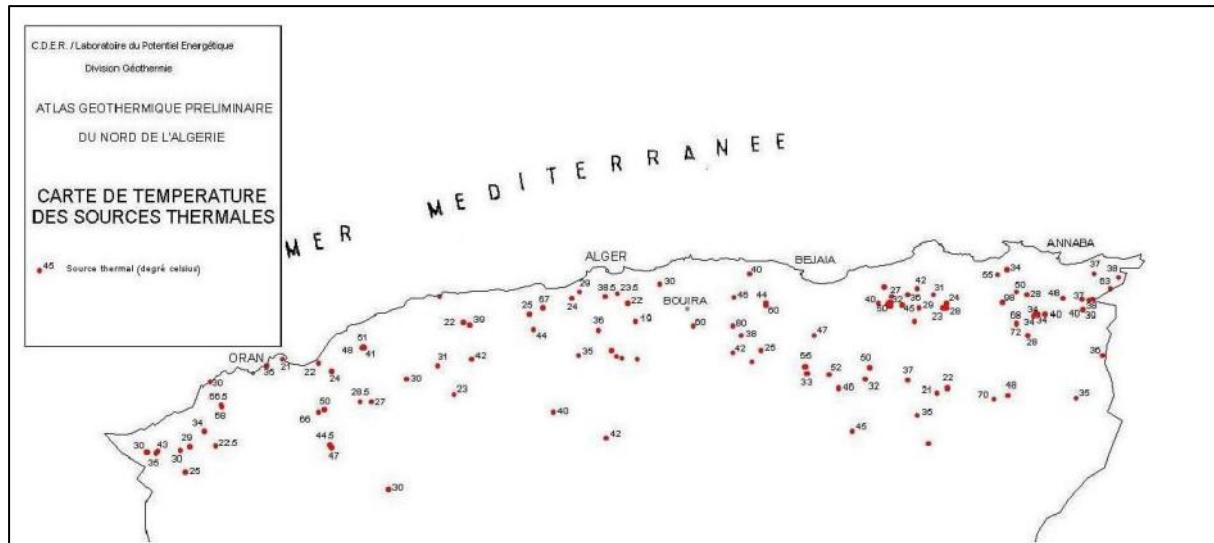


Fig (II.9) : Carte des sources thermales en Algérie.

Potentiel de l'hydroélectricité

Les quantités globales de précipitations enregistrées sur le territoire algérien sont considérables, estimées à environ 65 milliards de m³ par an. Toutefois, elles profitent peu au pays en raison de plusieurs contraintes : nombre limité de jours de pluie, concentration spatiale des précipitations, fort taux d'évaporation et écoulement rapide des eaux vers la mer.

De manière générale, les ressources hydriques de surface diminuent progressivement du nord vers le sud. Les ressources utiles et renouvelables sont actuellement évaluées à environ 25 milliards de m³, dont près des deux tiers proviennent des eaux de surface. À ce jour, 103 sites de barrages ont été identifiés, parmi lesquels plus de 50 sont déjà en exploitation.

Tableau (II-2) : Parc de production hydroélectrique en Algérie.

Centrale	Puissance installée en MW
Darguina	71.5
Ighil Emda	24
Mansouria	100
Erraguene	16
Souk Eljemaâa	8.085
Tizi Meden	4.458
Ighzer nchebel	2.712
Ghrib	7.000
Gouriet	6.425
Bouhanifa	5.700
Oued Fodda	15.600

Beni Behde	3.500
Tessala	4.228

Le Potentiel de la Biomasse

a. Potentiel de la forêt

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 millions de TEP (Tonnes Équivalent Pétrole).

Le potentiel récupérable est de l'ordre de 3.7 millions de TEP. Le taux récupération actuel est de l'ordre de 10%

b. Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles

Cinq millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1,33 millions de TEP/an.

II.8. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons découvert l'univers des énergies renouvelables, leur fonctionnement, leurs formes variées, et surtout leur importance dans le monde d'aujourd'hui. Que ce soit le soleil, le vent, l'eau ou la biomasse, ces sources naturelles offrent une alternative propre aux énergies fossiles, de plus en plus limitées et polluantes.

Cependant, intégrer ces énergies dans les réseaux électriques actuels n'est pas sans difficulté. Leur caractère variable et imprévisible oblige les ingénieurs à repenser la façon dont l'électricité est produite, transportée et consommée. C'est un défi technique, mais aussi une belle opportunité d'innover pour construire un avenir énergétique plus durable.

Dans les prochains chapitres, nous allons justement explorer comment un réseau électrique – en l'occurrence le modèle IEEE à 14 nœuds – se comporte lorsqu'on y introduit des sources renouvelables. Cette étude nous permettra de mieux comprendre les impacts concrets de la transition énergétique sur la structure et le fonctionnement des réseaux



***Chapitre III :
Étude du
réseau IEEE 14
nœuds***

III.1. Présentation du réseau IEEE 14 nœuds

III.1.1. Description de la Topologie du Système

Le système de test IEEE à 14 nœuds est une référence standardisée largement utilisée pour valider les techniques et les outils d'analyse des systèmes électriques. Il représente un modèle simplifié d'une partie du réseau électrique américain tel qu'il existait dans les années 1960. Bien que relativement petit, ce système capture les caractéristiques essentielles d'un réseau de transport réel et convient aux études sur le flux d'énergie, la stabilité, l'analyse des défauts et l'intégration des énergies renouvelables.

Le réseau se compose de 14 jeux de barres, 5 générateurs synchrones (sur les jb 1, 2, 3, 6 et 8), 11 charges et 20 branches (y compris les lignes de transmission et les transformateurs). La topologie comprend à la fois des jb slack, PV (contrôlés en tension) et PQ (charge), permettant différents types d'études de flux de puissance.

La topologie globale du système peut être décrite comme suit :

Le jeu de barre 1 est le Slack bus (jb de référence), équipé d'un générateur et sert de point principal d'injection de puissance.

Les jeux de barres 2, 3, 6 et 8 sont des jb PV, chacun associé à un générateur régulant l'amplitude de la tension tout en fournissant de la puissance active.

Les jeux barres restants sont des jb PQ, agissant comme des points de charge qui tirent la puissance active et réactive du réseau.

Plusieurs transformateurs avec des capacités de changement de prises sont intégrés, notamment dans les lignes entre les jb 4-7 et 4-9.

Les lignes de transmission interconnectent les bus pour former un réseau maillé, ce qui améliore la fiabilité et la flexibilité du flux d'énergie.

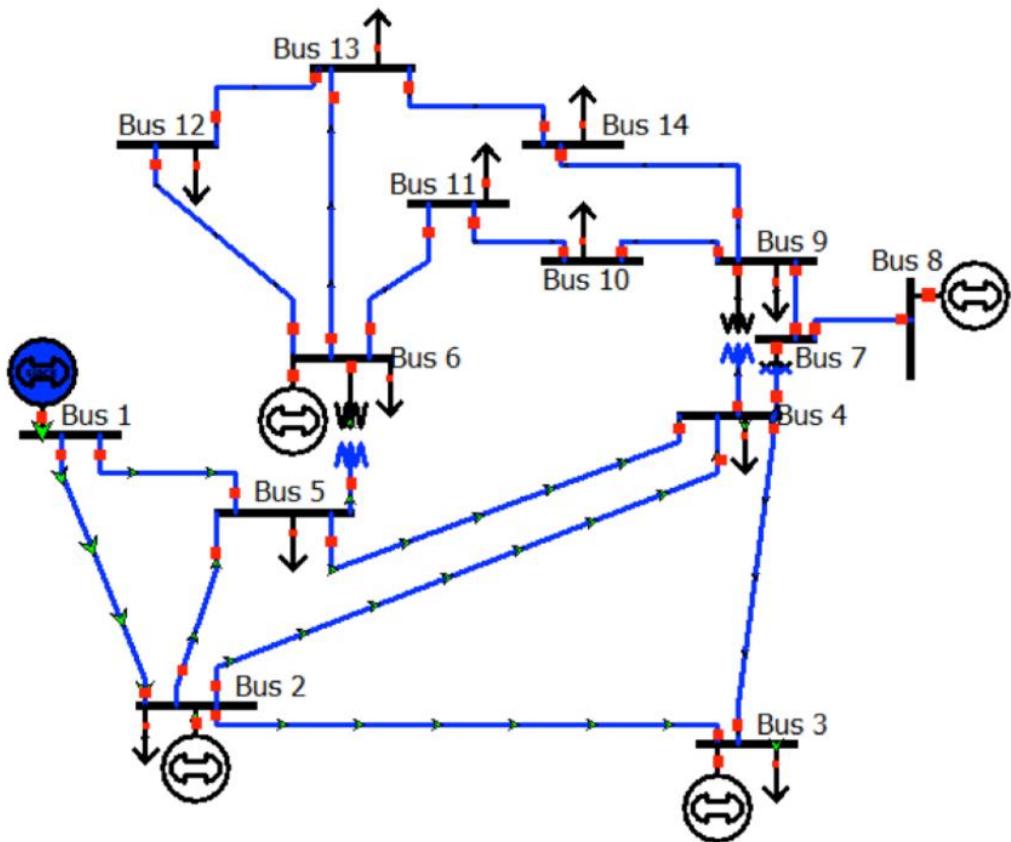


Fig (III.1) ; Schéma du Réseau IEEE 14 nœuds

Tableau (III.1) : Les caractéristiques de réseau 14 JB

Nombre des jeux de barres	Nombre des lignes	Nombre des transformateurs	Nombre des générateurs	Nombre des charges
14	20	3	5	11

Le système IEEE 14-nœuds n'est pas basé géographiquement mais est topologiquement réaliste. Il sert de banc d'essai pour l'analyse des flux de charge, les études de défauts, les stratégies d'optimisation et de contrôle, et il est particulièrement utile pour tester l'intégration des sources d'énergie renouvelables dans les réseaux existants.

III.2.2. Les données du système

Cette section présente les principales données nécessaires à la simulation et à l'analyse du système de test IEEE 14-bus. Les informations comprennent des paramètres électriques associés aux bus, aux lignes de transmission et aux générateurs.

1- Données des jeux de barres

Les données de bus sont constituées des informations nécessaires aux études de flux de charge, types de bus, spécifications de tension et valeurs de charge. Une version simplifiée des données du IEEE 14 nœuds est présentée ci-dessous.

Tableau (III.2) : Données des jeux de barres du réseau IEEE standard à 14 nœuds

Bus N°	Type de Bus	P charge (p. u)	Q charge (p. u)	V m (p. u)	V a (rad)
1	Slack	0	0	1.060	0
2	PV	0.217	0.127	1.045	0
3	PQ	0.942	0.190	1.010	0
4	PQ	0.478	-0.039	1	0
5	PQ	0.076	0.016	1	0
6	PQ	0.112	0.075	1.070	0
7	PQ	0	0	1	0
8	PQ	0	0	1.090	0
9	PQ	0.295	0.166	1	0
10	PQ	0.090	0.058	1	0
11	PQ	0.035	0.018	1	0
12	PQ	0.061	0.016	1	0
13	PQ	0.135	0.058	1	0
14	PQ	0.149	0.050	1	0

2-Données des Lignes

Le tableau ci-dessous répertorie les lignes de transmission interconnectant les bus dans le système de IEEE 14 nœuds. Chaque ligne est représentée avec les paramètres suivants :

R (u. p.) : Résistance

X (u. p.) : Réactance

B (p. u.) : Susceptance totale de charge de ligne

Toutes les valeurs sont données par unité (p. u.) sur une base de 100 MVA et la base de tension de chaque bus est supposée être de 69 kV ou 138 kV selon la région.

Tableau (III.3) : Données des lignes de transport du réseau IEEE standard à 14 nœuds

Line N°	From Bus	To Bus	R (p. u)	X (p. u)	B/2 (p. u)
1	1	2	0.01938	0.05917	0.02640
2	1	5	0.05403	0.22304	0.02190
3	2	3	0.04699	0.19797	0.01870
4	2	4	0.05811	0.17632	0.02460
5	2	5	0.05695	0.17388	0.01700
6	3	4	0.06701	0.17103	0.01730
7	4	5	0.01335	0.04211	0.00640
8	4	7	0	0.20912	0
9	4	9	0	0.55618	0
10	5	6	0	0.25202	0
11	6	11	0.09498	0.19890	0
12	6	12	0.12291	0.25581	0
13	6	13	0.06615	0.13027	0
14	7	8	0	0.17615	0
15	7	9	0	0.25653	0

16	9	10	0.03181	0.08450	0
17	9	14	0.12711	0.27038	0
18	10	11	0.08205	0.19207	0
19	12	13	0.22092	0.19988	0
20	13	14	0.17093	0.34802	0

3- Données des générateurs

Ce tableau fournit les limites de puissance active et réactive de chaque générateur, ainsi que le bus auquel il est connecté et sa consigne de tension.

Tableau (III.4) : Données des générateurs du réseau IEEE standard à 14 nœuds

Gen. Bus	PG (p. u)	QG (p. u)	Q min (p. u)	Q max (p. u)	V set (p. u)
1	2.324	-0.169	-0.2	0.1	1.060
2	0.400	0.424	-0.4	0.5	1.045
3	0	0.234	0	0.4	1.010
6	0	0.122	-0.06	0.24	1.070
8	0	0.174	-0.06	0.24	1.090

Tableau (III.5) : coefficients de coût des générateurs

Generator	Bus	a (\$/MW ² ·h)	b (\$/MWh)	c (\$/h)
G1	1	0.005	2.450	105.0
G2	2	0.005	3.510	44.1
G3	3	0.005	3.890	40.6
G4	6	0.005	4.000	50.0
G5	8	0.005	4.100	55.0

III.3. Plateformes de simulation utilisées

Présentation de PSAT sous MATLAB

PSAT (Power System Analysis Toolbox) est un outil open source développé sous l'environnement MATLAB/Simulink, dédié à l'analyse et à la simulation des réseaux électriques. Il permet d'effectuer diverses études telles que le calcul de l'écoulement de puissance, l'optimisation de la production, l'analyse de stabilité et les simulations dynamiques. Grâce à son interface graphique et à sa compatibilité avec les systèmes de test standard (comme IEEE 14 bus), PSAT constitue un outil pédagogique et de recherche performant, particulièrement adapté à l'étude de l'impact des énergies renouvelables sur le comportement des réseaux électriques.

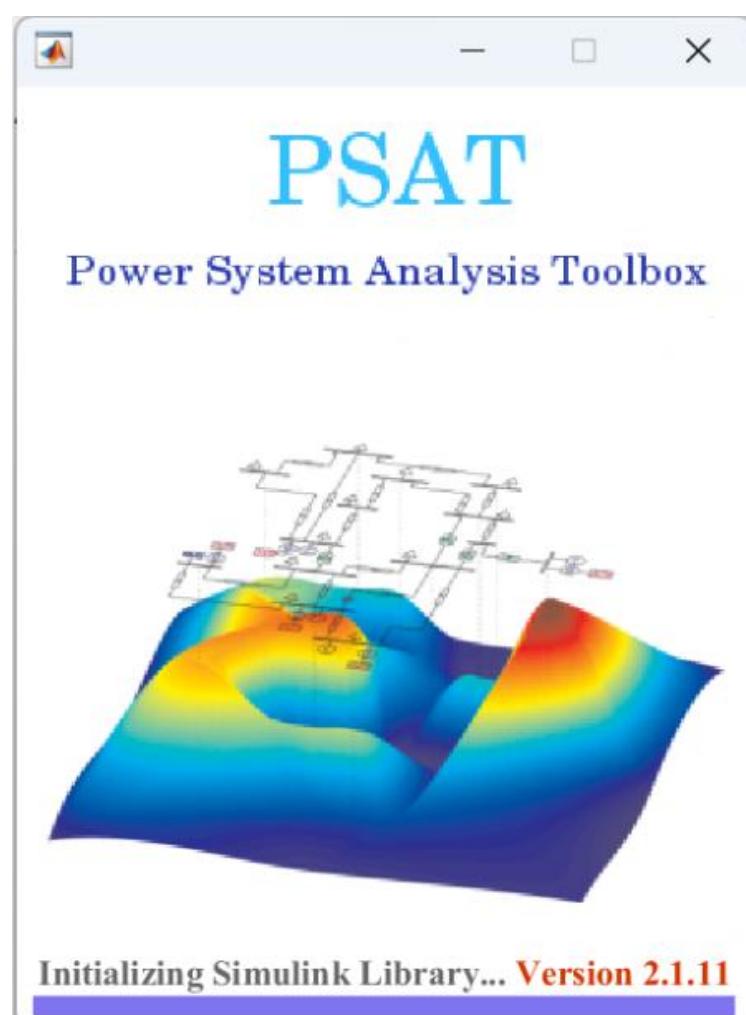


Fig (III.2) : La première fenêtre de PSA

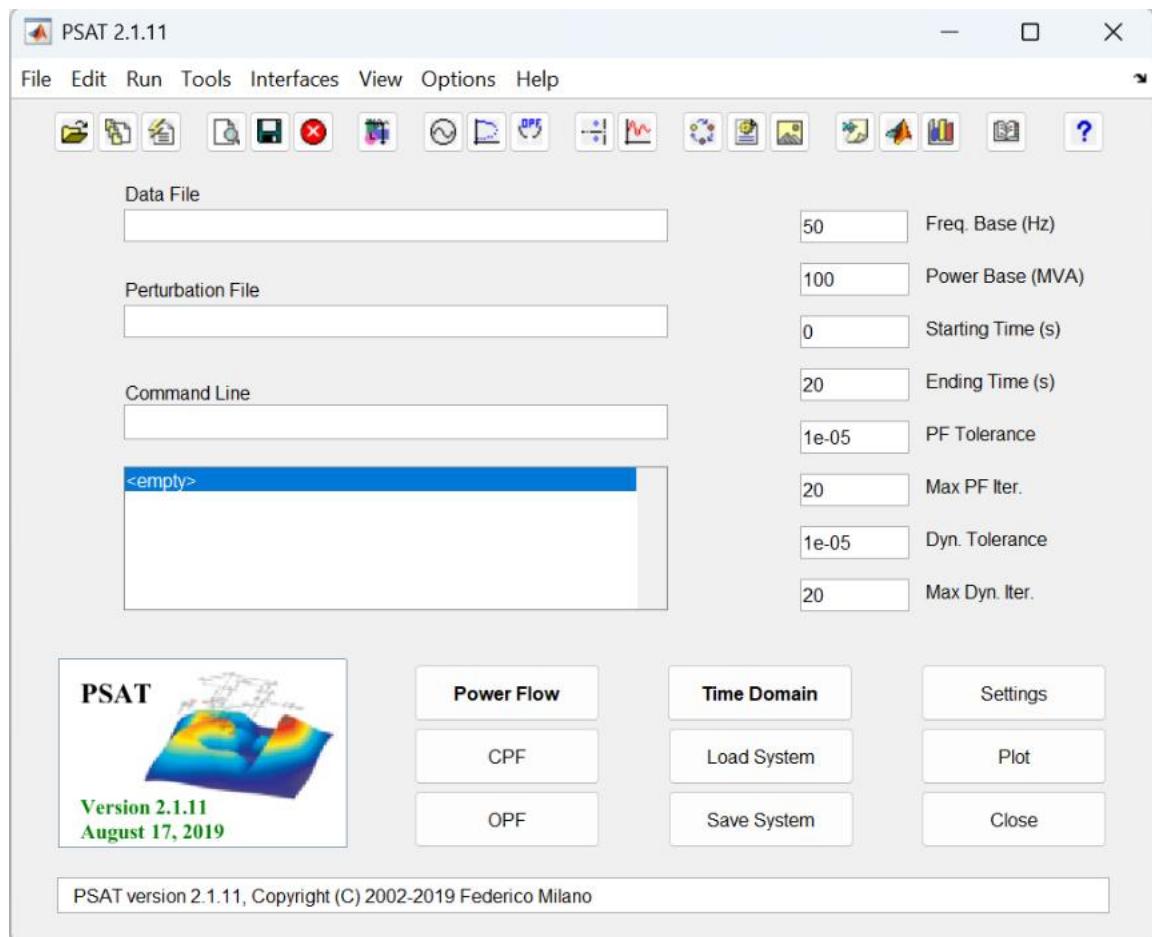


Fig (III.3) : La fenêtre principale du PSAT.

Présentation de Powerworld

PowerWorld Simulator est un logiciel professionnel d'analyse des réseaux électriques en régime permanent et transitoire, largement utilisé dans l'enseignement, la recherche et l'industrie. Il permet de visualiser et de simuler de manière intuitive le comportement des systèmes électriques complexes, grâce à une interface graphique conviviale et interactive. PowerWorld est particulièrement adapté à l'étude de l'écoulement de puissance, de la stabilité transitoire, de la sécurité du réseau et de l'impact des énergies renouvelables. Il prend en charge les systèmes de test standards (comme IEEE 14, 30, 118 bus) et offre des outils puissants pour l'analyse de scénarios, la formation et la prise de décision.

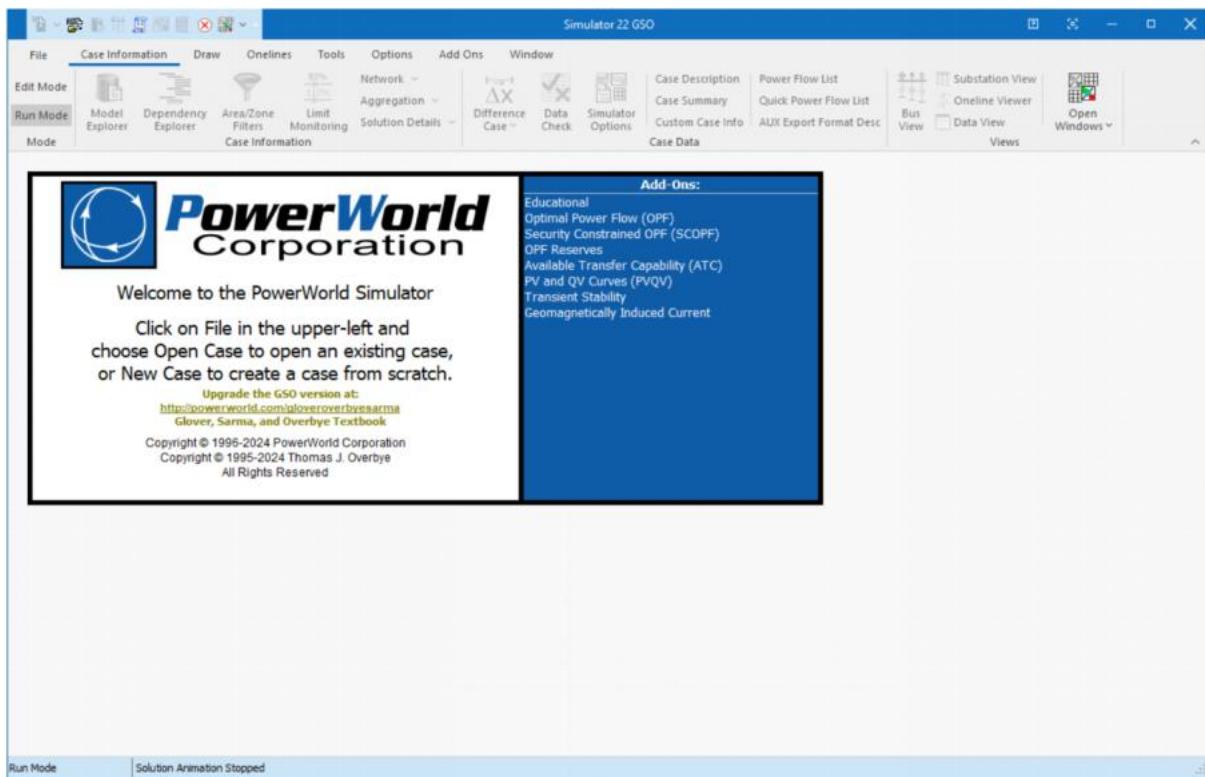


Fig (III.4) : La fenêtre principale du Powerworld

III.4. Cas normal : Réseau standard

D'après les données du réseau IEEE standard à 14 nœuds, nous avons utilisé la programmation sur logiciel PSAT

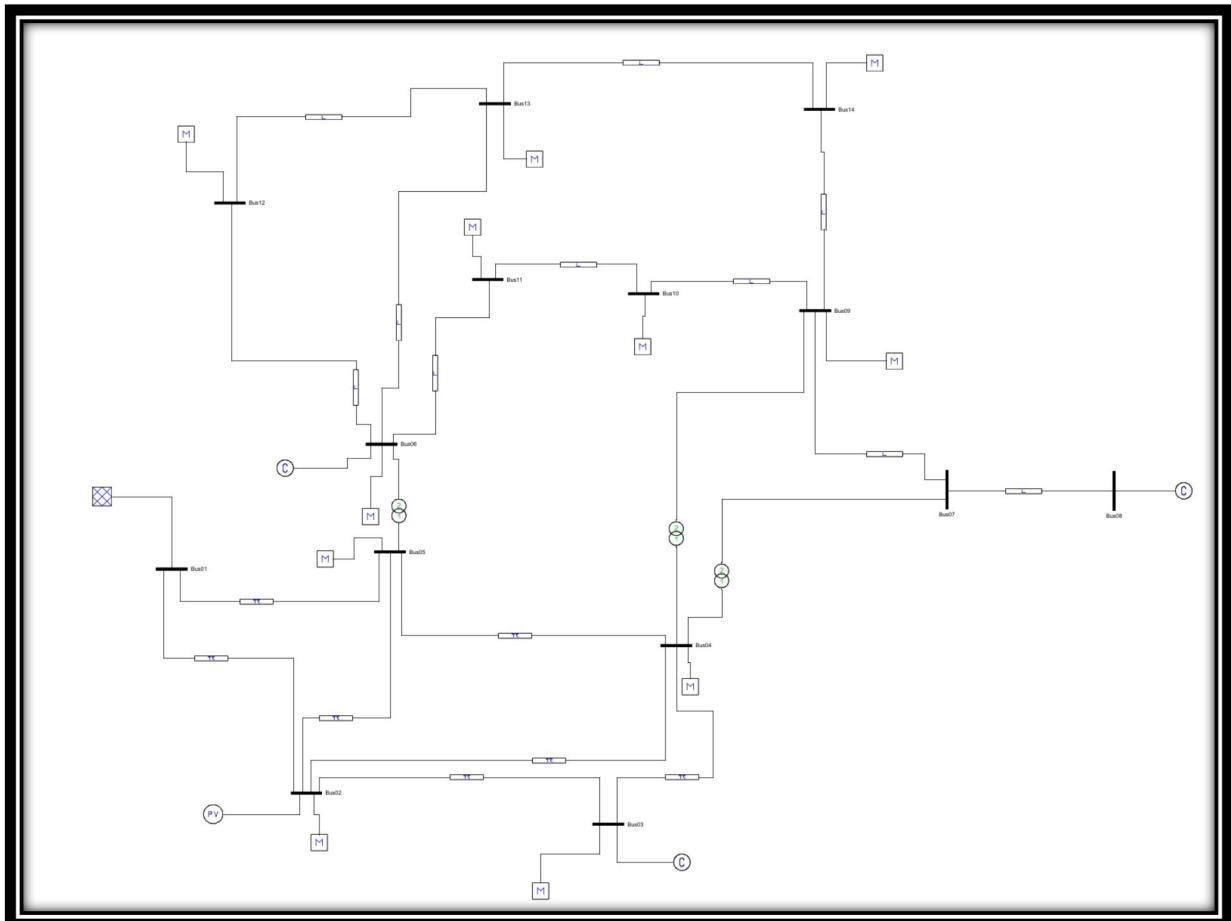


Fig (III.5) : Le réseau IEEE14 nœud standard par logiciel PSAT

Tableau (III.6) : Résultats de réseau IEEE 14 nœud cas normal

Bus	V m (p. u)	P gen (p. u)	Q gen (p. u)	P charge (p. u)	Q charge (p. u)
1	1.06000	2.3273	-0.217		
2	1.04500	0.4000	0.4219	0.2170	0.1270
3	1.01000	0.0000	0.2170	0.9420	0.1900
4	1.01832			0.4780	0.0390

5	1.02143			0.0760	0.0160
6	1.07000	0.0000	0.1020	0.1120	0.0750
7	1.02216				
8	1.09000	0.0000	0.1760		
9	0.99210			0.2950	0.1660
10	0.99209			0.0900	0.0580
11	1.00125			0.0350	0.0180
12	0.99826			0.0610	0.0160
13	0.97743			0.1350	0.0580
14	0.96359			0.1490	0.0500

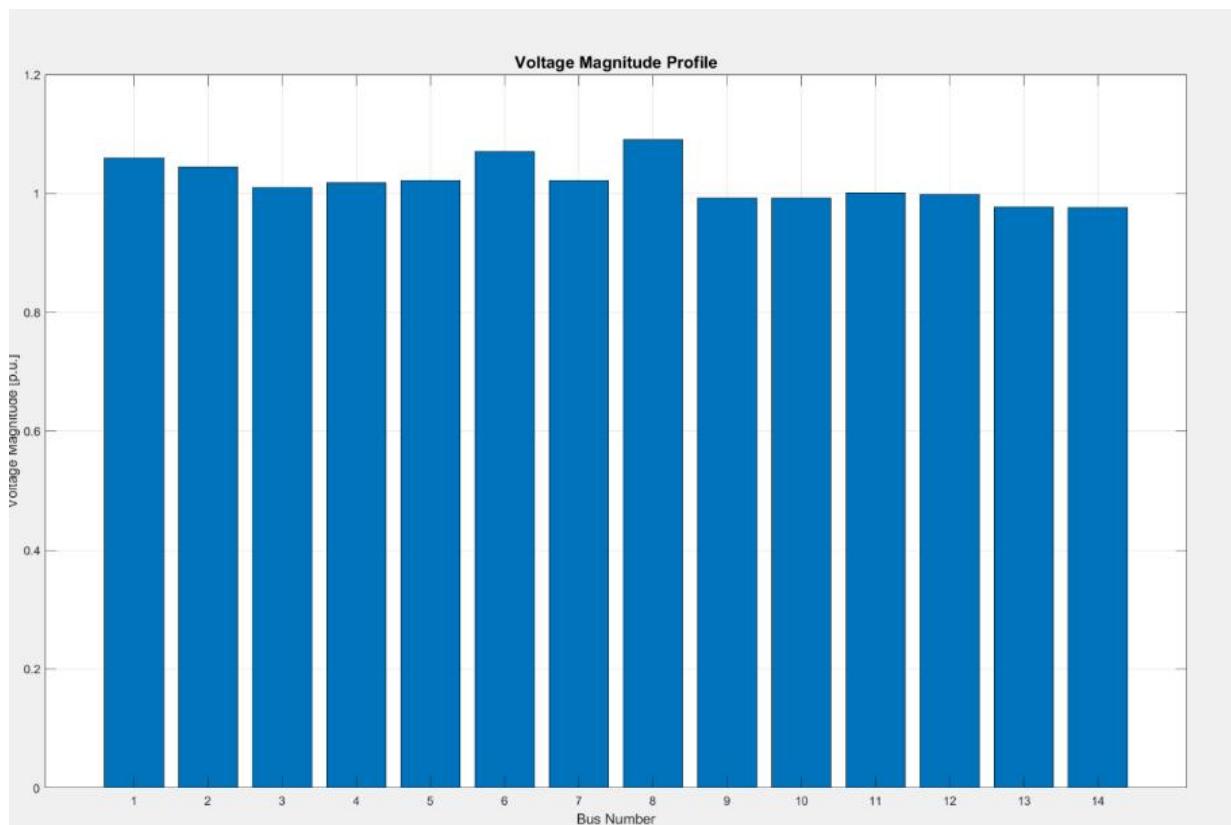


Fig (III.6) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau

Number	Name	PU Volt	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1 1		1.06000			232.61	-17.22
2 2		1.04500	21.70	12.70	40.00	43.99
3 3		1.01000	94.20	19.00	0.00	26.51
4 4		1.01526	47.80	-3.90	0.00	0.00
5 5		1.02088	7.60	1.60		
6 6		1.01708	11.20	7.50	0.00	24.00
7 7		1.01826				
8 8		1.05808			0.00	24.00
9 9		0.99635	29.50	16.60		
10 10		0.99218	9.00	5.80	0.00	0.00
11 11		1.00084	3.50	1.80		
12 12		1.00096	6.10	1.60		
13 13		0.99543	13.80	5.80	0.00	0.00
14 14		0.97691	14.90	5.00		

Fig (III.7) : Résultats de réseau IEEE 14 nœud cas normal de powerworld

D'après les résultats du tableau, il ressort que l'ensemble des nœuds du réseau présentent des niveaux de tension situés dans les limites acceptables, ce qui témoigne d'un bon état d'équilibre du réseau électrique étudié.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré en détail le réseau de test IEEE 14 nœuds, largement utilisé dans les études de performance et d'analyse des systèmes électriques. Nous avons présenté sa structure, ses composants principaux, ainsi que ses paramètres techniques. Grâce à cette modélisation, il a été possible d'évaluer le profil de tension aux différents nœuds, un indicateur essentiel pour la stabilité et la qualité de l'alimentation électrique.

L'analyse menée nous a permis de mieux comprendre comment se comporte un réseau dans des conditions normales, sans sources de production renouvelables. Ce diagnostic de départ est indispensable pour mesurer ensuite les effets de l'intégration des énergies renouvelables, notamment sur les niveaux de tension, les pertes en ligne ou encore la charge des transformateurs.

Cette étude servira donc de référence de comparaison pour les simulations à venir. Dans le chapitre suivant, nous allons introduire différentes sources d'énergies renouvelables dans ce réseau — telles que le solaire ou l'éolien — afin d'en observer l'impact réel sur son comportement électrique global.



***Chapitre IV :
Intégration des
énergies
renouvelables
dans le réseau
IEEE 14 nœuds***

IV.1. Introduction

L'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques devient essentielle face aux enjeux environnementaux et énergétiques actuels. Dans ce chapitre, nous allons analyser l'impact de l'ajout de sources telles que le solaire ou l'éolien dans le réseau IEEE 14 nœuds.

Ces énergies, bien que propres, présentent des défis techniques liés à leur variabilité. L'objectif est donc d'évaluer leur effet sur le profil de tension, la stabilité du réseau et son efficacité, en s'appuyant sur des simulations pour déterminer une stratégie d'intégration optimale.

IV.2. Réseau IEEE 14 nœud avec évolutions des charges

En considérant une croissance annuelle des charges de l'ordre de 10 %, on atteint un 50 % d'augmentation de la charge initiale après une période de cinq ans. Dans ce contexte, il est possible d'observer une variation significative des tensions aux différents nœuds de charge, ainsi qu'une modification notable de l'écoulement des puissances actives et réactives à travers les lignes du réseau.

Tableau (IV.1) : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau de chargés en fonctionnel l'évolution des charges.

Bus	V m (p. u)	P gen (p. u)	Q gen (p. u)	P load (p. u)	Q load (p. u)
1	1.06000	3.8902	1.1500		
2	1.04500	0.400	0.500	0.3255	0.1905
3	1.01000	0.00	0.400	1.4130	0.2850
4	0.92389			0.7170	-0.0585
5	0.93671			0.1140	0.0240
6	1.07000	0.00	0.240	0.1680	0.1125
7	0.86243				
8	1.09000	0.00	0.240		
9	0.82541			0.4425	0.2490

10	0.83278			0.1350	0.0870
11	0.85043			0.0525	0.0270
12	0.84873			0.0915	0.0240
13	0.81342			0.2070	0.0870
14	0.79892			0.2235	0.0750

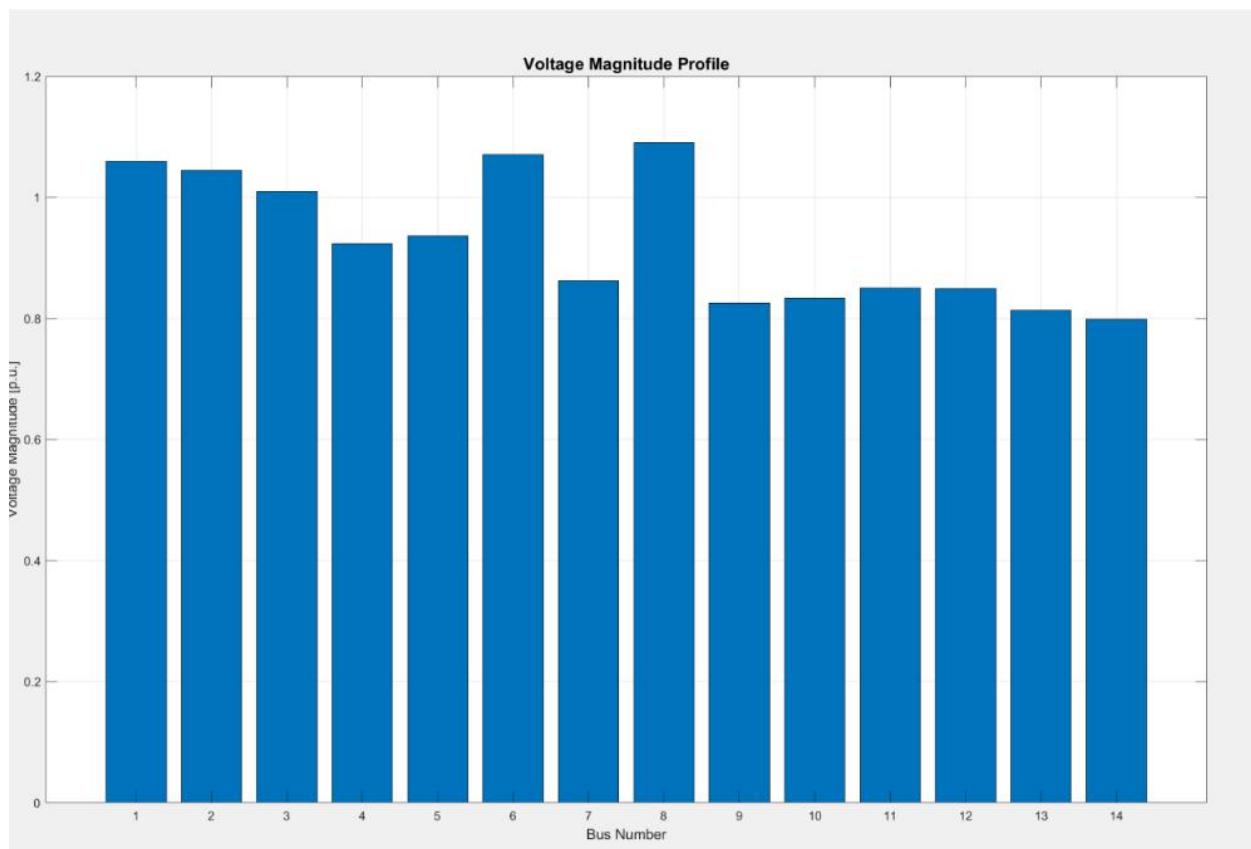


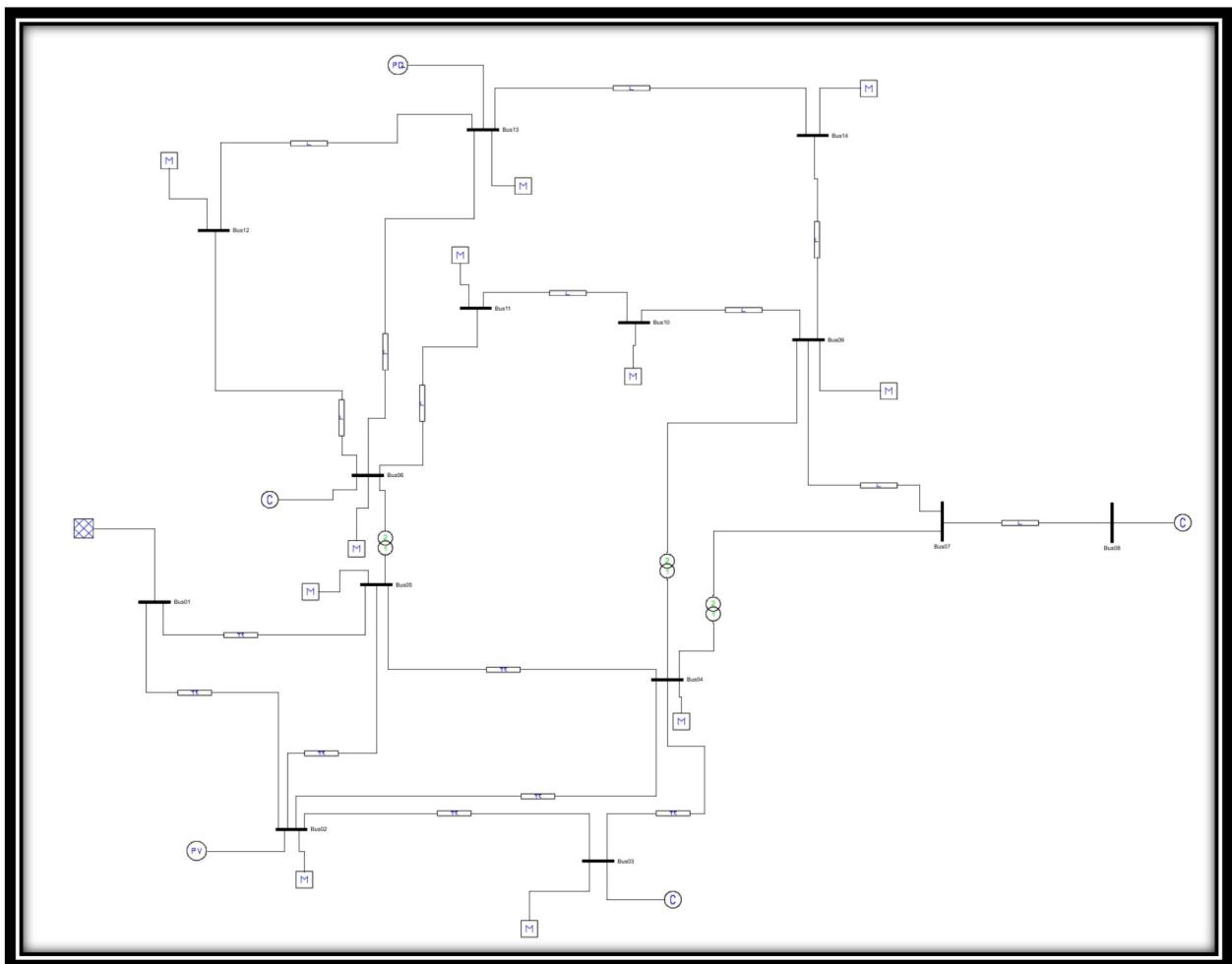
Fig (IV.1) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau

Number	Name	PU Volt	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1	1	1.06000			388.92	114.85
2	2	1.04500	32.55	19.05	40.00	50.00
3	3	1.01000	141.30	28.50	0.00	40.00
4	4	0.90312	71.70	-5.85		
5	5	0.91840	11.40	2.40		
6	6	1.07000	16.80	11.25	0.00	24.00
7	7	0.87522				
8	8	1.09000			0.00	24.00
9	9	0.83686	44.25	24.90	0.00	0.00
10	10	0.82817	13.50	8.70		
11	11	0.84100	5.25	2.70		
12	12	0.83841	9.15	2.40		
13	13	0.82870	20.70	8.70	0.00	0.00
14	14	0.79788	22.35	7.50		

Fig (IV.2) : Résultats de réseau IEEE 14 nœud cas évolutions des charges de powerworld

D'après les résultats de l'écoulement de puissance obtenus, et plus particulièrement les plans de tensions tableau (III.1), on remarque clairement que les tensions dans les nœuds de charge 7, 9, 10, 11, 12, 13 et 14 sortent des écarts admissibles.

IV.3. Intégration d'une source solaire au nœud 13

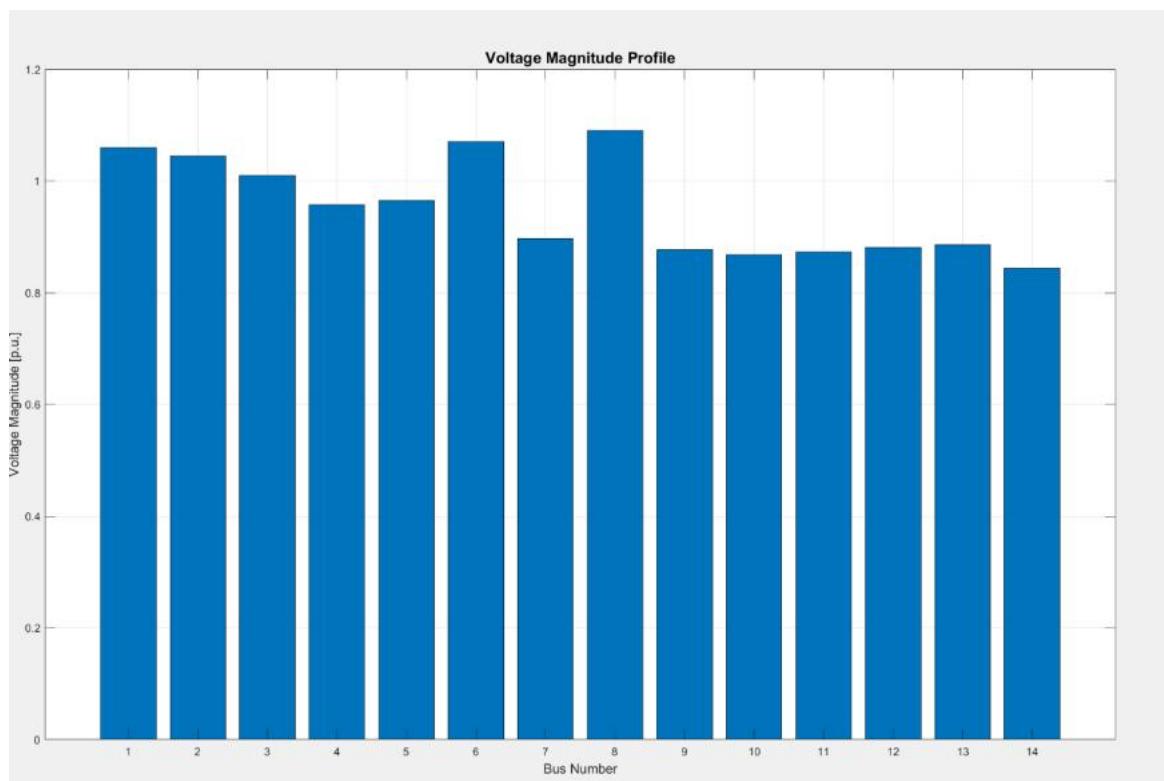


Fig(IV.3) : Le réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 13) par logiciel PSAT

Tableau (IV.2) : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 13)

Bus	V m (p. u)	P gen (p. u)	Q gen (p. u)	P load (p. u)	Q load (p. u)
1	1.06000	3.5077	0.7294		
2	1.04500	0.400	0.500	0.3255	0.1905
3	1.01000	0.00	0.400	1.413	0.285
4	0.95739			0.717	-0.0585
5	0.96528			0.114	0.0240

6	1.07000	0.00	0.2400	0.1680	0.1125
7	0.89725				
8	1.09000	0.00	0.240		
9	0.87652			0.4425	0.249
10	0.86783			0.1350	0.087
11	0.87341			0.0525	0.0270
12	0.88124			0.0915	0.0240
13	0.88562	0.300	0.00	0.2070	0.0870
14	0.84426			0.2235	0.0750



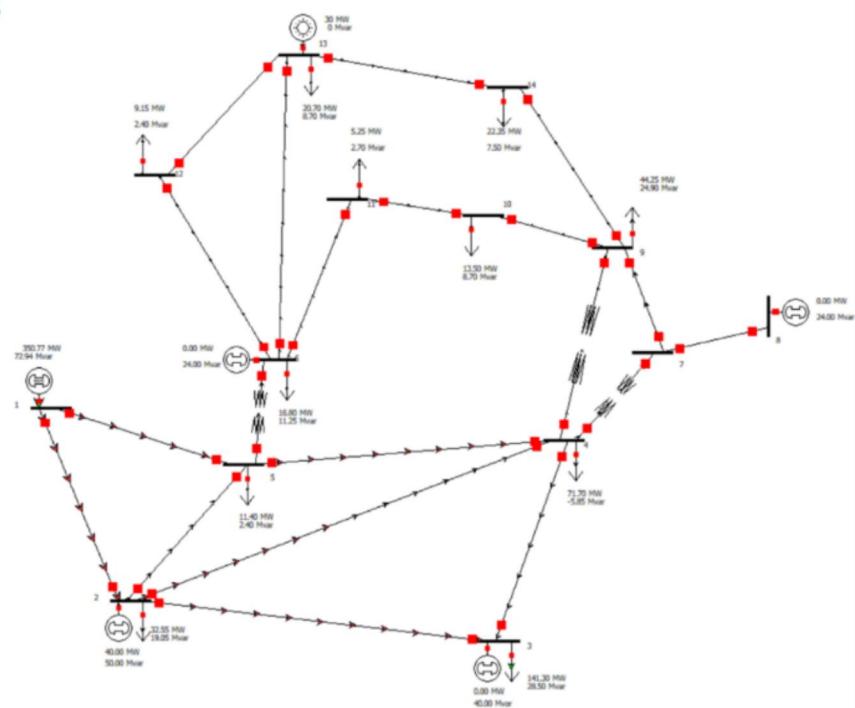
Fig(IV.4) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau

coût horaire total = 1977.71 \$/h

coût annuel = 17324739.6\$

charge totale = 388.95 MW

MW pertes = 31.82 MW



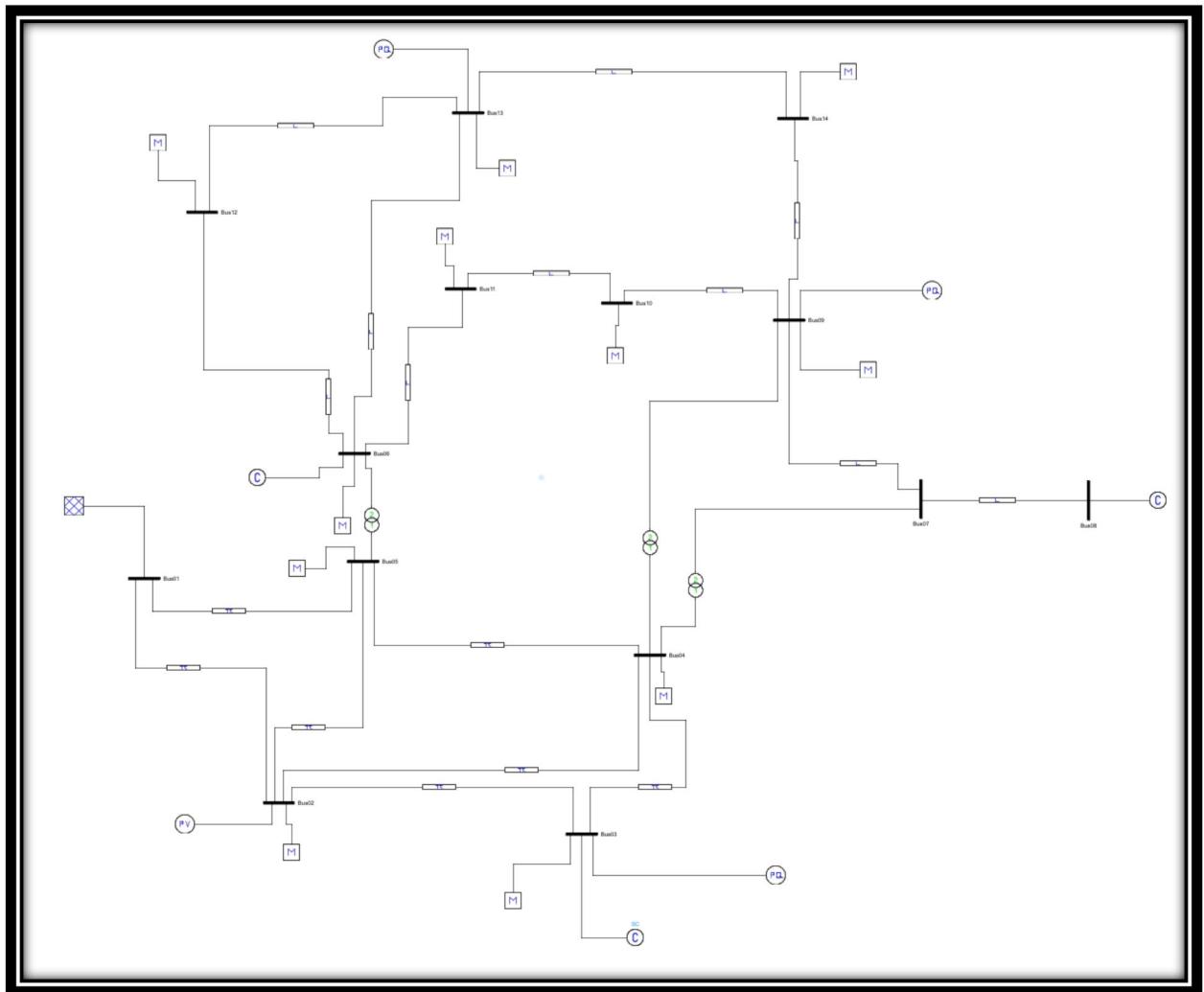
Fig(IV.5) : Le réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 13) par logiciel powerworld

Number	Name	PU Volt	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1 1		1.06000			350.69	72.87
2 2		1.04500	32.55	19.05	40.00	50.00
3 3		1.01000	141.30	28.50	0.00	40.00
4 4		0.93737	71.70	-5.85		
5 5		0.95178	11.40	2.40		
6 6		1.07000	16.80	11.25	0.00	24.00
7 7		0.91563				
8 8		1.09000			0.00	24.00
9 9		0.87966	44.25	24.90	0.00	0.00
10 10		0.87259	13.50	8.70		
11 11		0.88805	5.25	2.70		
12 12		0.89503	9.15	2.40		
13 13		0.89592	20.70	8.70	30.00	0.00
14 14		0.85330	22.35	7.50		

Fig(IV.6) : Résultats de réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 13) de powerworld

Le tableau (III.2) présente l'évolution des tensions nodales dans le scénario où une source solaire est intégrée au niveau du nœud 13 du réseau. On observe une amélioration globale des tensions nodales, qui, pour la plupart, se situent désormais dans les limites admissibles. Toutefois, certaines tensions restent en dehors de ces limites, notamment au niveau des nœuds 9, 10, 11, 12, 13 et 14.

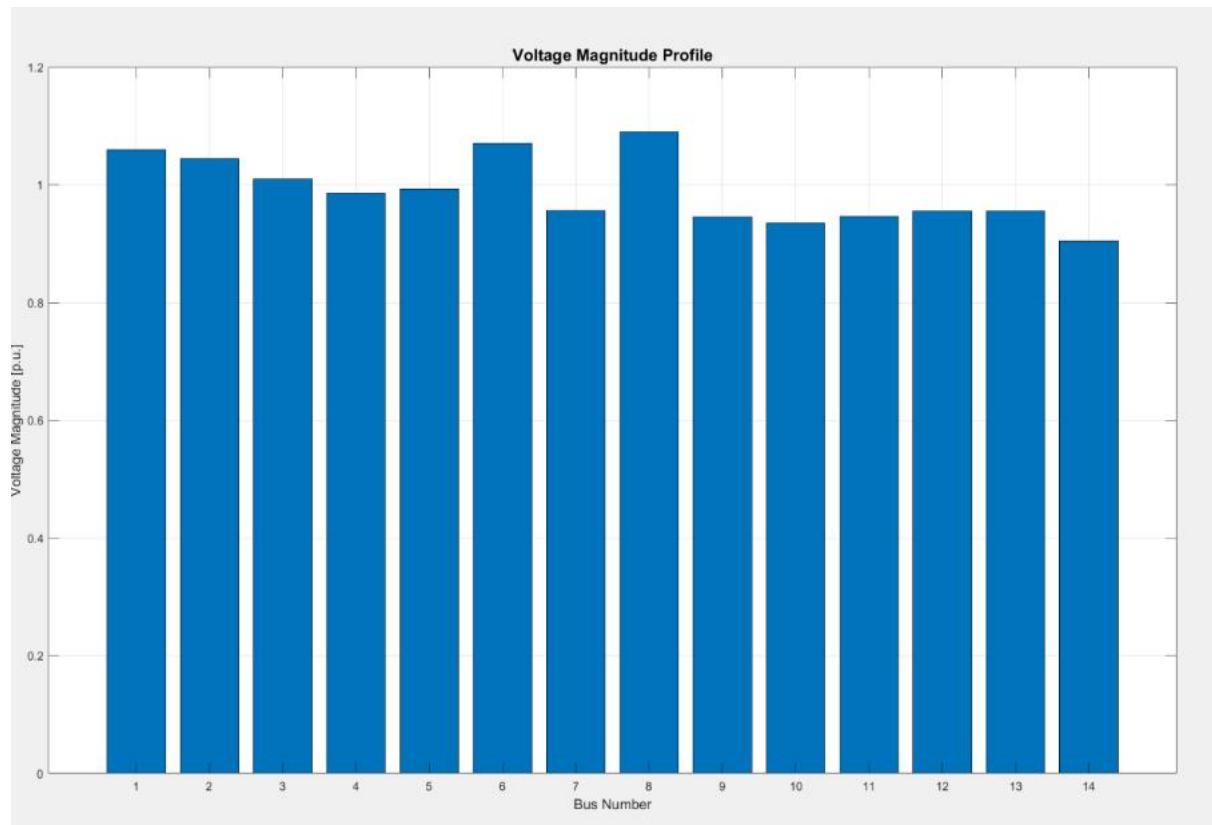
IV.4. Intégration d'une source solaire au nœuds 3, 9 et 13



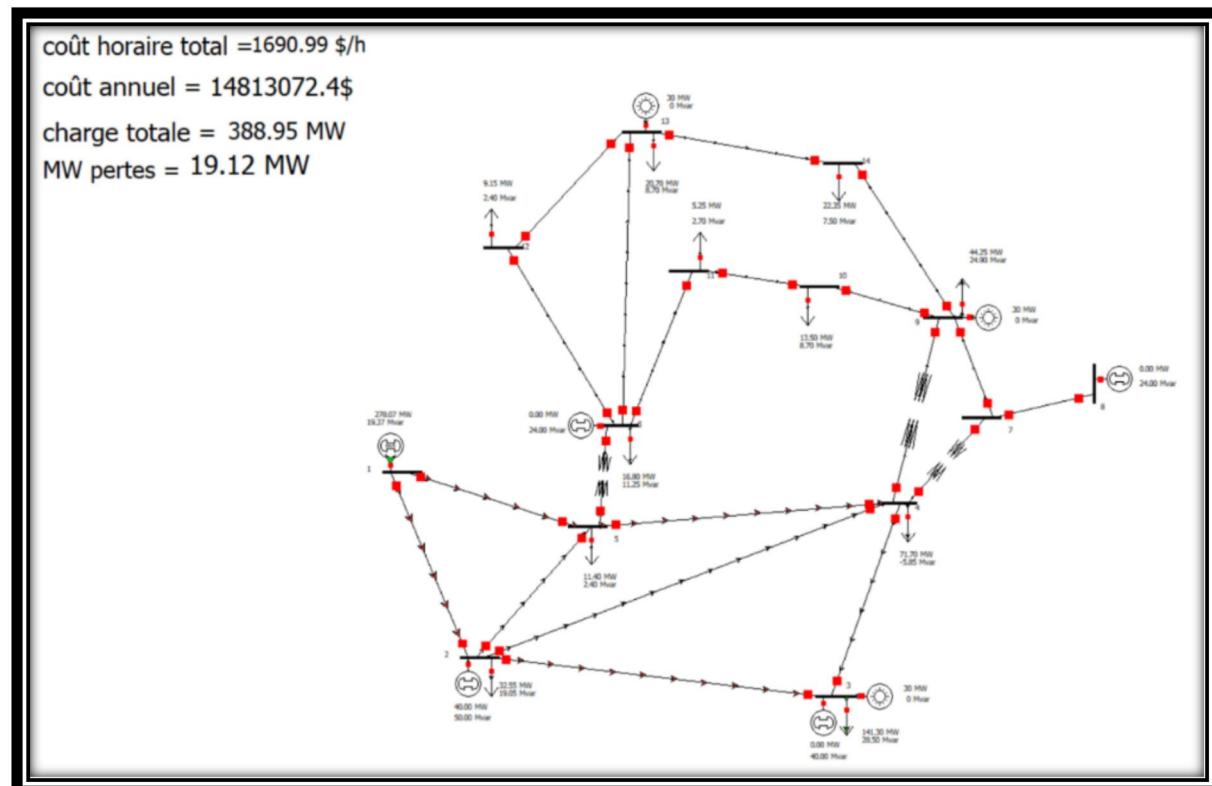
Fig(IV.7) : Le réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 3, 9 et 13) par logiciel PSAT

Tableau (IV.3) : Résultats de l'écoulement de puissance dans le réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 3, 9 et 13)

Bus	V m (p. u)	P gen (p. u)	Q gen (p. u)	P load (p. u)	Q load (p. u)
1	1.06000	2.7807	0.1937		
2	1.04500	0.400	0.500	0.3255	0.1905
3	1.01000	0.300	0.400	1.4130	0.2850
4	0.98617			0.7170	-0.0585
5	0.99282			0.114	0.024
6	1.07000	0.00	0.240	0.168	0.1125
7	0.95638				
8	1.09000	0.00	0.240		
9	0.94536	0.300	0.00	0.4425	0.249
10	0.93512			0.135	0.087
11	0.94597			0.525	0.270
12	0.95491			0.915	0.240
13	0.95542	0.300	0.00	0.207	0.087
14	0.90432			0.2235	0.075



Fig(I.8) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau



Fig(IV.9) : Le réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 3, 9 et 13) par logiciel powerworld

Number	Name	PU Volt	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1	1	1.06000			278.07	19.36
2	2	1.04500	32.55	19.05	40.00	50.00
3	3	0.98027	141.30	28.50	30.00	40.00
4	4	0.98271	71.70	-5.85		
5	5	0.99150	11.40	2.40		
6	6	1.07000	16.80	11.25	0.00	24.00
7	7	0.96880				
8	8	1.09000			0.00	24.00
9	9	0.93633	44.25	24.90	30.00	0.00
10	10	0.92834	13.50	8.70		
11	11	0.93917	5.25	2.70		
12	12	0.94132	9.15	2.40		
13	13	0.94359	20.70	8.70	30.00	0.00
14	14	0.90840	22.35	7.50		

Fig(IV.10) : Résultats de réseau IEEE14 (injection de source solaire au nœud 3, 9 et 13) de powerworld

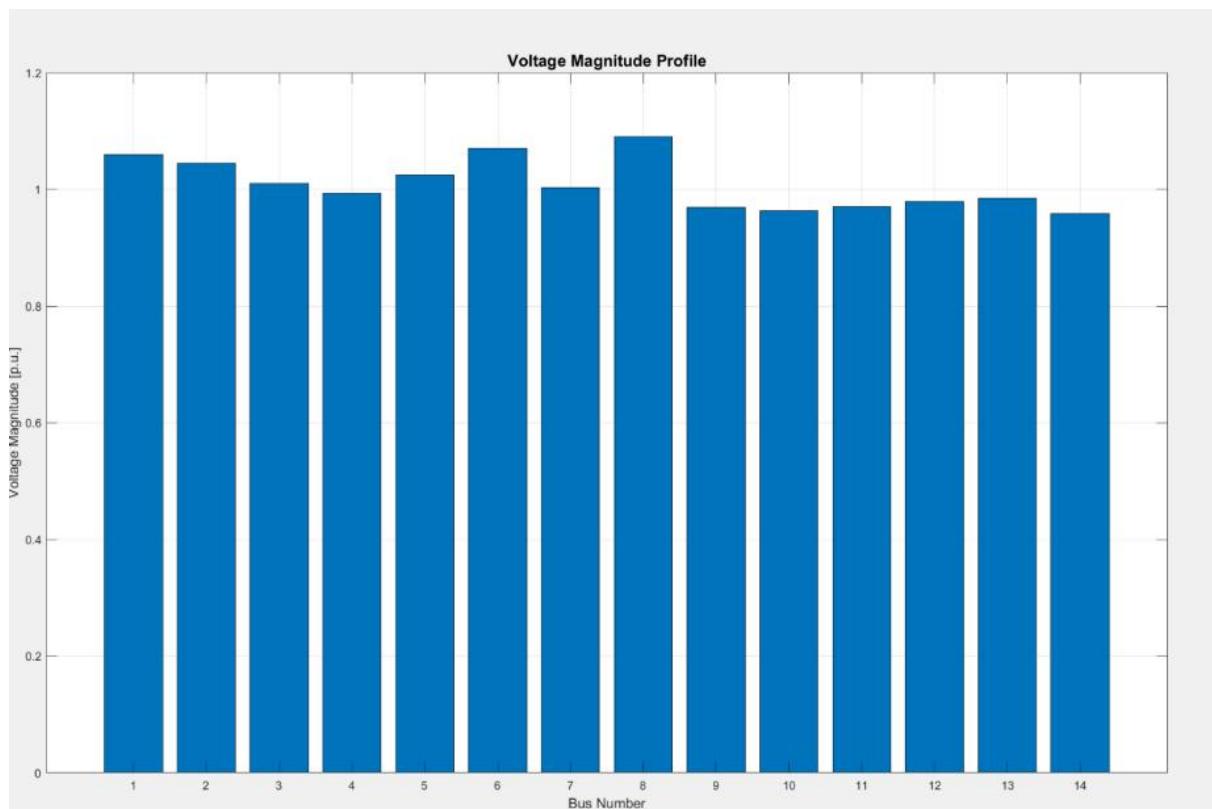
Le profil de tension obtenu sur l'ensemble des bus est globalement satisfaisant, avec des valeurs qui restent dans les limites standards d'exploitation. Toutefois, on observe que certaines tensions sont très proches des bornes limites. Cela indique que le réseau fonctionne actuellement dans un état stable, mais avec une marge de sécurité réduite. Une légère perturbation, telle qu'une variation de charge ou une fluctuation de la production renouvelable, pourrait suffire à provoquer un dépassement des seuils admissibles.

IV.5. Augmentation de puissance intégrée d'une source solaire au nœuds

Tableau (IV.4) : Résultats de réseau IEEE14 après l'augmentation de puissance injectée

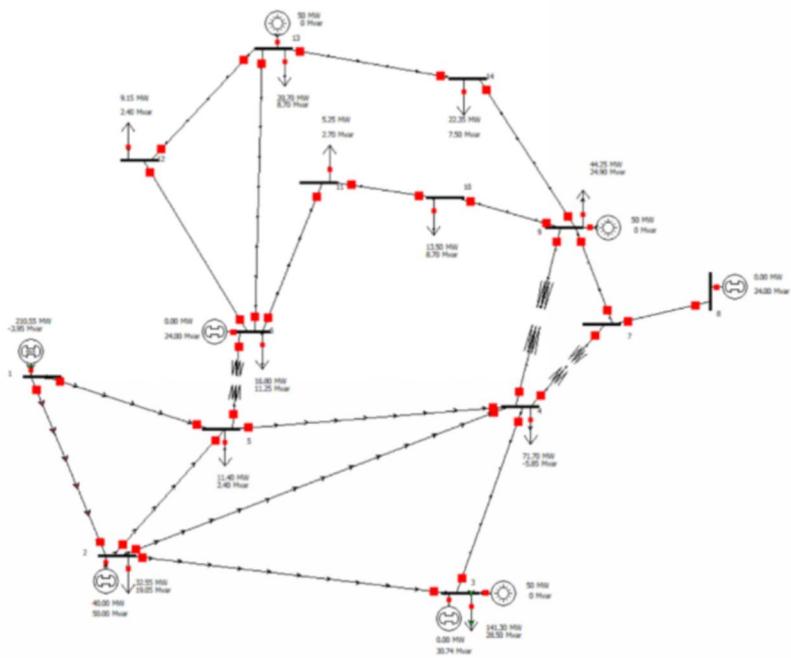
Bus	V m (p. u)	P gen (p. u)	Q gen (p. u)	P load (p. u)	Q load (p. u)
1	1.06000	2.1055	-0.0395		
2	1.04500	0.400	0.500	0.3255	0.1905
3	1.01000	0.500	0.400	1.413	0.2850
4	9.99267			0.717	-0.0585

5	1.02452			0.114	0.024
6	1.07000	0.00	0.240	0.168	0.1125
7	10.0249				
8	1.09000	0.00	0.240		
9	0.96892	0.500	0.00	0.4425	0.249
10	0.96359			0.135	0.087
11	0.97013			0.0525	0.027
12	0.97941			0.0915	0.024
13	0.98538	0.500	0.00	0.207	0.087
14	0.95834			0.2235	0.075



Fig(IV.11) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau

coût horaire total = 1480.61 \$/h
 coût annuel = 12970143.6\$
 charge totale = 388.95 MW
 MW pertes = 11.61 MW



Fig(IV.12) : Le réseau IEEE14 après l'augmentation de puissance injectée par logiciel powerworld

Number	Name	PU Volt	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1 1		1.06000			210.50	-10.86
2 2		1.04500	32.55	19.05	40.00	50.00
3 3		1.01000	141.30	28.50	50.00	37.22
4 4		1.01246	71.70	-5.85		
5 5		1.01882	11.40	2.40		
6 6		1.07000	16.80	11.25	0.00	24.00
7 7		1.00156				
8 8		1.09000			0.00	24.00
9 9		0.97062	44.25	24.90	50.00	0.00
10 10		0.96263	13.50	8.70		
11 11		0.97234	5.25	2.70		
12 12		0.97650	9.15	2.40		
13 13		0.98552	20.70	8.70	50.00	0.00
14 14		0.94721	22.35	7.50		

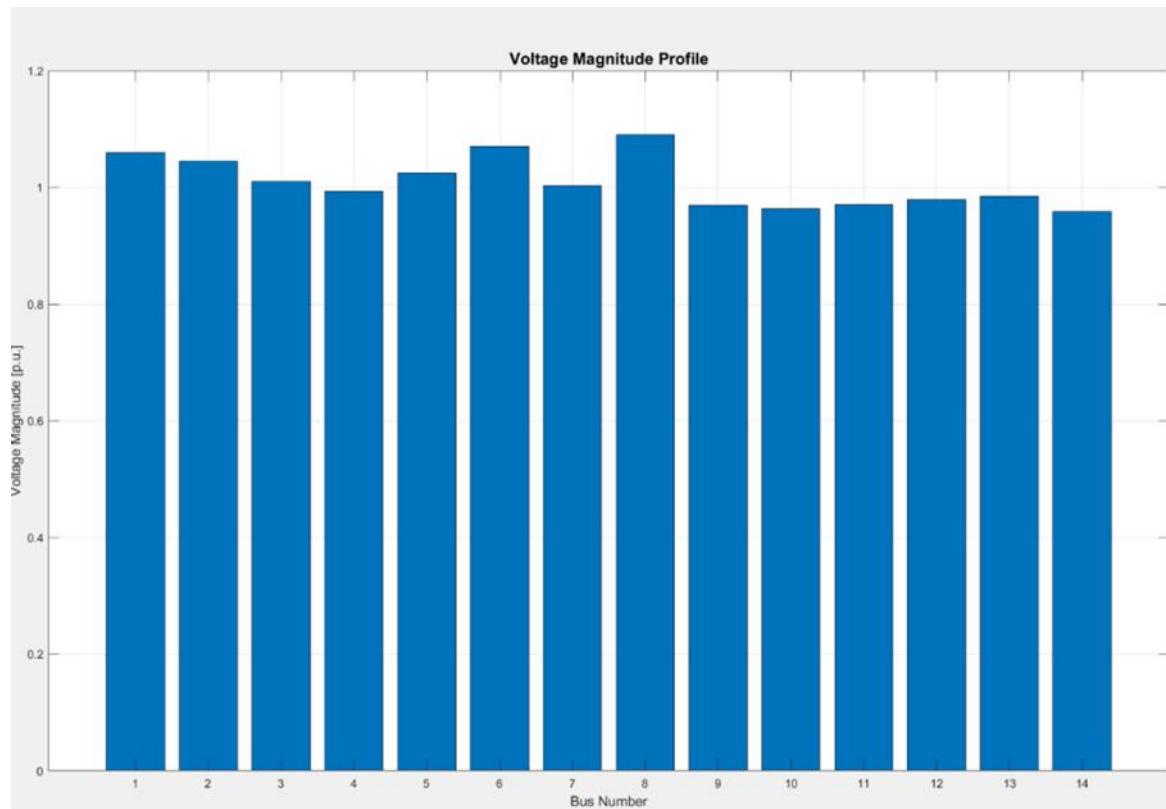
Fig(IV.13) : Résultats de réseau IEEE14 après l'augmentation de puissance injectée de powerworld

La figure(III.11) présente le profil de la magnitude des tensions aux 14 nœuds du réseau électrique. L'ensemble des tensions observées se situe dans la plage acceptable définie entre 0,90 p. u et 1,09 p. u ce qui indique un fonctionnement globalement stable du réseau.

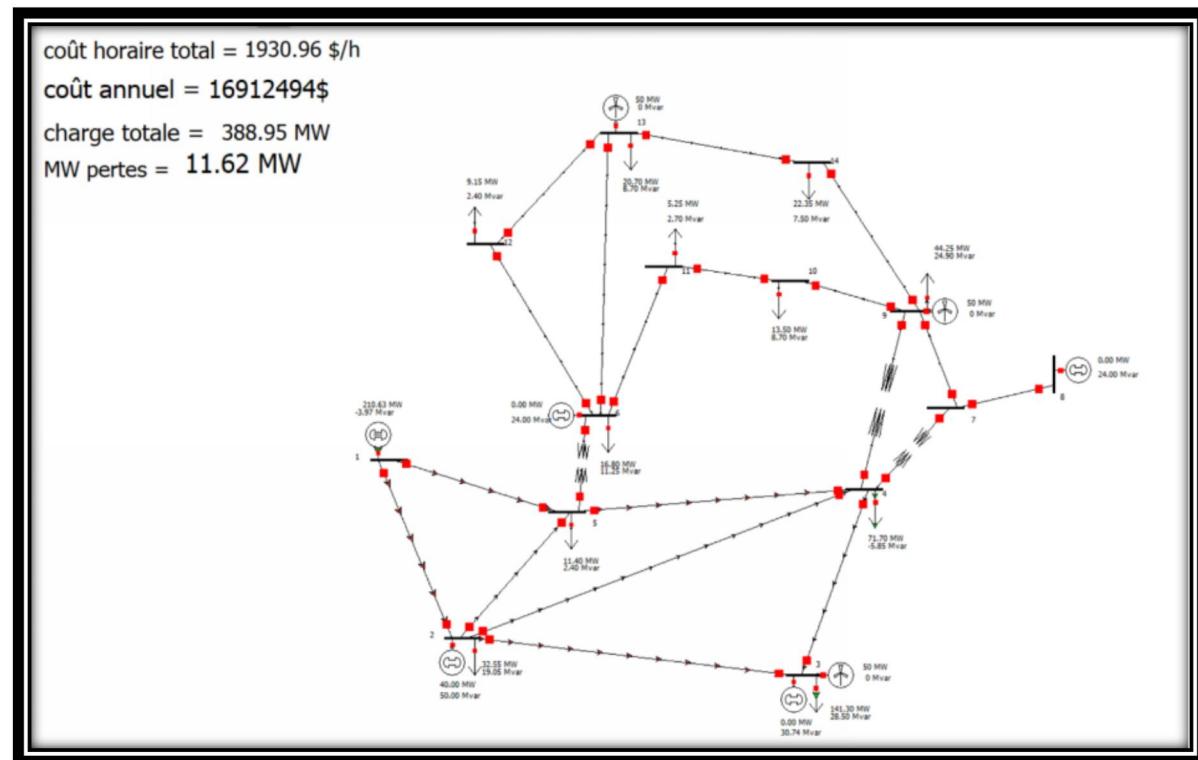
IV.6. Intégration d'une source éolienne au nœuds 3, 9 et 13

Tableau (IV.5) : Résultats de réseau IEEE14 avec intégration des sources éolienne

Bus	V m (p. u)	P gen (p. u)	Q gen (p. u)	P load (p. u)	Q load (p. u)
1	1.06000	2.1055	-0.0395		
2	1.04500	0.400	0.500	0.3255	0.1905
3	1.01000	0.500	0.400	1.413	0.2850
4	9.99267			0.717	-0.0585
5	1.02452			0.114	0.024
6	1.07000	0.00	0.240	0.168	0.1125
7	10.0249				
8	1.09000	0.00	0.240		
9	0.96892	0.500	0.00	0.4425	0.249
10	0.96359			0.135	0.087
11	0.97013			0.0525	0.027
12	0.97941			0.0915	0.024
13	0.98538	0.500	0.00	0.207	0.087
14	0.95834			0.2235	0.075



Fig(IV.14) : Amplitude des tensions dans chaque nœud du réseau



Fig(IV.15) : Le réseau IEEE14 avec intégration des sources éolienne par logiciel powerworld

Number	Name	PU Volt	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1 1		1.06000			210.50	-10.86
2 2		1.04500	32.55	19.05	40.00	50.00
3 3		1.01000	141.30	28.50	50.00	37.22
4 4		1.01246	71.70	-5.85		
5 5		1.01882	11.40	2.40		
6 6		1.07000	16.80	11.25	0.00	24.00
7 7		1.00156				
8 8		1.09000			0.00	24.00
9 9		0.97062	44.25	24.90	50.00	0.00
10 10		0.96263	13.50	8.70		
11 11		0.97234	5.25	2.70		
12 12		0.97650	9.15	2.40		
13 13		0.98552	20.70	8.70	50.00	0.00
14 14		0.94721	22.35	7.50		

Fig(IV.16) : Résultats de réseau IEEE14 avec intégration des sources éolienne de powerworld

Tableau (IV.5) : Comparaison des coûts horaires et annuels selon différents scénarios d'injection d'énergie dans le réseau

Les cas de simulation	coûts horaire total (\$/h)	coûts annuel (\$)
Cas d'évolution de charge	1990.10	17433276
Cas d'injection d'énergie solaire au nœud 13	1977.71	17324739.6
Cas d'injection au nœuds 3, 9 et 13	1690.99	14813072.4
Cas d'augmentation de puissance injectée	1480.61	12970143.6
Cas d'injection d'énergie éolienne	1930.96	16912494

Les résultats obtenus pour le profil de tension montrent que l'injection d'énergie solaire et l'injection d'énergie éolienne produisent des effets similaires sur le réseau électrique. En effet, dans les deux cas, la puissance injectée est identique et appliquée aux mêmes jeux de barres, ce qui se traduit logiquement par un profil de tension quasi identique. Cela confirme que, du point de vue purement électrique et pour une même puissance active injectée, l'impact sur la stabilité du plan de tension ne dépend pas de la nature de la source mais plutôt de sa localisation et de sa capacité d'injection.

Cependant, d'un point de vue économique, l'énergie solaire présente un avantage notable. L'installation et la maintenance des systèmes photovoltaïques sont généralement moins coûteuses et plus simples que celles des éoliennes, en particulier pour des projets de petite ou moyenne taille et en milieu urbain ou isolé. De plus, les panneaux solaires nécessitent moins d'infrastructures mécaniques (pas

de pièces mobiles) et peuvent être intégrés directement sur les bâtiments, ce qui réduit les coûts d'aménagement.

Ainsi, bien que les performances techniques soient équivalentes dans ce scénario, le choix de la technologie solaire peut être privilégié pour des raisons économiques et de facilité d'intégration, tout en assurant un bon maintien du profil de tension du réseau.

IV.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau IEEE 14 nœuds, en mettant l'accent sur le choix optimal des points d'injection et l'analyse du profil de tension. Les simulations ont montré que, correctement implantées, les sources renouvelables peuvent contribuer à l'amélioration de la stabilité de tension et à la réduction des pertes. L'approche adoptée confirme l'importance d'une planification rigoureuse pour garantir une insertion efficace et fiable des ENR dans les réseaux électriques.



Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur l'analyse et l'optimisation du réseau électrique IEEE 14 nœuds avec l'intégration progressive des énergies renouvelables. Dans un premier temps, nous avons présenté les concepts fondamentaux liés aux réseaux électriques et aux énergies renouvelables, ainsi que les outils de simulation utilisés. Ensuite, une étude approfondie du profil de tension et de la structure du réseau de base a permis d'identifier ses points faibles.

L'intégration des sources renouvelables, telles que le solaire ou l'éolien, a été abordée selon une méthodologie rigoureuse, mettant en évidence l'importance du choix des nœuds d'injection et du contrôle de la puissance réactive. Les résultats obtenus à travers diverses simulations ont montré que l'ajout bien planifié d'ENR peut améliorer la stabilité du réseau, réduire les pertes d'énergie et contribuer à une meilleure performance globale.

Cette étude confirme que l'intégration optimale des énergies renouvelables, même dans un réseau de petite taille comme celui à 14 nœuds, constitue une solution pertinente pour répondre aux défis énergétiques actuels. Elle ouvre également la voie à des perspectives futures, notamment l'application de techniques d'optimisation avancées, l'intégration de dispositifs de stockage, ou encore l'étude de réseaux plus complexes.

Bibliographique

- [1] NAWA Hacenna « Intégration des énergies éoliennes dans le réseau électrique » diplôme de MASTER Académique Soutenu le 02 / 07 / 2019
- [2] Dr. KOUADRIA Selman « Réseaux Électriques » Polycopié de cours Année Universitaire : 2023/2024
- [3] DJEBAIRIA Sabra et HOUAMRIA Radja « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique » diplôme de MASTER Soutenu publiquement, le 14/07/2021
- [4] Mme AZIZI Amina « Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride » Thèse de Doctorat troisième cycle Année 2019
- [5] Dr SAIDI Hemza « Energies Renouvelables » Polycopié de cours Année universitaire 2016/2017.
- [6] <https://www.enercoop.fr>
- [7] BEN MOUSSA Mohammed Lamine et LAKHAL Kheir Eddine « Analyse de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution » MASTER ACADEMIQUE Année universitaire 2020/2021
- [8] Ben Abdelghani, A. « Analyse des réseaux électriques avec intégration des énergies renouvelables : méthodologies et outils de simulation. » Thèse de doctorat, Université de Lorraine. (2021)
- [9] CHIKHOUNE Thinhinane et TIGRINE Zakaria « étude de la stabilité de tension dans réseaux électrique » diplôme de master. 2021/2022
- [10] KAZOUZ Mohammed Lamine, HENINE Nadjet et LAMRI Merwane « SIMULATION ET ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE OPTIMAL DANS UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE AVEC L'INTÉGRATION DES SOURCES À ÉNERGIES RENOUVELABLES : APPLICATION SUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE ALGÉRIEN (ÉTUDE TECHNICO/ÉCONOMIQUE) » diplôme de master 2021
- [11] BAHLOUL Abderrahim et MEKHENANE Mohammed « Etude de la stabilité de la tension » diplôme de MASTER 18/06 /2022

- [12] M'Baye, A. « Impact de l'intégration du photovoltaïque sur le profil de tension des réseaux BT/HTA. » Mémoire de master, Université de Grenoble Alpes.2022
- [13] IEA – Agence Internationale de l'Énergie. « Intégration des énergies renouvelables variables. » Édition française. Disponible sur : www.iea.org 2023
- [14] Bernard, L. « Smart grids et énergies renouvelables : les nouveaux défis du réseau. » Techniques de l'ingénieur, Réf. D4 550 v2.2021
- [15] ADEME. « Les réseaux électriques intelligents : enjeux et perspectives. » Agence de la transition écologique. Disponible sur : www.ademe.fr 2023
- [16] RTE. Bilan électrique 2022. « Réseau de Transport d'Électricité. » Disponible sur : www.rte-france.com 2023
- [17] RTE. « Futurs énergétiques 2050 – Scénarios pour un mix énergétique décarboné. » Rapport complet.2022
- [18] ENEDIS. « Intégration des énergies renouvelables au réseau de distribution. » Disponible sur : www.enedis.fr 2023
- [19] GRTgaz. « Réseaux électriques et gaz : coordination pour la transition énergétique. » Rapport technique. 2023
- [20] Panciatici, P. « Planification et gestion des réseaux électriques dans un contexte d'intégration massive des énergies renouvelables. » Revue de l'Énergie, n° 660. 2021