

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par :

ZITOUNI Badreddine

HAMDI Mouaad

Thème:

**Application des réseaux de neurones
artificiels dans le contrôle de
la tension des réseaux de distribution
intelligents**

M^r SADAOUI Fares

MCA

Président

UKM Ouargla

M^r BOUKAROURA Abdelkader

MAB

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^r BOUDJELLA Houari

MCB

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage pour réaliser ce travail.

Nous tenons, avant tout, à exprimer nos profondes gratitudee à notre Encadreur

Dr : BOUKAROURA Abdelkader, Nos remerciements vont également à tous les enseignants de département de Génie électrique.

Nos tenons à remercier également les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous adressons aussi nos remerciements à tous nos amis et collègues surtout ceux qui nous ont apportés leur soutien moral.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles pour leurs encouragements et leurs soutiens inconditionnelles et toute personne ayant contribué à la réalisation de ce mémoire .

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes parents que dieu les garde

A ma grand-mère

A mes oncles et leurs familles

A mon cher frère et ma chère sœur.

A mes cousins et toute la famille ZITOUNI

Et tous mes amis sans exception.

A toute la promotion 2022 d'électrotechnique.

A toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ZITOUNI Badreddine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes parents que dieu les garde

A ma grand-mère

A mes oncles et leurs familles

A mon cher frère et ma chère sœur.

A mes cousins et toute la famille HAMDI

Et tous mes amis sans exception.

A toute la promotion 2022 d'électrotechnique.

A toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

HAMDI Mouaad

Liste d'abréviations et symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Réseaux de distribution intelligents	
1.1 Introduction.....	2
1.2 Structure du réseau électrique.....	2
1.3 Fonctionnement des réseaux électriques.....	3
1.3.1 Production.....	3
1.3.2 Transport.....	3
1.3.3 Distribution.....	3
1.3.4 Consommation.....	4
1.4 Les réseaux de distribution intelligents.....	5
1.4.1 Définition.....	5
1.4.2 Objectifs des Smart Grids.....	7
1.4.3 Fonctionnalités associées au concept des réseaux intelligents.....	8
1.4.3.1 Gestion de la demande.....	8
1.4.3.2 Stockage d'énergie.....	8
1.4.3.3 Production décentralisée.....	9
1.4.3.4 Outils de mesure et de surveillance.....	10
1.4.3.5 Technologies de communication.....	12
1.5 Conclusion.....	12
Chapitre 2 : Les réseaux neurones artificiels	
2.1 Introduction.....	14
2.2 Généralités sur les réseaux de neurones artificiels.....	14
2.2.1 Définition des réseaux de neurones artificiels.....	14
2.2.1 Inspiration des réseaux de neurones artificiels.....	14
2.2.3 Évolution des réseaux de neurones artificiels.....	15
2.3 Représentation mathématique.....	16
2.3.1 Neurone formel.....	16
2.3.2 Modèle mathématique d'un neurone formel.....	16
2.3.2.1 Activation d'un réseau de neurone artificiel.....	17
2.3.3 Réseaux multi couches (Multi-layer perceptron).....	18
2.3.4 Modèle mathématique des réseaux multi couches.....	18
2.3.4.1 Les poids.....	18
2.3.4.2 Le biais.....	19
2.3.5 Réseau à connexions locales.....	19
2.3.6 Réseau à connexions récurrentes (feedback network).....	19
2.4 Apprentissage des réseaux de neurones.....	20
2.4.1 L'apprentissage supervisé.....	20
2.4.2 L'apprentissage non supervisé.....	21
2.5 Algorithmes d'apprentissage.....	21
2.5.1 Préapprentissage.....	21
2.5.2 Apprentissage continu.....	21
2.6 Domaines d'application.....	22
2.6.2 La santé.....	22
2.6.3 Le secteur bancaire et financier.....	22
2.6.3 Le transport.....	22

Sommaire

2.7 Conclusion.....	22
Chapitre 3 : Contrôle de la tension à l'aide des réseaux de neurones artificiels	
3.1 Introduction.....	23
3.2 Méthodes du contrôle de la tension.....	23
3.2.1. Transformateurs régleurs en charge (On-load Tap Changer (OLTC)).....	24
3.2.2 Contrôle du facteur de puissance du générateur.....	25
3.2.3 Compensateurs de l'énergie réactive.....	25
3.2.3.1 Bancs de condensateurs.....	25
3.2.3.2 Compensateurs synchrones.....	25
3.2.3.3 Dispositifs FACTS.....	25
3.2.3.4 Stockage d'énergie.....	25
3.2.3.5 Reconfiguration de réseau.....	26
3.3 Impact de la production décentralisée sur le profil de tension.....	26
3.4 Estimation du profil de tension en présence de la production décentralisée.....	27
3.4.1 Méthode basée sur l'écoulement de puissance.....	27
3.4.2 Méthode basée sur les unités de télégestion (RTUs : Remote Terminal Units).....	27
3.4.3 Méthode pour le contrôle de la tension.....	28
3.4.4 Génération des données d'apprentissage du RNA.....	29
3.5 Application au réseau test IEEE 33 jeux de barres.....	30
3.5.1 Ecoulement de puissance.....	31
3.5.1 Impact de la variation de la charge sur le profil de tension et les pertes de puissance.....	34
3.5.2 Impact des DGs sur le profil de tension et les pertes de puissance.....	35
3.5.3 Contrôle de la tension à l'aide des réseaux de neurones.....	36
3.5.3.1 Estimation des tensions V_{\min} et V_{\max}	36
3.5.3.2 Contrôle de la tension du réseau IEEE 33 jeux de barres.....	38
3.6 Conclusion.....	39
Conclusion générale.....	41
Bibliographie.....	42
Annexe.....	44

Liste d'abréviations et symboles

Abréviations

DG	: Distributed Generation
RTU	: Unités de télégestion (Remote Terminal Units)
RTO	: Organisation régionale de transport
SCADA	: Système de contrôle et d'acquisition de données (Supervisory Control and Data Acquisition)
IA	: Intelligence Artificielle
RNA	: Réseau de Neurone Artificiel
OLTC	: On-load tap changer (Transformateur régleur en Charge)
HTA	: Haute tension A
HTB	: Haute tension B
FACTS	: Flexible Alternative Current Transmission Systems
PMUs	: Phasor Measurement Units
MLP	: Multi Layer Perceptron
p.u	: Unité relative (Per Unit)

Symboles

ΔV	: Variation de tension
P	: Puissance active
Q	: Puissance réactive
X	: Réactance de la ligne
R	: Résistance de la ligne
U_{new}	: La nouvelle tension
VB	: La bande de tension admissible
U_{max}	: La limites supérieure de la tension
U_{min}	: La limites inférieur de la tension
Rng	: La différence entre le tension mesurée la plus élevée et la plus basse
Tap	: La position de prise du transformateur
P_L	: La puissance active de la charge respectivement
Q_L	: La puissance réactive de la charge respectivement
V_{UL}	: La limite max de tension (égale 1.05 p.u)
V_{old}	: la tension de référence
V_{est}	: La valeur de tension minimale estimée entre deux systèmes DG ou condensateurs ou entre un DG et condensateur.

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma de l'organisation des réseaux électriques en fonction de leur tension.....	2
Figure 1.2 : Architecture générale du réseau électrique en Algérie	4
Figure 1.3 : Normalisation des différents niveaux de tension	5
Figure 1.4 : Exemple d'architecture d'un réseau intelligent	6
Figure 1.5 : Exemple de stockage d'énergie dans un Smart Grid	9
Figure 1.6 : Compteurs Intelligents	11
Figure 1.7 : Phasor Measurement Unit (PMU)	12
Figure 2.1 : Un neurone avec son arborisation dendritique.....	15
Figure 2.2 : Modèle d'un neurone formel	16
Figure 2.3 : Différents types de fonctions de transfert pour le RNA	17
Figure 2.4 : Passage du neurone biologique vers le neurone formel.....	17
Figure 2.5 : Schéma simplifié d'un réseau de neurone multicouche.....	18
Figure 2.6 : Modèle d'un neurone multicouche	18
Figure 2.7 : RNA à connexions locales	19
Figure 2.8 : Réseau à connexions récurrentes	20
Figure 2.9 : Apprentissage supervisé.....	21
Figure 2.10 : Apprentissage non supervisé.....	21
Figure 3.1 : Schéma d'un réseau a deux jeux de barres avec un DG	24
Figure 3.2 : Transformateur régleur en charge.....	24
Figure 3.3 : Ecoulement des puissances dans un réseau à deux jeux de barres avec DG.....	26
Figure 3.4 : Structure du réseau avec DGs et RTUs	28
Figure 3.5 : Contrôle de tension	29
Figure 3.6 : Structure du RNA	29
Figure 3.7 : Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres	30
Figure 3.8 : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres	32
Figure 3.9 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 33 jeux de barres	33
Figure 3.10 : Profil de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres pour trois niveaux de charge	34
Figure 3.11 : Pertes de puissances active dans les branches du réseau IEEE 33 jeux de barres pour trois niveaux de charge	34
Figure 3.12 : Pertes de puissances réactive dans les branches du réseau IEEE 33 jeux de barres pour trois niveaux de charge	35
Figure 3.13 : Réseau IEEE 33 jeux de barres avec deux DGs.....	35
Figure 3.14 : Influence des DGs sur le profil de tension du réseau 33 jeux de barres.....	36
Figure 3.15 : Comparaison de la tension V_{min} actuelle et estimée du réseau IEEE 33 jeux de barres(phase d'apprentissage).....	37
Figure 3.16 : Comparaison de la tension V_{min} actuelle et estimée du réseau IEEE 33 jeux de barres (phase de test)	37

Figure 3.17 : Comparaison de la tension V_{\max} actuelle et estimée du réseau IEEE 33 jeux de barres (phase d'apprentissage)	38
Figure 3.18 : Comparaison de la tension V_{\max} actuelle et estimée du réseau IEEE 33 jeux de barres (phase de test)	38
Figure 3.19 : Profil de tension sans et avec régulation de OLTC du réseau 33 jeux de barres.	39

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Tableau des domaines de tension	5
Tableau 1.2 : Comparaison entre le réseau électrique traditionnel et intelligent.....	7
Tableau 2.1 : passage du neurone biologique vers le neurone formel.....	17
Tableau 3.1 : Identification de la topologie du réseau de distribution IEEE 33-bus.....	30
Tableau 3.2 : Ecoulement de puissances pour le réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres	31
Tableau 3.3 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 33-bus	32
Tableau A.1 : Caractéristiques techniques des branches du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres.....	44
Tableau A.2 : Caractéristiques techniques des jeux de barres du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres.....	45

Introduction générale

Le développement de nouvelles sources de production décentralisée ou de génération dispersée (en anglais : Distributed Generation (DG)) est désormais une réalité dans plusieurs pays à travers le monde, grâce à la libéralisation du marché de l'énergie ainsi qu'aux évolutions technologiques des moyens de production de petite puissance [1]. Cependant, ces moyens de production décentralisés introduisent des changements radicaux notamment sur les réseaux de distribution qui n'ont pas été conçus pour accueillir ce type de production. L'insertion de ces sources d'énergie au niveau de réseaux de distribution peut avoir des conséquences importantes sur la circulation des flux énergétiques, le profil de tension, les pertes de puissance, les systèmes de protection, ainsi que sur le contrôle de tension [2].

Dans ce travail, nous nous intéressons au problème de contrôle de la tension du réseau électrique de distribution en présence de la production décentralisée.

L'objectif principale de ce travail est de contrôler la tension du réseau de distribution en présence de productions décentralisées en utilisant une méthodologie basée sur les réseaux de neurones artificiels et sur les unités de télégestion (Remote Terminal Units (RTUs)). Cette méthode vise à faciliter l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de distribution en améliorant son profil de.

Ce travail comprend trois chapitres. Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les réseaux de distribution, plus particulièrement les réseaux de distribution intelligents.

Le deuxième chapitre s'intéresse aux réseaux de neurones artificiels.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des principaux types de contrôle de la tension dans les réseaux de distribution et des résultats de l'application de la méthode de réglage de la tension sur le réseau test IEEE 33 jeux de barres

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale et quelques perspectives.

1.1 Introduction

Les réseaux électriques sont les infrastructures qui permettent d'acheminer l'énergie électrique des installations de production jusqu'aux consommateurs. En Algérie, les réseaux électriques utilisent le courant alternatif triphasé sinusoïdal à la fréquence de 50 Hz. Il comprend des milliers de composants (Générateurs, transformateurs, lignes, système de protection, ... etc.) [1].

La libéralisation du marché de l'énergie électrique, les préoccupations environnementales liées au changement climatique et l'arrivée massive de la production décentralisée amènent des transformations importantes sur ces réseaux. Pour faire face à ces défis, les autorités prennent des mesures pour moderniser les infrastructures du réseau électrique, afin d'assurer la gestion, la sécurité et la fiabilité de ce dernier. Parmi les nouvelles technologies envisagées pour atteindre ces objectifs, il s'agit de la technologie Smart Grids ou réseaux électriques intelligents.

Dans ce premier chapitre, on présentera en premier lieu la structure des réseaux électriques conventionnels. Ensuite, on s'intéressera au réseau de distribution intelligent, sa définition, ses caractéristiques et ses objectifs. Enfin, on présentera les différentes fonctionnalités associées au concept des réseaux électriques intelligents.

1.2 Structure des réseaux électriques

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destinés à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique et veiller sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. L'architecture ou le design du réseau est un facteur clé pour assurer ces objectifs [2].

L'organisation des réseaux de transport et de distribution est subdivisée en fonction du niveau de tension comme l'indique la figure 1.1 :

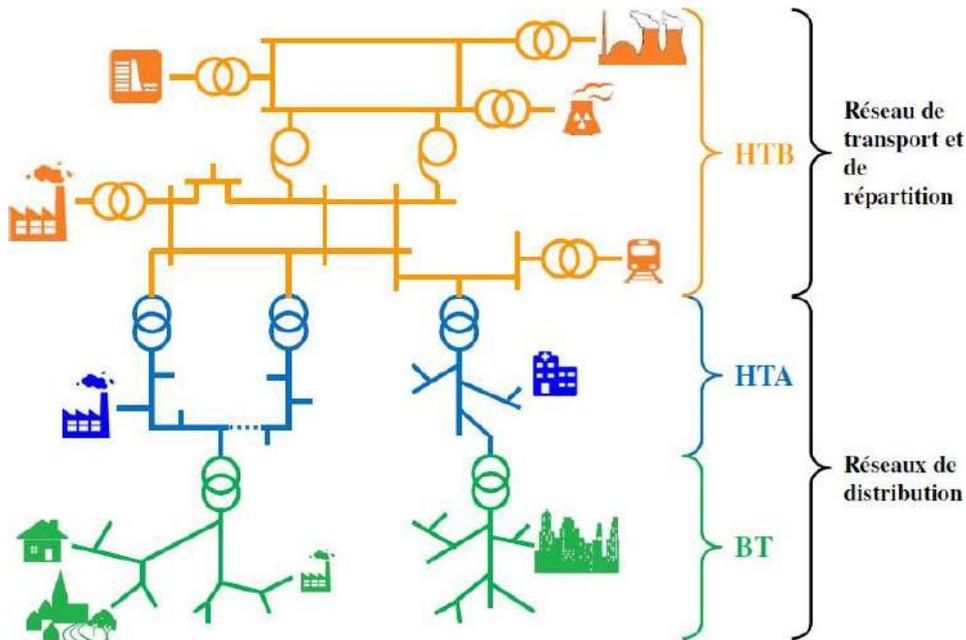


Figure 1.1 : Schéma de l'organisation des réseaux électriques en fonction de leur tension

1.3 Fonctionnement des réseaux électriques

Physiquement, le réseau électrique est organisé en différents niveaux de tension : le réseau de transport et de répartition, auxquels sont connectés les grands groupes de production centralisée et le réseau de distribution alimentant la plupart des consommateurs [3].

1.3.1 Production

Les grands groupes de production d'énergie électrique sont en général basés sur des alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Ils sont connectés sur le réseau de transport via un transformateur élévateur.

1.3.2 Transport

Les réseaux de transport assurent le transport de l'énergie électrique sur de grandes distances. Afin de minimiser, entre autre, les pertes joules sur les lignes, ces réseaux sont à très haute tension (de 63 kV à 400 kV).

1.3.3 Distribution

Les réseaux de distribution constituent l'architecture la plus importante du réseau électrique. Ils assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local. Leur tension est inférieure ou égale à 50 kV (HTA). Ils sont constitués de deux types de réseaux : le réseau moyenne tension (HTA) avec un niveau de tension de 10 kV et 30 kV connecté au réseau de transport, et le réseau basse tension (BT) de tension de 0.4 kV.

1.3.4 Consommation

La production d'énergie thermique, lumineuse et mécanique sont les trois usages classiques de l'énergie électrique. Elles se retrouvent aussi bien chez les consommateurs résidentiels qu'industriels.

La figure 1.2 illustre l'architecture générale des réseaux électriques en Algérie.

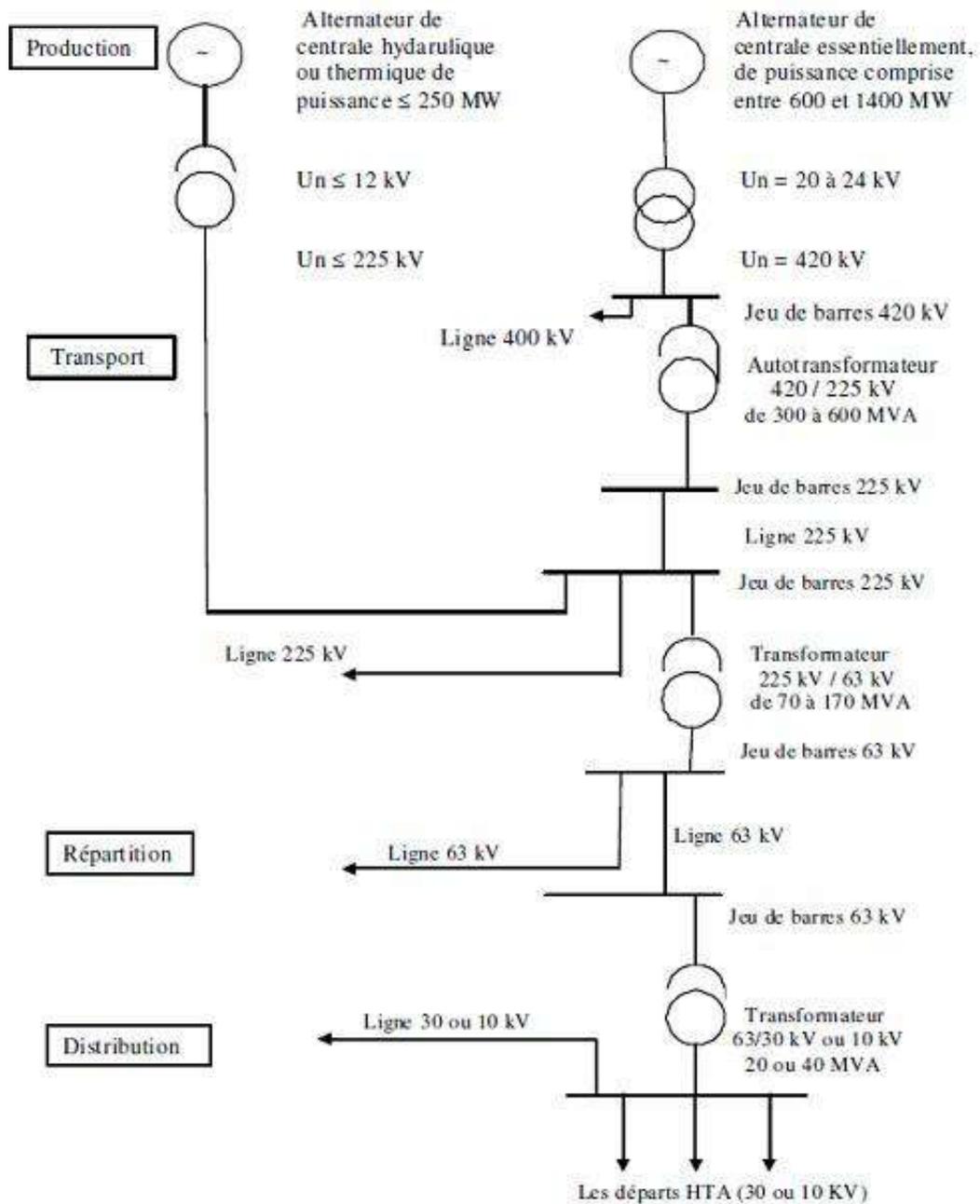


Figure 1.2 : Architecture générale du réseau électrique en Algérie

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension comme suit :

Tableau 1.1 : Tableau des domaines de tension [4]

Domaines de tension		Valeur de la tension composée nominale (U_n en Volts)	
		Tension Alternative	Tension Continue
Très Basse Tension (TBT)		$U_n < 50$	$U_n < 120$
Basse Tension (BT)	BTA	$50 < U_n < 500$	$120 < U_n < 750$
	BTB	$500 < U_n < 1000$	$750 < U_n < 1500$
Haute Tension (HT)	HTA ou MT	$1000 < U_n < 50\ 000$	$1500 < U_n < 75\ 000$
	HTB	$U_n > 50\ 000$	$U_n > 75\ 000$

Les appellations normalisées des différents niveaux de tension sont présentées dans la figure 1.3.

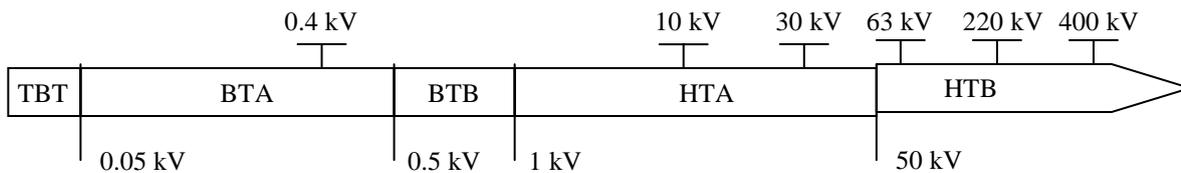


Figure 1.3 : Normalisation des différents niveaux de tension [4].

1.4 Réseaux de distribution intelligents

1.4.1 Définition

Le concept des réseaux électriques intelligents ou Smart Grids est arrivé dans le secteur électrique il y a quelques années déjà, à travers la problématique des énergies renouvelables et la gestion des pics croissants de consommation d'électricité. Le concept s'élargit aujourd'hui à l'ensemble des réseaux d'énergie (gaz, chaleur, eau). Les Smart Grids sont capables d'intégrer et de coordonner les actions des différents utilisateurs, consommateurs et/ou producteurs, afin de maintenir une fourniture d'électricité efficace, durable, économique et sécurisée.

Les Smart Grids peuvent se définir comme une combinaison de l'infrastructure et de l'intelligence embarquée associée (logiciel, automatismes, transmission et traitement de l'information).

Cette intelligence peut être déployée à divers niveaux de la chaîne énergétique (production, transport, distribution et consommation). L’intelligence et la communication se trouvent donc du producteur jusqu’au consommateur final [5].

Différents modèles et architectures peuvent être trouvés dans la littérature pour l’exploitation des Smart Grids. La Figure 1.4 présente l’un de ces modèles. Le Smart Grid dans ce modèle peut se décomposer en trois niveaux [6] :

- Une première couche d’infrastructure composée d’équipements qui servent à acheminer l’électricité (lignes, transformateurs, etc.).
- Un deuxième niveau formé par des architectures de communication collectant des données issues de différents capteurs réseau
- Un dernier niveau constitué par des applications et des services, comme le monitoring, les systèmes d’intervention à distance, l’automatisation des réponses à la demande d’électricité utilisant une information en temps réel.

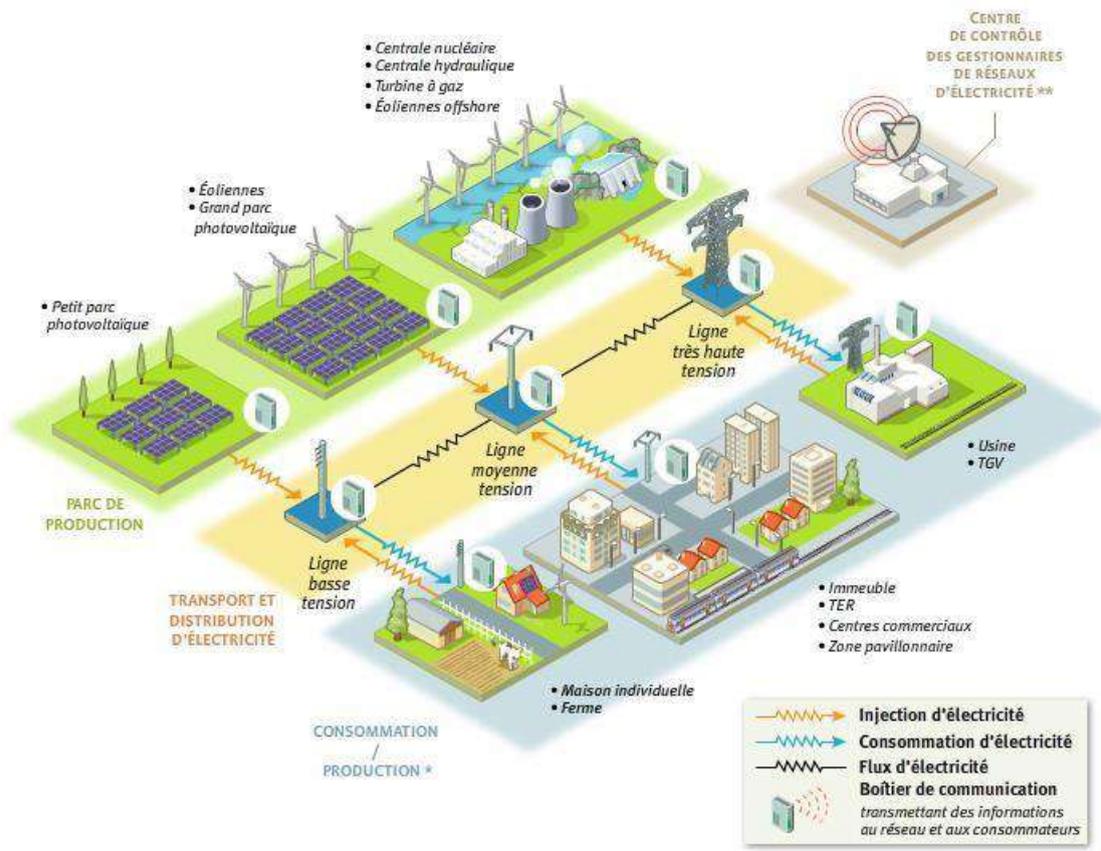


Figure 1.4 : Exemple d’architecture d’un réseau intelligent [7]

Le tableau 1.2 ci-dessous représente les principales caractéristiques qui distinguent les réseaux électriques classiques et les réseaux électriques intelligents.

Tableau 1.2 : Comparaison entre le réseau électrique traditionnel et intelligent [8]

Caractéristiques des réseaux électriques traditionnels	Caractéristiques des réseaux électriques Intelligents
Analogique	Numérique
Unidirectionnel	Bidirectionnel
Production centralisée	Production décentralisée
Communicant sur une partie du réseau	Communicant sur l'ensemble du réseau
Un seul acteur économique	Choix du fournisseur
Gestion de l'équilibre du système électrique par l'offre (production)	Gestion de l'équilibre du système électrique par la demande (consommation)
Consommateur	Consomm'acteur

1.4.2 Objectifs des Smart Grids

Les réseaux électriques ne permettront pas de faire face à l'augmentation de consommation mondiale d'électricité, notamment ces dernières années, Ils ont besoin d'évoluer et devenir des réseaux plus intelligents pour corriger leurs principales lacunes [9].

- **Sécurité du réseau** : que ce soit au niveau du producteur, du transport ou du consommateur, le réseau n'est pas sécurisé aux niveaux physique et informatique ;
- **Gestion de la demande** : la gestion de la demande permet, en incitant, par des signaux tarifaires, aux utilisateurs des réseaux à limiter leur consommation en période de pointe et à la reporter en période creuse, de mieux gérer l'équilibre production/consommation. Cependant, actuellement, le réseau ne peut pas exploiter les données de l'ensemble des appareils consommateurs intelligents et leur gestion est bien souvent délaissée au manuel.
- **Conservation de l'énergie** : les batteries sont développées et leur capacité est devenue assez importante pour entrer en compte dans la gestion de l'énergie. Ces batteries sont à la fois capables de consommer ou de produire. Mais pour avoir un impact sur le réseau, ces batteries doivent faire partie d'une gestion intelligente afin de ne pas accentuer les pics de consommation.
- **L'intégration des énergies renouvelables** : l'arrivée des énergies renouvelables n'est pas récente. Mais leur rentabilité augmente, leur nombre accroit, et de nouveaux types de

centrales émergent de ces technologies. Que ce soit une petite ou une grande source d'énergie renouvelable, leur production est intermittente et leur gestion est difficile .

1.4.3 Fonctionnalités associées au concept de réseaux intelligents

Le réseau traditionnel est confronté à de nombreux défis, notamment l'ancienne infrastructure, le manque de communication, la demande croissante en énergie et les problèmes de sécurité. Pour résoudre ces problèmes, le concept de réseau intelligent a fait son apparition et comprend des technologies de l'information et de la communication permettant une communication bidirectionnelle entre le service public et les consommateurs d'énergie.

1.4.3.1 Gestion de la demande

La gestion de la demande est un élément essentiel de la gestion de l'énergie du réseau électrique intelligent. C'est un ensemble de programmes permettant aux clients de planifier et de surveiller les activités liées à l'utilisation de l'électricité. En particulier, cela les aide à jouer un rôle important dans le déplacement de leurs propres demandes d'électricité pendant les périodes de pointe afin de consommer moins d'énergie et/ou de déplacer leurs demandes vers les heures creuses afin d'atténuer la courbe de la demande. En fait, en réduisant la charge globale du réseau électrique, [10].

La gestion de la demande peut atténuer les urgences du système électrique par :

- L'augmentation de la fiabilité du système ;
- La réduction du nombre de coupures de courant ;
- Le réglage des profils de tension ;

1.4.3.2 Stockage d'énergie

Le Smart Grid est un système qui utilise la technologie informatique afin de réduire intelligemment la consommation d'électricité. Ce système de contrôle permet la production et le stockage décentralisé d'électricité. La disponibilité du stockage à un coût compétitif et à grande échelle serait un facteur clé pour répondre à l'accroissement de la pénétration des énergies renouvelables et à la variabilité de la demande. On pourrait par exemple stocker l'énergie solaire produite dans la journée pour une utilisation nocturne, ou utiliser le stockage pour pallier l'intermittence de l'éolien. La Figure 1.6 représente un exemple d'utilisation des systèmes de stockage d'énergie dans un Smart Grid où ce dernier devrait servir à recharger les batteries pendant les creux de consommation, et d'utiliser cette énergie pendant les pics [10].

Les solutions de stockage d'énergie se divisent en plusieurs catégories :

- Les véhicules électriques (en première vie ou une utilisation des batteries des véhicules usagés) ;
- Les technologies électrochimiques (batteries aqueuses, batteries à électrolyte organique, batteries haute température, ... etc.) ;
- Les technologies mécaniques (volant à inertie, pompage hydro, air comprimé).

Chacune de ces technologies à ses spécificités (en termes de capacité à livrer de la puissance, de coût, de durée de vie en cycle, de densité énergétique, de maturité, ...etc.) si bien que l'optimum est parfois dans l'association de plusieurs technologies [11].

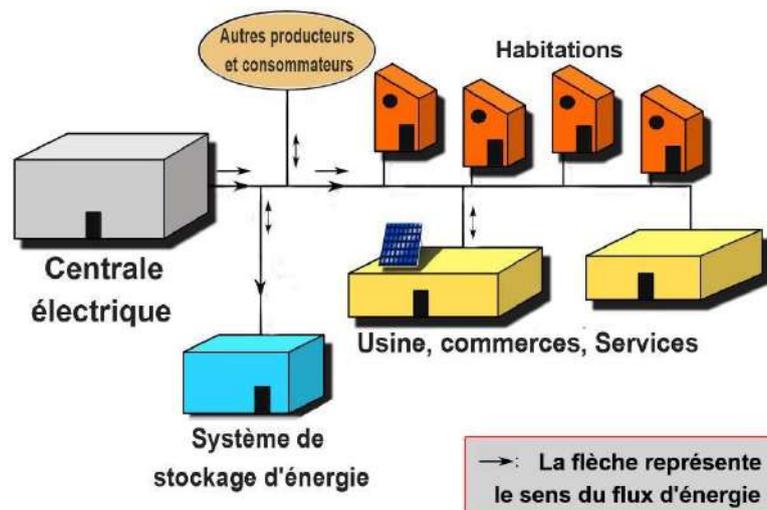


Figure 1.5 : Exemple de stockage d'énergie dans un Smart Grid

1.4.3.3 Production décentralisée

- **Définition**

Le terme production décentralisée désigne l'ensemble des générateurs d'électricité de faible puissance, connectés aux réseaux de distribution. Ce terme est construit par opposition au terme production centralisée désignant les grandes centrales de production connectées au réseau de transport [12].

- **Types de production décentralisée**

Différentes technologies de production décentralisées existent sur les réseaux de distribution et elles sont classées selon le type de source d'énergie utilisée comme suit :

- **Les énergies renouvelables**

Les principales sources de l'énergie renouvelable sont [12]:

- **Hydraulique** : Les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. Celle-ci est transformée en énergie électrique par un alternateur entraîné par une turbine mue par la force de l'eau qui est due soit à la hauteur de chute dans le cas des centrales alimentées par une conduite forcée, soit au débit dans le cas de centrales au fil d'eau. L'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus répandue puisqu'elle est également utilisée dans la production centralisée.
- **Eolien** : Les aérogénérateurs, ou éoliennes, tirent leur énergie du vent qui est transmise par le rotor et le multiplicateur de vitesse à une génératrice. Cette source d'énergie, qui commence à atteindre sa maturité technologique, est de plus en plus répandue grâce à son fort attrait écologique. Elle est passée devant la production géothermique au niveau mondial en 2000.
- **Solaire photovoltaïque** : Les panneaux solaires convertissent directement l'énergie reçue par rayonnement solaire en énergie électrique à courant continu. Ils sont très utilisés pour l'alimentation de sites isolés (non connectés au réseau) en association avec un système de stockage.
- **Solaire thermique** : Les centrales solaires thermiques sont des centrales thermiques utilisant des turbines à vapeur, celle-ci étant produite par chauffage de l'eau via un fluide caloporteur en utilisant le rayonnement solaire concentré sur un échangeur par des miroirs paraboliques.
- **Les énergies non renouvelables**

Les principales technologies non renouvelables sont : Le thermique à flamme (qui est basé sur des turbines ou micro turbines à vapeur), les moteurs à combustibles fossiles (Les turbines à gaz et les groupes diesel) et les piles à combustible produisant directement de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène par réaction inverse de l'électrolyse de l'eau.

1.4.3.4. Outils de mesure et de surveillance

L'environnement du réseau intelligent nécessite la mise à jour des outils de détection et de mesure à tous les niveaux du réseau. Ces composantes fourniront les données nécessaires pour surveiller le réseau et le marché de l'électricité. Elles permettent de détecter les pannes, d'intervenir et d'évaluer l'état de l'équipement et l'intégrité du réseau, d'assurer la protection contre le fraude d'énergie, de permettre le choix du consommateur et diverses fonctions de surveillance du réseau. En ce qui concerne le comptage et la mesure, les nouvelles technologies numériques utilisant

les communications bidirectionnelles, une variété d'intrants (signaux de tarification, heure du tarif quotidien, organisation régionale de transport (RTO) réduisant les effets de la congestion), une variété de extrants (données de consommation en temps réel, qualité de l'alimentation, paramètres électriques), capacité de se connecter et de se déconnecter, et interfaces avec les générateurs, les opérateurs de réseau et les portails clients pour améliorer la mesure de la puissance. Ceci est facilité par l'utilisation accrue de l'électronique numérique pour le comptage et les mesures, l'avancement du compteur électrique au niveau du client, et l'installation d'un système de surveillance à grande surface pour la surveillance et la protection avancées des services publics. Les détails de ces mesures sont discutés dans les sections suivantes [13].

- **Compteurs intelligents (Smart Meters)**

Le système de comptage évolué ou compteur intelligent (Voir Figure 1.6) est l'un des concepts clés des réseaux intelligents, car il permet de communiquer sur les données de consommations avec les équipements en aval et en amont du compteur.



Figure 1.6 : Compteurs Intelligents

- **Synchrophaseurs**

Le synchrophaseurs (en Anglais : *Phasor Measurement Units (PMU)*), représenté sur la Figure 1.7, est un appareil qui mesure la phase et la fréquence pour une ou plusieurs phases de tension et/ou de courant alternatif. Les données des phaseurs sont actuellement utilisées pour le système de connaissance de la situation et la surveillance des réseaux électriques. Les données sont horodatées et synchronisées à l'aide d'un système de positionnement mondial (Global Positioning System (GPS)). Ils sont principalement utilisés pour visualiser la différence d'angle de phase entre deux extrémités des lignes de transmission [13].



Figure 1.7: Phasor Measurement Unit (PMU)

1.4.3.5 Technologies de communication

Parce qu'une grande partie des systèmes de transmission et de distribution existants utilisent encore d'anciennes technologies de communication et de contrôle numériques, des systèmes de communication de pointe pour l'automatisation de la distribution, comme les unités de télégestion (en Anglais : Remote Terminal Units (RTU)) et les systèmes de contrôle et d'acquisition de données (en anglais : Supervisory Control and Data Acquisition(SCADA)) sont en cours de développement ainsi que des outils et logiciels innovants qui communiqueront avec les appareils ménagers. En fin de compte, les technologies de communication à haute vitesse, entièrement intégrées et bidirectionnelles permettront au réseau intelligent d'être une méga-infrastructure dynamique et interactive pour l'échange d'information et d'électricité en temps réel. La technologie existe pour la mesure, la surveillance et le contrôle en temps réel dans le réseau intelligent, cette technologie joue un rôle essentiel dans le fonctionnement du réseau intelligent. Il est nécessaire de formaliser les normes et les protocoles qui seront appliqués pour la transmission sécurisée de renseignements critiques et de nature très délicate dans le cadre du système de communication [13].

1.5 Conclusion

Ce premier chapitre a donné une vision sur les réseaux électriques intelligents dites Smart Grids. Ces réseaux ont pour objectifs d'assurer une meilleure sécurité, de faciliter l'intégration des énergies renouvelables, de garantir la conservation de l'énergie et d'assurer une gestion efficace de la demande.

Plusieurs technologies sont exploitées pour atteindre ces objectifs à savoir les compteurs intelligents, les synchrophaseurs (PMUs), les systèmes de stockage d'énergie et les technologies de communication.

L'objet du prochain chapitre est de présenter quelques concepts de base sur les réseaux de neurones artificiels. Ces derniers font la base de notre méthode pour le réglage de la tension des réseaux de distribution.

2.1 Introduction

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) constituent l'une des approches d'intelligence artificielle (IA) dont le développement se fait à travers les méthodes par lesquelles l'homme essaye toujours d'imiter la nature et de reproduire des modes de raisonnement et de comportement qui lui sont propre [14].

Dans ce chapitre, on présente, dans un premier temps, quelques notions de bases sur les réseaux de neurones artificiels. Ensuite, nous intéresserons au réseau multi couches ou multi perceptrons (MP ou MLP en anglais pour Multi Layer Perceptron) et nous expliquerons la démarche d'apprentissage de ces réseaux. Ce chapitre sera achevé par une présentation de diverses applications des RNA.

2.2 Généralités sur les réseaux de neurones artificiels

2.2.1 Définition des réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau [15].

2.2.2 Inspiration des réseaux de neurones artificiels

Le système nerveux est composé de 10^{12} neurones interconnectés. Bien qu'il existe une grande diversité de neurones, ils fonctionnent tous sur le même schéma [15].

Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se divise pour former ce que l'on appelle les dendrites. Celles-ci sont parfois si nombreuses que l'on parle alors de chevelure dendritique ou d'arborisation dendritique. C'est par les dendrites que l'information est acheminée de l'extérieur vers le soma, corps du neurone.

L'information traitée par le neurone chemine ensuite le long de l'axone (unique) pour être transmise aux autres neurones. La transmission entre deux neurones n'est pas directe. En fait, il existe un espace intercellulaire de quelques dizaines d'Angstroms entre l'axone du neurone afférent et les dendrites du neurone efférent. La jonction entre deux neurones est appelée la synapse [15].

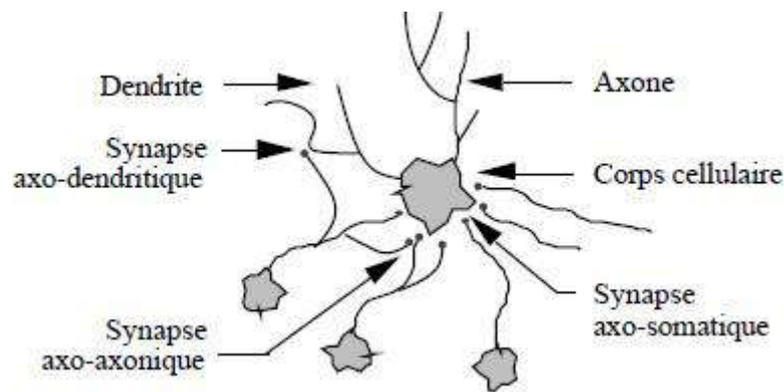


Figure 2.1 : Un neurone avec son arborisation dendritique [15]

2.2.3 Évolution des réseaux de neurones artificiels

La première modélisation d'un neurone biologique date de 1943. Elle a été présentée par McCulloch et Pitts. Ce modèle, appelé aussi neurone à seuil, a été inspiré des récentes découvertes en biologie. L'interconnexion de ces neurones permet le calcul de plusieurs fonctions logiques [16].

En 1949, le psychologue Donald Hebb a introduit le premier mécanisme d'évolution des connexions, appelées (par analogie aux systèmes biologiques) des synapses. Il a proposé de nombreuses règles de mise à jour des poids dont la plus connue à cette époque est la "règle de Hebb" [16].

L'association de ces deux méthodes permet au psychologue Frank Rosenblatt en 1958 de développer le premier modèle opérationnel de réseaux de neurones « le perceptron ». Celui-ci est capable d'apprendre à calculer un grand nombre de fonctions booléennes.

En 1969, deux scientifiques américains nommés Minsky et Papert ont publié un ouvrage dans lequel ont prouvé les limites du perceptron proposé par Rosenblatt. En particulier, son incapacité réside à la résolution des problèmes non linéaires.

En 1982, Hopfield a démontré l'intérêt des réseaux entièrement connectés.

Depuis 1985, de nouveaux modèles mathématiques ont permis de les dépasser et ont donné naissance aux réseaux multicouches que nous étudierons plus particulièrement

2.3 Représentation mathématique

2.3.1 Neurone formel

Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il recueille un nombre de variable d'entrées en origine de neurones amont. Un poids (w) spécifique de la force de la connexion est associé à chacune de ces entrées. Chaque processeur élémentaire est assigné d'une sortie unique, qui se divise ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. A chaque connexion est associé un poids.

2.3.2 Modèle mathématique d'un neurone formel

Un neurone formel est une fonction algébrique non-linéaire et borné, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficient ou poids, comme il est montré sur la figure 2.2. Par la similitude avec le neurone biologique, la dynamique de neurone formel est modélisée par deux étapes [17] :

- Un opérateur de sommation, qui élabore le potentiel , pour calculer le seuil d'activation θ ;
- Un opérateur non linéaire qui donne la limite d'activation de neurone (fonction de transfert)

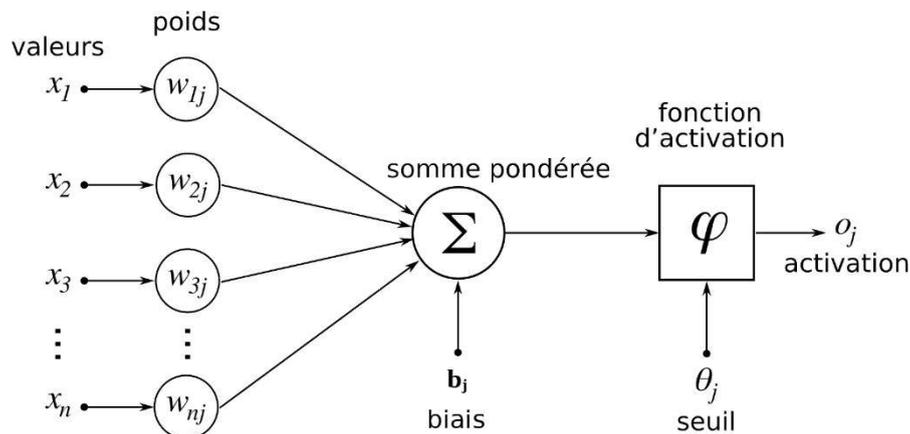


Figure 2.2 : Modèle d'un neurone formel

Dans cette figure (2-2), x_j sont les entrées du neurone i (sortie du neurone amont j), w_{ij} c'est la valeur du poids synaptique des liaisons dirigées aux neurones i vers le neurone ;
Le calcul de la somme pondérée des entrées (a) selon l'expression suivante :

$$a = \sum(w_i \cdot x_i) \quad (2.1)$$

A partir de résultats tirés de la somme pondérée, une fonction de seuillage φ calcule les paramètres de l'état de neurone, transmise aux neurone suivant, donnée comme suit :

$$y_i = (a_i - \theta_i) \quad (2.2)$$

2.3.2.1 Activation d'un réseau de neurone artificiel

En remplaçant la valeur trouvée dans l'expression précédente dans une fonction de transfert qui calcule la valeur de l'état du neurone. C'est cette valeur qui sera transmise aux neurones avals. Il existe plusieurs formes de la fonction de transfert comme il est montré sur la Figure (2.3).

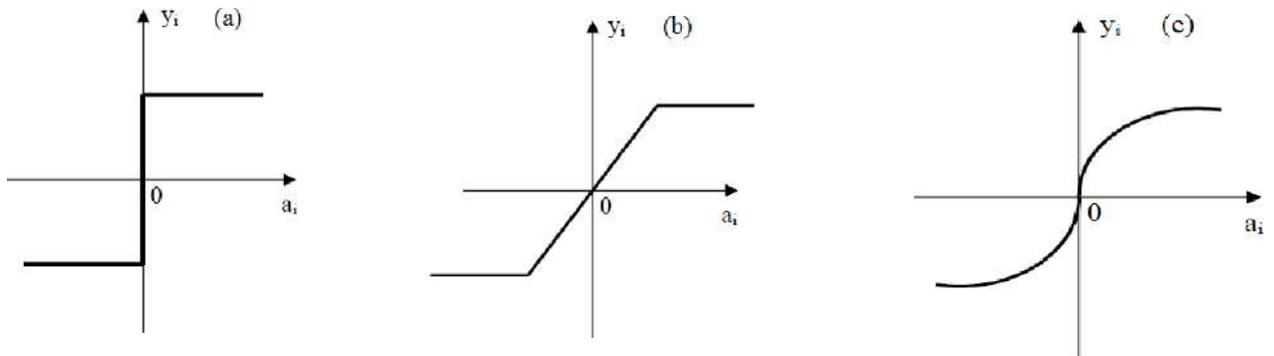


Figure 2.3: Différents types de fonctions de transfert pour le RNA
 (a) : fonction à seuil, (b) : linéaire par morceaux, (c) : sigmoïde.

On pourra résumer une modélisation de tel neurone par le tableau.2.1 et la figure 2.4, qui nous permettra de voir clairement le passage du neurone biologique vers le neurone formel.

Tableau 2.1 : passage du neurone biologique vers le neurone formel

Neurone biologique	Neurone artificiel
Synapses	Poids de connexions
Axones	Signal de sortie
Dendrite	Signal d'entrée
Somma	Fonction d'activation

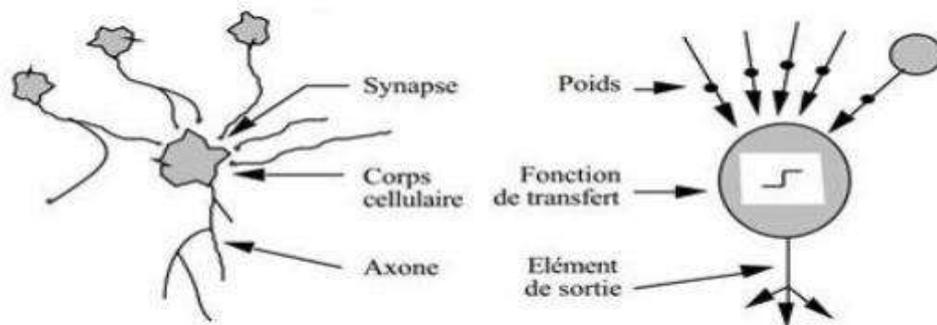


Figure 2.4 : Passage du neurone biologique vers le neurone formel

2.3.3 Réseaux multi couches (Multi-layer perceptron)

Les neurones sont arrangés par couche, dans lequel chacun des neurones d'une couche (n-1) est connecté à tous les neurones de la couche (n) comme montre la Figure 2.5 Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de chemin de l'information au sein d'un réseau neurone [18].

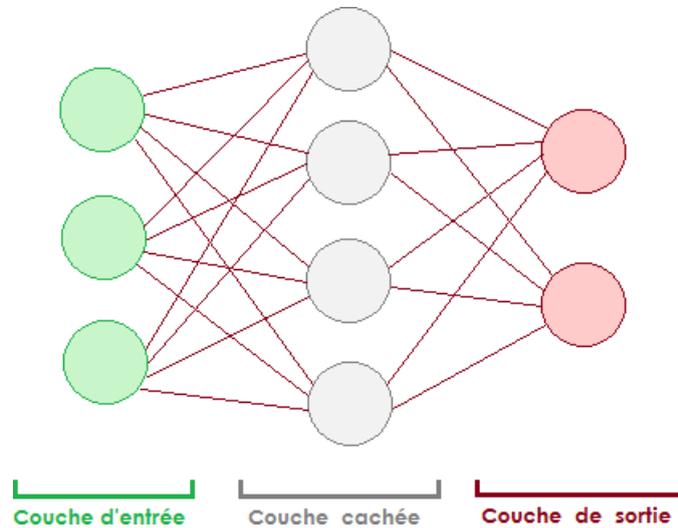


Figure 2.5: Schéma simplifié d'un réseau de neurone multicouche

2.3.4 Modèle mathématique des réseaux multi couches

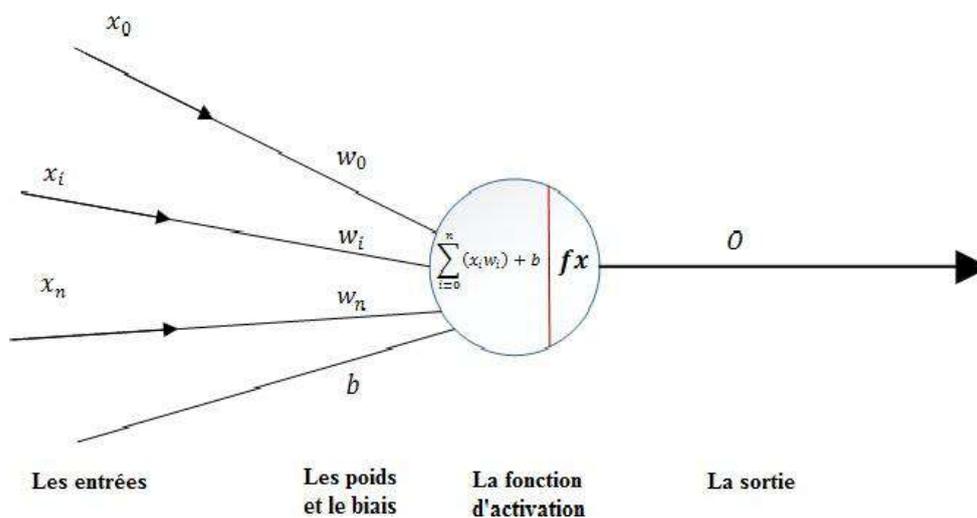


Figure 2.6: Modèle d'un neurone multicouche

2.3.4.1 Les poids

Un poids est une connexion entre les neurones qui porte une valeur. Plus la valeur est élevée, plus le poids est important, et plus nous attachons d'importance aux neurones du côté d'entrée du poids.

2.3.4.2 Le biais

Dans un réseau neurone, nous essayons de tenir compte des facteurs imprévus ou non observables, et c'est ça le rôle du biais. Chaque neurone qui n'est pas sur la couche d'entrée a un biais attaché à elle, et le biais, tout comme le poids, porte une valeur.

2.3.5 Réseau à connexions locales

Il s'agit d'une topologie multicouche, mais qui à l'image de la rétine, conserve une certaine topologie. Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche avale (Figure 2.7) [18].

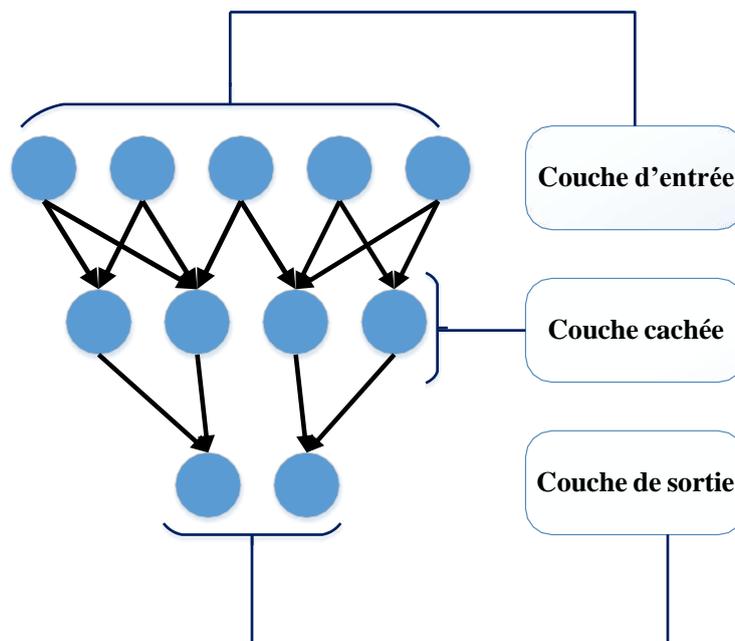


Figure 2.7: RNA à connexions locales

2.3.6 Réseau à connexions récurrentes (feedback network)

La connexion récurrente est actuellement la structure la plus utilisée. Cette popularité est une conséquence des résultats généralement bons. Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche (Figure 2.8) [18].

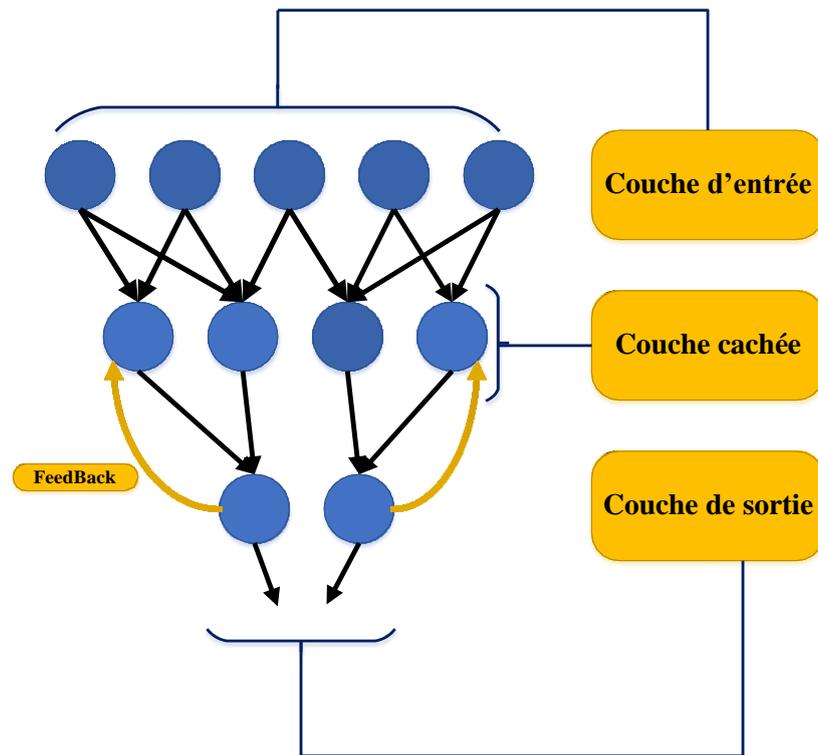


Figure 2.8: Réseau à connexions récurrentes

2.4 Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est une phase de développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré.

On distingue plusieurs types d'apprentissage, les plus fréquemment rencontrés dans la littérature sont l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

2.4.1 L'apprentissage supervisé

Cet algorithme d'apprentissage ne peut être utilisé que lorsque les combinaisons d'entrées-sorties désirées sont connues [19-21]. L'apprentissage est alors facilité et par là, beaucoup plus rapide que pour les autres algorithmes puisque l'ajustement des poids est fait directement à partir de l'erreur, soit la différence entre la sortie obtenue par le RNA et la sortie désirée.

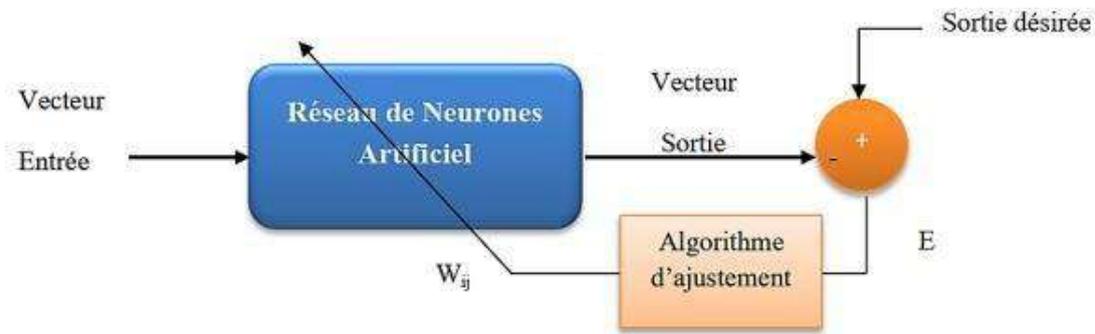


Figure 2.9: Apprentissage supervisé

2.4.2 L'apprentissage non supervisé

Il n'y pas de connaissances à priori des sorties désirées pour des entrées données. En fait, c'est de l'apprentissage par exploration où l'algorithme d'apprentissage ajuste les poids des liens entre neurones de façon à maximiser la qualité de classification des entrées [19,22,23].

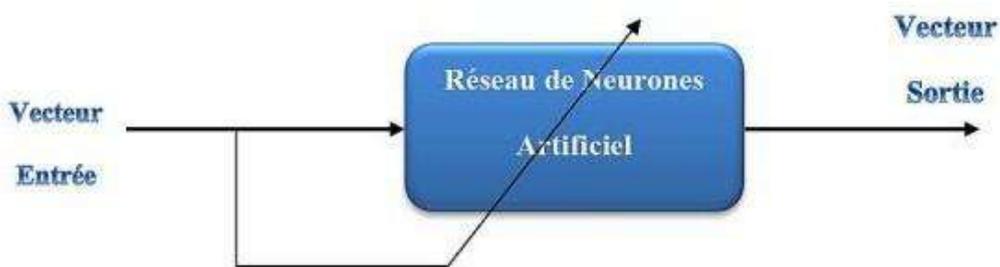


Figure 2.10 : Apprentissage non supervisé

2.5 Algorithmes d'apprentissage

2.5.1 Préapprentissage

Une fois l'apprentissage terminé, la structure et les poids entre les neurones sont fixés. Lorsque la tâche à effectuer par le RNA ne change pas significativement avec le temps, un RNA statique peut être très efficace et beaucoup plus simple à implémenter. Par ailleurs, il n'est alors pas aussi important de se soucier de la simplicité de la fonction d'apprentissage et de la rapidité de convergence du RNA [21].

2.5.2 Apprentissage continu

Un apprentissage continu est requis lorsque les combinaisons d'entrées-sorties idéales risquent de changer avec le temps ou selon diverses conditions externes. Le gain de flexibilité inhérent à la capacité d'adaptation du RNA s'obtient au détriment d'une implémentation plus complexe du système puisque l'algorithme d'apprentissage doit alors être intégré à la structure de calcul du RNA [21].

2.6 Domaines d'application

Aujourd'hui, l'intelligence artificielle est largement utilisée dans de nombreux domaines différents, soit l'ingénierie, la médecine et de nombreux autres domaines. Les domaines les plus communs qui exploitent ces réseaux neurones artificiels sont [24] :

2.6.1 L'industrie

La robotique moderne inclut très souvent des briques d'intelligence artificielle. C'est le cas des robots susceptibles d'apprendre un geste à partir d'une manipulation réalisée par un opérateur. Place à la maintenance prédictive, qui permet d'intervenir juste-à-temps. Des systèmes experts peuvent détecter, avant les êtres humains, des signes d'usure sur une machine, indiquant que celle-ci doit être révisée ou, qu'au contraire, elle ne nécessite pas encore d'intervention.

2.6.2 La santé

C'est l'un des secteurs les plus dynamiques en intelligence artificielle. Ces techniques sont utilisées pour diagnostiquer des maladies, notamment les cancers, aussi bien voire mieux que les spécialistes.

2.6.3 Le secteur bancaire et financier

Un des principaux usages de l'IA est la détection des opérations frauduleuses.

2.6.4 Le transport

Dans ce domaine, l'IA se met au service du véhicule autonome.

2.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le principe des réseaux de neurones artificiels (RNA). Dans un premier temps, nous avons expliqué le principe de fonctionnement d'un neurone formel, qui est l'entité de base qui compose un réseau de neurones, et d'un réseau de neurone multi couches ou MLP. Ensuite, nous avons présenté les principales techniques d'apprentissage d'un RNA. Finalement, nous avons exposé quelques domaines d'application des RNA.

Dans le chapitre suivant, on va élaborer le modèle neuronal qui va être utilisé dans la méthode de réglage de la tension des réseaux de distribution intelligents.

3.1 Introduction

Le flux de puissance s'écoule des niveaux de tension les plus élevés vers les niveaux les plus faibles. Le taux de pénétration de la production décentralisée devient plus en plus significatif dans les réseaux de distribution. Cependant, leur intégration dans ces réseaux va engendrer des impacts sur le transit de puissance, le réglage des relais de protection, la stabilité et la tension du réseau. Du fait de ces impacts, il apparaît vital d'effectuer un ajustement du système de contrôle du réseau pour maintenir sa qualité et sa fiabilité.

Dans ce chapitre, nous intéresserons au réglage de la tension au présence de la production décentralisée. La première partie, porte sur la problématique générale du réglage de la tension dans les réseaux de distribution et des moyens de réglage existants. Le réglage de tension, à l'aide des RNA, pour les réseaux de distribution est présenté en détails dans une deuxième partie. Dans un premier temps une analyse des résultats obtenus de l'application de l'écoulement de puissance au réseau test IEEE 33 jeux de barres est abordé. Par la suite, l'impact de la variation de la charge et de l'intégration des DGs sur le profil de tension et les pertes de puissance sont présenté et discuté. Enfin, nous allons présenter et discuter les résultats de l'application de la méthode de réglage de la tension, à l'aide des RNA.

3.2 Méthodes du contrôle de la tension

La variation de tension ΔV sur la ligne peut être approximativement représentée par l'équation suivante :

$$\Delta V = \frac{P * R + Q * X}{V} \quad (3.1)$$

Où, ΔV indique la variation de tension ; P et Q représentent la sortie de puissance active et réactive de DG, respectivement ; X et R sont, respectivement, la réactance et la résistance de la ligne raccordée au DG [25].

Une alimentation radiale simple reliée à un DG est illustrée sur la Figure 3.1 En général, comparativement à la ligne de transport, le rapport X/R est relativement faible dans un réseau de distribution. Selon l'équation 3.1, toute quantité importante de puissance injectée par les DGs entraînera une augmentation ou une baisse de tension sur le réseau de distribution, en particulier dans une alimentation de distribution faible avec une impédance élevée. La variation de tension dépendrait également de plusieurs facteurs, dont la taille et l'emplacement des DGs et la méthode de réglage de

la tension. Dans la littérature, de vastes recherches ont été entreprises pour résoudre ce problème, et les techniques suivantes ont été utilisées avec succès dans un éventail d'applications [25].

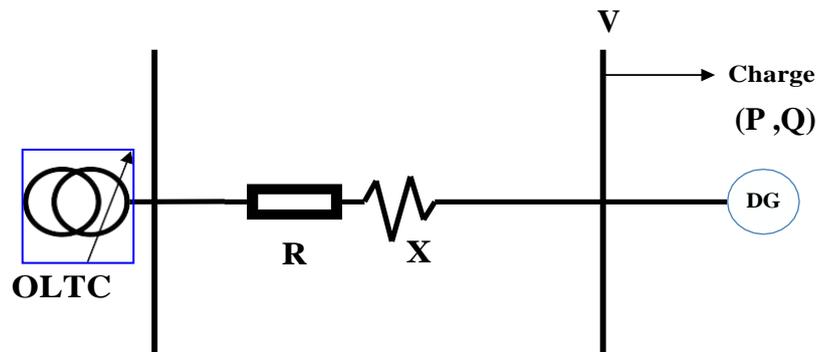


Figure 3.1 : Schéma d'un réseau à deux jeux de barres avec un DG

3.2.1 Transformateurs régleurs en charge (On-load Tap Changer (OLTC))

La technique de contrôle de tension la plus couramment utilisée sur les réseaux de distribution consiste à utiliser des OLTCs qui maintiennent une tension secondaire adéquate en sélectionnant la position de prise appropriée. Ces dispositifs permettent de contrôler la tension du jeu de barres secondaire par la modification de leur rapport de transformation en fonction de l'évolution des charges et des fluctuations de la tension amont. L'ajustement de la tension peut être réalisé en charge ou hors charge. Un relais surveille en continu la tension de sortie du transformateur, une commande de changement de prise est lancée lorsque la tension est supérieure aux limites prédéfinies (généralement $\pm 5\%$)

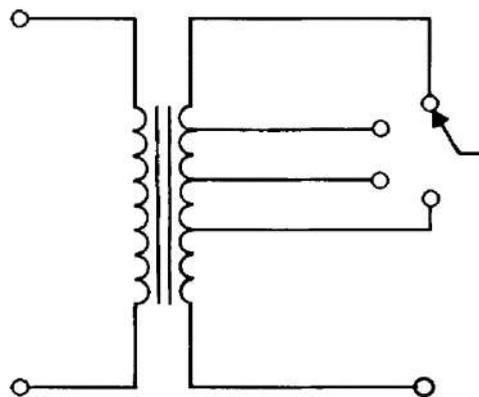


Figure 3.2: Transformateur régleur en charge

3.2.2 Contrôle du facteur de puissance du générateur

Les générateurs synchrones peuvent ajuster leur puissance réactive pour régler la tension du réseau. Cependant, cette opération pourrait entraîner plusieurs problèmes graves, y compris un courant

élevé et une surchauffe, déclencher la limite d'excitation ou la protection contre le courant excessif et déconnecter le générateur du réseau [25].

3.2.3 Compensateurs de l'énergie réactive

3.2.3.1 Bancs de condensateurs

Tant que la puissance réactive du banc de condensateurs puisse commandée facilement sur une plage suffisamment grande et à un taux adéquat, les bancs de condensateurs peuvent jouer le rôle des régulateurs idéal de tension. Un banc de condensateurs peut être utilisé aussi pour éliminer les variations de tension provoquées par des changements des puissances active et réactive de la charge.

3.2.3.2 Compensateurs synchrones

Cette solution utilise des générateurs conventionnels pour générer ou absorber la puissance réactive. En effet, une machine synchrone peut être contrôlée de façon à préserver la tension via la puissance réactive qu'elle génère. Le principe du contrôle est le même que celui des machines utilisée dans les centrales électriques avec un régulateur en charge du maintien de la tension.

3.2.3.3 Dispositifs FACTS

Les systèmes FACTS sont des dispositifs basés sur l'électronique de puissance qui permettent de contrôler le transit de puissance et d'augmenter la capacité de transport des réseaux et d'améliorer la stabilité de tension. Ces dispositifs pourront régler la tension au jeu de barres de raccordement en modifiant les échanges de puissances réactives par une injection en parallèle (dans le cas des FACTS shunt). Une compensation de la chute de tension peut être réalisée par la modification de l'impédance des lignes en utilisant des systèmes FACTS série.

3.2.3.4 Stockage d'énergie

À l'heure actuelle, les technologies de stockage de l'énergie sont à divers stades de développement et de déploiement. Les batteries hydroélectriques et au plomb-acide sont la technologie de stockage la plus répandue déployée sur les systèmes électriques, elles sont techniquement et commercialement matures. Alors que le stockage d'énergie magnétique supraconductrice est techniquement possible mais n'est pas mature. Ces dispositifs utilisent un système de conversion de puissance pour se connecter au réseau de distribution, ils peuvent compenser les variations de tension à court ou moyen terme. Pour des problèmes de tension de plus longue durée, une capacité de stockage d'énergie excessive est nécessaire avec un coût en capital élevé [26].

3.2.3.5 Reconfiguration de réseau

La reconfiguration du réseau fait référence au processus de changement de configuration d'exploitation par la modification de l'état topologique, en service ou hors service, de certaines branches du réseau. La pleine utilisation des ressources du réseau, la réduction des pertes, l'amélioration du profil de tension et de la stabilité du réseau sont les avantages de cette stratégie.

L'application du processus de reconfiguration est possible seulement pour le réseau dont la structure est maillée, sa composition pouvant être changée à condition de respecter la contrainte d'arborescence [26].

3.3 Impact de la production décentralisée sur le profil de tension

Le problème du réglage de la tension a été considéré comme l'un des problèmes principaux lors de l'intégration des générateurs distribués dans les réseaux de distribution. Plusieurs recherches ont été effectuées pour décrire mathématiquement l'impact des DGs sur le profil de tension du réseau de distribution. Dans cette section, une brève discussion sur l'impact des DGs sur le profil de tension du réseau de distribution est présentée [27, 28].

Considérons un réseau de distribution simple (à deux jeux de barres) auquel il est connecté un DG, comme le montre la Figure 3.3.

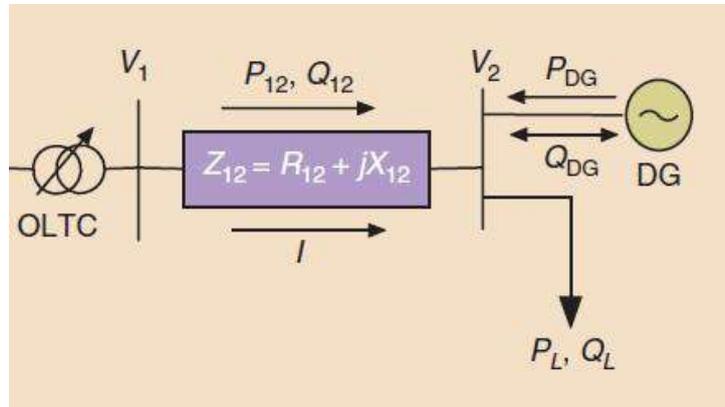


Figure 3.3 : Ecoulement des puissances dans un réseau à deux jeux de barres avec DG

Où V_1 et V_2 sont les tensions au jeux de barres 1 et 2, respectivement ; R_{12} et X_{12} sont la résistance et la réactance de la ligne, respectivement ; P_{12} et Q_{12} sont, respectivement, les puissances active et réactive qui circule dans la ligne ; P_L et Q_L sont les puissances active et réactive de la charge, respectivement [27, 28].

Lorsque le DG ne débite aucune puissance, la chute de tension entre les jeux de barres 1 et 2 est approximativement égal à :

$$V_1 - V_2 = P_{12} * R_{12} + Q_{12} * X_{12} \quad (3.2)$$

Si le DG injecte une puissance dans le réseau, l'équation (3.2) peut être modifiée comme suit :

$$V_1 - V_2 = (P_L - P_{DG}) * R_{12} + (Q_L \pm Q_{DG}) \quad (3.3)$$

Où P_{DG} et Q_{DG} sont les puissance active et réactive du DG.

Lorsque la puissance active injectée par le DG est supérieure à P_L , le terme « $P_L - P_{DG}$ » de l'équation 3.3 devient négatif et V_2 devient supérieur à V_1 . De l'équation 3.3, il est clair que l'augmentation de la tension V_2 est directement proportionnelle à l'injection de puissance active par la DG [27, 28].

3.3 Estimation du profil de tension en présence de la production décentralisée

3.3.1 Méthode basée sur l'écoulement de puissance

Le problème de l'écoulement de puissance ou bien la répartition de charge consiste à calculer les tensions (amplitudes et phases) dans un réseau de distribution suivant des répartitions données des puissances actives et réactives. Mathématiquement, le problème peut être réduit à un ensemble d'équations non linéaires, où les modules et les phases des tensions aux niveaux des jeux de barres sont les variables. Le résultat du problème de l'écoulement de puissance aide l'exploitant du système électrique à connaître les niveaux de tension de tous les jeux de barres et les pertes de puissance.

3.3.2 Méthode basée sur les unités de télégestion (RTUs : Remote Terminal Units)

Un RTU est un dispositif d'acquisition de données utilisé dans le réseau de distribution intelligent ou distribution smart grids. La fonction du RTU est de collecter des données de réseau, d'exécuter des algorithmes, de traiter des informations, et envoyer des données à un poste de contrôle via un lien de communication. La Figure 3.4 représente un réseau de distribution équipé des RTUs. Dans ce cas, les RTUs sont installés avec chaque DG [27, 28].

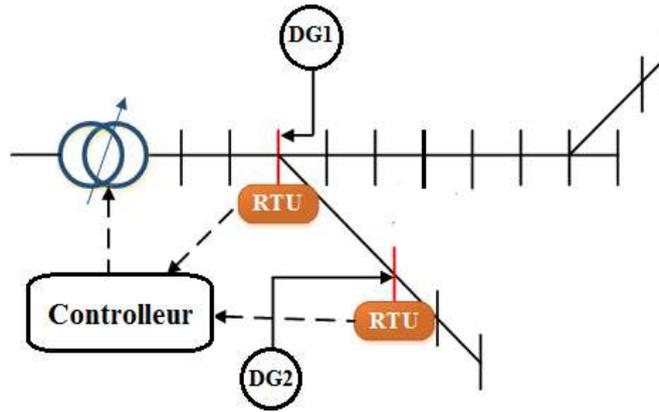


Figure 3.4 : Structure du réseau avec DGs et RTUs

Généralement, la possibilité d'une tension maximale se produit uniquement au niveau du jeu de barres de référence ou des jeux de barres qui ont des sources de puissance telles que les DGs. Les RTUs connectés à ces points peuvent lire directement les tensions des jeux de barres pour une valeur de tension maximale. Pour les tensions minimales, l'événement possible se produit entre deux DGs ou au jeu de barres terminal. Pour estimer la valeur de tension minimale, la méthode basée sur les RTUs suppose que la charge est concentrée entre deux DGs et que la tension minimale est située entre ces DGs. V_{est} la tension minimale peut être calculer par les équations suivantes [27] :

$$V_{est,DG1} = V_1 - \left(P_1 \frac{r}{2} + Q_1 \frac{x}{2} \right) \tag{3.4}$$

$$V_{est,DG2} = V_2 - \left(P_2 \frac{r}{2} + Q_2 \frac{x}{2} \right) \tag{3.5}$$

$$V_{est} = \frac{V_{est,DG1} + V_{est,DG2}}{2} \tag{3.6}$$

3.3.3 La méthode de contrôle de la tension

La méthode basée sur les RNA pour contrôler la tension d'un réseau de distribution est comme suite : La première étape de la méthode, consiste à estimer, à l'aide du RNA, les valeurs min et max de la tension du réseau comme montre la Figure 3.5. Le RNA utilise les tensions des RTUs connectés avec les DGs comme entrées. Les sorties du RNA sont les tensions min et max du réseau. Par la suite, les valeurs max et min estimées, sont utilisées pour déterminer la position de prise appropriée du régleur au sein du transformateur en utilisant les équations suivantes [27, 28] :

$$V_{new} = V_{UL} - \left(\frac{V_B - R_{ng}}{2} \right) - (V_{max} - V_{old}) \tag{3.7}$$

$$Tap = \frac{(V_{new} - 1) * 16}{(1.05 - 0.95)} \tag{3.8}$$

Ou V_{new} est nouvelle tension ; V_{UL} est la limite max de la tension (égale 1.05 p.u) ; V_B est la différence entre les limites maximal et minimal de la tension (égale 0.1 p.u) ; R_{ng} est la différence entre les tensions maximal et minimal ; V_{max} est la valeur maximal de la tension ; V_{old} représente la tension de référence ; Tap est la position du changeur de prise.

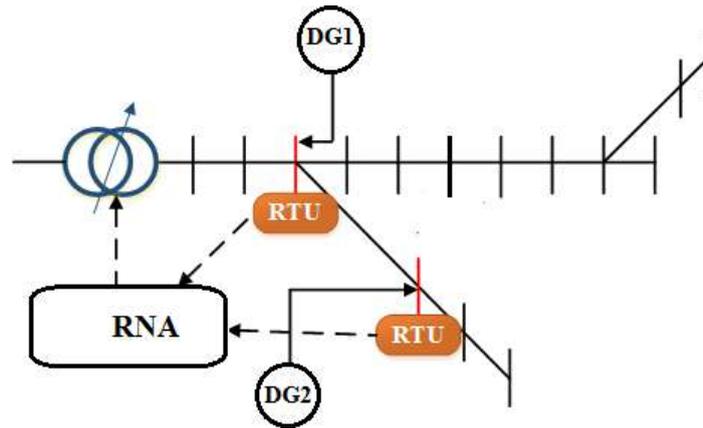


Figure 3.5: Contrôle de tension

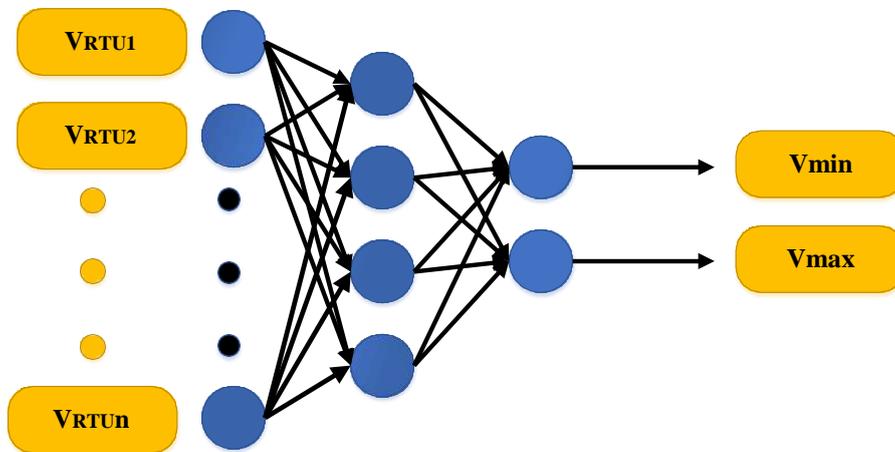


Figure 3.6: Structure du RNA

3.3.4 Génération des données d'apprentissage du RNA

La première étape perpétrée dans le processus hors ligne concerne la préparation des données pour la procédure d'apprentissage et de test du RNA. L'ensembles de données d'apprentissage et de test sont générés en faisant varier à la fois la puissance demandée (active et réactive) et les puissances

actives générées par les DGs. La charge est variée dans l'intervalle 50% et 150% et les puissances des DGs dans l'intervalle 0 et 4500 kW [28].

3.4 Application au réseau test IEEE 33 jeux de barres

Les caractéristiques du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres de la Figure 3.7 sont données comme suit [28, 29, 30] :

- Nombre de jeux de barres =33 ;
- Nombre de branches =32 ;
- Jeu de barres de référence N° =1 ;
- Puissance de base = 100 MVA ;
- Tension de base =12,66 Kv ;
- Poste source avec un transformateur régleur en charge possédant 17 prises [-8, -7, -6, -5, -4, -3, -2 -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6, +7, +8];
- Le rapport de changement de prise est de 0,00625 p.u avec une plage de variation de tension comprise entre 0.95 p.u. et 1.05 p.u.
- Les puissances active et réactive totale demandées du réseau sont 3.72 MW et 2.3 MVar.

Les données du réseau test sont présentées dans l'annexe.

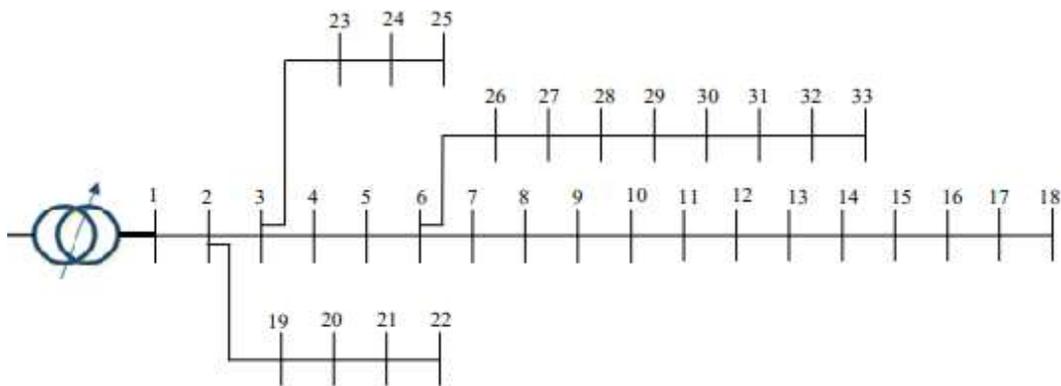


Figure 3.7 : Représentation simplifiée du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres

Le tableau 3.1 représente le type de chaque jeu de barres et de chaque ligne constituant le réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres.

Tableau 3.1 : Identification de la topologie du réseau de distribution IEEE 33 Jeux de barres

JB de référence	1
JB terminaux	18, 22, 25 ,33
JB intermédiaires	4,5,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,19,20,21,23,24,26,27,28,29,30,31,32
JB communs	2, 3, 6
Ligne principale	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18
Lignes latérales	2, 19, 20, 21,22
	3, 23, 24,25
	6, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32,33

3.4.1 Ecoulement de puissance

Le tableau 3.2 montre les modules et les angles des tensions au niveau de chaque jeu de barres.

La figure 3.8 représentent le module de tension au niveau de chaque jeu de barres. La valeur de tension la plus basse est 0.9134 p.u qui se trouve au niveau du jeu de barres 18.

Tableau 3.2 : Ecoulement de puissances pour le réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres

JB	Tension (pu)	Phase (rad)	JB	Tension (pu)	Phase (rad)	JB	Tension (pu)	Phase (rad)
1	1.0000	0	12	0.9271	0.0032	23	0.9794	0.0012
2	0.9970	0.0003	13	0.9210	-0.0048	24	0.9727	-0.0004
3	0.9830	0.0017	14	0.9187	-0.0063	25	0.9694	-0.0012
4	0.9755	0.0029	15	0.9173	-0.0069	26	0.9479	0.0032
5	0.9682	0.0041	16	0.9160	-0.0074	27	0.9453	0.0043
6	0.9498	0.0025	17	0.9140	-0.0088	28	0.9339	0.0059
7	0.9463	-0.0015	18	0.9134	-0.0089	29	0.9257	0.0074
8	0.9415	-0.0009	19	0.9965	0.0001	30	0.9222	0.0093
9	0.9352	-0.0023	20	0.9929	-0.0011	31	0.9180	0.0079
10	0.9294	-0.0035	21	0.9922	-0.0015	32	0.9171	0.0075
11	0.9286	-0.0033	22	0.9916	-0.0018	33	0.9168	0.0074

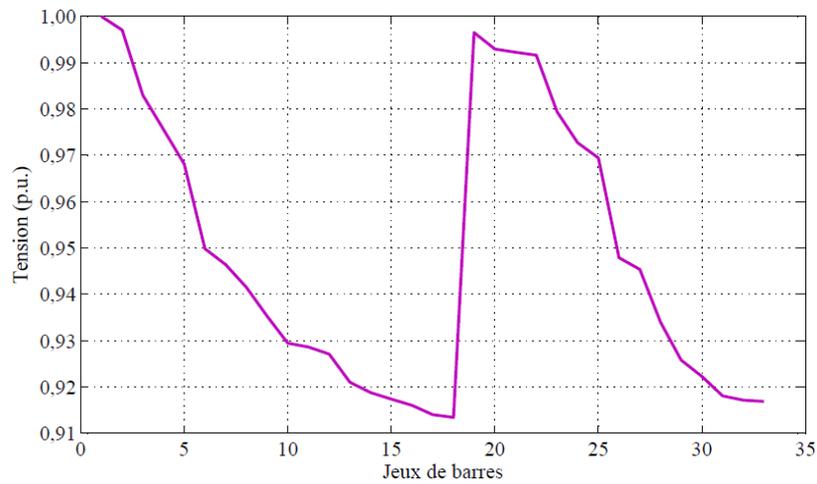


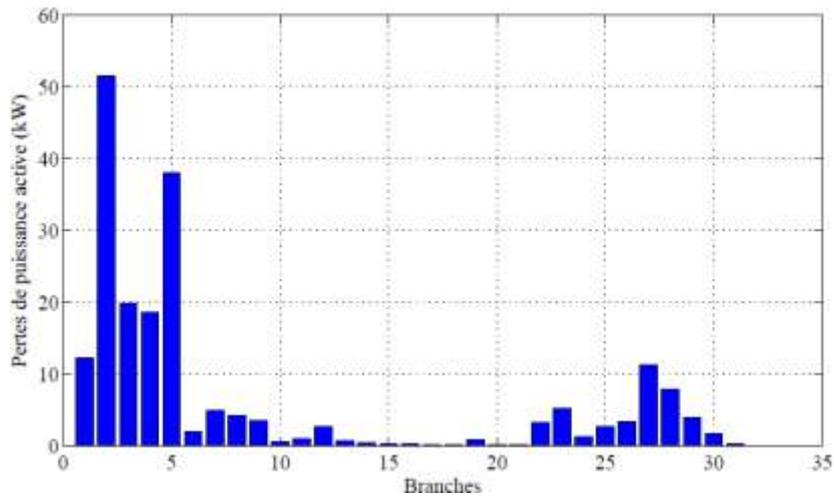
Figure 3.8 : Profile de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres

Le tableau 3.3 montre les pertes de puissance active et réactive dans chaque branche du réseau IEEE 33 jeux de barres.

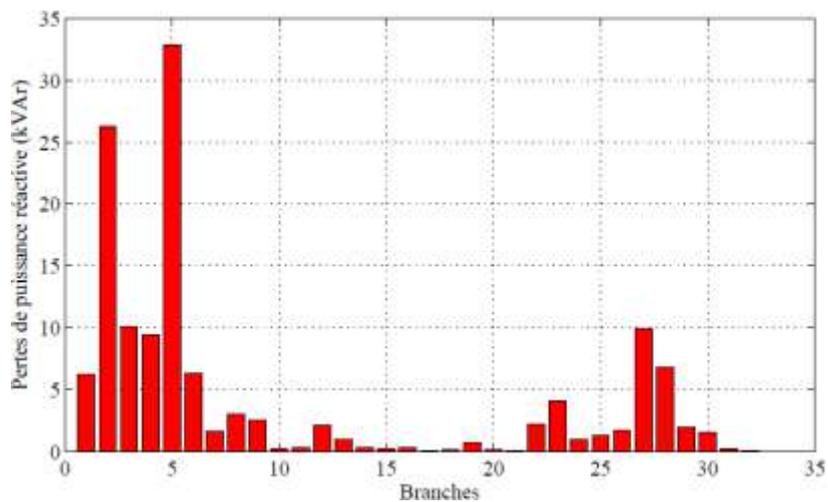
Tableau 3.3 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 33 Jeux de barres

Branche	Pertes active (kW)	Pertes réactive (kVAr)	Branche	Pertes active (kW)	Pertes réactive (kVAr)
1	12.1927	6.2154	17	0.0531	0.0416
2	51.5711	26.2668	18	0.1610	0.1536
3	19.7934	10.0806	19	0.8322	0.7498
4	18.5931	9.4697	20	0.1008	0.1177
5	38.0256	32.8256	21	0.0436	0.0577
6	1.9131	6.3238	22	3.1812	2.1737
7	4.8342	1.5976	23	5.1432	4.0613
8	4.1773	3.0012	24	1.2873	1.0073
9	3.5575	2.5216	25	2.5940	1.3213
10	0.5531	0.1829	26	3.3211	1.6909
11	0.8802	0.2911	27	11.2766	9.9424
12	2.6638	2.0958	28	7.8180	6.8108
13	0.7286	0.9590	29	3.8881	1.9805
14	0.3569	0.3176	30	1.5928	1.5742
15	0.2813	0.2054	31	0.2131	0.2484
16	0.2515	0.3358	32	0.0132	0.0205
Pertes de puissance active				201.8925 kW	
Pertes de puissance réactive				134.6413 kVAr	

La figure 3.9 a et b représente les pertes de puissance active et réactive au niveau de chaque branche. Pour les pertes actives, la plus grande valeur 51.5711 kW se trouve au niveau de la branche numéro 2, alors que la plus grande valeur des pertes réactives 32.8256 kVAr se trouve au niveau de la branche numéro 5. Cela est dû aux valeurs des courants traversant ces branches ainsi qu'aux caractéristiques électriques, résistance et réactance relatives à chaque branche du réseau. Les pertes totales active et réactive du réseau sont respectivement 201.89 kW et 134.64 kVAr représentant 5.42 % et 5.85 % de la puissance demandée.



a. Pertes de puissance active



b. Pertes de puissance réactive

Figure 3.9 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau IEEE 33 jeux de barres

3.4.2 Impact de la variation de la charge sur le profil de tension et les pertes de puissance

La figure 3.10 représente, le profil de tension du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres pour trois niveaux de charge (50 %, 100 % et 150 %). D'après les courbes des trois niveaux de charge, les valeurs de tension les plus basses sont 0.9583 p.u, 0.9134 p.u et 0.8642 p.u, respectivement, au niveau du jeu de barres 18.

Les figures 3.11 et 3.12 représentent, respectivement, les pertes de puissances active et réactive dans les branches du réseau test IEEE 33 jeux de barres pour les trois niveaux de charge. Les pertes totales active sont 46.9929 kW, 201.8925 kW et 492.8714 kW et les pertes totales réactive du réseau sont 31.3011 kVAr, 134.6413 kVAr et 329.1664 kVAr pour les trois niveaux de charge.

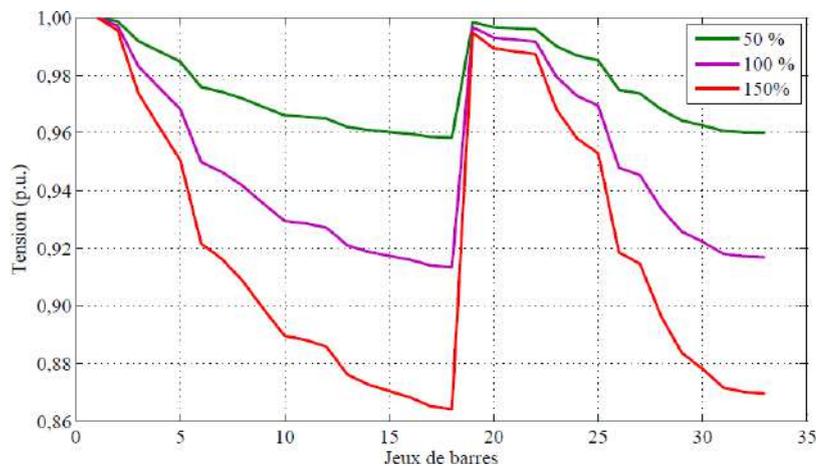


Figure 3.10 : Profil de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres pour trois niveaux de charge

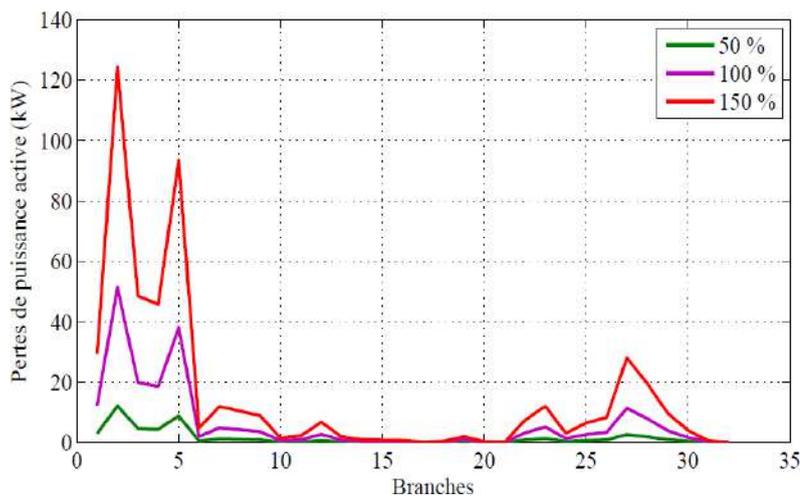


Figure 3.11 : Pertes de puissances active dans les branches du réseau IEEE 33 jeux de barres pour trois niveaux de charge

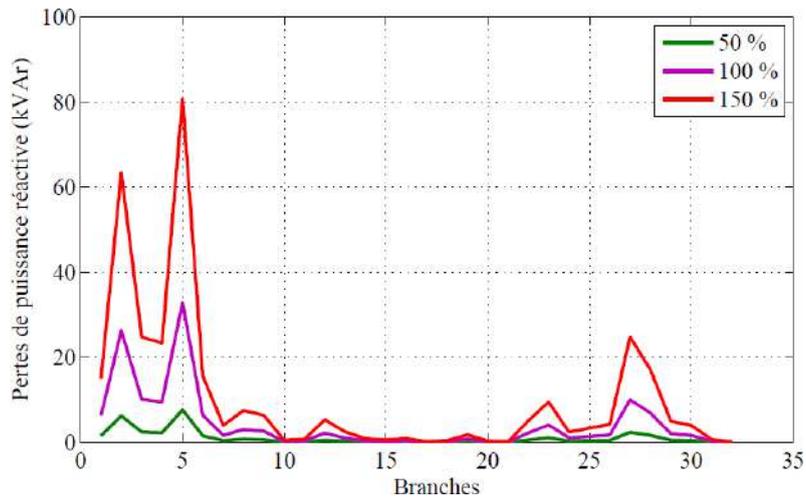


Figure 3.12 : Pertes de puissances réactive dans les branches du réseau IEEE 33 jeux de barres pour trois niveaux de charge

3.4.3 Impact des DGs sur le profil de tension et les pertes de puissance

Dans cette section, nous étudions l'impact de l'intégration des DGs sur le profil de tension et les pertes de puissances.

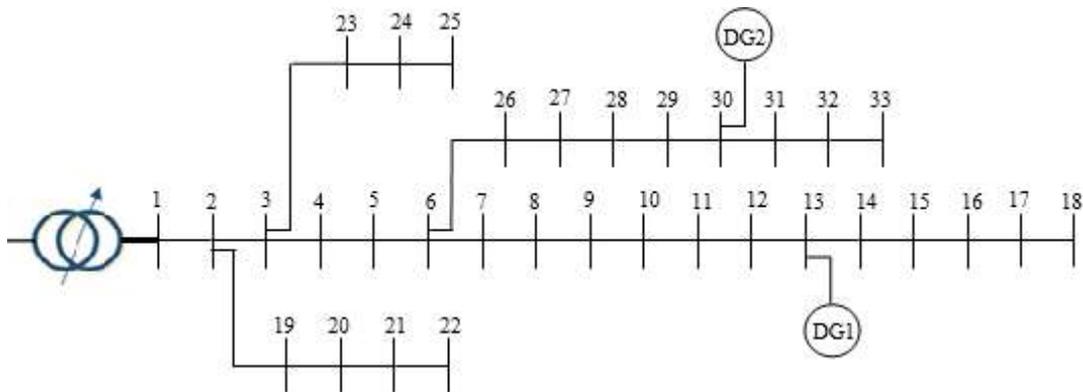


Figure 3.13 : Réseau IEEE 33 jeux de barres avec deux DGs

Nous procédons à l'intégration de deux DGs de 2.5 MW et de 1 MW dans les jeux de barres 13 et 30, comme le montre la Figure 3.13.

Le profil de la tension présenté par la Figure 3.14 représente le niveau de tension au niveau de chaque jeu de barres du réseau sans DGs et avec l'intégration de deux DGs. En remarque que le niveau de tension au niveau de chaque jeu de barres du réseau avec l'intégration de deux DGs dépasse la limite de 1.05 p.u.

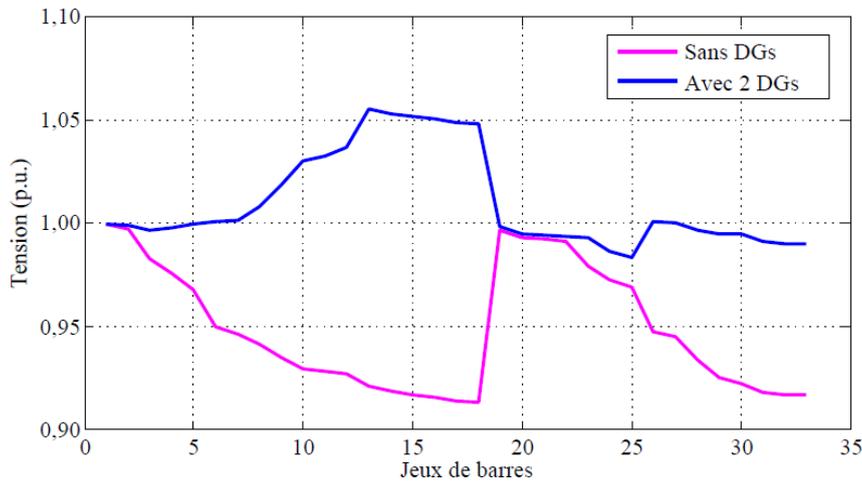


Figure 3.14 : Influence des DGs sur le profil de tension du réseau IEEE 33 jeux de barres

Les pertes totales active sont 201.8925 kW et les pertes totales réactive sont 134.6413 kVAr du réseau sans DGs et les pertes totales active sont 181.5032 kW et les pertes totales réactive sont 127.5139 kVAr du réseau avec deux DGs

3.4.4 Contrôle de la tension à l'aide des réseaux de neurones

On va contrôler la tension avec la méthode basée sur les réseau neurones artificiels. Les paramètres utilisées pour la construction et l'apprentissage des RNA sont les suivantes :

- Le nombre de neurone dans la couche cachée : $N_{hidden} = 10$;
- Le nombre d'époch : $N_{epoch} = 100$;
- Les tailles des données utilisées pour l'apprentissage pour le réseau IEEE 33 jeux de barres est (147 x 4);
- Pour le réseau on a divisé les données comme suit : 80 % des données pour l'apprentissage et 20 % pour le test.

3.5.4.1 Estimation des tensions V_{min} et V_{max}

Après l'application au réseau de distribution IEEE 33 jeu de barres, on a obtenu les résultats représentés sur les Figures 3.13 et 3.14. Les Figures 3.15 et 3.16 représentent une comparaison entre la tension V_{min} actuelle (obtenue par écoulement de puissance) et celle estimée par RNA dans les phases d'apprentissage et de test. On remarque que les deux courbes des tensions sont presque identiques.

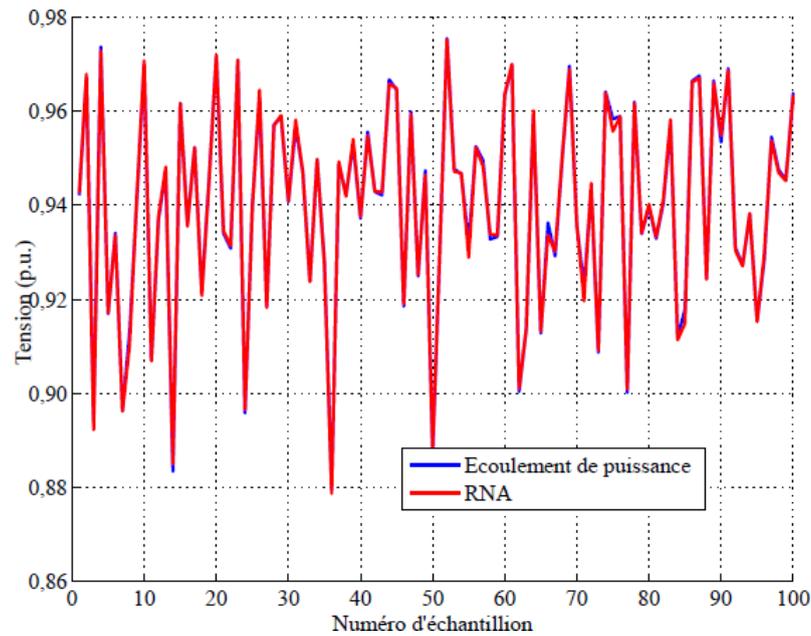


Figure 3.15: Comparaison de la tension V_{min} actuelle et estimée du réseau IEEE 33 jeux de barres (phase d'apprentissage)

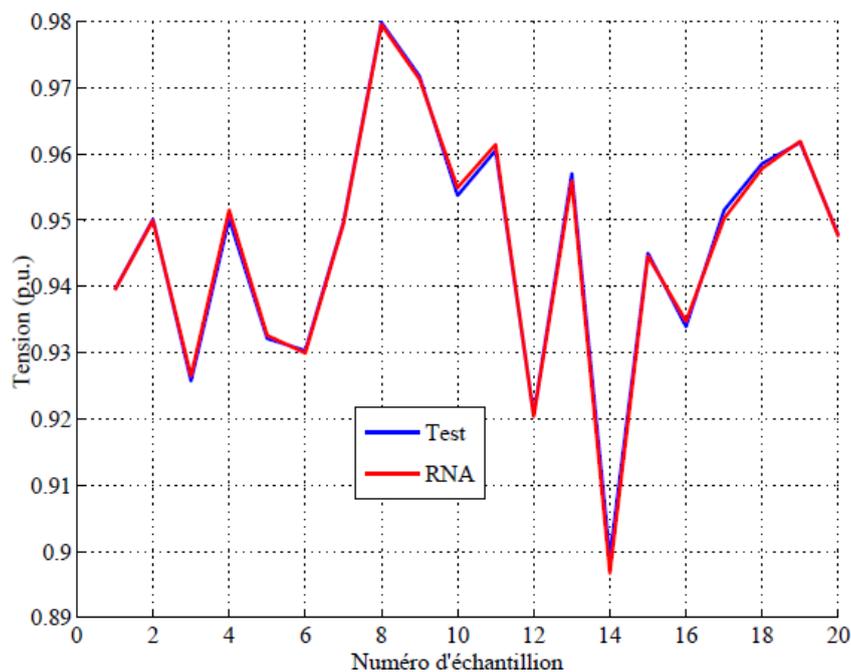


Figure 3.16: Comparaison de la tension V_{min} actuelle et estimée du réseau IEEE 33 jeux de barres (phase de test)

Les Figures 3.17 et 3.18 représentent des comparaisons entre les tensions maximales (V_{max}) actuelles et estimées par RNA pour les phases d'apprentissage et de test, respectivement. On constate d'après ces figures que les deux courbes des tensions actuelles et estimées sont presque identiques.

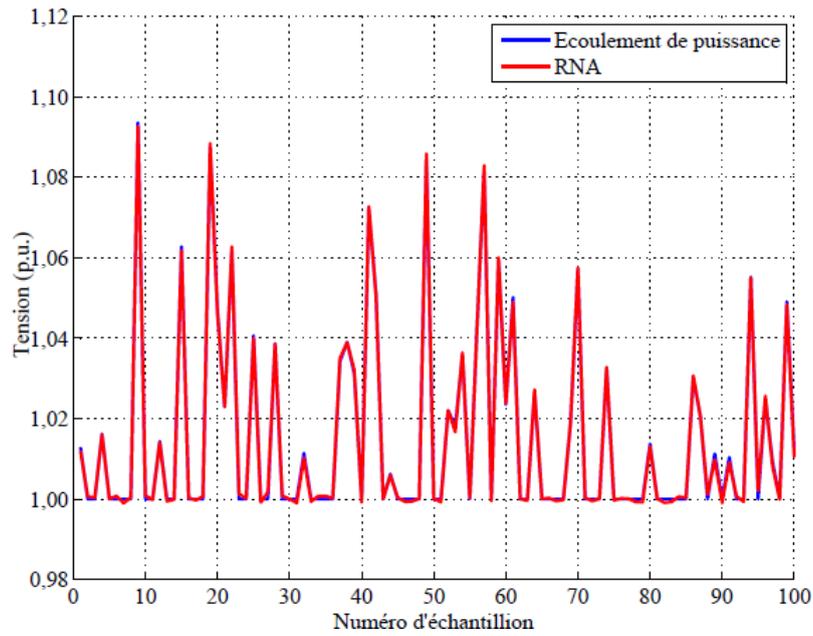


Figure 3.17 : Comparaison de la tension V_{max} actuelle et estimée du réseau IEEE 33 jeux de barres (phase d'apprentissage)

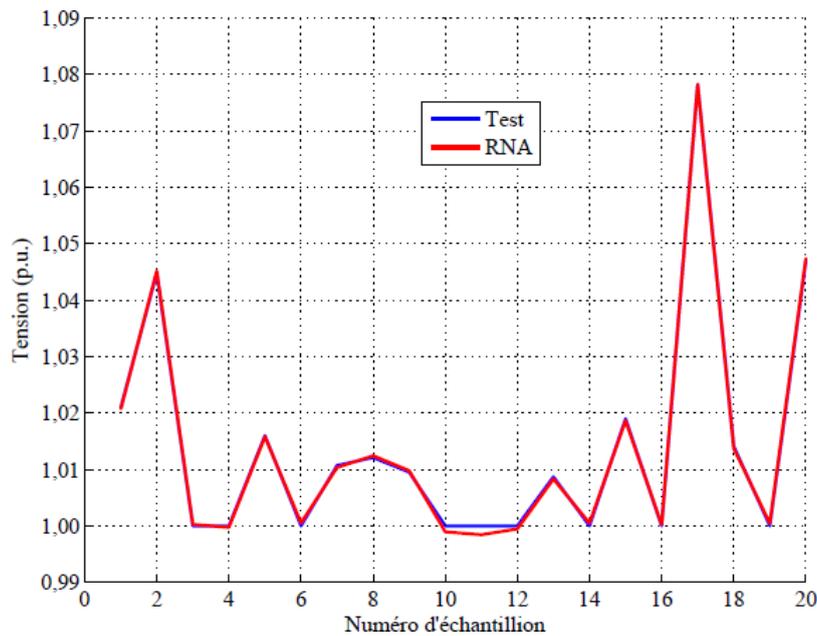


Figure 3.18 : Comparaison de la tension V_{max} actuelle et estimée du réseau IEEE 33 jeux de barres (phase de test)

3.5.4.2 Contrôle de la tension du réseau IEEE 33 jeux de barres

Après l'apprentissage du RNA, ce dernier sera utilisé pour contrôler la tension du réseau. Afin de valider la méthode, un scénario de violation des limites de tension est simulé. La Figure 3.19 représente le profil de tension du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres avant et après la régulation de

tension. En remarque que la tension minimale du réseau, avant régulation, est d'environ 0.9134 p.u qui est inférieur à la limite de tension min admissible 0.95 p.u. Afin de régler le profil de tension du réseau, le transformateur régleur en charge (OLTC) modifiera son position de prise. Dans ce cas, le OLTC a changé son réglage de prise au numéro de prise +7, ce qui augmente la tension à la valeur 1.0433 p.u. Après la régulation, la tension minimale du réseau est maintenue dans l'intervalle admissible [0.95-1.05 p.u].

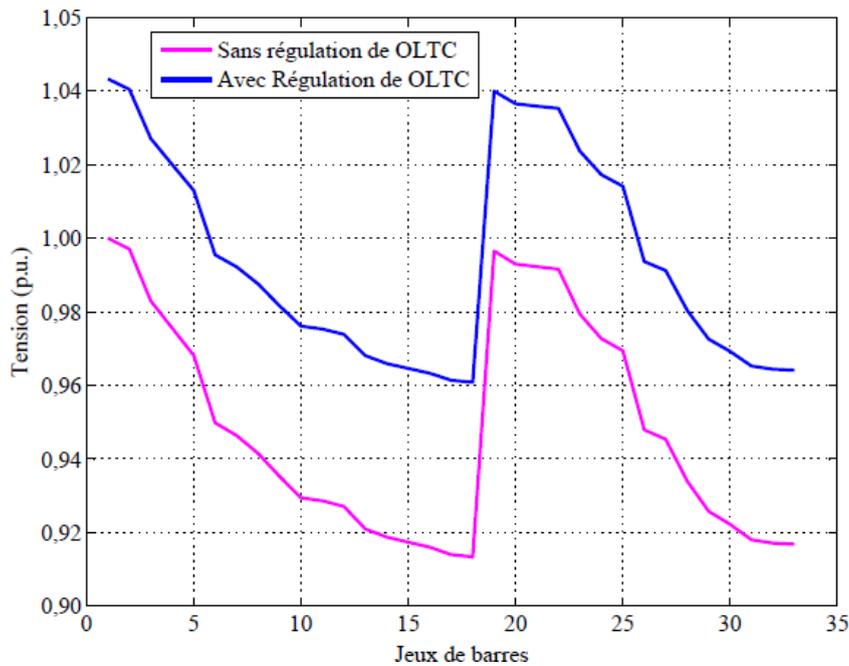


Figure 3.19 : Profil de tension sans et avec régulation de OLTC du réseau 33 jeux de barres

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre une méthodologie pour le contrôle de la tension d'un réseau de distribution intelligent avec réseaux de neurones artificiels (RNA) est présentée. Cette méthode est basée sur l'estimation des tensions maximale et minimale à l'aide des RNA et des RTUs.

Typiquement, le transformateur régleur en charge (OLTC) est utilisé comme un outil de réglage de la tension du réseau de distribution. Ce dispositif permet de contrôler la tension du jeu de barres secondaire par la modification de leur rapport de transformation en fonction de l'évolution des charges et des fluctuations de la tension amont. Dans notre étude, ce dispositif est utilisé pour contrôler la tension du réseau de distribution. Nous avons testé la méthode pour contrôler de la tension d'un réseau de distribution intelligent. D'abord on a estimé, à l'aide du RNA, les valeurs minimale et maximale de la tension par le RNA en utilisant des données obtenues à partir d'écoulement de puissance. Ensuite on a utilisé ces valeurs minimales et maximales de la tension pour déterminer la position de prise

appropriée du régulateur au sein du transformateur. Enfin, on a comparé les valeurs du RNA avec les valeurs obtenues à partir de l'écoulement de puissance. Nous avons mis en application cette méthode sur un réseau test : le réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres.

Conclusion générale

La libéralisation du marché de l'électricité et l'augmentation de la consommation d'énergie ont conduit les chercheurs à développer des techniques pour l'intégration des nouvelles sources de génération d'énergie au niveau du réseau de distribution. Ce type de source de production est généralement connue sous la nomination production décentralisée (Distributed Generation (DG)).

Le travail présenté dans ce mémoire s'est porté sur le contrôle de la tension des réseaux de distribution en présence de la production décentralisée à l'aide des réseaux de neurones artificiels.

Dans le cadre de ce travail, nous avons présenté :

- Les réseaux électriques classiques, et on les a comparés avec les réseaux modernes ou intelligents.
- Une prestation du réseau neurone artificiel, son historique, l'inspiration biologique, leur modèles mathématiques et ces différentes structures, aussi on a vu les différents types d'apprentissage et les algorithmes utilisés pour l'apprentissage.
- Les différentes méthodes de contrôle de la tension, de l'impact de l'insertion des DGs sur le profil de tension et les pertes de puissances et de la méthode pour le contrôle de la tension en présence de la production décentralisée, permet d'estimer les tension min et max d'un réseau à l'aide d'un réseau de neurones artificiels multicouches et des RTUs. Des tests de validation sont menés, sur un réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres.

De nombreuses perspectives s'ouvrent dans l'avenir à savoir, parmi lesquelles on peut citer :

- Le contrôle de la tension des réseaux de distribution intelligent en présence des énergies renouvelables, des véhicules électriques, des batteries de stockage et des maisons intelligente ;
- Le développement des techniques pour la gestion de la demande en parallèle avec le contrôle de la tension.

Bibliographie

- [1] D. Labeled, “Production décentralisée et couplage au réseau”, Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2008.
- [2] W. C. B. Vicente, “Modélisation des réseaux de distribution sous incertitude”, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [3] V. Gouin, “Evaluation de l’impact du Smart Grid sur les pratiques de planification en cas d’insertion de production décentralisée et de charges flexibles”, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2015.
- [4] N. Ketfi, “Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d’énergie dispersée”, Thèse de doctorat, Université de Batna, 2014.
- [5] Les smart grids dans la région grenobloise, disponible sur le site : http://www.grenoble-isere.com/media/upload/pdf_publications/AEPI-Etude-SmartGrid-Etude-2016-Fr.pdf.
- [6] Smart Grids : Le savoir-faire français, Disponible sur le site : <https://www.ademe.fr/smart-grids-savoir-faire-francais>.
- [7] E. Duverger, “Réseau électrique intelligent pour les nouveaux usages”, Thèse de doctorat, Université de Perpignan Via Domitia, 2019.
- [8] A. Boukaroura, “Contribution à la modélisation et à l’optimisation des réseaux de distribution sous incertitudes”, Thèse de doctorat, Université de Oum El Bouaghi, 2021.
- [9] G. Guérard, “Optimisation de la diffusion de l’énergie dans les smart-grids”, thèse de doctorat, Université de Versailles, 2014.
- [10] M. E. El-hawary, “The Smart Grid – State-of-the-art and Future Trends”, Electric Power Components and Systems, Vol. 42, No. 3-4, pp. 239–250, 2014.
- [11] DJABALI Abdelhak, “Mitigation des risques d’instabilité de tension des réseaux électriques intelligents par la gestion de la demande”, Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas Setif1, 2019.
- [12] B. Berseneff, “Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur”, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2010.
- [13] JAMES Momoh, SMART GRID Fundamentals of Design and Analysis. New Jersey 2012, Ch. 2.
- [14] Merzouka NOURESSADAT : "Etude des performances des réseaux de neurones dynamiques à représenter des systèmes réels : une approche dans l'espace d'état ". Mémoire de Magister. Université de Sétif 1, 2009.
- [15] Claude Touzet, “Les reseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme”, 1992, Collection de l’EERIE, N. Giambiasi. hal-01338010.

- [16] Wira PATRICE : " Réseaux de Neurones artificiels : architectures et applications ". Université de haute Alsace, laboratoire MIPS, 2009.
- [17] Touzet CLAUDE : "Les réseaux de neurones artificiels-Introduction au connexionnisme". Editions la Machotte, 2016.
- [18] T. M. Hagan, B. H. Demuth, M. H. Beale, O. De Jesús " Neural Network Design ", 2nd Edition, septembre 2014.
- [19] Jean –Michel Renders “Algorithmes génétiques et réseaux de neurones : applications à la commande de processus”, Edition : Lavoisier,15-04-1996.
- [20] Laurent Miclet, Antoine Cornuéjols “Apprentissage artificiel - Concepts et algorithmes Broché”, 2ème édition : Eyrolles, 03-06-2010.
- [21] Stuart Russel et Peter Norvig “Intelligence artificielle”, 3ème édition : Pearson éducation, 10-12-2010.
- [22] François Blayo et Michel Verleysen “Les réseaux de neurones artificiels”, Edition : PUF, 1996.
- [23] Jean-Claude Heudin, “Comprendre le Deep Learning : Une introduction aux réseaux de neurones”, Edition : Science eBook, 02-11-2016.
- [24] Youcef DJERIRI : "Les Réseaux de Neurones Artificiels". Mémoire de magister. Université de Sidi-Bel-Abbès, 2017.
- [25] T. Xu, P. C. Taylor, “Voltage Control Techniques for Electrical Distribution Networks Including Distributed Generation” Seoul, Korea, July 6-11, 2008.
- [26] Yujun He, “Contribution au réglage de la tension sur un réseau HTA avec producteurs. Apport de la flexibilité de la demande, Thèse de doctorat, Centrale Supélec, 2015.
- [27] Raghavendra P., Dattatraya N. Gaonkar “online voltage-profile estimation in smart distribution networks” IEEE Industry Applications Magazine, march/april 2018, pp. 14-22.
- [28] DIAFET Ilyes et GUECHTOUL Abdeldjalil “ Contrôle en temps réel de la tension des réseaux de distribution intelligents à l’aide des réseaux de neurones artificiels ”, Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2020.
- [29] M. E. Baran and F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, pp. 1401–1407, 1989.
- [30] Azimi R., Esmaeili S., “Multi-objective daily Volt/Var control in distribution systems with distributed generation using binary ant colony optimization”. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 21(3), 2013, pp. 613-629.

Annexe

Tableau A.1 : Caractéristiques techniques des branches du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres

Branche N°.	Jeu de barres de départ	Jeu de barres d'arrivée	Résistance (Ω)	Réactance (Ω)
1	1	2	0.0922	0.0470
2	2	3	0.4930	0.2512
3	3	4	0.3661	0.1864
4	4	5	0.3811	0.1941
5	5	6	0.8190	0.7070
6	6	7	0.1872	0.6188
7	7	8	0.7115	0.2351
8	8	9	1.0299	0.7400
9	9	10	1.0440	0.7400
10	10	11	0.1967	0.0651
11	11	12	0.3744	0.1298
12	12	13	1.4680	1.1549
13	13	14	0.5416	0.7129
14	14	15	0.5909	0.5260
15	15	16	0.7462	0.5449
16	16	17	1.2889	1.7210
17	17	18	0.7320	0.5739
18	2	19	0.1640	0.1565
19	19	20	1.5042	1.3555
20	20	21	0.4095	0.4784
21	21	22	0.7089	0.9373
22	3	23	0.4512	0.3084
23	23	24	0.8980	0.7091
24	24	25	0.8959	0.7071
25	6	26	0.2031	0.1034
26	26	27	0.2842	0.1447
27	27	28	1.0589	0.9338
28	28	29	0.8043	0.7006
29	29	30	0.5074	0.2585
30	30	31	0.9745	0.9629
31	31	32	0.3105	0.3619
32	32	33	0.3411	0.5302

Tableau A.2 : Caractéristiques techniques des jeux de barres du réseau de distribution IEEE 33 jeux de barres

Jeu de barres N°.	P (MW)	Q (MVA _r)
1	0	0
2	0.1000	0.0600
3	0.0900	0.0400
4	0.1200	0.0800
5	0.0600	0.0300
6	0.0600	0.0200
7	0.2000	0.1000
8	0.2000	0.1000
9	0.0600	0.0200
10	0.0600	0.0200
11	0.0450	0.0300
12	0.0600	0.0350
13	0.0600	0.0350
14	0.1200	0.0800
15	0.0600	0.0100
16	0.0600	0.0200
17	0.0600	0.0200
18	0.0900	0.0400
19	0.0900	0.0400
20	0.0900	0.0400
21	0.0900	0.0400
22	0.0900	0.0400
23	0.0900	0.0500
24	0.4200	0.2000
25	0.4200	0.2000
26	0.0600	0.0250
27	0.0600	0.0250
28	0.0600	0.0200
29	0.1200	0.0700
30	0.2000	0.6000
31	0.1500	0.7000
32	0.2100	0.1000
33	0.0600	0.0400

يزداد الطلب على الطاقة الكهربائية بشكل كبير في العديد من البلدان حول العالم بسبب الزيادة السكانية. و نظرا لهذا، تسعى الشركات المتخصصة في توزيع الطاقة الكهربائية لتشجيع الاعتماد على مصادر الإنتاج اللامركزي للطاقة في شبكات التوزيع، تحولت هذه الأخيرة الى شبكات نشطة يتم فيها التحكم في تدفق الطاقة والجهد الكهربائي ليس فقط بواسطة المستهلك، بل وأيضاً بواسطة مصادر الطاقة. ونتيجة لذلك، يجب تطوير استراتيجيات جديدة لضمان تشغيل دقيق لشبكات التوزيع ، وبفضل تطبيق تقنيات الشبكات الكهربائية الذكية على جميع شبكات التوزيع الحالية، يمكن تحقيق التحكم في الجهد وبالتالي ضمان التشغيل الفعال للشبكة. تقدم هذه الدراسة منهجية تستند إلى الشبكات العصبونية الاصطناعية للتحكم في الجهد في شبكة التوزيع الذكية. وتهدف الطريقة، من ناحية، إلى تيسير إدماج الطاقات المتجددة على نطاق واسع، ومن ناحية أخرى إلى الحفاظ على الجهد الكهربائي والتقليل في الضياع في الطاقة للشبكة.

الكلمات المفتاحية : شبكات التوزيع الكهربائية، الإنتاج اللامركزي، الشبكات العصبونية الاصطناعية، التحكم في الجهد.

Abstract

The electrical energy demand is increasing dramatically in many countries around the world due to population increasing. Due to this significant demand increasing, electricity distribution companies seek to promote distributed generation (DG). With the increasing integration of decentralized power generation into distribution network, it becomes an active circuit in which power flows and voltages will be governed not only by loads, but also by sources. Therefore, new management and control strategies must be implemented to ensure a reliable operation of distribution networks. Recently, with the implementation of smart grid technologies, voltage control can be performed in real-time hence ensuring efficient operation of the network. This study presents a methodology based on artificial neural networks for voltage control of a smart distribution network. The proposed methodology aims, on the one hand, to facilitate the integration of renewable energies on a large scale, and on the other hand to maintain the voltage profile and reduce power losses of the network.

Key-words: Smart Distribution network, Distributed generation, Artificial neural network, Voltage control.

Résumé

La demande d'énergie électrique augmente considérablement dans plusieurs pays du monde en raison d'augmentation de la population. En raison de cette augmentation significative de la quantité d'énergie électrique consommée dans les réseaux de distribution, les sociétés de distribution d'électricité cherchent à favoriser la dépendance à la production décentralisée dans le réseau de distribution, ces derniers deviennent un ensemble de circuits électriques actifs dans lesquels les flux de puissance et les tensions seront gouvernés non seulement par les charges, mais aussi par les sources. Par conséquent, de nouvelles stratégies de gestion et de contrôle doivent être pensées et actées pour garantir un fonctionnement fiable des réseaux de distribution. Grâce à la mise en œuvre des technologies de smart grids sur l'ensemble des réseaux de distribution existants, le contrôle de la tension peut être réalisé en garantissant un fonctionnement efficace du réseau. Cette étude présente une méthodologie basée sur les réseaux de neurones artificiels pour le contrôle de la tension d'un réseau de distribution intelligent. La méthodologie vise, d'une part à faciliter l'intégration des énergies renouvelables à large échelle, et d'autre part à maintenir le profil de tension et réduire les pertes de puissance du réseau.

Mots clés : Réseau de distribution intelligent, Production décentralisée, Réseaux neurones artificiels, Contrôle de la tension.