

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DES FRÈRES MENTOURI CONSTANTINE
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

N° Ordre :

Série :

THÈSE

Présentée pour obtenir le diplôme de
DOCTORAT EN SCIENCE
En **ELECTROTECHNIQUE**

RÉPARTITION OPTIMALE DES PUISSANCES UTILISANT LES TECHNIQUES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Option : **ÉLECTROTECHNIQUE**

Par :

Mr DRAIDI ABDELLAH

Date de Soutenance : 11 juillet 2016

Devant le jury :

Président	BOUZID Aissa	Prof.	Université des Frères Mentouri Constantine
Rapporteur	LABED Djamel	MCA	Université des Frères Mentouri Constantine
Examineurs	CHIKHI Khaled	Prof.	Université Batna 2
	FETHA Cherif	Prof.	Université Batna 2
	CHENNI Rachid	Prof.	Université des Frères Mentouri Constantine

Année 2016

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de mon oncle Mohamed

À ma femme

À mon fils Dhia Eddine

À ma mère, À mon père

À mon frère Djamel et à ma sœur Imène

À toute ma famille et à tous mes amis...

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Labeled Djamel, Maître de conférences Classe A à l'université des Frères Mentouri Constantine, Pour m'avoir accueilli et m'accepter au sein de son équipe et pour avoir dirigé ce travail et m'avoir guidé, encouragé et conseillé tout au long de ces années de Doctorat.

Je tiens à remercier Monsieur Aïssa Bouzid Professeur à l'université des Frères Mentouri Constantine, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur Chikhi Khalef, Professeur à l'université Batna 2, pour m'avoir fait l'honneur d'évaluer mon travail.

Je remercie également Monsieur Fetha Cherif, Professeur à l'université Batna 2, pour avoir jugé ma thèse de Doctorat.

Je tiens à remercier aussi Monsieur Chenni Rachid, Professeur à l'université des Frères Mentouri Constantine, pour avoir examiné ma thèse.

Enfin et tout particulièrement je remercie mes parents, et ma femme pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'étude.

Table des Matières

<i>Dédicaces</i>	I
<i>Remerciements</i>	II
Table des Matières	IV
Liste des Figures.....	VII
Liste des Tableaux.....	X
Liste des Symboles.....	XI
Introduction Générale	1
Chapitre 1 GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES	4
1. GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.....	5
1.1. INTRODUCTION.....	5
1.2. PRODUCTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE	6
1.2.1. TYPES DE CENTRALES ELECTRIQUES	7
1.3. TRANSPORT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE.....	14
1.3.1. LES POSTES DE LIVRAISON HTB	15
1.4. DISTRIBUTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE	17
1.4.1. LES POSTES DE LIVRAISON HTA (POSTE SOURCE).....	18
1.5. CONCLUSION	20
Chapitre 2 ÉCOULEMENT DE PUISSANCE	21
2. ÉCOULEMENT DE PUISSANCE.....	22
2.1. INTRODUCTION.....	22
2.1.1. OBJECTIFS	22
2.2. LA PUISSANCE DANS LES CIRCUITS ALTERNATIFS.....	23
2.2.1. LA PUISSANCE COMPLEXE	25
2.2.2. LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE	25
2.3. REPARTITION DE LA PUISSANCE DANS UNE BRANCHE NODALE.....	26
2.3.1. SIMPLIFICATION DE L'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE DE LA LIGNE 28	
2.3.2. REGULATION DE LA TENSION	28
2.4. LES CONSTANTES ABCD.....	29
2.5. LES MODELES DES LIGNES DE TRANSMISSION	30
2.5.1. LIGNE MOYENNE DE TRANSMISSION	30
2.5.2. LIGNE LONGUE DE TRANSMISSION.....	31
2.5.3. COEFFICIENT DE REFLEXION	34
2.5.4. DIAGRAMME EN TREILLIS	35
2.5.5. IMPEDANCE CARACTERISTIQUE.....	36
2.5.6. LONGUEUR D'ONDE.....	36
2.6. LIGNE D'ALIMENTATION REGLÉE.....	37

2.7.	L'EFFET FERRANTI.....	38
2.8.	MODELISATION DES ELEMENTS DE RESEAU	39
2.8.1.	MODELISATION D'UN TRANSFORMATEUR A DEUX ENROULEMENTS.....	39
2.8.2.	GENERATEURS ET CHARGES	40
2.9.	LES VARIABLES SYSTEMES DANS L'ECOULEMENT DE PUISSANCE	41
2.10.	METHODES DE RESOLUTION DE L'ECOULEMENT DE PUISSANCE	42
2.10.1.	TYPE DE JEUX DE BARRES	43
2.10.2.	METHODES DE GAUSS-SEIDEL UTILISANT LA MATRICE-Y	44
2.10.3.	METHODE DE GAUSS-SEIDEL UTILISANT LA MATRICE Z	50
2.10.4.	LA MÉTHODE DE NEWTON-RAPHSON	51
2.10.5.	SOLUTION DE L'ECOULEMENT DE PUISSANCE UTILISANT LA METHODE DE NEWTON RAPHSON.....	55
2.10.6.	MÉTHODE D'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE DÉCOUPLÉ RAPIDE	59
2.10.7.	MODELE D'UN TRANSFORMATEUR DEPHASEUR	61
2.11.	ECOULEMENT ET CONTROLE DE LA PUISSANCE REACTIVE	62
2.11.1.	REGLAGE DE LA TENSION	63
2.11.2.	COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE.....	64
2.12.	CONCLUSION	65
Chapitre 3	RÉSEAUX DE NEURONES ET LOGIQUE FLOUE	66
3.	RÉSEAUX DE NEURONES ET LOGIQUE FLOUE	67
3.1.	INTRODUCTION.....	67
3.2.	LES RESEAUX DE NEURONES.....	67
3.2.1.	MODELE D'UN NEURONE	67
3.2.2.	FONCTIONS DE TRANSFERT	69
3.2.3.	APPRENTISSAGE D'UN RESEAU DE NEURONES.....	70
3.2.4.	ARCHITECTURE DE RESEAU.....	71
3.2.5.	RETROPROPAGATION DE L'ERREUR (BACKPROPAGATION).....	72
3.3.	LA LOGIQUE FLOUE.....	74
3.3.1.	LES ENSEMBLES FLOUS (FUZZY SETS).....	75
3.3.2.	FONCTIONS D'APPARTENANCE.....	75
3.3.3.	TYPES DE FONCTIONS D'APPARTENANCE	76
3.3.4.	LES VARIABLES LINGUISTIQUES	77
3.3.5.	OPERATEURS FLOUS	78
3.3.6.	SYSTEME DE COMMANDE FLOU	79
3.4.	ANFIS (ARTIFICIAL NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEMS).....	81
3.4.1.	INTRODUCTION.....	81
3.4.2.	ARCHITECTURE DES ANFIS	82
3.4.3.	COMPLEXITE DE CALCUL DES ANFIS	84
3.4.4.	DIAGRAMME DE FLUX DE BASE DES CALCULS DANS ANFIS	85
3.5.	CONCLUSION	85
Chapitre 4	APPLICATION DES ANFIS AUX RESEAUX ELECTRIQUES	86

4.	APPLICATION DES ANFIS AUX RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.....	87
4.1.	INTRODUCTION.....	87
4.2.	ÉCOULEMENT DE PUISSANCE UTILISANT LES ANFIS	87
4.2.1.	LA SIMULATION UTILISANT LES TECHNIQUES CONVENTIONNELLES	89
4.2.2.	ESTIMATION DE L'AMPLITUDE DES TENSIONS UTILISANT LES ANFIS 91	
4.2.3.	ESTIMATION DES ANGLES DE PHASE DES TENSIONS	95
4.3.	ESTIMATION DE LA CONSOMMATION (LOAD FORECASTING) UTILISANT LES ANFIS	98
4.3.1.	LES METHODES DE RESOLUTION DE L'ESTIMATION DE LA CONSOMMATION (LOAD FORECASTING)	99
4.3.2.	APERÇU SUR LE RESEAU ELECTRIQUE ALGERIEN	101
4.3.3.	PREPARATION DES DONNEES	102
4.3.4.	ARCHITECTURE DE L'ANFIS.....	103
4.3.5.	TEST DE L'ANFIS.....	107
4.4.	CONCLUSION	108
	Conclusion Générale	109
	Annexes	110
	Annexe 1	110
A1.	FORMATION DES MATRICES DE RÉSEAU.....	110
A1.1.	FORMATION DE LA MATRICE D'ADMITTANCE Y_{bus}	110
A1.2.	FORMATION DE LA MATRICE D'IMPEDANCE Z_{bus}	111
A1.3.	EXEMPLE DE CONVERSION DE LA MATRICE Y A LA MATRICE Z	114
	Annexe 2	116
	Références Bibliographiques	121

Liste des Figures

Chapitre 01	GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES	
Figure 1-1	Réseau de production et de transport Algérien	6
Figure 1-2	Principe de fonctionnement d'une centrale à cycle combiné.	8
Figure 1-3	Principe d'une centrale nucléaire	9
Figure 1-4	Principe d'une centrale solaire thermique	11
Figure 1-5	Principe d'une centrale solaire photovoltaïque	12
Figure 1-6	Diagramme du compartiment essentiel d'une large turbine éolienne	13
Figure 1-7	Architecture générale d'un réseau électrique	14
Figure 1-8	Niveaux de tension sur le réseau électrique	15
Figure 1-9	Alimentation simple antenne d'un poste de livraison HTB	16
Figure 1-10	Alimentation double antenne d'un poste de livraison HTB	16
Figure 1-11	Structure générale d'un réseau privé de distribution	17
Figure 1-12	Départ en simple dérivation des postes source	18
Figure 1-13	Départ en coupure d'artère des postes source	19
Figure 1-14	Départ en double dérivation des postes source	19
Chapitre 02	ÉCOULEMENT DE PUISSANCE	
Figure 2-1	Écoulement de puissance sur une ligne à deux extrémités	26
Figure 2-2	(a) représentation schématique d'un réseau à deux extrémités utilisant des constantes ABCD (b) deux extrémités en série (c) deux extrémités en parallèle	29
Figure 2-3	Représentation d'une ligne de transmission en π avec son diagramme vectoriel	31
Figure 2-4	Représentation d'une ligne de transmission en T avec son diagramme vectoriel	31
Figure 2-5	Modèle d'une section élémentaire d'une ligne longue de transmission	32
Figure 2-6	(a) l'ondes incidente et réfléchie à un changement d'impédance dans une ligne longue de transmission ; (b) le renforcement des ondes incidentes et réfléchie ; (c) onde incidente et réfléchie traversant l'une et l'autre.	35

Figure 2-7	(a) Un point P à l'instant t' sur un signal d'impulsion appliquée à l'extrémité d'envoi d'une ligne de transmission ; (b) diagramme de treillis.	36
Figure 2-8	(a) circuit équivalent d'un transformateur à rapport réglable en ignorant les éléments shunts ; (b) impédance équivalente du réseau ; (c) admittance équivalente de réseau.	40
Figure 2-9	Illustration du processus itératif numérique pour la valeur finale d'une fonction	44
Figure 2-10	Organigramme du processus itératif de base des itérations de type Jacobi	45
Figure 2-11	Organigramme de la méthode de Gauss- Seidel d'écoulement de puissance	49
Figure 2-12	Illustration graphique de la méthode de Newton-Raphson	53
Figure 2-13	Nœud typique d'un réseau électrique	56
Figure 2-14	(a) diagramme de l'injection de la tension d'un transformateur déphaseur, (b) schéma d'un transformateur déphaseur	61
Chapitre 03	RÉSEAUX DE NEURONES ET LOGIQUE FLOUE	
Figure 3-1	Modèle d'un neurone artificiel	68
Figure 3-2	Représentation matricielle d'un neurone artificiel	69
Figure 3-3	Fonction de transfert log-sigmoïde	69
Figure 3-4	Fonction de transfert tan-sigmoïde.	69
Figure 3-5	Fonction de transfert linéaire	70
Figure 3.6	Représentation matricielle d'un réseau de trois couches.	71
Figure 3-7	Types de fonctions d'appartenance : (a) Γ -fonction (b) fonction en S, (c) fonction en L (d) fonction en Λ ;(e) fonction gaussienne ; (f) fonction en π	77
Figure 3-8	Schéma d'un contrôleur flou typique	79
Figure 3-9	La fonction d'appartenance des valeurs linguistiques de sortie	80
Figure 3-10	Distribution de La possibilité d'une condition de sortie	80
Figure 3-11	Structure du system ANFIS	83
Figure 3-12	Diagramme de flux de base des calculs dans anfis	85
Chapitre 04	APPLICATION DES ANFIS AUX RÉSEAUX ÉLECTRIQUES	
Figure 4-1	Réseau IEEE 39 bus system	88
Figure 4-2	Architecture de l'ANFIS utilisé	91
Figure 4-3	Données d'apprentissage en fonction de la sortie ANFIS	92
Figure 4-4	Données de test (testing) en fonction de la sortie ANFIS	93

Figure 4-5	. Données de vérification (checking) en fonction de la sortie ANFIS	93
Figure 4-6	Architecture de l'ANFIS utilisé	95
Figure 4-7	Données d'apprentissage en fonction de la sortie ANFIS	96
Figure 4-8	Données de test (testing) en fonction de la sortie ANFIS	97
Figure 4-9	Données de vérification (checking) en fonction de la sortie ANFIS	97
Figure 4-10	L'évolution historique de la demande maximale de 2000 à Août 2011	101
Figure 4-11	Comparison between load curves of two days with maximum demand	102
Figure 4-12	Architecture de l'ANFIS	104
Figure 4-13	Réponse de l'ANFIS de Mars 2010 à Février 2012	106
Figure 4-14	Test de réseau à l'aide des données Mars 2012	107
Annexe 01		
Figure A1-1	Élément du réseau (ligne, câble)	110
Figure A1-2	Partie de réseau	111
Figure A1-3	Ajout de branche et /ou corde	112
Annexe 02		
Figure. A2.1	Trajectoire de la descente du gradient	119

Liste des Tableaux

Chapitre 02	ÉCOULEMENT DE PUISSANCE	
Tableau 2-1	Constantes ABCD des lignes de transmission	34
Tableau 2-2	Type de jeux de barres	43
Chapitre 03	RÉSEAUX DE NEURONES ET LOGIQUE FLOUE	
Tableau 3-1	Comparatif des avantages et des inconvénients des SIF et RN	82
Tableau 3-2	Les caractéristiques des couches	84
Chapitre 04	APPLICATION DES ANFIS AUX RÉSEAUX ÉLECTRIQUES	
Tableau.4-1	Résultats de PowerWorld Simulator	89
Tableau 4-2	Exemple de la matrice input	103

Liste des Symboles

HTB	Haute tension de classe B
HTA	Haute tension de classe A
BTB	Basse tension de classe B
BTA	Basse tension de classe A
TBT	Très basse tension
HT	Haute tension
MT	Moyenne tension
BT	Basse tension
θ	Angle de déphasage entre tension et courant
$\cos \theta$	Le facteur de puissance
S	Puissance apparente
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
FP_{aml}	Facteur de puissance amélioré
FP_{exi}	Facteur de puissance existant
kVA_{disp}	Puissance apparente rendu disponible à partir de celle existante
$perte_{red}$	La réduction des pertes en P.U
FP_{aml}	Facteur de puissance amélioré
P_{rs}	Puissance active à l'extrémité de réception
Q_{rs}	Puissance réactive à l'extrémité de réception
Y_{sr}	Admittance série
g_{sr}	Conductance série de la ligne
b_{sr}	Susceptance série de la ligne

R_{sr}	Résistance de la ligne
X_{sr}	Réactance série de la ligne
$V_s \angle \theta_s$	Tension de l'extrémité d'envoi
$V_r \angle \theta_r$	Tension de l'extrémité de réception
δ	Angle de transmission
$ \Delta V $	Chute de tension dans la ligne
$V_R \%$	Régulation de la tension
V_{rsc}	Tension de réception sans charge
V_{rpc}	Tension de pleine charge à un facteur de puissance spécifié
γ	Constante de propagation
g_{sh}	Conductance shunt
b_{sh}	Susceptance shunt
x_{sh}	Réactance capacitive shunt
Y	Admittance shunt
α	Constante d'atténuation
β	Constante de phase
Z_0	Impédance caractéristique
V_x	Tension à un point x
I_x	Courant à un point x
ρ_L	Coefficient de réflexion
SIL	Surge impedance loading
λ	Longueur d'onde
μ_0	Perméabilité du vide
k_0	Permittivité du vide
v	Vitesse de propagation
p_{D1}, p_{D2}	Puissances actives demandées par les deux jeux de barres 1 et 2.

Q_{D1} et Q_{D2}	Puissances réactives demandées par les deux jeux de barres 1 et 2.
ε	Tolérance spécifiée
$J^{(k)}$	Matrice Jacobéenne
$\Delta P_i^{(k)}$	Résidus de puissance active
$\Delta Q_i^{(k)}$	Résidus de puissance réactive
P_i^{plan}	Valeurs planifiées de $P_i^{(k)}$
Q_i^{plan}	Valeurs planifiées de $Q_i^{(k)}$
B' et B''	Partie imaginaire de matrice d'admittance nodale Y_{bus}
n	Rapport des prises de réglage de la tension
$P_{(spec)}$	Écoulement spécifiée de la puissance active
P_j	Entrées du neurone
$w_{i,j}$	Poids du neurone i
n	Niveau d'activation du neurone
b	Biais ou seuil d'activation
f	Fonction de transfert
a	Sortie de neurone
$e(t)$	Erreur d'apprentissage
\hat{F}	L'indice de performance
η	Taux d'apprentissage
s_i^k	Sensibilité du neurone i de la couche k
F	Ensemble flou
$\mu_F(x)$	Fonction d'appartenance
$\alpha; \beta, \gamma$	Valeurs linguistiques
X_i	Variable linguistique
FLC	Fuzzy logic controller
ANFIS	Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

O_i^k	Degré d'appartenance (couche k)
SIF	Système à inférence floue
<i>input</i>	Entrée
<i>inputmf</i>	Entrée de la fonction d'appartenance
<i>rule</i>	Règle
<i>outputmf</i>	Sortie de la fonction d'appartenance
<i>output</i>	Sortie
y_{ij}	Admittance reliant le nœud i au nœud j
E_i	Tension complexe qui apparaît aux nœuds i
I_i	Courant injecté au nœud i
Y_{bus}	Matrice d'admittance nodale
Z_{bus}	Matrice d'impédance nodale

Introduction Générale

Les réseaux électriques ont connu un énorme essor suite au développement de l'informatique et des logiciels de commande, on parle aujourd'hui des '*smart grids*' ou *réseaux intelligents*. C'est-à-dire l'automatisation et le contrôle informatique de la production de l'énergie électrique, de toutes les opérations du réseau de transport, de distribution et la gestion de comptage pour les différents types de charges électriques sur tous les niveaux de tensions et pour d'éventuelle productions décentralisées.

L'étude de l'écoulement de puissance est procédée, pour que le réseau électrique soit stable, économique et fiable. Le calcul de l'écoulement de puissance est nécessaire pour définir l'état du réseau électrique en termes de charges connectées, des amplitudes de courants dans chaque partie du réseau (lignes, câbles, transformateurs ...), l'évaluation des pertes et, éventuellement, la modification du plan de tension pour réduire ces pertes. Il est nécessaire de définir des stratégies de contrôle et de gestion pour déterminer la tension au niveau de chaque nœud, la puissance active et réactive permet de déterminer les instructions de réglage pour les machines du réseau.

L'optimisation de la capacité de transit ou le dispatching économique et l'engagement propre de toutes les unités de générateurs d'un réseau afin de servir les exigences de toutes les charges d'une manière optimale et économique.

L'estimation de la consommation électrique ou '*load forecasting*' est une procédure nécessaire pour effectuer de nombreuses fonctions d'électricité, y compris l'engagement des unités de générateurs, la coordination hydro-thermique, l'entretien, la puissance d'échange, l'évaluation de la transaction, ainsi que des fonctions d'analyse de réseau, de la protection et l'écoulement de puissance, la planification de contingence, le délestage des charges, et les stratégies de sécurité de charge.

L'introduction des techniques de l'intelligence artificielle dans les logiciels de commande et de décision, est un élément essentiel dans la recherche et dans le développement des réseaux modernes. Dans cette thèse on va introduire une méthode hybride entre deux techniques d'intelligence artificielle (les réseaux de neurones et la logique floue) pour l'optimisation de la répartition des puissances dans les réseaux électriques et pour l'estimation de la consommation des différentes charges.

Les réseaux de neurones ont la capacité de traiter des problèmes divers et variés. Le résultat peut être une prédiction, une classification ou une analyse de données. Ils permettent de traiter des problèmes non structurés, c'est-à-dire des problèmes sur lesquels on ne dispose d'aucune information au préalable. Les réseaux de neurones donnent de bons résultats car mêmes dans des domaines très complexes, ils sont plus performants que les statistiques ou les arbres de décisions. En découvrant les relations entre les variables, ce système ne nous oblige pas à s'interroger sur la forme de la fonction à estimer.

La logique floue permet de raisonner non pas sur des variables numériques, mais sur des variables linguistiques, c'est-à-dire, sur des variables qualitatives (grand, petit, moyen, loin, près, fort, etc.). Le fait de raisonner sur ces variables linguistiques va permettre de pouvoir manipuler des connaissances en langage naturel. Tout ce que l'on fait de rentrer au système, ce sont des règles d'inférences exprimées en langage naturel. Il y a donc un avantage certain à travailler en logique floue. Cette méthode est très utile lorsque l'on se trouve confronté à des systèmes qui ne sont pas, ou difficilement modélisables. De même, cette méthode est très avantageuse si l'on possède un bon niveau d'expertise humaine. En effet, il faut fournir au système flou toute une base de règle exprimé en langage naturel pour permettre de raisonner et de tirer des conclusions. Plus l'expertise humaine d'un système est importante plus on est capable d'ajouter des règles d'inférences au système.

Les systèmes d'inférence neuro-flou artificiels ou 'Artificial Neuro Fuzzy Inference System' ANFIS est une méthode hybride qui associe les avantages des deux techniques sans en présenter leurs inconvénients.

La structure générale de notre thèse est divisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une vue générale sur le réseau électrique et ces trois majeures parties à savoir, la production, le transport, la distribution de l'énergie électrique. On a étudié les types de centrales électriques entre autres les centrales conventionnelles et celles à énergie renouvelable, puis les techniques de transport et de distribution de l'énergie produite.

Dans le deuxième chapitre, on a procédé à une étude détaillée sur l'écoulement de la puissance active dans le réseau électrique et ces méthodes de résolution présentes dans la littérature, telles que la méthode de Gauss-Seidel et la méthode de Newton-Raphson, ainsi que des notions sur le contrôle de la puissance réactive.

Le chapitre trois, présente deux techniques d'intelligence artificielle ont été présentées à savoir : les réseaux de neurones et la logique floue, et la combinaison entre ces deux méthodes, les systèmes à inférence neuro-flou (ANFIS).

Le dernier chapitre comporte la partie de notre programmation qui est divisée en deux parties :

- La première partie consiste à introduire les ANFIS dans l'écoulement de puissance où on a prédit les valeurs des tensions nodales en matière d'amplitude et angle de phase en se basant sur les résultats du programme conventionnel de l'écoulement de puissance pour l'apprentissage.
- La deuxième partie consiste à prédire les pics de consommation de la puissance électrique active dans le réseau Algérien (*load peak forecasting*) en utilisant les ANFIS.

Chapitre 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

1. GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

1.1. INTRODUCTION

L'énergie électrique constitue un élément essentiel et vital pour la vie humaine moderne, on ne peut pas imaginer le monde actuel sans électricité.

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centrales de production vers les consommateurs. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles avec des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir et de faire passer l'électricité d'une tension à une autre grâce aux transformateurs. Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

Thomas Edison fut le premier fondateur du réseau électrique, il développa un réseau électrique à courant continu alimenté par des générateurs à courant continu entraînés par des moteurs à vapeur. Les systèmes de production d'électricité en courant alternatif sont devenus répandus un peu plus tard. La principale raison de la conversion en courant alternatif est l'emploi des transformateurs utilisés pour augmenter ou diminuer les niveaux de tension alternative pour le transport et la distribution de l'énergie électrique. Actuellement, presque tout l'appareillage du réseau électrique produit et distribue le courant alternatif triphasé. Les transformateurs augmentent la tension produite par les alternateurs tout en diminuant le courant électrique, cela permet de réduire les pertes de puissance active par effet Joule.

L'expansion de la consommation d'énergie électrique a engendré une forte demande sur le système de distribution, ou les préoccupations sont non seulement asservir plus de clients, mais fournir l'équipement qui exige plus d'attention aux variations de la tension et moins d'interruptions de service. [1]

Le réseau électrique est toujours composé de trois grandes parties telles que : la production de l'énergie électrique, le transport, la distribution. Parfois, dans la littérature,

une quatrième partie telle que la consommation est ajoutée comme une partie distincte derrière la distribution au réseau électrique.

La figure 1-1 montre un schéma global du réseau électrique de production et de transport algérien avec ces différentes centrales de production, poste de livraison HTB et lignes de transport.

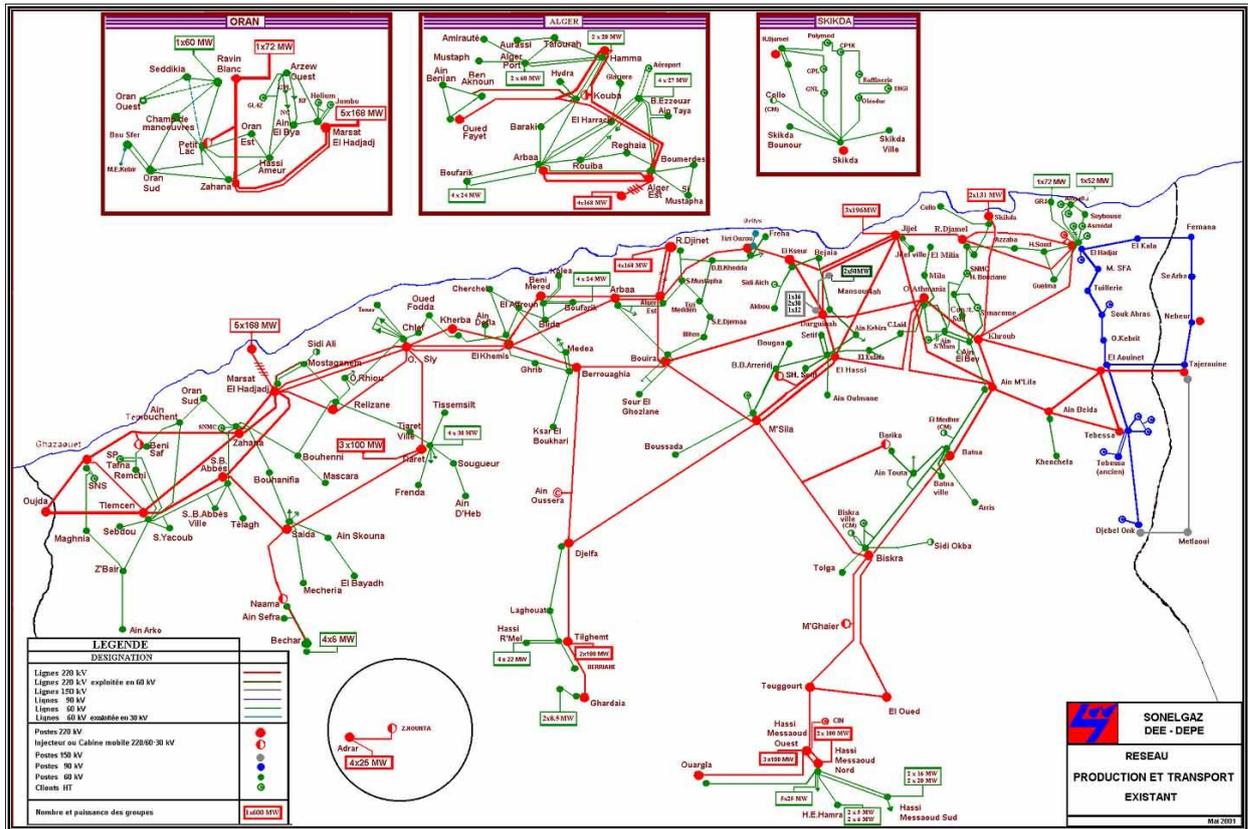


Figure 1-1. Réseau de production et de transport Algérien

1.2. PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Aujourd'hui, le réseau électrique est compliqué, interconnecté et change en dimension et en configuration. Une large gamme d'électricité est générée dans des centrales thermiques, hydrauliques et nucléaires ; ces centrales sont connues comme sources d'énergie électrique conventionnelles. Une autre partie d'électricité est générée par des sources d'énergie non-conventionnelles ; cette énergie est nommée énergie verte parce qu'elle émet moins de polluants. [2]

L'emplacement des centrales de génération, des lignes de transport et des postes de transformation demande toujours une analyse détaillée pour arriver à une solution acceptable et économique. Parfois, on peut placer une centrale à côté de la source d'énergie primaire et utiliser des lignes pour transporter l'énergie électrique. Quand cela n'est pas pratique ou économique, on doit transporter la matière première à la centrale. [3]

Les sources d'énergie renouvelable impliquent des nouvelles architectures des réseaux électriques, on associe souvent le concept de la production décentralisée à ces sources non-conventionnelles. L'efficacité de la production décentralisée est directement dépendante de l'évolution des réseaux de transport d'énergie intelligents de type *Smart grid*, capables de gérer la variété et la variabilité des sources.

1.2.1. TYPES DE CENTRALES ELECTRIQUES

1.2.1.1. CENTRALES ELECTRIQUES UTILISANT DES SOURCES D'ENERGIE CONVENTIONNELLES

A. LES CENTRALES THERMIQUES

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel. La plupart ont une capacité comprise entre 200 MW et 2000 MW. Ci-dessous quelques types de centrales thermiques :

Les centrales à cycle combiné

Les centrales à cycle combiné se sont développées suite au développement des turbines à gaz. La centrale à cycle combiné utilise le gaz naturel comme combustible dans un système de production en deux étapes (voir fig. 1-2) : Une première turbine à gaz met l'alternateur en mouvement grâce à la combustion de gaz naturel pour générer de l'électricité dans un premier cycle. Dans un deuxième cycle, la chaleur issue du premier cycle est récupérée au maximum pour générer de la vapeur qui fait tourner une seconde turbine, à vapeur, pour générer de l'électricité supplémentaire. La puissance totale est générée à deux tiers par la turbine à gaz et à un tiers par la turbine à vapeur. La combinaison de ces deux cycles augmente le rendement électrique de la centrale qui se situe aux alentours de 58.5 %. [5]

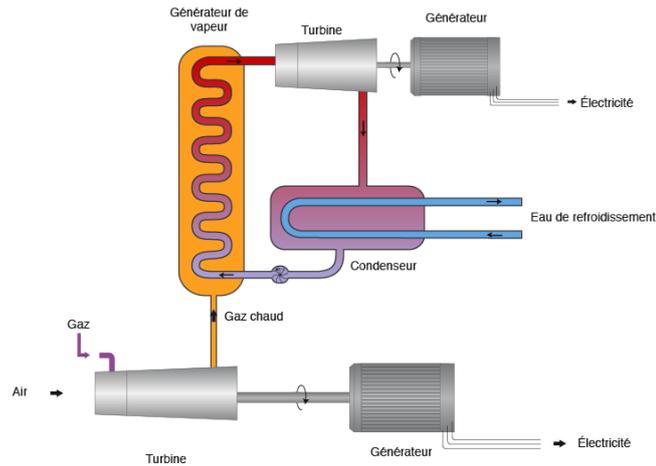


Figure 1-2. Principe de fonctionnement d'une centrale à cycle combiné. [6]

B. LES CENTRALES HYDRAULIQUES

La production d'énergie hydroélectrique implique le stockage d'un fluide hydraulique (l'eau) la conversion de l'énergie (potentielle) hydraulique du fluide en énergie (cinétique) mécanique dans une turbine hydraulique et la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique dans un générateur électrique.

Les premières centrales hydroélectriques sont entrées en service dans les années 1880 et représentent maintenant environ 20 % (875 GW) de capacité de production installée dans le monde (World Energy Council 2010) L'hydroélectricité est une source importante d'énergie renouvelable, bien que le coût d'investissement initial est élevé, la simplicité des centrales hydroélectriques, associés avec leurs coûts d'exploitation et de maintenance réduits, leur longue durée de service et sa grande fiabilité, leur fait une source très économique effective et flexible de production d'électricité.

Les unités hydroélectriques ont été installées avec des capacités allant de quelques kilowatts à environ 1 GW. L'unité de génération peut avoir son arbre orienté en verticale, horizontale ou d'une direction inclinée dépendant de la condition physique du site et du type de turbine utilisée. On constate trois types de centrales hydraulique :

- Large centrales hydrauliques (≥ 30 MW)
- Petites hydroélectrique (100 kW à 30 MW)
- Micro hydroélectrique (<100 kW) [7]

C. LES CENTRALES NUCLEAIRES

Les centrales nucléaires produisent de l'électricité à partir de la chaleur libérée par une *réaction nucléaire*. Ce phénomène est provoqué par la division du noyau d'un atome, procédé qu'on appelle *fission nucléaire*.

Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière brûlant le combustible est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission (voir fig. 1-3). Le rendement global est entre 30 % à 40 % et l'on doit encore prévoir un système de refroidissement important, ce qui nécessite un emplacement près d'un cours d'eau ou la construction d'une tour de refroidissement.

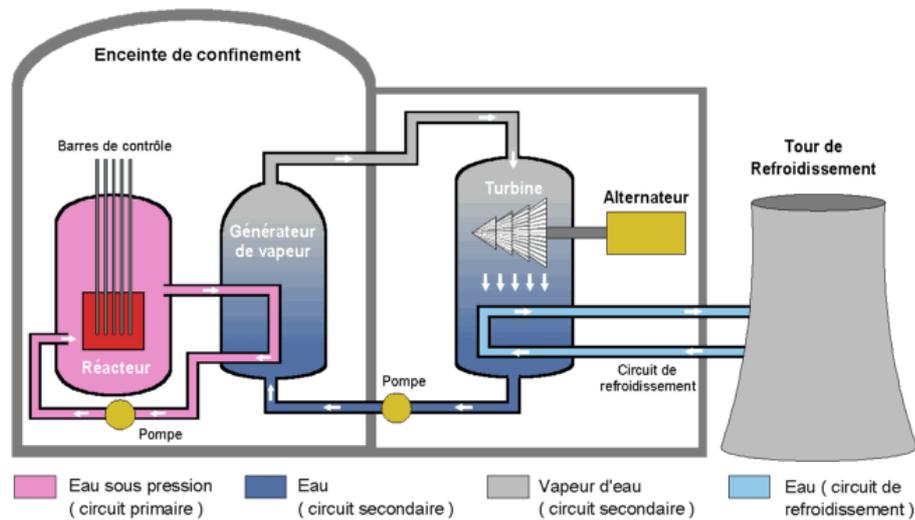


Figure 1-3. Principe d'une centrale nucléaire

Type de réacteurs nucléaires

Il existe plusieurs types de réacteurs ; en voici les principaux :

- Réacteur à eau pressurisée (*pressure water reactor*)
- Réacteur à eau bouillante (*boiling water reactor*)
- Réacteur à gaz à haute température (*high temperature gaz reactor*)
- Réacteur à neutrons rapides
- Réacteur à eau lourde [3] [8]

1.2.1.2. CENTRALES ELECTRIQUES UTILISANT DES SOURCES D'ENERGIE NON-CONVENTIONNELLES OU RENOUVELABLES

Plusieurs méthodes de production de l'énergie électrique sont soit à utilisation limitée ou à l'étape expérimentale. Des méthodes montrent une capacité d'être une possible méthode de production dans le futur.

Les méthodes de production alternative sont :

- Les systèmes à énergie solaire thermique ;
- Énergie solaire photovoltaïque ;
- Les systèmes hybrides à énergie solaire ;
- Les systèmes d'énergie éolienne ;
- Les systèmes d'énergie géothermique ;
- Les systèmes Magnétohydrodynamiques (MHD) ;
- Système à fusion nucléaire ;
- Pile à combustible ;
- Énergie marémotrice ;
- La gazéification du charbon ;
- La biomasse.

Parmi ces sources, on cite quelques types potentiels de sources d'énergie renouvelable :

A. LES SYSTEMES A ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE

Le soleil fournit un flux constant d'énergie rayonnante. La quantité d'énergie solaire qui arrive sur la terre dans une journée est égale à l'énergie produite par la combustion de plusieurs millions de tonnes de charbon. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire Algérien, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/ m²/an au Sud du pays.

C'est pour cela l'énergie solaire est une source majeure d'électricité pour nos besoins croissants sans cesse. Il existe deux méthodes de collecte et de concentration de l'énergie solaire actuellement en usage. Ces deux méthodes impliquent une surface réfléchissante comme un miroir. La première méthode utilise des miroirs paraboliques pour capter l'énergie du soleil. Ces miroirs concentrent l'énergie du soleil en focalisant la lumière sur une surface de réception opaque. La chaleur focalisée sur les tubes pourrait transformer l'eau en vapeur. Puis la vapeur d'eau pourrait entraîner une turbine pour produire de l'énergie électrique. Les miroirs peuvent être tournés pour les maintenir en bonne position pour la meilleure réflexion de la lumière. La deuxième méthode utilise un *capteur solaire thermique*. Des couches de verre sont posées sur une plaque de métal noirci, avec un espace d'air entre chaque couche. Les couches de verre constituent un piège à chaleur. Ils laissent les rayons du soleil entrer, et gardent la majorité de la chaleur à l'intérieur. Le type d'application peut aller du chauffage d'une piscine avec un capteur léger, à une centrale solaire thermodynamique produisant de l'électricité. [9] Dans une centrale solaire thermodynamique (ou thermodynamique voir fig. 1-4), c'est la vapeur d'eau sous pression qui actionne une turbine reliée à un générateur électrique. La chaleur nécessaire pour transformer l'eau en vapeur est fournie par les rayons du Soleil¹.

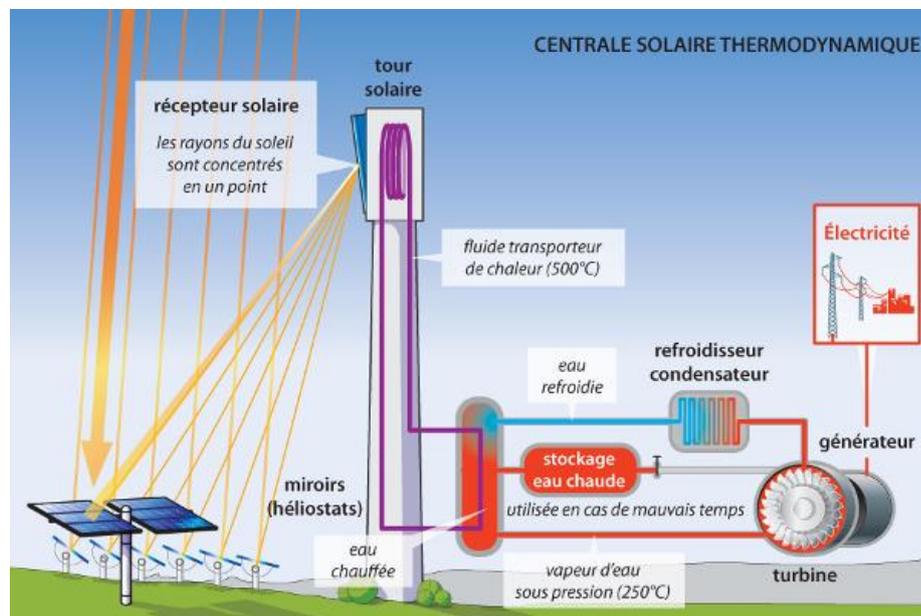


Figure 1-4. Principe d'une centrale solaire thermique [10]

¹ Centrale solaire Noor (Ouarzazate, Maroc) est entrée en service en février 2016 avec 160 MW (Noor I), à sa finition totale (Noor II et Noor III), elle sera la plus grande centrale solaire au monde avec 500 MW comme puissance totale de l'ensemble.

B. ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire. (Voir fig. 1-5). La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base. Elle utilise l'effet photoélectrique pour convertir les ondes électromagnétiques émises par le soleil en électricité. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules regroupés forment une installation solaire. L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution ou le réseau de transport.

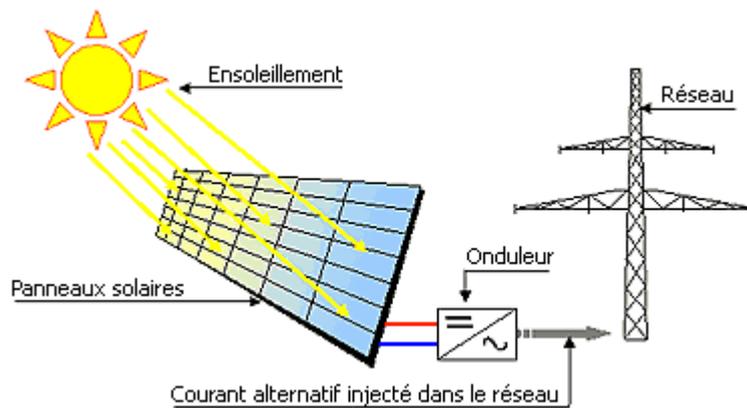


Figure 1-5. Principe d'une centrale solaire photovoltaïque

C. ENERGIE SOLAIRE HYBRIDE

Le concept de centrale solaire hybride existe pour des centrales de grandes puissances. L'intérêt de cette technique est de combiner l'énergie solaire (avec une conversion par la voie thermique) et une centrale à énergie fossile afin d'assurer la disponibilité de l'électricité en toute heure et indépendamment des conditions d'ensoleillement. Deux turbines à gaz, deux chaudières de récupération, une turbine à vapeur et des lignes de production et d'évacuation d'énergie. Donc la vapeur est produite par deux sources : il y a le gaz naturel, dans le cadre du cycle combiné normal, et la vapeur produite par le champ solaire. Ces deux vapeurs convergent vers la turbine à vapeur et s'intègrent en même temps pour produire de l'énergie électrique.²

² Centrale hybride solaire-gaz de Hassi R'Mel, avec une capacité de production de 150 mégawatts (MW) dont 120 mégawatts produits à partir du gaz et 30 mégawatts par l'énergie solaire.

D'autre type de centrale hybride PV-CSP (*PhotoVoltaic- Concentrated Solar Power*) combine l'énergie solaire photovoltaïque avec l'énergie solaire thermique.

D. ÉNERGIE EOLIENNE

Une éolienne (aérogénérateurs) est constituée d'un ensemble de dispositifs qui transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, laquelle est ensuite transformée en énergie électrique. (Voir fig. 1-6). Le rendement énergétique de même que la puissance développée des éoliennes sont fonction de la vitesse du vent ; dans la plage de fonctionnement de l'éolienne, la puissance est approximativement proportionnelle au cube de cette vitesse. Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 14 et 90 km/h. Au-delà, elles sont progressivement arrêtées pour sécuriser les équipements et minimiser leur usure.

L'énergie éolienne des parcs éoliens est devenue un élément majeur pour les nouvelles installations électriques dans de nombreuses régions du monde. Le facteur de charge est aux alentours de 20 %. [7]

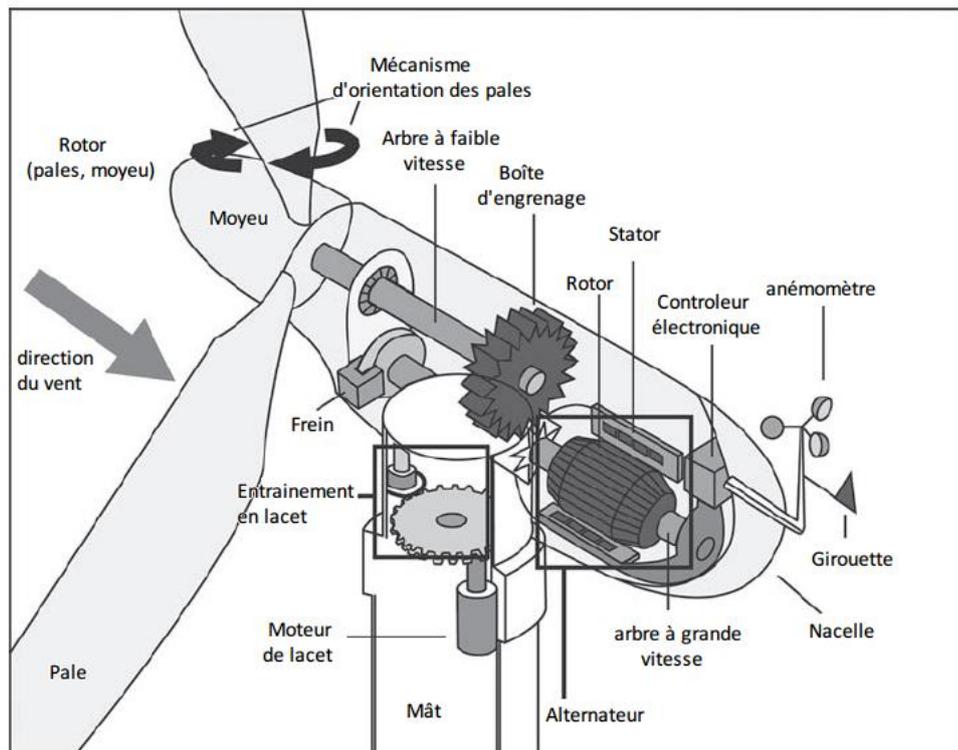


Figure 1-6. Diagramme du compartiment essentiel d'une large turbine éolienne [7]

1.3. TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Le réseau de transport achemine l'énergie électrique sur de longues distances via des lignes haute tension de type HTB. Ces lignes sont interconnectées pour assurer l'alimentation indépendamment de la disponibilité des moyens de production. La figure 1-7 précise que le réseau de transport se situe en amont des postes sources. [11]

Les lignes HTB sont souvent aériennes et sont portées par des pylônes. La distance entre conducteurs et entre conducteurs et le sol varie proportionnellement avec la tension.

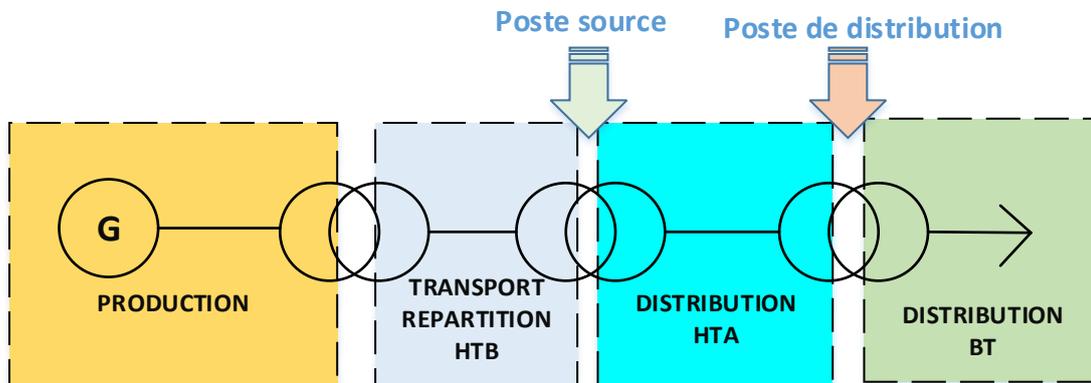


Figure 1-7. Architecture générale d'un réseau électrique

Impressionnantes par leurs dimensions, les lignes très haute tension (HTB), sont conçues pour transporter de grandes puissances, en toute sécurité pour les personnes, et résister à des conditions climatiques sévères. La nouvelle norme française en vigueur UTE C 18-510³ [12] définit les niveaux de tension alternative comme suit :

- HTB : pour une tension composée supérieure à 50 kV
- HTA : pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV
- BTB : pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV
- BTA : pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V
- TBT : pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V.

³ Le recueil UTE C 18-510 est destiné à faire connaître les prescriptions à observer en vue d'éviter les accidents corporels au cours des opérations entreprises lors de la construction, de l'exploitation ou de l'entretien des ouvrages électriques, quelle que soit la tension.

La figure 1-8 montre un comparatif entre l'ancienne norme (CEI 38 ⁴) et la nouvelle norme (NF C 18-510 ⁵) qui régissent les niveaux de tension.

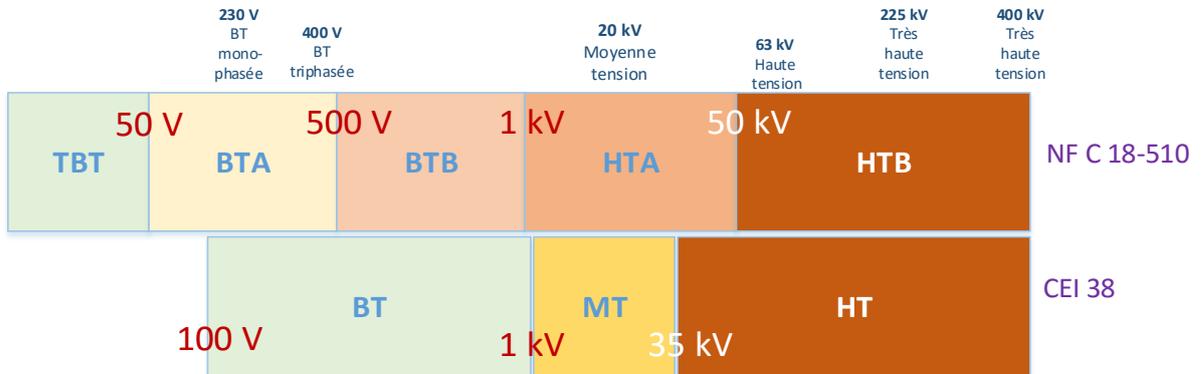


Figure 1-8. Niveaux de tension sur le réseau électrique

La tension de la source d'alimentation est liée à la puissance de livraison tel que :

- HTB (225 kV) : puissance de livraison supérieur à 40000 kVA
- HTB (63 kV ou 90 kV) : puissance de livraison comprise entre 10000 kVA et 40000 kVA
- HTA : puissance de livraison comprise entre 250 kVA et 10000 kVA
- BTA : puissance de livraison Inférieure à 250 kVA.

1.3.1. LES POSTES DE LIVRAISON HTB

Ils concernent généralement les puissances supérieures à 10 MVA. L'installation du poste de livraison est comprise entre :

- d'une part, le point de raccordement au réseau de distribution HTB
- d'autre part, la borne aval du ou des transformateurs HTB / HTA

Les schémas électriques des postes de livraison HTB les plus couramment rencontrés sont les suivants :

⁴ CEI 38: 1983, Tensions normales de la Commission électrotechnique internationale.

⁵ La norme NF C18-510 regroupe un ensemble de prescriptions pour la prévention des risques électriques lors des opérations sur les ouvrages ou installations électriques ou dans un environnement électrique.

1.3.1.1. SIMPLE ANTENNE

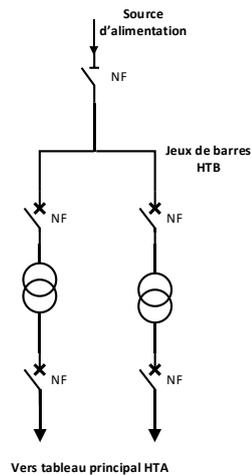


Figure 1-9. Alimentation simple antenne d'un poste de livraison HTB

Le schéma simple antenne ou simple dérivation est un schéma simple (fig. 1-9), il fournit de la haute tension HTB à partir d'une seule l'alimentation aux différents jeux de barres. Son inconvénient majeur est la discontinuité de service en cas de défaut.

1.3.1.2. DOUBLE ANTENNE

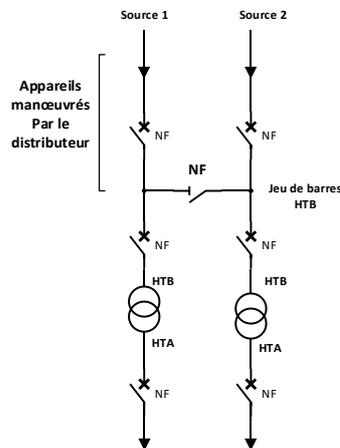


Figure 1-10. Alimentation double antenne d'un poste de livraison HTB

Le schéma de l'alimentation double antenne est donné à la figure 1-10. En mode d'exploitation normal, les deux disjoncteurs d'arrivée des sources sont fermés, ainsi que le sectionneur de couplage. Les transformateurs sont donc alimentés par les 2 sources simultanément. En cas de perte d'une source, l'autre source assure la totalité de l'alimentation. Leurs avantages est la bonne disponibilité, dans la mesure où chaque

source peut alimenter la totalité du réseau et la possibilité de la maintenance du jeu de barres avec un fonctionnement partiel de celui-ci. En revanche, c'est une solution plus coûteuse que l'alimentation simple antenne et qui ne permet qu'un fonctionnement partiel du jeu de barres en cas de maintenance de celui-ci.

1.4. DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Le réseau de distribution amène l'électricité chez les différents consommateurs. La distribution est assurée par des lignes moyenne tension HTA et basse tension. Le réseau de distribution se situe en aval du poste source. Les lignes HTA (souvent 20 kV) sont réalisées en aérien (milieu rural) et en souterrain (milieu urbain) la figure 1-11 montre la structure général d'un réseau de distribution privé.

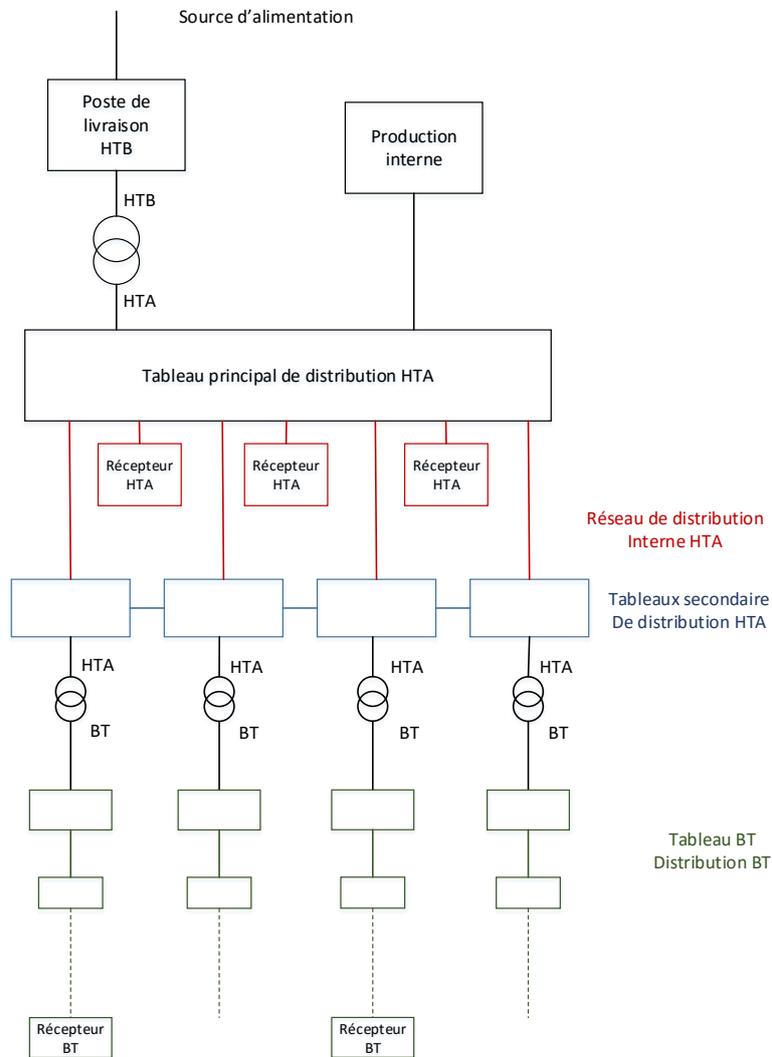


Figure 1-11. Structure générale d'un réseau privé de distribution

1.4.1. LES POSTES DE LIVRAISON HTA (POSTE SOURCE)

Ils comportent des transformateurs HTB/HTA à partir desquels la HTB est distribuée en triphasé sans neutre et entre 5 et 33 kV (souvent 20 kV). Les transformateurs HTB/HTA peuvent être couplés. En aval des transformateurs, la partie HTA est constituée de cellules *d'arrivée*, de *couplage* et de *départ*. A partir de ces départs, on réalise des schémas : en *Antenne* ou *Simple dérivation*, en *Boucle* ou *Coupure d'Artère* et en *Double dérivation*, selon les besoins de continuité de service et de contraintes de coût.

1.4.1.1. DISTRIBUTION EN ANTENNE OU SIMPLE DERIVATION

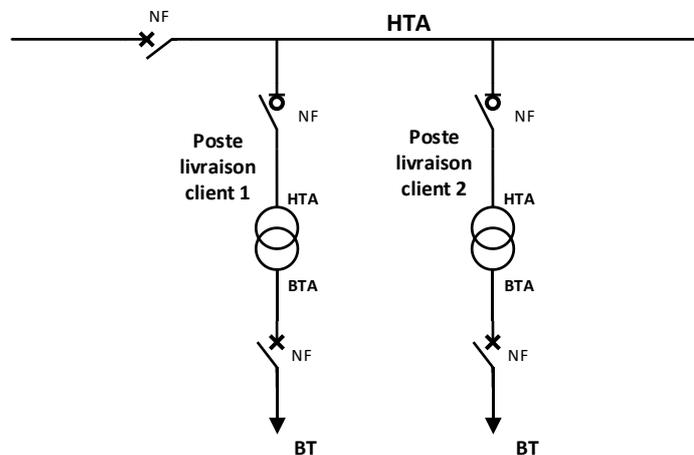


Figure 1-12. Départ en simple dérivation des postes source

Le schéma de la distribution en antenne ou simple dérivation est illustré à la figure 1-12, ce schéma est principalement utilisé dans les zones rurales, en réseau aérien. En cas de défaut sur un tronçon de câble ou dans un poste, les utilisateurs sont privés d'alimentation le temps de la réparation. [13] [14]

1.4.1.2. DISTRIBUTION EN COUPURE D'ARTERE OU EN BOUCLE

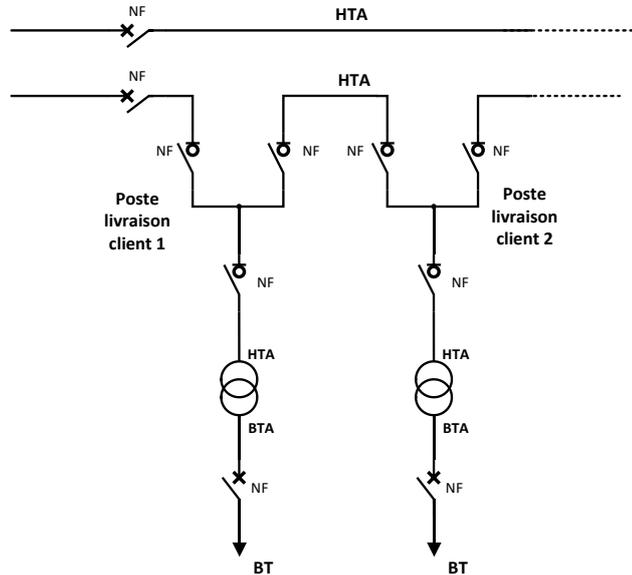


Figure 1-13. Départ en coupure d'artère des postes source

Il est utilisé dans les zones urbaines (fig. 1-13), En cas de défaut sur un tronçon de câble ou dans un poste, on isole le tronçon en défaut par l'ouverture des 2 appareils de protection ou de sectionnement qui l'encadrent et on réalimente la boucle en refermant le disjoncteur.

1.4.1.3. DISTRIBUTION EN DOUBLE DERIVATION

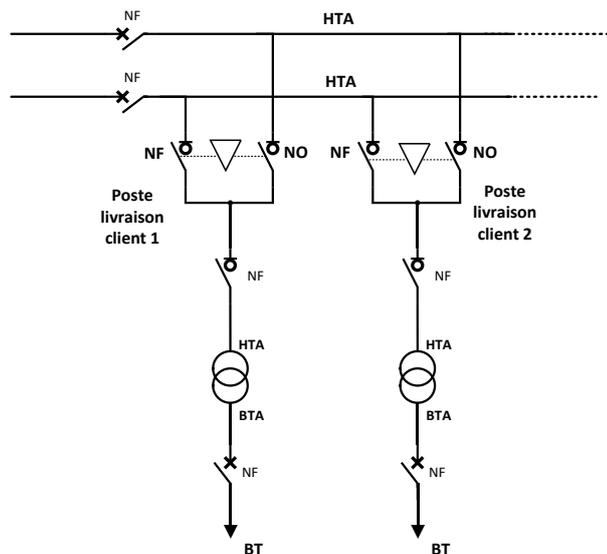


Figure 1-14. Départ en double dérivation des postes source

Il est utilisé pour assurer une continuité de service optimale (fig. 1-14). En cas de défaut sur l'une des lignes, l'alimentation de l'abonné est permutée sur la seconde. Les deux arrivées sont différentes mais peuvent être issues du même poste source. On ne peut se connecter sur les deux arrivées en même temps grâce au verrouillage mécanique présents entre les deux appareils de sectionnement. Il est possible que la seconde arrivée (ou la troisième) soit un groupe électrogène (diesel, gaz, autre). [13]

1.5. CONCLUSION

Nous pouvons conclure à partir de ce chapitre que derrière la prise de courant il y a tout un processus de conduite de réseau électrique à savoir la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique. La tendance actuelle est penchée vers les réseaux intelligents ou *smart grids* ou les parties production, transport et distribution sont commandées par des technologies d'informatique afin d'optimiser l'ensemble des mailles de réseau d'électricité et en conséquent optimiser l'efficacité énergétique du réseau global. Le réseau va donc émerger de la centralisation vers la décentralisation c'est-à-dire l'ouverture du marché d'électricité ou le client peut devenir fournisseur d'énergie grâce aux compteurs intelligents *smart meters*.

Chapitre 2

ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

2. ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

2.1. INTRODUCTION

Le calcul d'écoulement de puissance est une étude en régime permanent du réseau électrique qui consiste à déterminer, en premier lieu, à chaque jeu de barres, l'amplitude et la phase de la tension ainsi que les puissances active et réactive injectées. Connaissant les tensions (amplitude et phase) aux jeux de barres ainsi que les puissances injectées (active et réactive), nous pouvons calculer, en deuxième lieu, les courants et les puissances dans les lignes et ceux fournis par les sources. [15]

2.1.1. OBJECTIFS

2.1.1.1. DEFINITION DE L'ETAT DU RESEAU

Le calcul de la répartition des charges au sein d'un réseau a pour objet de déterminer l'état du réseau en fonction des charges qui sont connectées et de la répartition de la consommation sur l'ensemble des nœuds du réseau. Ce calcul se fait en supposant que le réseau fonctionne en régime permanent et que les générateurs fournissent la puissance électrique sous forme d'un système de tensions et de courants alternatifs sinusoïdaux triphasés équilibrés directs. Le but du calcul est de fournir une image exacte de la répartition des puissances actives et réactives sur l'ensemble des éléments de transmission du réseau.

2.1.1.2. CALCULER L'AMPLITUDE DES COURANTS DE TRANSIT

La connaissance de la valeur de l'intensité du courant de transit dans chacun des composants du réseau, ligne, câble ou transformateur permet de s'assurer que dans chacun de ces composants de l'intensité ne dépasse pas la valeur limite compatible avec un bon fonctionnement de ce composant.

2.1.1.3. EVALUER LES PERTES

De même, la connaissance des courants de transits permet d'avoir une évaluation des pertes en lignes et éventuellement de modifier le plan de tension afin de minimiser les pertes sur l'ensemble du réseau.

2.1.1.4. DEFINIR UNE STRATEGIE DE REGLAGE ET DE CONDUITE

La capacité de détermination des tensions en chaque nœud et des puissances active et réactive que doit fournir la machine concernée, afin d'assurer le transport et la fourniture en chaque nœud consommateur de la puissance demandée, permet de définir les consignes de réglage à appliquer au niveau de chacune des machines connectées au réseau. Un tel calcul est utilisé également pour des analyses de stabilité.

2.1.1.5. OPTIMISER LA CAPACITE DE TRANSIT

Enfin, il est possible d'introduire la notion de contrainte et de fonction objectif afin d'optimiser le trajet des flux de puissance pour augmenter ainsi la capacité de transit de puissance disponible du réseau. [16]

2.2. LA PUISSANCE DANS LES CIRCUITS ALTERNATIFS

Les concepts de puissance instantanée, puissance moyenne, puissance apparente et puissance réactive sont fondamentales et sont brièvement abordées dans ce paragraphe. Considérons une impédance localisée $Z e^{j\theta}$ alimentée par une tension sinusoïdale $E \angle 0^\circ$ à fréquence constante. La charge linéaire absorbe un courant sinusoïdal. La puissance variant avec le temps peut être écrite comme suit :

$$\begin{aligned} p(t) &= \operatorname{Re}(\sqrt{2} E \mathcal{E}^{j\omega t}) \operatorname{Re}(\sqrt{2} I \mathcal{E}^{j(\omega t - \theta)}) \\ &= 2EI \cos \omega t \cdot \cos(\omega t - \theta) \\ &= EI \cos \theta + EI \cos(2\omega t - \theta) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Le premier terme est la puissance moyenne dépendant du temps, lorsque la tension et le courant (formes d'onde) se composent uniquement d'éléments fondamentaux. Le deuxième terme est l'amplitude d'oscillation de puissance. L'équation (2.1) peut être écrite comme :

$$EI \cos \theta (1 + \cos 2\omega t) + EI \sin \theta \cdot \sin 2\omega t \quad (2.2)$$

Le premier terme (puissance active) est la puissance réellement consommée dans le circuit et le deuxième terme (puissance réactive) est la puissance échangée entre la source et le circuit, mais pas consommée dans le circuit.

La puissance active est mesurée en Watts, et est définie comme

$$P = EI \cos \theta (1 + \cos 2\omega t) \approx EI \cos \theta \quad (2.3)$$

La puissance réactive est mesurée en VAR et définit par :

$$Q = EI \sin \theta \cdot \sin 2\omega t \approx EI \sin \theta \quad (2.4)$$

$\cos \theta$ est appelé *le facteur de puissance* (*power factor PF*) du circuit, et θ est l'angle du facteur de puissance.

La puissance apparente en VA (Voltampère) est donnée par :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + (P \tan \theta)^2} = P\sqrt{1 + \tan^2 \theta} = P \sec \theta = \frac{P}{\cos \theta} \quad (2.5)$$

L'angle du facteur de puissance est généralement donné par :

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \quad (2.6)$$

Si $\cos \theta \cong 1 \xrightarrow{\text{alors}} Q \cong 0$ Une telle charge est une charge de facteur de puissance unitaire, ce cas est observé pour un petit pourcentage de charges (un chauffage par résistance et des lampes à incandescence). Les charges industrielles, commerciales ou résidentielles fonctionnent à facteur de puissance inductif. Comme l'équipement électrique est évalué sur une base kVA, un facteur de puissance inférieure limite la capacité de l'équipement à fournir de la puissance active. Le flux et le contrôle de la puissance réactive est un aspect important de l'écoulement de puissance et sera étudié ultérieurement dans ce chapitre.

L'importance du contrôle du facteur de puissance (puissance réactive) a pour but :

- L'amélioration de la capacité de manipuler la puissance active des lignes de transmission.
- L'amélioration de la limite de stabilité de tension.
- L'augmentation de la capacité des systèmes existants : l'amélioration du facteur de puissance pour la libération de certaines kVA qui peuvent être calculés à partir de l'équation (2.5) :

$$FP_{aml} = \frac{FP_{exi}}{1 - kVA_{disp}} \quad (2.7)$$

Où FP_{aml} est le facteur de puissance amélioré, FP_{exi} est le facteur de puissance existant, et kVA_{disp} est une kVA (per unit P.U) rendu disponible à partir de kVA existant.

- Réduction des pertes : les pertes de puissance active sont réduites (elles sont proportionnelles au carré du courant). Avec l'amélioration de PF, le courant en P.U pour la même livraison de la puissance active est réduit. La réduction des pertes est donnée par l'expression :

$$perte_{red} = 1 - \left(\frac{FP_{exi}}{FP_{aml}} \right)^2 \quad (2.8)$$

Où $perte_{red}$ est la réduction des pertes en P.U avec l'amélioration de facteur de puissance de FP_{exi} à FP_{aml} . Une amélioration de facteur de puissance de 0,7 à 0,9 réduit les pertes de 39,5%.

- Amélioration de la régulation de la ligne de transmission : l'amélioration du facteur de puissance améliore la régulation de ligne en réduisant les chutes de tension dans la répartition des charges.

2.2.1. LA PUISSANCE COMPLEXE

Si le vecteur de tension est exprimé en $A + jB$ et le vecteur courant $C + jD$ donc par convention sont les voltampères dans les circuits à courant alternatif qui sont vectoriellement exprimés en :

$$EI^* = (A + jB)(C - jD) = AC + BD + j(BC - AD) = P + jQ \quad (2.9)$$

Où $P = AC + BD$ est la puissance active et $Q = BC - AD$ est la puissance réactive ; I^* est le conjugué de I .

Le facteur de puissance est donné par :

$$\cos \theta = \frac{AC + BD}{\sqrt{A^2 + B^2} \sqrt{C^2 + D^2}} \quad (2.10)$$

2.2.2. LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

La notion de la conservation de l'énergie (théorème de Tellegen) est basée sur les lois de Kirchhoff et indique que la puissance générée est égale à la puissance consommée (y compris la demande et les pertes d'énergie). Si $i_1, i_2, i_3 \dots i_n$ sont des courants et $v_1, v_2, v_3 \dots v_n$ sont des tensions de n éléments :

$$\sum_{k=1}^{k=n} V_k I_k = 0 \quad (2.11)$$

Dans un système linéaire d'éléments passifs, la somme de la puissance complexe, active et réactive égale à zéro

$$\sum_{k=1}^{k=n} S_n = 0 ; \quad \sum_{k=1}^{k=n} P_n = 0 ; \quad \sum_{k=1}^{k=n} Q_n = 0 \quad (2.12)$$

2.3. REPARTITION DE LA PUISSANCE DANS UNE BRANCHE NODALE

La modélisation des lignes de transmission est unique dans le sens où la capacité joue un rôle important et ne peut pas être ignorée, sauf pour les lignes de *longueur courtes* inférieure à 50 miles (80 km).

Prenons le flux d'énergie sur une ligne de transmission courte. Comme il n'y a pas d'éléments de dérivation (shunt), la ligne peut être modélisée par sa résistance et réactance série et par la charge. Ce système peut être appelé une *branche nodale* dans l'écoulement de puissance. La somme des puissances actives et réactives de l'envoi et de la réception d'une branche nodale n'est pas nul, due aux pertes de l'admittance série Y_{sr} (Fig. 2-1).

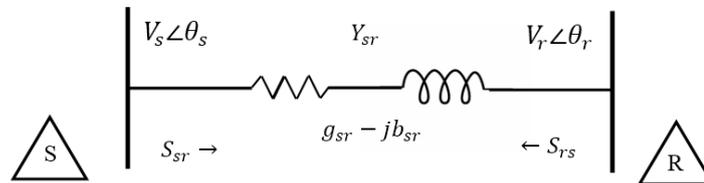


Figure 2-1. Écoulement de puissance sur une ligne à deux extrémités

Nous définissons Y_{sr} , l'admittance des éléments série $Y_{sr} = g_{sr} - jb_{sr}$ où :

g_{sr} est la *conductance* série de la ligne [siemens]⁶ ; b_{sr} est la *susceptance* série de la ligne [siemens] ; $Z = zl = l(r_{sr} - jx_{sr}) = R_{sr} - X_{sr} = 1/Y_{sr}$ où l est la longueur de la ligne. La puissance de l'extrémité d'envoi est :

$$S_{sr} = V_s I_s^* \quad (2.13)$$

⁶ L'ancien nom de cette unité est le [mho] Ω ohm épilé à l'envers dont le symbole est un Ω renversé dans le sens de la hauteur ce qui équivaut encore à Ω^{-1} . Ce terme a été suggéré par *William Thomson*.

Où I_s^* est le conjugué de I_s , cela donne :

$$\begin{aligned} S_{sr} &= V_s [Y_{sr}(V_s - V_r)]^* \\ &= [V_s^2 - V_s V_r \varepsilon^{j(\theta_s - \theta_r)}] (g_{sr} - j b_{sr}) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Où $V_s \angle \theta_s$ est le voltage de l'extrémité d'envoi et $V_r \angle \theta_r$ est le voltage de l'extrémité de réception, la puissance complexe dans l'équation (2,14) peut être divisée en composante active et réactive dans l'extrémité d'envoi :

$$P_{sr} = [V_s^2 - V_s V_r \cos(\theta_s - \theta_r)] g_{sr} - [V_s V_r \sin(\theta_s - \theta_r)] b_{sr} \quad (2.15)$$

$$Q_{sr} = [-V_s V_r \sin(\theta_s - \theta_r)] g_{sr} - [V_s^2 - V_s V_r \cos(\theta_s - \theta_r)] b_{sr} \quad (2.16)$$

Et dans la réception

$$P_{rs} = [V_r^2 - V_r V_s \cos(\theta_r - \theta_s)] g_{sr} - [V_r V_s \sin(\theta_r - \theta_s)] b_{sr} \quad (2.17)$$

$$Q_{rs} = [-V_r V_s \sin(\theta_r - \theta_s)] g_{sr} - [V_r^2 - V_r V_s \cos(\theta_r - \theta_s)] b_{sr} \quad (2.18)$$

Si on néglige g_{sr}

$$P_{rs} = \frac{|V_s| |V_r| \sin(\delta)}{X_{sr}} \quad (2.19)$$

$$Q_{rs} = \frac{|V_s| |V_r| \cos(\delta) - |V_r|^2}{X_{sr}} \quad (2.20)$$

Où δ est la différence entre l'angle de la tension de l'émission et la réception $\delta = \theta_s - \theta_r$. Pour des petites valeurs de δ l'équation de la puissance réactive devient :

$$Q_{rs} = \frac{|V_r|}{X_{sr}} (|V_s| - |V_r|) = \frac{|V_r|}{X_{sr}} |\Delta V| \quad (2.21)$$

Où $|\Delta V|$ représente la chute de tension de la ligne.

Pour une ligne courte :

$$\begin{aligned} |\Delta V| &= I_r Z = I_r (r_{sr} + j x_{sr}) = (R_{sr} + j X_{sr}) \frac{(P_{rs} - j Q_{rs})}{V_r} \\ &\approx \frac{R_{sr} P_{rs} + j X_{sr} Q_{rs}}{|V_r|} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Par conséquent, l'écoulement de la puissance active (réelle) dépend de l'angle δ , appelé l'angle de transmission, et des amplitudes relatives des tensions des terminaux de l'envoi et de la réception. Comme ces tensions seront maintenues près de la tension

nominale, la puissance active dépend surtout de l'angle δ . Le transfert de puissance maximale se produit à $\delta = 90^\circ$ (limite de stabilité du régime permanent).

Le flux de la puissance réactive est dans la direction de la tension la plus faible et il est indépendant de δ . Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Pour des lignes de petites résistances, l'écoulement de la puissance active est proportionnel à $\sin(\delta)$, son maximum est à $\delta = 90^\circ$. Pour des raisons de stabilité, la valeur est limitée à moins de 90° . Le transfert de la puissance active augmente avec l'augmentation de la tension de transmission.
- L'écoulement de la puissance réactive est proportionnel à la chute de tension dans la ligne, et est indépendant de δ . La tension de réception chute avec l'augmentation de la demande de puissance réactive.

2.3.1. SIMPLIFICATION DE L'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE DE LA LIGNE

En générale, la conductivité série est inférieure à la susceptance série, la différence d'angle de phase est faible, et les tensions de l'extrémité d'envoi et de réception sont proches de la tension nominale :

$$g_{sr} \ll jb_{sr} ; \sin(\theta_s - \theta_r) \approx \theta_s - \theta_r ; \cos(\theta_s - \theta_r) \approx 1 ; V_s \approx V_r \approx 1 \text{ PU} \quad (2.23)$$

Si ces relations sont utilisées, on aura :

$$P_{sr} \approx (\theta_s - \theta_r)b_{sr} ; Q_{sr} \approx (V_s - V_r)b_{sr} ; P_{rs} \approx -(\theta_r - \theta_s)b_{sr} ; Q_{rs} \approx -(V_r - V_s)b_{sr} \quad (2.24)$$

2.3.2. REGULATION DE LA TENSION

La régulation de la tension est définie comme étant l'augmentation de la tension au niveau de l'extrémité de réception, exprimée en pourcentage de la tension de pleine charge par rapport à la tension lorsque la charge totale est enlevée (à un facteur de puissance spécifié). La tension de l'extrémité d'émission est maintenue constante. La régulation de tension est exprimée en pourcentage ou en PU *per unit* de la tension de l'extrémité de réception en pleine charge :

$$V_R \% = \frac{V_{rsc} - V_{rpc}}{V_{rpc}} \times 100 \quad (2.25)$$

Où : V_{rsc} est la tension de réception sans charge, V_{rpc} est la tension de pleine charge à un facteur de puissance spécifié.

2.4. LES CONSTANTES ABCD

Une ligne de transmission de longueur quelconque peut être représentée par un réseau à quatre bornes, Fig. 2-2 (a). Pour les constantes A, B, C et D, la relation entre tensions et courants des bornes de l'envoi et de la réception peut être exprimé sous la forme :

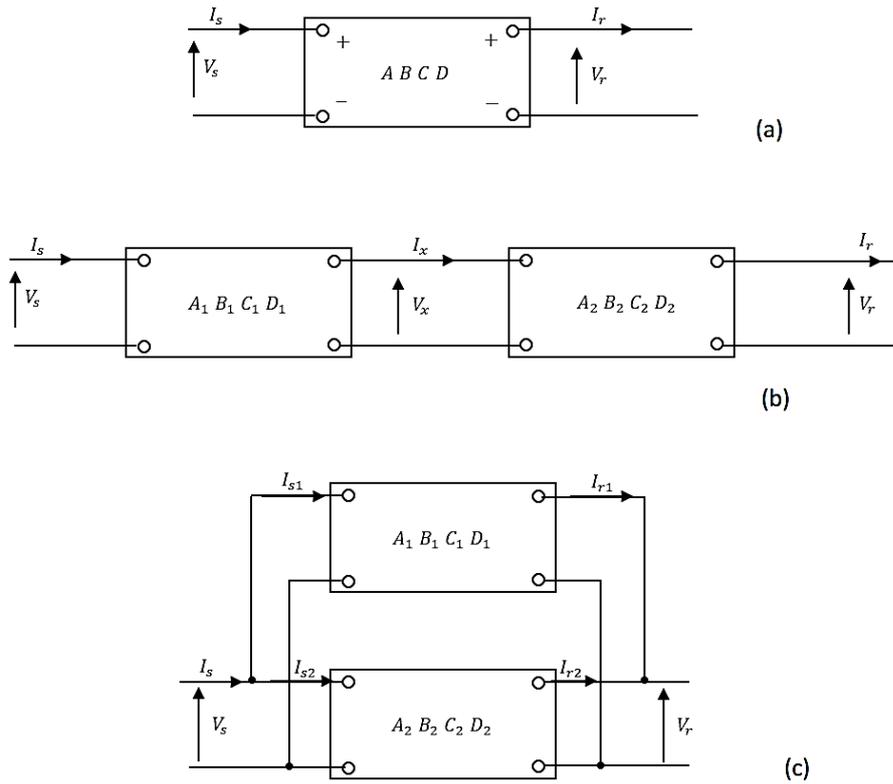


Figure 2-2. (a) représentation schématique d'un réseau à deux extrémités utilisant des constantes ABCD (b) deux extrémités en série (c) deux extrémités en parallèle

$$\begin{vmatrix} V_s \\ I_s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_r \\ I_r \end{vmatrix} \quad (2.26)$$

Dans le cas où les tensions et les courants de d'extrémité d'envoi sont connus, la tension et le courant de réception peuvent être trouvés par :

$$\begin{vmatrix} V_r \\ I_r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D & -B \\ -C & A \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_s \\ I_s \end{vmatrix} \quad (2.27)$$

En outre,
$$AD - BC = 1 \quad (2.28)$$

La signification de ces constantes est donnée par :

$A = V_s/V_r$, si $I_r = 0$, i.e., l'extrémité de réception est en circuit ouvert. A est donc un rapport de deux tensions (sans dimension).

$B = V_s/I_r$, si $V_r = 0$, i.e., l'extrémité de réception est en court-circuit. B a une dimension d'une impédance (en ohm).

$C = I_s/V_r$, si $I_r = 0$, i.e., l'extrémité de réception est en circuit ouvert. C donc a une dimension d'une admittance.

$D = I_s/I_r$, si $V_r = 0$, i.e., l'extrémité de réception est en court-circuit. D a est donc un rapport de deux courants (sans dimension).

Deux réseaux ABCD en série (fig 2-2.b) peuvent être réduits en un seul réseau équivalent, tel que :

$$\begin{vmatrix} V_s \\ I_s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_r \\ I_r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1A_2 + B_1C_2 & A_1B_2 + B_1D_2 \\ C_1A_2 + D_1C_2 & C_1B_2 + D_1D_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_r \\ I_r \end{vmatrix} \quad (2.29)$$

$$A = \frac{(A_1B_2 + A_2B_1)}{(B_1 + B_2)} ; B = \frac{B_1B_2}{(B_1 + B_2)} ;$$

$$C = (C_1 + C_2) + \frac{(A_1 - A_2)(D_2 - D_1)}{(B_1 + B_2)} ; D = \frac{B_2D_1 + B_1D_2}{(B_1 + B_2)} \quad [17] \quad (2.30)$$

2.5. LES MODELES DES LIGNES DE TRANSMISSION

2.5.1. LIGNE MOYENNE DE TRANSMISSION

Avec l'augmentation de la distance de la ligne, le courant de charge devient appréciable et la capacité shunt doit être considérée, ligne supérieure à 80 km (50 miles) est inférieure à 250 km (150 miles) de longueur sont définies comme *lignes de distance moyenne*. [18]

Il existe deux modèles pour la modélisation, le modèle de *circuit T nominal* et le modèle de *circuit π nominal*. Dans le circuit en T l'admittance shunt est connectée au milieu de la ligne, cependant dans le circuit en π la moitié des capacités shunt peuvent être considérées comme étant localisées à chaque extrémité de la ligne, le modèle de circuit en π est le diagramme vectoriel sont représentés dans la figure 2-3. Le modèle de circuit en T est le diagramme vectoriel sont représentés dans la figure 2-4.

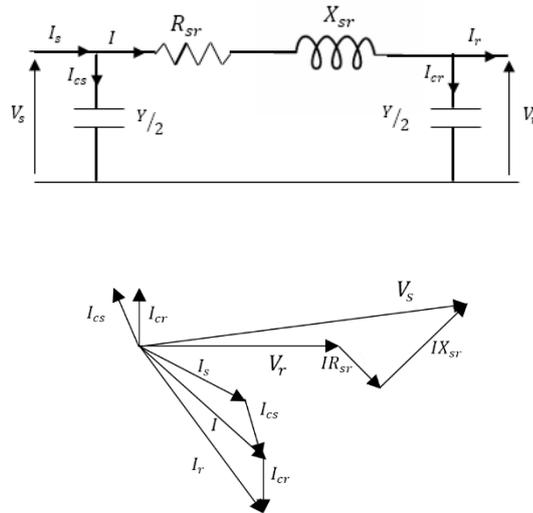


Figure 2-3. Représentation d’une ligne de transmission en π avec son diagramme vectoriel

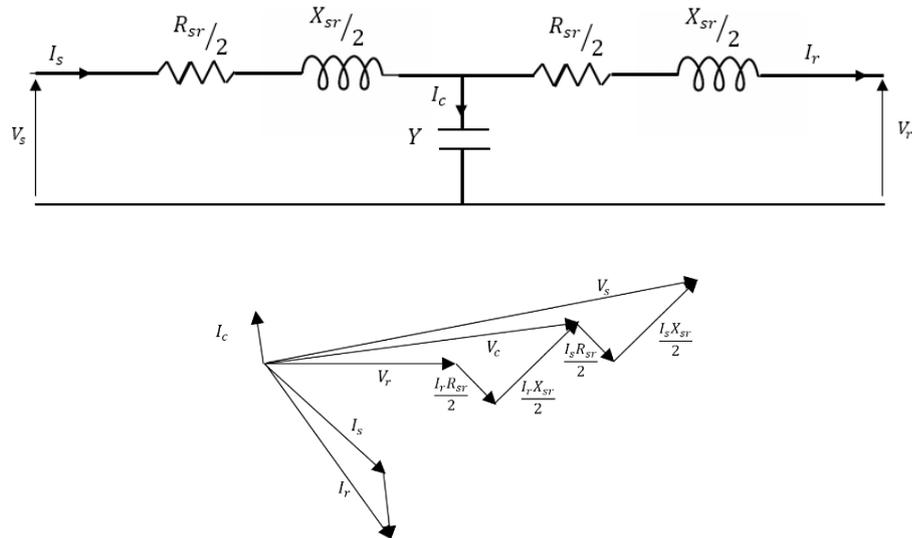


Figure 2-4. Représentation d’une ligne de transmission en T avec son diagramme vectoriel

2.5.2. LIGNE LONGUE DE TRANSMISSION

Pour les lignes de longueur courtes et moyennes, des modèles précis sont obtenus en faisant des approximations telles que les impédances shunt soient localisées, alors que ceci n’était pas le cas pour les lignes longues de 250 km (150 miles) et plus. [18]. Chaque section élémentaire de la ligne a sa propre impédance série et admittance shunt. Considérons une section élémentaire d’une impédance z PU et d’une admittance y PU. L’impédance de la section élémentaire de longueur dx est zdx et l’admittance ydx . En se référant à la figure 2.5 et en appliquant la loi de Kirchhoff des tensions on aura :

$$V = Izdx + V + \frac{\partial V}{\partial x} dx \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -IZ$$

La loi des nœuds donne également :

$$I = Vydx + I + \frac{\partial I}{\partial x} dx \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -Vy$$

Dérivons les équations 2.30 et 2.31 :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = yzV \quad (2.33)$$

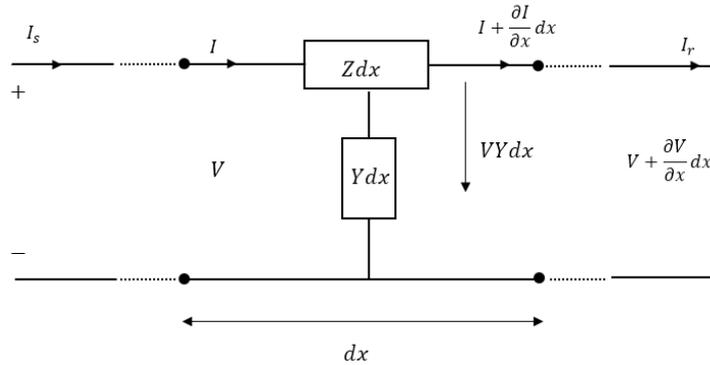


Figure 2-5. Modèle d'une section élémentaire d'une ligne longue de transmission

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = yzI \quad (2.34)$$

Ces équations différentielles ont des solutions de la forme :

$$V = V_1 e^{\gamma x} + V_2 e^{-\gamma x} \quad (2.35)$$

Où γ est la *constante de propagation*. Elle est définie par : $\gamma = \sqrt{zy}$

Définissons l'élément shunt suivant, pour le distinguer de l'élément série de la ligne : g_{sh} est la conductance shunt, b_{sh} est la susceptance shunt, x_{sh} est la réactance capacitive shunt et $Y = yl$ est l'admittance shunt où l est la longueur de la ligne. La conductance shunt est négligeable donc : $y = \frac{j}{x_{sh}}$; $y = jb_{sh}$; $yz = -b_{sh}x_{sc} + jr_{sc}b_{sh}$

$$|\gamma| = \sqrt{b_{sh}(r_{sc}^2 + x_{sc}^2)}^{\frac{1}{4}} \quad (2.36)$$

La *constante de propagation* complexe peut être écrite sous :

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.37)$$

Où α est défini comme la *constante d'atténuation*. Les unités communes sont Nepers/mile ou Nepers/km.

$$\alpha = |\gamma| \cos \left[\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{-r_{sc}}{x_{sc}} \right) \right] \quad (2.38)$$

$$\beta = |\gamma| \sin \left[\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{-r_{sc}}{x_{sc}} \right) \right] \quad (2.39)$$

Où β est la constante de phase [rad/km]

$$L'impédance caractéristique est : Z_0 = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (2.40)$$

En négligeant encore la conductance shunt :

$$\frac{z}{y} = \frac{r_{sc} + jx_{sc}}{jb_{sh}} = x_{sc}x_{sh} - jr_{sc}x_{sh}$$

$$Z_0 = \sqrt{x_{sh}(r_{sc}^2 + x_{sc}^2)^{\frac{1}{4}}} \quad (2.41)$$

$$\angle Z_0 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{-r_{sc}}{x_{sc}} \right) \quad (2.42)$$

La tension à un point x peut être écrite comme :

$$V_x = \left| \frac{V_r + Z_0 I_r}{2} \right| e^{\alpha x + j\beta x} + \left| \frac{V_r - Z_0 I_r}{2} \right| e^{-\alpha x - j\beta x} \quad (2.43)$$

Cette équation représente une équation d'une *onde progressive*. La solution consiste à deux termes, chacun est lui-même fonction de deux variables, de temps et de distance. A chaque instant, le premier terme, qui représente *l'onde incidente* est distribué sinusoidalement tout au long de la ligne avec l'amplitude qui croît exponentiellement depuis l'extrémité de réception.

La même explication pour le courant :

$$I_x = \left| \frac{V_r / Z_0 + I_r}{2} \right| e^{\alpha x + j\beta x} + \left| \frac{V_r / Z_0 - I_r}{2} \right| e^{-\alpha x - j\beta x} \quad (2.44)$$

Ces équations peuvent être écrites comme :

$$\begin{aligned} V_x &= V_r \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) + Z_0 I_r \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) \\ I_x &= \frac{V_r}{Z_0} \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) + I_r \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.45)$$

Ou sous forme matricielle :

$$\begin{vmatrix} V_s \\ I_s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cosh \gamma l & Z_0 \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_0} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_r \\ I_r \end{vmatrix} \quad (2.46)$$

Finalement, les constantes ABCD pour tous les types de ligne sont représentées dans le tableau 2-1

Tableau 2-1. Constantes ABCD des lignes de transmission

CONSTANTES ABCD DES LIGNES DE TRANSMISSION				
Longueur de la ligne	COURTE	MOYENNE	MOYENNE	LONGUE
Circuit équivalent	Impédance équivalente seulement	π	T	Paramètres distribués
A	1	$1 + \frac{1}{2}YZ$	$1 + \frac{1}{2}YZ$	$\cosh \gamma l$
B	Z	Z	$Z \left[1 + \frac{1}{4}(YZ) \right]$	$Z_0 \sinh \gamma l$
C	0	$Y \left[1 + \frac{1}{4}(YZ) \right]$	Y	$\frac{\sinh \gamma l}{Z_0}$
D	1	$1 + \frac{1}{2}YZ$	$1 + \frac{1}{2}YZ$	$\cosh \gamma l$

2.5.3. COEFFICIENT DE REFLEXION

Les valeurs relatives de V_1 et V_2 dépendent des conditions aux extrémités de la ligne. Le *coefficient de réflexion* à l'extrémité de la charge est défini comme le ratio des amplitudes de l'onde progressive émise et réfléchi. Pour une ligne qui se termine par une charge Z_L :

$$V_2 = \left(\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) V_1 \quad (2.47)$$

Donc, le coefficient de réflexion du voltage à l'extrémité de la charge est :

$$\rho_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.48)$$

Le coefficient de réflexion du courant égale à la négation de celui de la tension.

Pour une ligne court-circuitée, le courant double et pour une ligne à circuit ouvert le voltage double. La figure 2-6 montre le phénomène de l'onde progressive. L'onde réfléchi dans une discontinuité d'impédance est l'image miroir de l'onde incidente mouvant dans la direction opposée. Chaque point de l'onde réfléchi correspond à celui de l'onde incidente multiplié par le coefficient de réflexion (image miroir). A chaque instant le voltage total est la somme de l'onde incidente et réfléchi. La figure 2-6(b) montre le renforcement de l'onde incidente et réfléchi. L'onde réfléchie se déplace vers la source et elle est aussi réfléchie. Le coefficient de réflexion de la source est défini par :

$$\rho_s = Z_s - Z_0 / Z_s + Z_0 \quad (2.49)$$

L'onde incidente apparaisse dans la source, alors que l'onde réfléchi apparaisse dans la charge. A chaque instant, le voltage ou le courant à chaque point est la somme de tous les voltages et tous les courants existant dans la ligne dans ce point et temps.

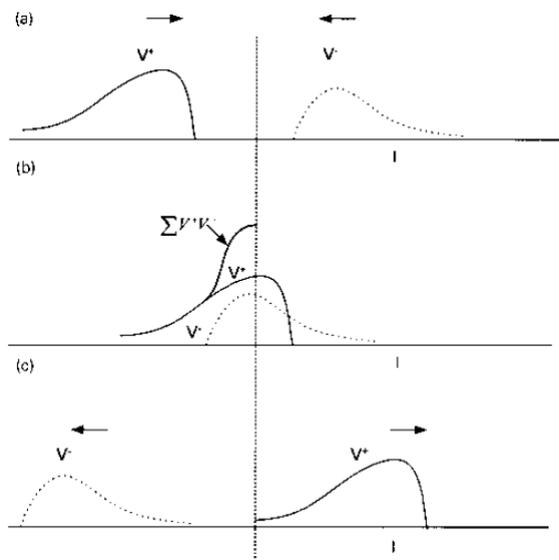


Figure 2-6. (a) L'ondes incidente et réfléchi à un changement d'impédance dans une ligne longue de transmission ; (b) le renforcement des ondes incidentes et réfléchi ; (c) onde incidente et réfléchi traversant l'une et l'autre.

2.5.4. DIAGRAMME EN TREILLIS

Les ondes (émise et réfléchi) qui circulent peuvent être représentés sur un diagramme en treillis (Fig. 2-7). L'axe horizontal est la distance de la ligne de la source et l'axe vertical est marqué par incréments de temps. Chaque incrément étant le temps nécessaire à l'onde pour parcourir la ligne dans une direction, à savoir la source à la charge. Considérons un point P dans la forme d'impulsion de la figure. 2-7 (b) à l'instant

t' , le temps de se déplacer dans une direction est l/u où u est proche de la vitesse de la lumière. Le point P atteint alors la fin de charge à $t' + l/u_s$ et est réfléchi. Le point correspondant sur l'onde réfléchie est $P\rho_L$. A l'extrémité d'envoi, il est ré-réfléchi en $P\rho_L\rho_s$, Fig. 2-7 (b).

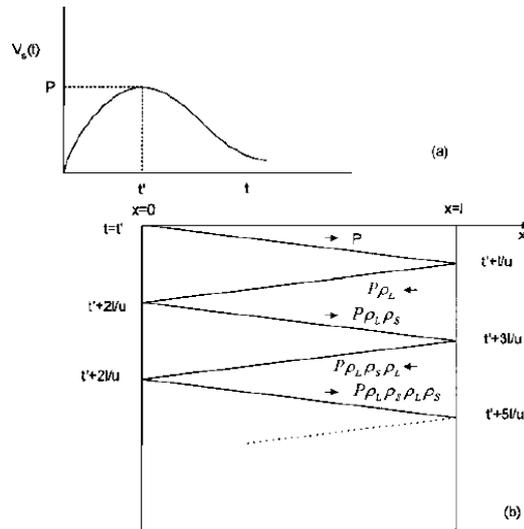


Figure 2-7 (a) Un point P à l'instant t' sur un signal d'impulsion appliquée à l'extrémité d'envoi d'une ligne de transmission ; (b) diagramme de treillis.

2.5.5. IMPEDANCE CARACTERISTIQUE

Le charge de l'impédance de surtension *The surge impedance loading (SIL)* de la ligne est définie comme étant la puissance délivrée à une charge purement résistive de valeur égale à l'impédance de surtension de la ligne :

$$SIL = V_r^2 / Z_0 \tag{2.50}$$

Pour une impédance caractéristique de 400 ohms, SIL en kW est 2,5 multipliée par le carré de la tension de l'extrémité de réception en kV. L'impédance caractéristique est un nombre réel et donc le facteur de puissance le long de la ligne égal à l'unité, à savoir, aucune compensation de puissance réactive est nécessaire. La charge SIL est aussi appelée la charge naturelle de la ligne de transmission.

2.5.6. LONGUEUR D'ONDE

Un cycle complet de tension ou de courant le long de la ligne, correspond à un changement de 2π radians dans un argument angulaire de β est définie comme la longueur d'onde λ . Si β est exprimée en rad /mile : $\lambda = 2\pi/\beta$

Pour une ligne sans pertes : $\beta = \omega\sqrt{LC}$

Donc : $\lambda = \frac{1}{f\sqrt{LC}}$ et la vitesse de propagation de l'onde est $v = f\lambda = \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx \frac{1}{\sqrt{\mu_0 k_0}}$

Où $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ est la perméabilité du vide, et $k_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ est la permittivité du vide. Donc, $\frac{1}{\sqrt{(\mu_0 k_0)}} = 3 \times 10^{10} \frac{cm}{s}$ or $186000 \frac{miles}{s} =$
vitesse de la lumière.

2.6. LIGNE D'ALIMENTATION REGLÉE

Dans le modèle de ligne de transmission longue, si la conductance shunt et la résistance série sont négligées, alors :

$$\gamma = \sqrt{YZ} = j\omega\sqrt{LC} \quad (2.51)$$

$$\cosh \gamma l = \cosh j\omega l\sqrt{LC} = \cos \omega l\sqrt{LC} \quad (2.52)$$

$$\sinh \gamma l = \sinh j\omega l\sqrt{LC} = j \sin \omega l\sqrt{LC} \quad (2.53)$$

Où l est la longueur de la ligne. Cela simplifie les constantes ABCD et en résulte la prochaine relation :

$$\begin{vmatrix} V_s \\ I_s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \omega l\sqrt{LC} & j Z_0 \sin \omega l\sqrt{LC} \\ \frac{j}{Z_0} \sin \omega l\sqrt{LC} & \cos \omega l\sqrt{LC} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_R \\ I_R \end{vmatrix} \quad (2.54)$$

$$\text{Si} \quad \omega l\sqrt{LC} = n\pi \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (2.55)$$

$$\text{Puis} \quad |V_s| = |V_r| \quad \text{et} \quad |I_s| = |I_r| \quad (2.56)$$

Ce sera une situation idéale pour l'exploitation d'une ligne de transmission. La tension et le courant d'extrémité de réception sont égales à la tension et au courant de l'extrémité d'envoi. La ligne a un profil de tension plat. $\beta = \frac{2\pi f}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$ (2.57)

Comme $1/\sqrt{LC} \approx$ vitesse de la lumière, la longueur d'onde de la ligne λ est 3100, 6200...miles ou $\beta = 0,116^\circ$ par mile. La quantité β_1 est appelée *la longueur électrique de la ligne*. La longueur calculée ci-dessus est trop longue pour profiter de cette propriété idéale et suggère que les lignes électriques peuvent être réglés avec des condensateurs en série pour annuler l'effet de l'inductance et des inductances shunt pour neutraliser l'effet de la capacité de la ligne.

2.7. L'EFFET FERRANTI

Lorsque la longueur de la ligne de transmission augmente, la tension de l'extrémité de réception dépasse celle de l'envoi, en raison de la capacité de la ligne. Ceci est appelé *l'effet Ferranti*. Dans un modèle de ligne longue à vide ($I_R = 0$), la tension de l'extrémité d'envoi est :

$$V_s = \frac{V_r}{2} e^{\alpha l} e^{j\beta l} + \frac{V_r}{2} e^{-\alpha l} e^{-j\beta l} \quad (2.58)$$

A $l = 0$, les deux ondes incidentes et réfléchies sont égales à $V_r/2$. Quand l augmente, l'onde incidente augmente de façon exponentielle, alors que l'onde réfléchie diminue. Ainsi, la tension de l'extrémité de réception augmente. Une autre explication de la montée de la tension peut être fournie en considérant que la capacité de la ligne est localisée à l'extrémité de réception. Soit la capacité Cl ; ensuite, le courant d'envoi en circuit ouvert est :

$$I_s = V_s / \left(j\omega Ll - \frac{1}{j\omega Cl} \right) \quad (2.59)$$

(C) est faible devant L . Ainsi, ωLl peut être négligé. La tension d'extrémité de réception peut alors être écrite comme suit :

$$V_r = V_s - I_s(j\omega Ll) = V_s + V_s \omega^2 Cl l^2 = V_s(1 + \omega^2 Cl l^2) \quad (2.60)$$

Cela donne une augmentation de la tension à l'extrémité de réception de :

$$|V_s| \omega^2 Cl l^2 = |V_s| \omega^2 l^2 / v^2 \quad (2.61)$$

Où v est la vitesse de propagation. Considérant que v est constante, la tension augmente avec l'augmentation de la longueur de la ligne.

En outre, à partir de l'équation. (2.54), la tension à toute distance x en termes de la tension de l'extrémité d'envoi, avec la ligne en circuit ouvert et en négligeant la résistance, est :

$$V_x = V_s \frac{\cos \beta(l-x)}{\cos \beta l} \quad (2.62)$$

Et le courant est

$$I_x = j \frac{V_s \sin \beta(l-x)}{Z_0 \cos \beta l} \quad (2.63)$$

[17]

2.8. MODELISATION DES ELEMENTS DE RESEAU

2.8.1. MODELISATION D'UN TRANSFORMATEUR A DEUX ENROULEMENTS

Un transformateur peut être modélisé par son impédance de fuite comme dans les calculs de court-circuit ; Cependant, dans les calculs d'écoulement de puissance le transformateur peut agir comme un élément de commande.

La régulation de tension est obtenue par *un commutateur à gradin* sur les enroulements, pour changer le rapport de transformation. Les gradins peuvent être ajustés en charge, fournissant une commande automatique de la tension. En charge les gradins fournissent généralement ± 10 à 20% d'ajustements de tension autour de la tension nominale du transformateur, dans 16 ou 32 étapes. Les gradins hors tension *off-load taps* fournissent $\pm 5\%$ de réglage de tension, deux gradins de $2,5\%$ en dessous de la tension nominale et deux gradins de $2,5\%$ en dessus la tension nominale. Ces gradins doivent être fixés à un niveau optimal avant la mise sous tension, car ceux-ci ne peuvent pas être ajustés en charge.

Les transformateurs peuvent fournir un contrôle de déphasage pour améliorer les limites de stabilité. L'ajustement de tension fournit indirectement un contrôle de puissance réactive. L'impédance d'un transformateur change avec la position du gradin. Pour un autotransformateur il peut y avoir un changement de 50% dans l'impédance au cours de réglage. La perte de puissance réactive dans un transformateur est importante, et le rapport X/R doit être correctement modélisé dans l'écoulement de puissance. Considérons un transformateur de rapport $1:n$. Il peut être modélisé par un transformateur idéal en série avec son impédance de fuite Z (les pertes par courant de Foucault et le circuit de magnétisation shunt sont négligées), comme le montre la Fig. 2.8 (a). Avec les notations représentées sur cette figure :

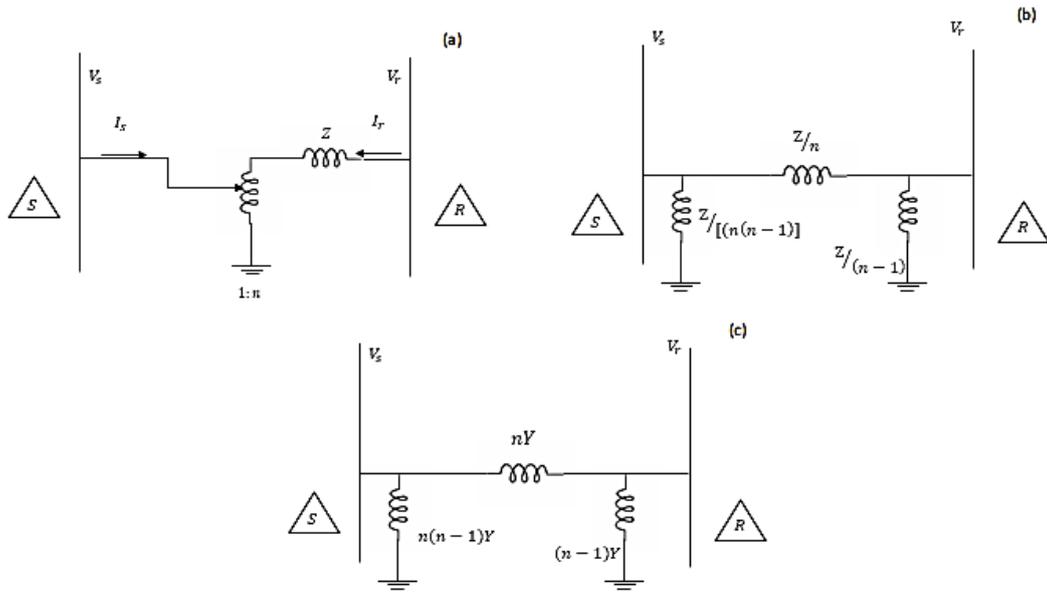


Figure 2-8. (a) circuit équivalent d'un transformateur à rapport réglable en ignorant les éléments shunts ; (b) impédance équivalente du réseau ; (c) admittance équivalente de réseau.

$$V_s = (V_r - ZI_r)/n \tag{2.64}$$

Comme la puissance dans le transformateur est invariante :

$$V_s I_s^* + (V_r - ZI_r)I_r^* = 0 \tag{2.65}$$

Substituent $I_s/(-I_r) = n$ les équations suivantes peuvent être écrites :

$$I_s = [n(n - 1)Y]V_s + nY(V_s - V_r) \tag{2.66}$$

$$I_r = nY(V_r - V_s) + [(1 - n)Y]V_r \tag{2.67}$$

Les équations (2.65) et (2.66) donnent le circuit équivalent représenté dans la figure 2-8 (b) et 2.8(c), respectivement.

Le circuit équivalent en π du transformateur Fig. 2-8(c) donne :

$$Y_{ss} = n^2 Y_{sr} \quad Y_{sr} = Y_{rs} = -n Y_{sr} \quad Y_{rr} = Y_{sr} \tag{2.68}$$

Si le rapport de transformation change par Δn :

$$Y_{ss} \rightarrow Y_{ss} + [(n + \Delta n)^2 - n^2]Y_{sr} ; Y_{sr} \rightarrow Y_{sr} - \Delta n Y_{sr} ; Y_{rr} \rightarrow Y_{rr} \tag{2.69}$$

2.8.2. GENERATEURS ET CHARGES

Les générateurs et les charges sont définis à l'aide des grandeurs fondamentales telles que les puissances actives et réactives et les deux composantes de la tension qui sont l'amplitude et la phase. Lorsque l'on décrit une charge à un sommet dit consommateur, cette dernière est représentée par la puissance complexe consommée

c'est-à-dire les valeurs P de la puissance active et les valeurs Q de la puissance réactive. Lorsque l'on décrit un sommet *générateur* leur fonctionnement est décrit par la puissance active P délivrée et l'amplitude V de la tension en ce nœud. On définit aussi la fourchette $[Q_{min}, Q_{max}]$ de sa capacité de fourniture/absorption de la puissance réactive. Une exception est cependant faite pour la machine la plus puissante connectée au réseau, que l'on appelle *nœud bilan* qui servira comme référence pour la tension en module et en phase et qui sera celle à laquelle seront affectées les pertes dans le réseau calculées a posteriori.

2.9. LES VARIABLES SYSTEMES DANS L'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

Dans l'analyse théorique, les courants sont calculés sur la base des impédances ou admittances du système et des tensions supposées. Les puissances complexes ont été calculés sur la base des tensions. En pratique, les tensions et les courants sont inconnues dans les nœuds de charge. L'équilibre de puissance nécessaire est connu. Un bus peut connecter des systèmes d'admittances, des admittances shunt, des générateurs, des charges, ou des sources de puissance réactive. La demande des consommateurs à tout instant est incontrôlable en termes de besoin en puissance active et réactive. Pour un circuit à deux nœuds, ceci est représenté par un vecteur à quatre dimensions p :

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{D1} \\ Q_{D1} \\ p_{D2} \\ Q_{D2} \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

Où p_{D1}, p_{D2}, Q_{D1} et Q_{D2} sont les puissance actives et réactives demandées par les deux jeux de barres 1 et 2. Les amplitudes et les angles de phase des tensions sont considérés *des variables d'état* et représenté par :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ |V_1| \\ \theta_2 \\ |V_2| \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Finalement, la puissance active et réactive générées par les nœud 1 et 2 sont connues par *les variables de contrôle* :

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{G1} \\ Q_{G1} \\ p_{G2} \\ Q_{G2} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

Ainsi, pour un système à deux bus, nous avons *12 variables* et pour les grands réseaux électriques, il y aura des milliers de variables et le programme de l'écoulement de puissance doit résoudre ces variables. Cette résolution sera examinée dans les calculs de l'écoulement de puissance en régime permanent. $f(x, p, u) = 0$

2.10. METHODES DE RESOLUTION DE L'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

Les solutions de l'écoulement de puissance en fonction de la matrice d'impédance nodale ont été brièvement expérimentées avec [19], mais les problèmes de stockage informatique et la vitesse sont devenus des problèmes insurmontables à l'époque. Pour surmonter ces limitations, la méthode de Newton-Raphson et ces formulations dérivées ont été développées au début des années 1970 et sont devenues fermement établies dans l'industrie des réseaux électrique [20] [21] [22] [23].

Du point de vue de modélisation mathématique, la solution de l'écoulement de puissance consiste à résoudre l'ensemble des équations algébriques non linéaires, qui décrivent le réseau électrique sous régime permanent stable. Au fil des ans, plusieurs approches ont été proposées pour la solution des équations l'écoulement de puissance. Les premières approches ont été basées sur les équations bouclées et les méthodes numériques de type Gauss. La méthode était laborieuse parce que les boucles de réseau devaient être précisées au préalable. L'amélioration de ces techniques ont vu l'introduction de l'analyse nodale en faveur de l'analyse de la boucle, ce qui conduit à une réduction considérable de la préparation des données. Néanmoins, la fiabilité de la convergence était encore la principale préoccupation. D'autres développements ont abouti à la mise en place de la méthode de Gauss-Seidel avec des facteurs d'accélération. L'appel de cette génération de méthodes d'écoulement de puissance est leurs exigences minimales de stockage et le fait qu'ils sont faciles à comprendre et à coder sous forme de programmes informatiques. L'inconvénient est que ces algorithmes présentent une mauvaise caractéristique de convergence lorsqu'elles sont appliquées à la solution des réseaux de taille réaliste [24] [25].

2.10.1. TYPE DE JEUX DE BARRES

Pour résoudre un problème de flux de puissance, le système est supposé être opérant dans des conditions d'équilibre en utilisant le modèle monophasé. Quatre quantités sont associées à chaque bus. Ce sont l'amplitude de la tension $|V|$, l'angle de phase δ , la puissance active P et la puissance réactive Q . Les jeux de barres (bus) de système sont généralement classés en trois types :

2.10.1.1. NŒUD DE REFERENCE

Ce jeu de barres est pris comme référence où l'amplitude et l'angle de phase de la tension sont spécifiés. Ce bus fait la différence entre les charges prévues et l'énergie produite qui est causée par les pertes dans le réseau.

2.10.1.2. NŒUD DE CHARGE

Dans ces jeux de barres, les puissances actives et réactives sont spécifiées. L'amplitude et l'angle de phase des tensions de bus sont inconnus. Ces bus sont appelés bus P-Q.

2.10.1.3. NŒUD DE REGULATION(GENERATION)

Ces nœuds sont des bus de génération. Ils sont également connus comme barres de tension contrôlée. Dans ces nœuds, la puissance active et l'amplitude de tension sont spécifiées. L'angle de phase de la tension et la puissance réactive sont à déterminer. Les limites de la valeur de la puissance réactive sont également spécifiées. Ces bus sont appelés bus P-V.

Tableau 2-2. Type de jeux de barres

Type de nœuds	Variables connues	Variables inconnues
PQ	Les puissances active et réactive (P,Q)	Tension amplitude et angle de phase (V, δ)
PV	Puissance active et la tension (P,V)	Angle de phase de tension et puissance réactive (δ ,Q)
Référence	Tension amplitude et angle de phase (V, δ)	Le courant, Les puissances active et réactive (P,Q)

2.10.2. METHODES DE GAUSS-SEIDEL UTILISANT LA MATRICE-Y

Le principe des itérations de Jacobi est montré dans la figure. 2-9. Le programme commence par un réglage des valeurs initiales de la tension, généralement égale à la tension au niveau du nœud de référence. Dans un réseau bien conçu, les tensions sont proches des valeurs nominales et en l'absence d'une meilleure estimation, toutes les tensions peuvent être réglés égal à 1 par unité. Depuis les contraintes des nœuds de puissance, les courants sont connus et remplacés dans les équations de la matrice Y, une meilleure estimation de tensions est obtenue. Ces nouvelles valeurs de tensions sont utilisées pour trouver de nouvelles valeurs de courants. L'itération se poursuit jusqu'à ce que la tolérance requise sur les flux de puissance soit obtenue. Ceci est schématiquement illustré à la Fig. 2-9. A partir d'une estimation initiale de X_0 , la valeur finale de X^* est obtenu par un certain nombre d'itérations. L'organigramme de base du processus d'itération est représenté sur la Fig. 2-10.

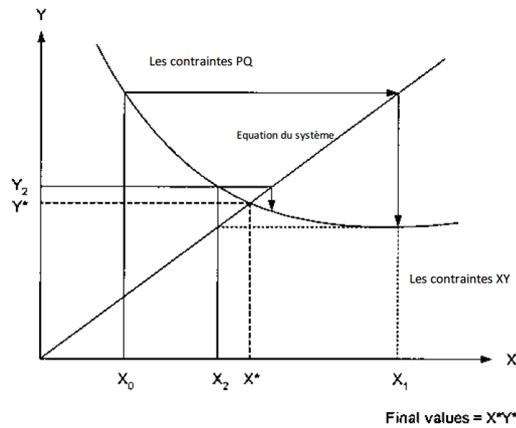


Figure 2-9. Illustration du processus itératif numérique pour la valeur finale d'une fonction

2.10.2.1. TECHNIQUE ITERATIVE DE JACOBI

Considérant n équations linéaires avec n inconnues ($x_1 \dots ; x_n$) comme données. Les coefficients a et les variables dépendantes b sont connus :

$$\begin{aligned}
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n &= b_n
 \end{aligned}
 \tag{2.73}$$

Ces équations peuvent être écrites sous :

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \frac{1}{a_{11}}(b_1 - a_{12}x_2 - a_{13}x_3 - \dots - a_{1n}x_n) \\
 x_2 &= \frac{1}{a_{22}}(b_2 - a_{21}x_1 - a_{23}x_3 - \dots - a_{2n}x_n) \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 x_n &= \frac{1}{a_{nn}}(b_n - a_{n1}x_1 - a_{n2}x_2 - \dots - a_{n,n-1}x_{n-1})
 \end{aligned}
 \tag{2.74}$$

Une valeur initiale pour chacune des variables dépendantes $x_1; x_2 \dots; x_n$ est assumée. Désignant ces valeurs par $x_1^0, x_2^0, x_3^0 \dots x_n^0$

Les valeurs initiales sont estimées par :

$$x_1^0 = \frac{y_1}{a_{11}} ; x_2^0 = \frac{y_2}{a_{22}} ; \dots \dots \dots x_n^0 = \frac{y_n}{a_{nn}}
 \tag{2.75}$$

Substituant dans l'équation (2.74) :

$$\begin{aligned}
 x_1^1 &= \frac{1}{a_{11}}(b_1 - a_{12}x_2^0 - a_{13}x_3^0 - \dots - a_{1n}x_n^0) \\
 x_2^1 &= \frac{1}{a_{22}}(b_2 - a_{21}x_1^0 - a_{23}x_3^0 - \dots - a_{2n}x_n^0) \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 x_n^1 &= \frac{1}{a_{nn}}(b_n - a_{n1}x_1^0 - a_{n2}x_2^0 - \dots - a_{n,n-1}x_{n-1}^0)
 \end{aligned}
 \tag{2.76}$$

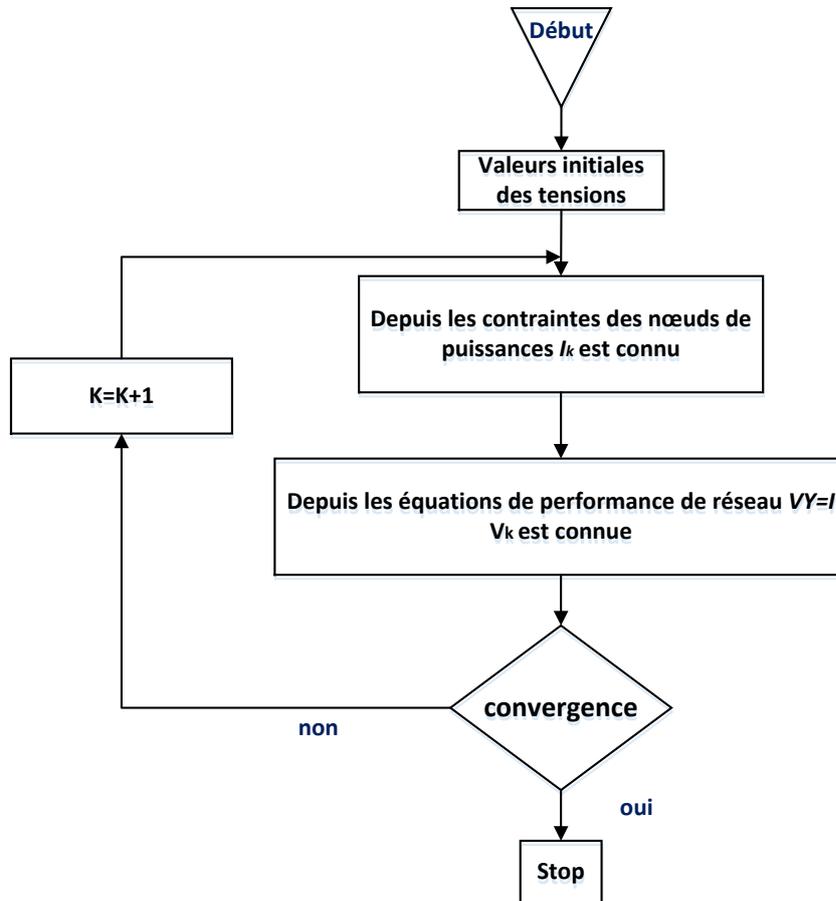


Figure 2-10. Organigramme du processus itératif de base des itérations de type Jacobi

Ces nouvelles valeurs de $x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1$ sont substituées dans la prochaine itération. En générale dans la $k^{ième}$ itération :

$$\begin{aligned} x_1^k &= \frac{1}{a_{11}}(b_1 - a_{12}x_2^{k-1} - a_{13}x_3^{k-1} - \dots - a_{1n}x_n^{k-1}) \\ x_2^k &= \frac{1}{a_{22}}(b_2 - a_{21}x_1^{k-1} - a_{23}x_3^{k-1} - \dots - a_{2n}x_n^{k-1}) \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ x_n^k &= \frac{1}{a_{nn}}(b_n - a_{n1}x_1^{k-1} - a_{n2}x_2^{k-1} - \dots - a_{n,n-1}x_{n-1}^{k-1}) \end{aligned} \quad (2.77)$$

2.10.2.2. ITERATION DE GAUSS–SEIDEL

Au lieu de remplacer les $k - 1$ approximations dans toutes les équations dans la $k^{ième}$ itération, les $k^{ième}$ itérations sont immédiatement utilisées. Cela devrait réduire le nombre d'itérations.

$$\begin{aligned} x_1^k &= \frac{1}{a_{11}}(b_1 - a_{12}x_2^k - a_{13}x_3^k - \dots - a_{1n}x_n^k) \\ x_2^k &= \frac{1}{a_{22}}(b_2 - a_{21}x_1^k - a_{23}x_3^k - \dots - a_{2n}x_n^k) \\ x_3^k &= \frac{1}{a_{33}}(b_3 - a_{31}x_1^k - a_{32}x_2^k - \dots - a_{3n}x_n^k) \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ x_n^k &= \frac{1}{a_{nn}}(b_n - a_{n1}x_1^k - a_{n2}x_2^k - \dots - a_{n,n-1}x_{n-1}^k) \end{aligned} \quad (2.78)$$

2.10.2.3. LA CONVERGENCE

La convergence peut être définie comme : $\varepsilon^k = |V_s^{k-1} - V_s^k| < \varepsilon$ (2.79)

La procédure de calcul est répétée jusqu'à ce que la tolérance spécifiée soit atteinte. La valeur de ε est arbitraire. Pour Gauss-Seidel $\varepsilon = 0.00001$ au 0.0001 est commun. C'est le plus grand changement de tension permis sur n'importe quel bus entre deux itérations successives avant que la solution finale soit atteinte. Environ 50 à 150 itérations sont communes, en fonction du nombre de bus et des impédances du système.

2.10.2.4. METHODE DE GAUSS–SEIDEL DE LA MATRICE Y

Dans les calculs de l'écoulement de puissance les équations du système peuvent être écrites en termes de courant, de tension ou de puissance au niveau du nœud k. L'équation de la matrice en termes de tensions inconnus, en utilisant la matrice d'admittance nodale pour le $n^{ième}$ nœud est :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{01} \\ V_{02} \\ \dots \\ V_{0n} \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

Où 0 est le nœud commun. Les courants entrant les nœuds depuis les générateurs et les charges sont inconnus, cela peut être écrit en termes de P,Q et V :

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \quad (2.81)$$

La convention de courant et de l'écoulement de puissance est importante. Les courants entrant les nœuds sont considérés positifs, donc la puissance dans le nœud est également positive. La charge est alimentée par le nœud donc la puissance active et réactive sont entrées comme : $-P - j(-Q) = -P + jQ$. Le courant est alors $(-P + jQ)/V^*$. L'équation nodale du courant au k^{ième} nœud devient :

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} = Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + Y_{k3}V_3 + \dots + Y_{kk}V_k + \dots + Y_{kn}V_n \quad (2.82)$$

cette équation peut être écrite sous :

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left[\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - Y_{k1}V_1 - Y_{k2}V_2 - Y_{k3}V_3 - \dots - Y_{kn}V_n \right] \quad (2.83)$$

en général, pour le nœud k:

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left[\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{i=1}^n Y_{ki}V_i \right] \quad \text{pour } i \neq k \quad (2.84)$$

La tension du k^{ième} nœud dans l'itération r+1 peut être écrite sous :

$$V_k^{k+1} = \frac{1}{Y_{kk}} \left[\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{i=1}^{k-1} Y_{ki}V_i^{k+1} - \sum_{i=k+1}^n Y_{ki}V_i^k \right] \quad (2.85)$$

1. La tension au nœud k a été écrite en termes d'elle-même et d'autres tensions. La première équation contenant le bus de référence qui est omis, puisque la tension au niveau de ce bus est déjà spécifiée en amplitude et en angle de phase.

La procédure de Gauss-Seidel pour les jeux de barres de charge PQ peut être résumée dans les étapes suivantes :

Les premières valeurs de phaseur de tension de charge sont assumées, la tension de swing bus est connue, et la tension de bus de contrôle au bus de génération peut être spécifiée.

Bien qu'une estimation initiale des angles des tensions accélère la solution finale, elle n'est pas nécessaire et les itérations peuvent être commencées par zéro degré ou par le même angle de phase du swing bus. Un début de tension doux assume une tension de $1 + j0$ à tous les bus, à l'exception de la tension du swing bus qui est fixe.

2. Sur la base des tensions initiales, la tension à un bus dans la première itération est calculée en utilisant l'équation. (2,84), c'est à dire, au bus 2 :

$$V_{2_1} = \frac{1}{Y_{22}} \left[\frac{P_2 - jQ_2}{V_{2_0}^*} - Y_{21}V_{1_0} - \dots - Y_{2n}V_{n_0} \right] \quad (2.86)$$

3. L'estimation de tension au bus 2 est affinée par trouver de nouvelles valeurs de V_2 à plusieurs reprises en substituant la valeur de V_2 dans le côté droit de l'équation.
4. La tension au bus 3 est calculée en utilisant la dernière valeur de V_2 trouvée dans l'étape 3 et de même pour d'autres bus du système.

Ceci termine une itération. Le processus d'itération est répété pour l'ensemble du réseau jusqu'à ce que la convergence spécifiée soit obtenue.

Un bus de génération est traité différemment ; la tension à contrôler sur le bus est spécifiée et le régulateur de tension du générateur varie la puissance réactive dans ses limites de capacité pour réguler la tension de bus :

$$Q_k = -I_m [V_k^* \{ \sum_{i=1}^{i=n} Y_{ki} V_i \}] \quad (2.87)$$

Où I_m désigne la partie imaginaire de l'équation. La valeur révisée de Q_k est obtenue en substituant la valeur la plus à jour de la tension.

$$Q_k^{k+1} = -I_m [V_k^{k*} \sum_{i=1}^{k-1} Y_{ki} V_i^{k+1} + V_k^{k*} \sum_k^n Y_{ki} V_i^k] \quad (2.88)$$

L'angle δ_k est l'angle de la tension dans Eq. (11.30):

$$\begin{aligned} \delta_k^{k+1} &= \angle of V_k^{k+1} \\ &= \angle of \left[\frac{P_k - jQ_k^{k+1}}{Y_{kk}(V_k^k)^*} - \sum_{i=1}^{k-1} \frac{Y_{ki}}{Y_{kk}} V_i^{k+1} - \sum_{i=k+1}^n \frac{Y_{ki}}{Y_{kk}} V_i^k \right] \end{aligned} \quad (2.89)$$

Pour un bus PV, les limites supérieures et inférieures de la génération de l'énergie réactive pour tenir la tension du bus constante sont aussi données :

$$Q_{k(\min)} < Q_k^{k+1} < Q_{k(\max)} \quad (2.90)$$

Si l'énergie réactive se situe dans les limites spécifiées la nouvelle valeur de la tension V_k^{k+1} est calculée en utilisant l'amplitude et δ_k^k spécifiés de la tension. Cette nouvelle valeur de la tension V_k^{k+1} est mise égale à la valeur spécifiée pour calculer la nouvelle valeur de l'angle δ_k^{k+1} . Si la puissance réactive calculée est à l'extérieur de la limite spécifié, alors, cela signifie que cette puissance réactive sera la nouvelle valeur de la limite. Le nœud PV est traité comme un nœud PQ. Un diagramme est représenté sur la Fig. 2-11.

si $Q_k^{k+1} > Q_{k(max)}$ alors $Q_k^{k+1} = Q_{k(max)}$ (2.91)

si $Q_k^{k+1} < Q_{k(min)}$ alors $Q_k^{k+1} = Q_{k(min)}$ (2.92)

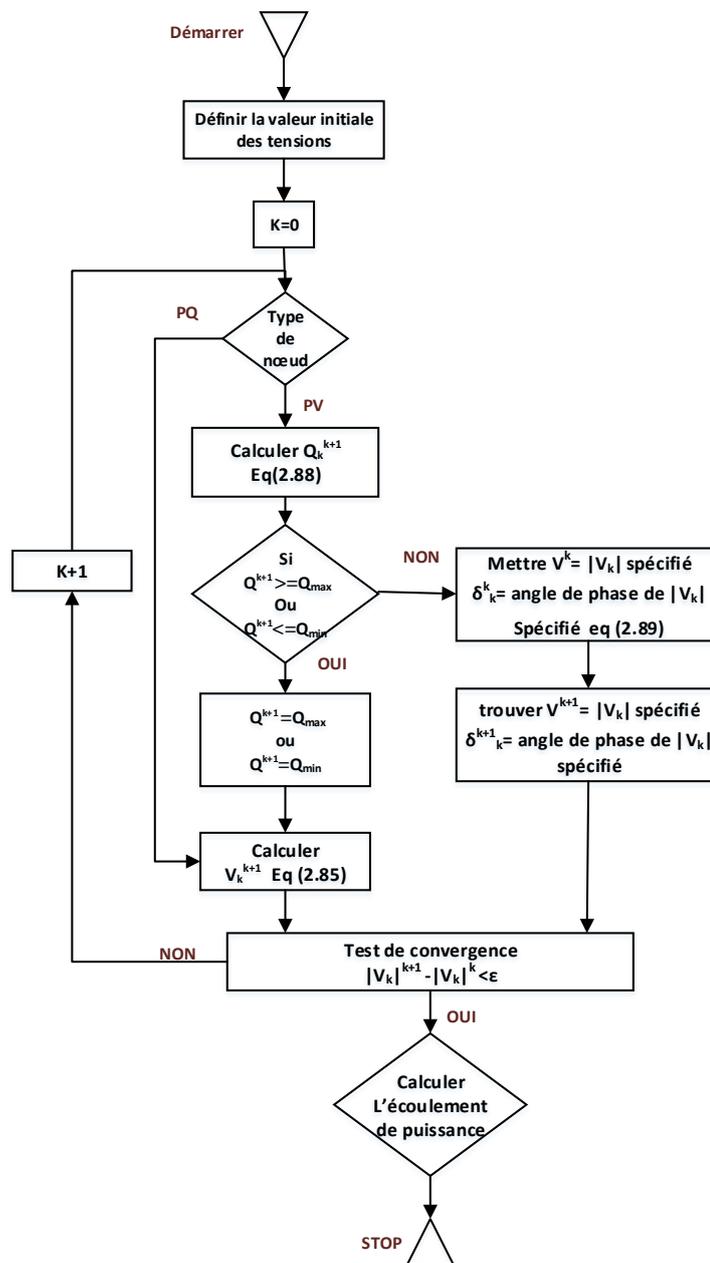


Figure 2-11. Organigramme de la méthode de Gauss- Seidel de l'écoulement de puissance

En général, la convergence est mieux assurée quand les éléments diagonaux de la matrice Y sont plus grands que les éléments non diagonaux. Ce n'est pas toujours le cas. Dans les systèmes qui ont une grande variation des impédances, des oscillations peuvent se produire sans convergence.

2.10.3. METHODE DE GAUSS–SEIDEL UTILISANT LA MATRICE Z

Nous savons comment une matrice d'impédance de bus peut être formée. Nous utiliserons cette matrice pour le calcul de l'écoulement de puissance. La tension du nœud de référence est définie et ne doit pas être incluse dans les équations matricielles. Les tensions restantes sont

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{22} & Z_{23} & Z_{2n} \\ Z_{32} & Z_{33} & Z_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n2} & Z_{n3} & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.93)$$

$$\text{Donc, on peut écrire : } V_k = Z_{k2}I_2 + Z_{k3}I_3 + \dots + Z_{kn}I_n \quad (2.94)$$

$$\text{Le courant de la branche } k \text{ peut être écrit sous : } I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - y_k V_k \quad (2.95)$$

Où y_k est l'admittance de bus k à un bus de référence commun. Si la branche k est un générateur qui fournit de la puissance active et réactive sur le bus, P et Q sont entrées en tant que des valeurs positives. Si la branche k est alimentée par le réseau, alors P et Q sont entrées en tant que valeurs négatives.

La procédure générale est très semblable à la méthode de l'admittance Y :

$$\begin{aligned} V_k &= Z_{k1}I_1 + \dots + Z_{kn}I_n \\ &= Z_{k1} \left[\frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} - y_1 V_1 \right] + \dots + Z_{kn} \left[\frac{P_n - jQ_n}{V_n^*} - y_n V_n \right] \end{aligned} \quad (2.96)$$

$$V_k = \sum_{i=1}^{i=n} Z_{ki} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - y_i V_i \right] \quad (2.97)$$

Le processus d'itération est :

$$\text{Assumer la tension initiale pour les } n \text{ bus : } V_1^0, V_2^0, \dots, V_n^0 \quad (2.98)$$

1. Calculer V_1 depuis l'équation (2.97) en termes des tensions initiales assumées et substituer dans la même équation pour une nouvelle valeur corrigée :

$$V_1^1 = \sum_{i=1}^n Z_{ki} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{0*}} - y_i V_i^0 \right] \quad (2.99)$$

2. Répétez l'opération pour bus 2, faisant usage de valeurs corrigées de V_1 trouvées à l'étape 2. Itérer pour trouver une valeur corrigée de V_2 avant de passer au prochain bus.
3. Lorsque toutes les tensions des jeux de barres ont été évalués tout recommencer pour la convergence requise.

Lors d'un bus de génération la puissance réactive n'est pas connue et une estimation est nécessaire. Ceci peut être fait à partir de : $Q_k = -I_m \frac{V_k^*}{Z_{kk}} \left[V_k - \sum_{i=1, i \neq k}^{i=n} Z_{ki} \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \right]$ (2.100)

La matrice impédance Z présente des caractéristiques de forte convergence, au détriment de la mémoire à cause de son besoin considérable de calculs préliminaires. Les modifications dues à l'évolution du système sont aussi relativement difficile.

2.10.3.1. CONVERSION DE LA MATRICE Y A LA MATRICE Z

Nous allons examiner une méthode par laquelle une matrice d'impédance nodale peut être construite à partir d'une matrice d'admittance par une opération de pivotement étape par étape d'où :

$$\text{nouvelle } Y_{kk} = \frac{1}{Y_{kk}} \quad (Y_{kk} = \text{pivot}) \quad (2.101)$$

$$\text{nouvelle } Y_{kj} = \frac{Y_{kj}}{Y_{kk}} \quad j = 1, \dots, n \quad (j \neq k) \quad (2.102)$$

$$\text{nouvelle } Y_{ik} = -\frac{Y_{ik}}{Y_{kk}} \quad i = 1, \dots, n \quad (j \neq k) \quad (2.103)$$

$$\text{nouvelle } Y_{ij} = Y_{ij} - \left[\frac{Y_{ik} Y_{kj}}{Y_{kk}} \right] \quad i = 1, \dots, n \quad (i \neq k, j \neq k) \quad (2.104)$$

Le choix d'un pivot est arbitraire. Les nouveaux éléments non nuls peuvent être évités par un bon choix. Un exemple d'illustration est donné à l'annexe 1 (A1.3) [17] [18]

2.10.4. LA MÉTHODE DE NEWTON-RAPHSON

La méthode de Newton Raphson (NR) est la méthode la plus utilisée pour résoudre les équations algébriques non linéaires, la méthode de Newton est une procédure d'approximations successives basée sur une estimation initiale de l'inconnue et de l'utilisation des séries de Taylor. Considérons la solution d'une équation unidimensionnel donnée par :

$$f(x) = c \quad (2.105)$$

Si $x^{(0)}$ est l'estimation initiale de la solution et $\Delta x^{(0)}$ est une petite déviation de la solution exacte, on doit trouver : $f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = c$ (2.106)

Faisons une expansion du côté gauche de l'équation précédente en série de Taylor :

$$f(x^{(0)}) + \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)} + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2f}{dx^2}\right)^{(0)} (\Delta x^{(0)})^2 + \dots = c \quad (2.107)$$

Assumons que l'erreur $\Delta x^{(0)}$ est très petite, les termes d'ordre supérieur peuvent être négligés, cela résulte : $\Delta c^{(0)} \simeq \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)}$ où $\Delta c^{(0)} = c - f(x^{(0)})$ (2.108)

La seconde approximation est donnée en ajoutons $\Delta x^{(0)}$ à l'estimation initiale :

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \frac{\Delta c^{(0)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)}} \quad (2.109)$$

L'utilisation successive de cette procédure donne l'algorithme de Newton-Raphson :

$$\Delta c^{(k)} = c - f(x^{(k)}) \quad (2.110)$$

$$\Delta x^{(k)} = \frac{\Delta c^{(k)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)}} \quad (2.111)$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad (2.112)$$

Eq.(2.111) peut être arrangé par :

$$\Delta c^{(k)} = j^k \Delta x^{(k)} \quad (2.113)$$

$$\text{Où} \quad j^k = \left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)} \quad (2.114)$$

La relation (2.113) montre que l'équation non linéaire $f(x) = 0$ est approximée par la ligne tangente à la courbe au point $x^{(k)}$. Par conséquent, une équation linéaire est obtenue en fonction des petites variations de la variable. L'intersection de la tangente avec l'axe des x résulte en $x^{(k+1)}$. Cette idée est démontrée graphiquement dans l'exemple suivant.

On va utiliser la méthode de N-R pour trouver la racine de l'équation suivante :

$$f(x) = x^3 - 6x^2 + 9x - 4 = 0$$

Assumons une estimation initiale $x^{(0)} = 6$.

La commande *Matlab plot* est utilisée pour tracer $f(x) = x^3 - 6x^2 + 9x - 4 = 0$ sur une plage de 0 à 6 (Figure 2-12).

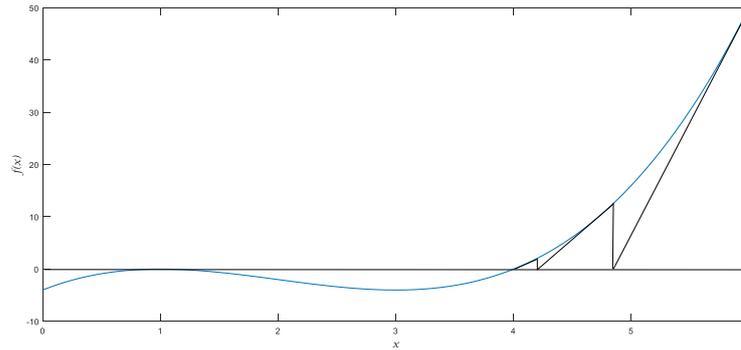


Figure 2-12. Illustration graphique de la méthode de Newton-Raphson

L'intersection de $f(x)$ avec l'axe des x donne les racines de $f(x)$. De la figure 2-12 deux des racines sont repérées $x = 1$ et $x = 4$, la racine $x = 1$ est répétée.

Encore, la figure 2-12 donne une description graphique de la méthode N-R, en commençant par une estimation initiale $x^{(0)} = 6$, on extrapole le long de la tangente à son intersection avec l'axe des x en prenant cela comme prochaine approximation. Cela continue jusqu'à ce que les valeurs successives de x soient suffisamment proches.

La solution analytique donnée par l'algorithme de N-R est :

$$\frac{df(x)}{dx} = 3x^2 - 12x + 9$$

$$\Delta c^{(0)} = c - f(x^{(0)}) = 0 - [(6)^3 - 6(6)^2 + 9(6) - 4] = -50$$

$$\left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} = 3(6)^2 - 12(6) + 9 = 45$$

$$\Delta x^{(0)} = \frac{\Delta c^{(0)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)}} = \frac{-50}{45} = -1,1111$$

Par conséquent, le résultat à la fin de la première itération est :

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x^{(0)} = 6 - 1,1111 = 4,8889$$

L'itération suivante :

$$x^{(2)} = x^{(1)} + \Delta x^{(1)} = 4,8889 - \frac{13,4431}{22,037} = 4,2789$$

$$x^{(3)} = x^{(2)} + \Delta x^{(2)} = 4,2789 - \frac{2,9981}{12,5797} = 4,0405$$

$$x^{(4)} = x^{(3)} + \Delta x^{(3)} = 4,0405 - \frac{0,3748}{9,4914} = 4,0011$$

$$x^{(5)} = x^{(4)} + \Delta x^{(4)} = 4,0011 - \frac{0,0095}{9,0126} = 4,0000$$

La méthode peut converger vers une racine différente de celle attendue ou diverger si la valeur initiale n'est pas *assez proche* de la racine.

On considère un système de n équations à n variables :

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1 \ ; \ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_2 \ ; \ \dots \ ; \ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_n \quad (2.115)$$

L'expansion du côté gauche de l'équation dans la série de Taylor sur les estimations initiales et en négligeant tous les termes d'ordre supérieur, conduit à l'expression :

$$(f_1)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_1 \quad (2.116)$$

$$(f_2)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_2 \quad (2.117)$$

.....

$$(f_n)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_n \quad (2.118)$$

Où sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^{(0)} \\ c_2 - (f_2)^{(0)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.119)$$

Dans sa forme courte, elle peut être écrite comme :

$$\Delta C^{(k)} = J^{(k)} \Delta X^{(k)} \quad (2.120)$$

$$\text{ou } \Delta X^{(k)} = [J^{(k)}]^{-1} \Delta C^{(k)} \quad (2.121)$$

Et l'algorithme de N-R pour le cas de n dimensions devient :

$$\Delta X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k)} \quad (2.122)$$

Où :

$$\Delta X^{(k)} = \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(k)} \\ \Delta x_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \Delta C^{(k)} = \begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^{(k)} \\ c_2 - (f_2)^{(k)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.123)$$

$$J^{(k)} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.124)$$

$J^{(k)}$ est la matrice Jacobéenne, les éléments de cette matrice sont les dérivées partielles évaluées dans $X^{(k)}$. On assume que $J^{(k)}$ a une matrice inverse durant chaque itération. La méthode de Newton, appliquée à un ensemble d'équations non linéaires, réduit le problème à résoudre un ensemble d'équations linéaires afin de déterminer les valeurs qui améliorent la précision des estimations. La solution de l'équation (2.121) par inversion est inefficace. Il n'est pas nécessaire d'obtenir l'inverse de $J^{(k)}$. Toutefois, une solution directe est obtenue par factorisation triangulaire optimale ordonnée.

Dans Matlab, la solution des équations linéaires simultanées $\Delta C = J\Delta X$ est obtenue en utilisant l'opérateur de division des matrices \backslash (i.e., $\Delta X = J\backslash\Delta C$) qui est basé sur la factorisation triangulaire et l'élimination Gaussienne. La méthode de Newton a l'avantage de converger quadratiquement lorsqu'on est près d'une racine. Néanmoins, plus d'évaluation fonctionnel sont nécessaires pendant chaque itération. Une limitation très importante est qu'elle ne converge pas, généralement, vers une solution depuis un point initial arbitraire. [18]

2.10.5. SOLUTION DE L'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE UTILISANT LA METHODE DE NEWTON RAPHSON

En raison de sa convergence quadratique, la méthode de Newton est mathématiquement supérieure à celle de Gauss-Seidel et elle est moins sujette à la divergence avec les problèmes mal conditionnés. Pour un large réseau électrique, la

méthode N-R est plus efficace et pratique. Le nombre d'itérations nécessaires pour obtenir une solution est *indépendant* de la taille du système, cependant, plus d'évaluation fonctionnelle est nécessaire à chaque itération. La puissance active et l'amplitude de la tension sont spécifiées pour les jeux de barres commandés en tension (PV), l'équation de l'écoulement de puissance est formulée sous forme polaire. Pour le bus typique du réseau électrique représenté sur la figure 2-13.

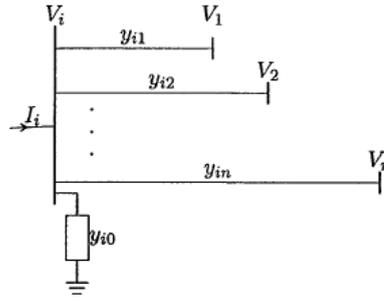


Figure 2-13. Nœud typique d'un réseau électrique

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.125)$$

Dans l'équation précédente, j inclue le bus i . Exprimons cette équation dans la forme polaire, on aura : $I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j$ (2.126)

$$\text{La puissance complexe au bus } i \text{ est : } P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.127)$$

Séparons la partie réelle et imaginaire :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.128)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.129)$$

Les équations (2.128) et (2.129) constituent un ensemble d'équations algébriques non linéaires en termes des variables indépendantes, l'amplitude de la tension en per unit, et l'angle de phase en radian. On a deux équations pour chaque nœud de charge (2.128) et (2.129) et une équation pour chaque nœud de régulation. Développons (2.128) et (2.129) en série de Taylor avec l'estimation initiale et négligeons tous les termes d'ordre supérieurs d'où résulte l'ensemble d'équations linéaires :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2.130)$$

Dans l'équation précédente, le nœud 1 est le nœud de référence. La matrice Jacobéenne donne la relation linéarisée entre les petites variations de l'angle et de l'amplitude de la tension $\Delta \delta_i^{(k)}$ et $\Delta |V_i^{(k)}|$ et les petits changements de la puissance active et réactive $\Delta P_i^{(k)}$ et $\Delta Q_i^{(k)}$. Les éléments de la matrice Jacobéenne sont les dérivées partielles de (2.128) et (2.129), évaluées à $\Delta \delta_i^{(k)}$ et $\Delta |V_i^{(k)}|$. Dans une forme réduite :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.131)$$

Pour les nœuds de contrôle (PV), les amplitudes de tension sont connues, par conséquent, si m nœuds du système sont des nœuds de contrôle, m équations contenant ΔQ et ΔV et les colonnes correspondantes de la matrice jacobéenne sont éliminées. Par conséquent, il y a $n - 1$ contraintes de puissance active et $n - 1 - m$ contraintes de puissance réactive et la matrice Jacobéenne est de l'ordre $(2n - 2 - m) \times (2n - 2 - m)$. J_1 est de l'ordre de $(n - 1) \times (n - 1)$, J_2 est de l'ordre de $(n - 1) \times (n - 1 - m)$, J_3 est de l'ordre de $(n - 1 - m) \times (n - 1)$ et J_4 est de l'ordre de $(n - 1 - m) \times (n - 1 - m)$.

Les éléments diagonaux et non diagonaux de J_1 sont :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.132)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.133)$$

Les éléments diagonaux et non diagonaux de J_2 sont :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.134)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.135)$$

Les éléments diagonaux et non diagonaux de J_3 sont :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.136)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.137)$$

Les éléments diagonaux et non diagonaux de J_4 sont :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.138)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.139)$$

Les termes $\Delta P_i^{(k)}$ et $\Delta Q_i^{(k)}$ sont la différence entre les valeurs planifiées et celles calculées, connues par résidus de puissance et données par :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{plan} - P_i^{(k)} \quad (2.140)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{plan} - Q_i^{(k)} \quad (2.141)$$

Les nouvelles estimations des tensions nodales sont :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.142)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.143)$$

La procédure de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson est comme suit :

1. Pour les nœuds de charge, où P_i^{plan} et Q_i^{plan} sont spécifiées, les amplitudes et les angles de phase de la tension sont mis égaux à ceux du nœud de référence $|V_i^{(0)}| = 1,0$ et $\delta_i^{(0)} = 0,0$. Pour les nœuds de régulation, où P_i^{plan} et $|V_i|$ sont spécifiées, les angles de phase sont mis égaux à l'angle du nœud de référence, $\delta_i^{(0)} = 0,0$.
2. Pour les nœuds de charge, P_i^k et Q_i^k sont calculées par les équations (2.128) et (2.129) ; $\Delta P_i^{(k)}$ et $\Delta Q_i^{(k)}$ sont calculées par (2.140) et (2.141).
3. Pour les nœuds de régulation, P_i^k et $\Delta P_i^{(k)}$ sont calculées par (2.128) et (2.140) respectivement.

4. Les éléments de la matrice Jacobéenne (J_1 , J_2 , J_3 et J_4) sont calculés par (2.132) -- (2.139).
5. L'équation linéaire simultanée (2.131) est résolue directement par une factorisation triangulaire ordonnée optimale et l'élimination de Gauss.
6. Les nouvelles valeurs d'amplitude et d'angle de phase de tension sont calculées par (2.142) et (2.143).

Le processus continue jusqu'à ce que les résidus $\Delta P_i^{(k)}$ et $\Delta Q_i^{(k)}$ soient inférieurs à une valeur spécifiée :

$$\left| \Delta P_i^{(k)} \right| \leq \varepsilon ; \quad \left| \Delta Q_i^{(k)} \right| \leq \varepsilon \quad (2.144)$$

2.10.6. MÉTHODE D'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE DÉCOUPLÉ RAPIDE

Les lignes de transmission ont un très grand rapport $\frac{X}{R}$. Pour ce système, la variation de la puissance active ΔP est moins sensible au changement de l'amplitude de tension et n'est plus sensible à la variation dans l'angle de phase $\Delta\delta$. Similairement, la puissance réactive est moins sensible au changement de l'angle de phase $\Delta\delta$ et dépend généralement du changement de l'amplitude de tension. Par conséquent, il est favorable de mettre les éléments J_1 et J_3 à zéro. Donc (2.131) devient :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (2.145)$$

$$\Delta P = J_1 \Delta\delta = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \Delta\delta \quad (2.146)$$

$$\Delta Q = J_4 \Delta|V| = \left[\frac{\partial Q}{\partial |V|} \right] \Delta|V| \quad (2.147)$$

Les équations (2.146) et (2.147) montrent que la matrice est séparée en deux équations découplées qui demande largement moins de temps pour la solution comparant par (2.131). En outre, une autre simplification considérable peut être faite pour éliminer la nécessité de recalculer J_1 et J_4 à chaque itération. Les éléments diagonaux de J_1 décrits par l'équation (2.132) peuvent être écrits :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) - |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} \quad (2.148)$$

Remplaçons le premier terme de l'équation (2.148) par $-Q_i$, selon l'équation (2.129) :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} = -Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \quad (2.149)$$

Où $B_{ii} = |Y_{ii}| \sin \theta_{ii}$ est la partie imaginaire des éléments diagonaux de la matrice d'admittance nodale. B_{ii} est la somme des susceptances de tous les éléments incidents au nœud i . dans un système électrique typique, l'auto susceptance $B_{ii} \gg Q_i$, et on peut négliger Q_i . Une autre simplification est obtenue en assumant $|V_i|^2 = |V_i|$, ce qui donne :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| B_{ii} \quad (2.150)$$

Sous conditions normales d'opération, $\delta_j - \delta_i$ est très petit. Donc, dans (2.133) assumons $\theta_{ii} - \delta_i + \delta_j \approx \theta_{ii}$, les éléments non-diagonaux de J_1 deviennent :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| B_{ij} \quad (2.151)$$

Une autre simplification est obtenue en assumant $|V_j| \approx 1$:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| B_{ij} \quad (2.152)$$

Similairement, les éléments diagonaux de J_4 décrits par (2.138) peuvent être écrits sous :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.153)$$

Remplaçons le second terme de l'équation (2.153) par $-Q_i$ (2.129), on aura :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + Q_i \quad (2.154)$$

Encore, comme $B_{ii} = Y_{ii} \sin \theta_{ii} \gg Q_i$, Q_i peut être négligée et (2.138) se réduit à :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| B_{ii} \quad (2.155)$$

De façon pareille dans (2.139), assumons $\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j \approx \theta_{ij}$:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| B_{ij} \quad (2.156)$$

Avec ces hypothèses, les équations (2.146) et (2.147) prennent la forme suivante :

$$\frac{\Delta P}{|V_i|} = -\mathbf{B}' \Delta \delta \quad (2.157)$$

$$\frac{\Delta Q}{|V_i|} = -\mathbf{B}'' \Delta |V| \quad (2.158)$$

B' et B'' sont la partie imaginaire de matrice d'admittance nodale Y_{bus} , tandis que les éléments de la matrice sont constants, ils ont besoin d'être triangulariser et inverser

seulement au début de l'itération. B' est de l'ordre de $(n - 1)$. Pour les nœuds de régulation où $|V_i|$ et P_i sont spécifiées contrairement à Q_i ; les lignes et colonnes correspondantes de Y_{bus} sont éliminées. Ainsi, B'' est de l'ordre de $(n - 1 - m)$, où m est le nombre des nœuds de régulation. Donc, dans l'algorithme de l'écoulement de puissance découplé rapide, les changements successifs de l'amplitude et de l'angle de tension sont :

$$\Delta\delta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P}{|V|} \tag{2.159}$$

$$\Delta|V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q}{|V|} \tag{2.160}$$

La solution de l'écoulement de puissance découplé rapide nécessite plus d'itération que la méthode de Newton Raphson, mais elle demande moins de temps par itération, et la solution de l'écoulement de puissance est obtenue rapidement. Cette technique est très utile dans l'analyse de contingence où plusieurs interruptions sont à simuler ou dans le cas d'un écoulement de puissance en ligne. [18]

2.10.7. MODELE D'UN TRANSFORMATEUR DEPHASEUR

Le contrôle de la puissance active peut être affectée en agitant sur l'angle de déphasage de la tension. Un transformateur de déphasage change l'angle phase sans changement notable de l'amplitude de tension ; ceci est obtenu par l'injection d'une tension perpendiculaire à la tension ligne - neutre correspondante, Fig.2.14 (a).

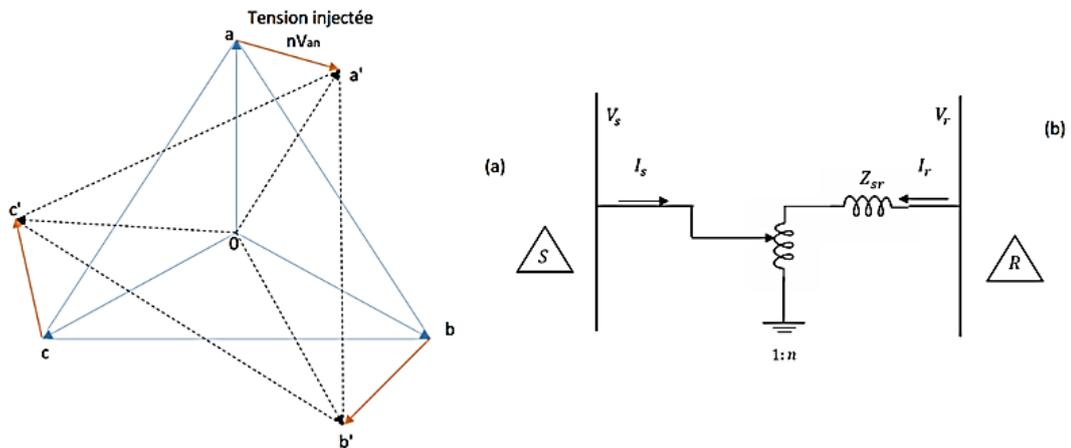


Figure 2-14. (a) diagramme de l'injection de la tension d'un transformateur déphaseur, (b) schéma d'un transformateur déphaseur

La matrice Y_{bus} pour l'écoulement de puissance est modifiée. Considérons le circuit équivalent représentée sur la Fig. 2-14 (b). Le transformateur de régulation est représenté

par un transformateur idéal avec une impédance ou admittance série. Etant donné qu'il est un transformateur idéal, la puissance apparente d'entrée est égale à la puissance apparente de sortie, et pour un transformateur changeur de prises pour réglage de tension, nous avons déjà montré que :

$$I_s = n^2 y V_s - n y V_r \quad (2.161)$$

où n est le rapport des prises de réglage de la tension (ou courant). Aussi,

$$I_r = y(V_r - nV_s) \quad (2.162)$$

Ces équations ne peuvent pas être représentées par un réseau bilatéral. La représentation de la matrice Y est

$$\begin{vmatrix} I_s \\ I_r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n^2 y & -n y \\ -n y & y \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_s \\ V_r \end{vmatrix} \quad (2.163)$$

Si le transformateur possède un dispositif de déphasage, n peut être remplacé par $n = N e^{j\phi}$

$$\begin{vmatrix} I_s \\ I_r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} N^2 y & -N^* y \\ -N y & y \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_s \\ V_r \end{vmatrix} \quad (2.164)$$

Où N^* est le conjugué de N . En fait, on peut écrire :

$N = n \varepsilon^{j0}$ Pour les transformateurs sans déphasage et $N = n \varepsilon^{j\phi}$ pour les transformateurs avec déphasage. Le déphasage provoque une redistribution de la puissance dans l'écoulement de puissance, et les angles des nœuds résolus refléteront cette redistribution. Une nouvelle équation doit être ajoutée dans l'écoulement de puissance pour calculer le nouvel angle de déphasage sur la base des dernières amplitudes et angles nodales. L'écoulement spécifiée de la puissance active est :

$$P_{(spec)} = V_s V_r \sin(\theta_s - \theta_r - \theta_\alpha) b_{sr} \quad (2.165)$$

Où θ_α est l'angle de déphasage. Comme les angles sont petits :

$$\sin(\theta_s - \theta_r - \theta_\alpha) \approx \theta_s - \theta_r - \theta_\alpha \quad (2.166)$$

Donc

$$\theta_\alpha = \theta_s - \theta_r - \frac{P_{(spec)}}{V_s V_r b_{sr}} \quad (2.167)$$

2.11. ECOULEMENT ET CONTROLE DE LA PUISSANCE REACTIVE

Dans ce chapitre on a montré qu'il y a une forte relation entre la tension et l'écoulement de l'énergie réactive, toutefois, l'écoulement de l'énergie active peut encore augmenter le problème de réglage de la tension. Le voltage dans un système de

distribution et pour les consommateurs doit être maintenu dans une plage bien définie ⁷. L'impact d'une forte charge brusque (démarrage d'un puissant moteur) ou d'une forte demande sous conditions d'opération de contingence, ou lorsqu'une ou plusieurs lignes mises hors tension, provoquent des *chutes de tension* rapides ou prolongées. Des *surtensions* peuvent se manifester sous des coups de foudre ou sous des omissions soudaines d'une forte charge. Les chutes de tension et les surtensions ont une pareille considération, cependant, les chutes de tensions sont les plus fréquentes.

2.11.1. REGLAGE DE LA TENSION

La tension est un paramètre local du réseau électrique dont la valeur fluctue par nature, elle est affectée par des variations de courte ou de longue durée de la consommation, elle subit des variations rapides liées à de multiples aléas : fluctuation des charges, changement de topologie du réseau, déclenchements d'ouvrage de transport ou de groupes de production.

Le réglage de la tension aux différents endroits du réseau s'avère donc être une nécessité pour :

- Exploiter au mieux le réseau en assurant sa sûreté. Le réglage de la tension permet d'éviter les phénomènes d'écroulement de tension qui peuvent entraîner des black-out ;
- Maintenir la tension d'alimentation des clients dans les plages contractuelles. Pour les clients et les distributeurs, chaque contrat de fourniture définit la tension nominale de raccordement ainsi que la plage de variation acceptée autour de cette valeur (déjà cité au-dessus) ;
- Respecter les contraintes de fonctionnement des matériels. Le matériel raccordé au réseau est défini pour un point de fonctionnement nominal, et des variations trop importantes de tension à ses bornes peuvent dégrader ou générer un vieillissement prématuré du matériel. Des tensions trop hautes entraînent le

⁷ La haute tension de classe A (HTA) mesurée au point d'utilisation ne doit pas s'écarter de : $\pm 12\%$ autour de sa valeur nominale pour les réseaux aériens, $\pm 6\%$ autour de sa valeur nominale pour les réseaux souterrains.

Le courant distribué en basse tension est livré à la tension nominale 220/380 volts qui sera portée progressivement à 230/400 volts. La tolérance maximale pour la variation de la basse tension autour de la tension nominale est de : 5 % pour les zones urbaines à usage éclairage prépondérant, 10 % pour les zones rurales ou industrielles à usage force motrice prépondérant [26]

vieillessement ou la destruction des matériels raccordés, des tensions trop basses provoquent des surcharges dans les lignes, perturbent le bon fonctionnement de certaines protections et des régleurs en charge des transformateurs ;

- Le producteur. La tension doit aussi être maintenue dans une plage qui soit acceptable pour les installations auxiliaires et afin de garantir la stabilité de l’alternateur principal, faute de quoi, les groupes peuvent être contraints à se déconnecter, ce qui affaiblit la sûreté du système électrique ;
- Minimiser les pertes. Un bon réglage de la tension permet de minimiser les pertes réseau ;
- Utiliser au mieux la capacité des ouvrages de transport. Régler la tension sur le réseau électrique permet d’optimiser les flux de puissance qui transitent dans les lignes et de contrôler au mieux ces transits. [27]

2.11.2. COMPENSATION DE L’ENERGIE REACTIVE

L’énergie électrique est, généralement, générée, transmise, distribuée et consommée en courant alternatif (AC), néanmoins, le courant alternatif a quelques désavantages, un de ces inconvénients est la nécessité de l’énergie réactive qui doit être fournie simultanément avec l’énergie active. Comme l’énergie active est celle responsable de fournir l’énergie consommé, l’énergie réactive ne contribue pas à la consommation, elle est en revanche une partie inhérente de l’énergie totale(apparente), elle est générée et consommée par toutes les parties du réseau (la génération, la transmission et la distribution et éventuellement par la charge). L’impédance d’une branche du circuit AC consiste en deux composantes, la résistance et la réactance. La réactance peut être capacitive ou inductive. La majorité des charges sont des charges inductives et doivent être alimentées avec une énergie réactive inductive (*lagging reactive power*). Il est plus économique de fournir cette énergie réactive près des charges dans le réseau de distribution.

La compensation de l’énergie réactive est le contrôle de cette énergie pour améliorer les performances du réseau alternatif en matière de compensation de la charge (booster le facteur de puissance du system, compenser la régulation de la tension et éliminer les harmoniques du courant) et de support de voltage pour réduire la variation de la tension dans un terminal donné de la ligne de transmission.

Les sources de l'énergie alternative génèrent de l'énergie réactive, les capacitances et les réactances stockent cette énergie dans le premier quart du cycle alternatif, et dans le prochain quart l'énergie réactive revient au réseau, en conséquence, l'énergie réactive déplace entre le réseau électrique d'une part et les capacitances ou les inductances d'autre part avec une fréquence double de la fréquence nominale, ainsi, afin de prévenir le mouvement çà et là de l'énergie réactive entre la charge et la source, elle doit être contrôlée. En outre, pour ajuster le facteur de puissance du système et maintenir la stabilité de la tension on a besoin de compenser la puissance réactive. En compensant la puissance réactive l'efficacité de la transmission s'améliore, plus encore, le régime permanent et les surtensions transitoires seront réglés, par conséquent, les Blackouts désastreux peuvent être évités. [28]

2.12. CONCLUSION

A la fin de ce chapitre, on peut résumer que la solution de l'écoulement de puissance est basée essentiellement sur les méthodes mathématiques numériques itératives et utilise deux types de matrices Y_{bus} et Z_{bus} . D'abord les méthodes utilisant la matrice d'admittance nodale Y_{bus} ont été introduites (la méthode de Gauss et Gauss-Seidel), cette méthode occupe peu de mémoire informatique, cependant, elle diverge pour certains cas. Ensuite les méthodes utilisant la matrice d'impédance nodale Z_{bus} la méthode de (Gauss-Seidel) s'est présentée comme une alternative à Y_{bus} en matière de convergence mais elle nécessite plus de capacité de stockage et par conséquent consomme plus de temps spécialement pour les systèmes larges. La méthode de Newton Raphson (N-R) est la plus utilisée dans les programmes de calcul de la solution de l'écoulement de puissance à cause de sa bonne convergence.

Donc pour avoir des bons résultats avec convergence on doit prévoir des compromis vitesse de calcul (temps d'exécution) et convergence. Les techniques de l'intelligence artificielle offrent une alternative pour le calcul des variables de réseau électrique, spécialement pour les techniques itératives qui consomment temps et espace mémoire.

Chapitre 3

RÉSEAUX DE NEURONES ET LOGIQUE FLOUE

3. RÉSEAUX DE NEURONES ET LOGIQUE FLOUE

3.1. INTRODUCTION

Afin de pouvoir optimiser l'écoulement de puissance, on a choisi de procéder aux techniques d'intelligence artificielle et plus précisément les réseaux de neurones et la logique floue. Pour cela, il nous faut un aperçu général sur ces deux techniques en précisant leurs principes de fonctionnement, avantages, inconvénients, et leurs utilisations.

3.2. LES RESEAUX DE NEURONES

Un *réseau de neurone* est une structure de calcul inspirée par l'étude de traitement du neurone biologique. Il y a de différents types de réseaux de neurones, du relativement simple au très complexe, tout comme il y a beaucoup de théories sur la façon de traitement du neurone biologique. Un réseau de neurones contient *des couches* (figure 3-1), ou des sous-groupes d'éléments de traitement. Une couche d'éléments de traitement rend le calcul indépendant sur les données qu'il reçoit et transmet les résultats à une autre couche. La couche suivante peut à son tour faire ses calculs indépendants et de transmettre les résultats à une autre couche. Enfin, un sous-groupe d'un ou plusieurs éléments de traitement détermine la sortie du réseau. Chaque élément de traitement effectue son calcul sur la base d'une somme pondérée de ses entrées. La première couche est *la couche d'entrée* la dernière couche est *la couche de sortie*. Les couches qui sont placées entre la première et les dernières couches sont *les couches cachées*. Les éléments de traitement sont considérés comme des unités qui sont semblables aux neurones dans le cerveau humain, et par conséquent, ils sont considérés comme des cellules de *neurones artificiels*. [29]

3.2.1. MODELE D'UN NEURONE

Le modèle mathématique d'un neurone artificiel est illustré à la figure 3.1. Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées. Le résultat n de cette somme est ensuite transformé par une fonction de transfert f qui produit

la sortie a du neurone. Les R entrées du neurone correspondent au vecteur $p = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_R]^T$ alors que $w = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_{1,R}]^T$ représente le vecteur des poids du neurone. La sortie n de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante :

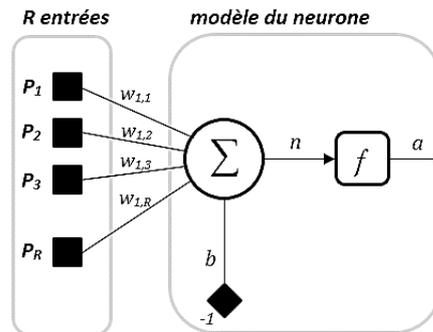


Figure 3-1. Modèle d'un neurone artificiel

$$n = \sum_{j=1}^R w_{1,j} p_j - b = w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \dots + w_{1,R} p_R - b \quad (3.1)$$

Que l'on peut aussi écrire sous forme matricielle : $n = w^T p - b \quad (3.2)$

T : le transposée de la matrice ou du vecteur

Cette sortie correspond à une somme pondérée des poids et des entrées moins ce qu'on nomme *le biais* b du neurone. Le résultat n de la somme pondérée s'appelle *le niveau d'activation du neurone*. Le biais b s'appelle aussi *le seuil d'activation* du neurone. Lorsque le niveau d'activation atteint ou dépasse le seuil b , alors l'argument de f devient positif (ou nul). Sinon, il est négatif.

Ajoutons la fonction d'activation f pour obtenir la sortie du neurone :

$$a = f(n) = f(w^T p - b) \quad (3.3)$$

Remplaçons w^T par une matrice d'une seule ligne $W = w^T$, on obtient la forme générale :

$$a = f(Wp - b) \quad (3.4)$$

La figure 3.2 donne la représentation matricielle du neurone artificiel.

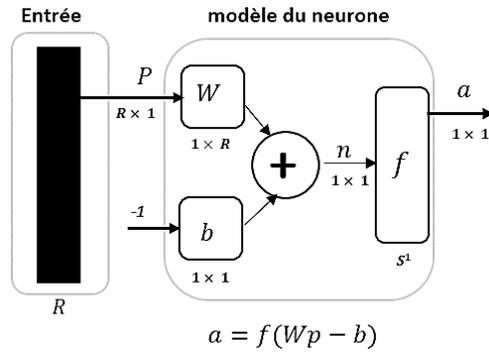


Figure 3-2. Représentation matricielle d'un neurone artificiel

3.2.2. FONCTIONS DE TRANSFERT

Différentes fonctions de transfert pouvant être utilisées comme fonction d'activation du neurone. Les plus utilisées sont les fonctions : *seuil*, *linéaire* et *sigmoïde*.

La fonction log-sigmoïde génère des sorties entre 0 et 1.

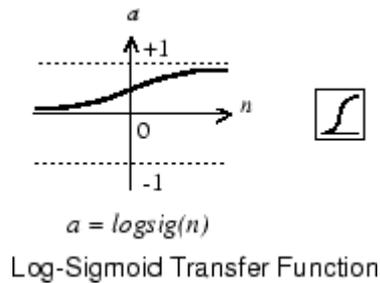


Figure 3-3. Fonction de transfert log-sigmoïde

Alternativement, les réseaux multicouches peuvent utiliser la fonction de transfert tan-sigmoïde.

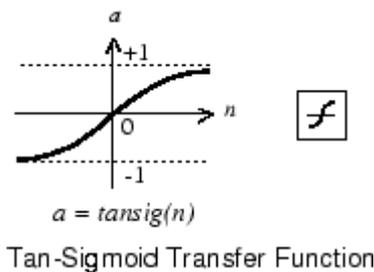


Figure 3-4. Fonction de transfert tan-sigmoïde.

Les fonctions de transfert sigmoïde sont souvent utilisées pour des problèmes de reconnaissance de formes, tandis que les fonctions de transfert linéaires sont utilisées pour la fonction de problèmes d'assemblage. La fonction de transfert linéaire *purelin* est illustré ci-dessous.

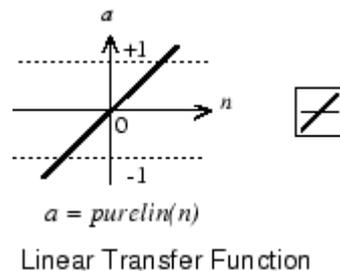


Figure 3-5. Fonction de transfert linéaire

Les trois fonctions de transfert décrites précédemment sont les fonctions de transfert les plus utilisés couramment pour les réseaux multicouches, d'autres fonctions de transfert peuvent être créés et utilisés selon le cas. [30]

3.2.3. APPRENTISSAGE D'UN RESEAU DE NEURONES

Il existe essentiellement deux types d'apprentissage, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage supervisé.

3.2.3.1. APPRENTISSAGE NON SUPERVISE

Dans ce cas, des exemples ou *prototypes* ou *patrons* sont présentés au réseau qu'on laisse s'auto-organiser au moyen de lois locales qui réagissent l'évolution des poids synaptiques. Ce mode d'apprentissage est aussi appelé *apprentissage par compétition*.

3.2.3.2. APPRENTISSAGE SUPERVISE

Dans ce type d'apprentissage, on cherche à imposer au réseau un fonctionnement donné en forçant à partir des entrées qui lui sont présentées, les sorties du réseau à prendre des valeurs données en modifiant les poids synaptiques. Le réseau se comporte alors comme un filtre dont les paramètres de transfère sont ajustés à partir des couples entrée /sortie présentés.

L'adaptation des paramètres du réseau s'effectue à partir d'un algorithme d'optimisation, l'initialisation des poids synaptiques étant le plus souvent aléatoire. [31]

L'une des applications les plus connus de l'apprentissage supervisé est celle du perceptron monocouche et multicouches avec les règles de correction d'erreur (Annexe 2), LMS⁸ et la rétropropagation d'erreur.

3.2.4. ARCHITECTURE DE RESEAU

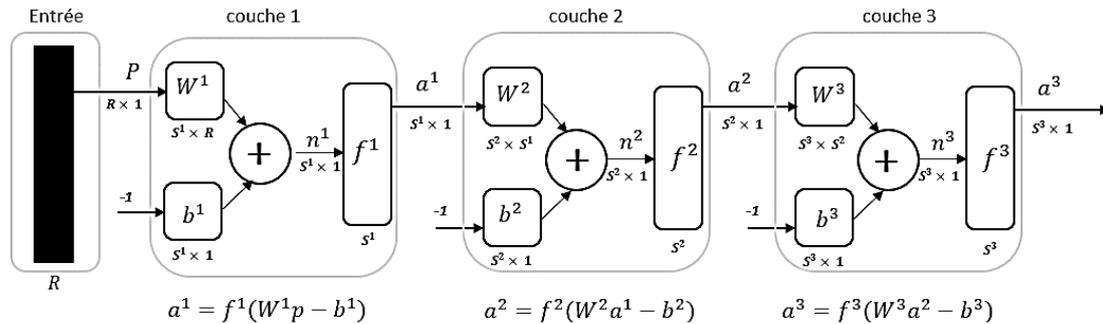


Figure 3.6 – Représentation matricielle d'un réseau de trois couches.

Les réseaux multicouches sont beaucoup plus puissants que les réseaux simples à une seule couche. En utilisant deux couches (une couche cachée et une couche de sortie), à condition d'employer une fonction d'activation *sigmoïde* sur la couche cachée, on peut entraîner un réseau à produire une approximation de la plupart des fonctions, avec une précision arbitraire (cela peut cependant requérir un grand nombre de neurones sur la couche cachée). Sauf dans de rares cas, les réseaux de neurones artificiels exploitent deux ou trois couches.

Entraîner un réseau de neurones signifie modifier la valeur de ses poids et de ses biais pour qu'il réalise la fonction entrée/sortie *désirée*. Pour spécifier la structure du réseau, il faut aussi choisir le nombre de couches et le nombre de neurones sur chaque couche. Tout d'abord, rappelons que le nombre d'entrées du réseau (R), de même que le nombre de neurones sur la couche de sortie est fixé par *les spécifications du problème* que l'on veut résoudre avec ce réseau. Par exemple, si la donnée du problème comporte quatre variables en entrée et qu'elle exige de produire trois variables en sortie, alors nous aurons simplement $R = 4$ et $S^M = 3$, où M correspond à l'indice de la couche de sortie (ainsi qu'au nombre de couches). Ensuite, la nature du problème peut aussi nous guider dans le choix des fonctions de transfert. Par exemple, si l'on désire produire des sorties

⁸ La règle LMS consiste à tenter de minimiser un *indice de performance* F basé sur l'erreur quadratique moyenne.

binaires 0 ou 1, alors on choisira probablement une fonction seuil (*hardlim*) pour la couche de sortie. Il reste ensuite à choisir le nombre de couches cachées ainsi que le nombre de neurones sur ces couches, et leur fonction de transfert. Il faudra aussi fixer les différents paramètres de l'algorithme d'apprentissage.

3.2.5. RETROPROPAGATION DE L'ERREUR (BACKPROPAGATION)

L'équation qui décrit les sorties d'une couche k dans un perceptron multicouche est donnée par :

$$a^k = f^k(W^k a^{k-1} - b^k), \text{ pour } k = 1, \dots, M, \quad (3.5)$$

Où M est le nombre total de couches et $a^0 = p$ définit le cas de base de cette formule de récurrence. Les sorties du réseau correspondent alors à a^M . L'algorithme de rétropropagation est une généralisation de la règle LMS. Tous deux utilisent comme indice de performance l'erreur quadratique moyenne, et tous deux permettent un apprentissage de type supervisé avec un ensemble d'association stimulus/cible $\{(p_q, d_q)\}$, $q = 1, \dots, Q$ où p_q représente le vecteur stimulus (entrées) et d_q un vecteur cible (sortie désirée). A chaque instant t , on peut propager vers l'avant un stimulus différent $\mathbf{p}(t)$ à travers le réseau de la figure 3-6 pour obtenir un vecteur de sorties $\mathbf{a}(t)$. Ceci nous permet de calculer l'erreur $\mathbf{e}(t)$ entre ce que le réseau produit en sortie pour ce stimulus et la cible $\mathbf{d}(t)$ qui lui est associée :

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{d}(t) - \mathbf{a}(t) \quad (3.6)$$

L'indice de performance F permet de minimiser l'erreur quadratique moyenne :

$$F(x) = E[e^T(t)e(t)] \quad (3.7)$$

Où $E[.]$ désigne l'espérance mathématique et le vecteur x regroupe l'ensemble des poids et des biais du réseau. Tout comme pour la règle LMS, nous allons approximer cet indice par l'erreur instantanée

$$\hat{F}(x) = e^T(t)e(t) \quad (3.8)$$

Nous allons utiliser la méthode de descente de gradient pour optimiser x :

$$\Delta w_{i,j}^k(t) = -\eta \frac{\partial \hat{F}}{\partial w_{i,j}^k} \quad (3.9)$$

$$\Delta b_i^k(t) = -\eta \frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i^k} \quad (3.10)$$

Où η désigne le taux d'apprentissage.

Pour calculer la dérivée partielle de \hat{F} , il faudra faire appel à la règle de chaînage des dérivées :

$$\frac{df[n(w)]}{dw} = \frac{df[n]}{dn} \times \frac{dn(w)}{dw} \quad (3.11)$$

Par exemple, si $f[n] = e^n$ et $n = 2w$, donc $f[w] = e^{2w}$

$$\frac{df[n(w)]}{dw} = \left(\frac{de^n}{dn}\right) \times \left(\frac{d2w}{dw}\right) = e^n \times 2 = 2e^{2w} \quad (3.12)$$

Nous allons nous servir de cette règle pour calculer les dérivées partielles des équations 3.9 et 3.10 :

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial w_{i,j}^k} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^k} \times \frac{\partial n_i^k}{\partial w_{i,j}^k} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i^k} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^k} \times \frac{\partial n_i^k}{\partial b_i^k} \quad (3.14)$$

Le deuxième terme de ces équations est facile à calculer car les niveaux d'activation n_i^k de la couche k dépendent directement des poids et des biais sur cette couche :

$$n_i^k = \sum_{j=1}^{s^{k-1}} w_{i,j}^k a_j^{k-1} - b_i^k \quad (3.15)$$

Par conséquent :

$$\frac{\partial n_i^k}{\partial w_{i,j}^k} = a_j^{k-1}, \quad \frac{\partial n_i^k}{\partial b_i^k} = -1 \quad (3.16)$$

On remarque que cette partie de la dérivée partielle de \hat{F} par rapport à un poids (ou un biais) est toujours égale à l'entrée de la connexion correspondante.

Maintenant, pour le premier terme des équations 3.13 et 3.14, définissons la sensibilité s_i^k de \hat{F} aux changements dans le niveau d'activation n_i^k du neurone i de la couche k :

$$s_i^k = \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_i^k} \quad (3.17)$$

On peut alors réécrire les équations 3.13 et 3.14 de la façon suivante :

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial w_{i,j}^k} = s_i^k a_j^{k-1} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i^k} = -s_i^k \quad (3.19)$$

Et les expressions des équations 3.09 et 3.10 de la façon suivante :

$$\Delta w_{i,j}^k(t) = -\eta s_i^k(t) a_j^{k-1}(t) \quad (3.20)$$

$$\Delta b_i^k(t) = \eta s_i^k(t) \quad (3.21)$$

Ce qui donne en notation matricielle : $\Delta W^k(t) = -\eta s^k(t) (a^{k-1})^T(t)$ (3.22)

$$\Delta b^k(t) = \eta s^k(t) \quad (3.23)$$

$$\text{avec : } s^k \equiv \frac{\partial \hat{F}}{\partial n^k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_1^k} \\ \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_2^k} \\ \vdots \\ \frac{\partial \hat{F}}{\partial n_{s^k}^k} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Il reste maintenant à calculer les sensibilités s^k , ce qui requerra une nouvelle application de la règle de chaînage des dérivées. Dans ce cas, nous obtiendrons une formule de récurrence où la sensibilité des couches en amont (entrées) dépendra de la sensibilité des couches en aval (sorties). C'est de là que provient l'expression *retropropagation*, car le sens de propagation de l'information est inversé par rapport à celui de l'équation 3.5.

Finalement, nous pouvons écrire la relation de récurrence pour les sensibilités :

$$\begin{aligned} s^k &= \frac{\partial \hat{F}}{\partial n^k} = \left(\frac{\partial n^{k+1}}{\partial n^k} \right)^T \frac{\partial \hat{F}}{\partial n^{k+1}} = \dot{F}^k(n^k) (W^{k+1})^T \frac{\partial \hat{F}}{\partial n^{k+1}} \\ &= \dot{F}^k(n^k) (W^{k+1})^T s^{k+1} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Cette équation nous permet de calculer s^1 à partir de s^2 , qui lui-même est calculé à partir de s^3 , etc., jusqu'à s^M . Ainsi les sensibilités sont *retropropagées* de la couche de sortie jusqu'à la couche d'entrée : $s^M \rightarrow s^{M-1} \rightarrow \dots \rightarrow s^2 \rightarrow s^1$ (3.26)

3.3. LA LOGIQUE FLOUE

En 1965, Lotfi Zadeh découvrit la formulation de la théorie des ensembles flous comme méthode de traitement de l'imprécision des systèmes pratiques. L'objectif de la logique floue est de rendre l'ordinateur pensant comme l'homme. La logique floue peut traiter le vague intrinsèque de la pensée humaine et du langage naturel. L'utilisation de l'algorithme de la logique floue peut permettre à la machine à comprendre et à répondre aux concepts humains vagues comme : chaud, froid, grand, petit, ...etc. il peut aussi donner des approches relativement simples pour aboutir aux conclusions depuis des informations imprécises. [32] [33]

3.3.1. LES ENSEMBLES FLOUS (FUZZY SETS)

On peut assimiler les ensembles flous comme une généralisation des ensembles classiques. Les ensembles classiques et leurs opérations sont particulièrement utiles pour exprimer la logique classique et ils mènent vers la logique Booléenne et ses applications dans les systèmes numériques. Les ensembles flous et les opérations floues sont utiles pour exprimer les idées de la logique floue menant vers des applications comme les contrôleurs flous.

Zadeh précisa que l'homme ne résonne pas en termes de symboles distincts et nombre mais en termes d'ensembles flous. Ces termes flous définissent des catégories générales et pas des collections rigides et fixes. La transition depuis une catégories-concept, idée ou problème à un autre est graduelle avec quelques états qui ont des *fonctions d'appartenance* grandes ou petites dans un ensemble ou dans un autre. Les ensembles flous sont des fonctions qui cartographient une valeur (qui peut être membre de l'ensemble) à un nombre entre 'zéro' et 'un' indiquant son vrai degré d'appartenance. Le degré de 'zéro' veut dire que la valeur n'est pas dans l'ensemble et le degré de 'un' veut dire que la valeur est complètement représentative de l'ensemble. Cela produit une courbe autours des membres de l'ensemble.

3.3.2. FONCTIONS D'APPARTENANCE

En théorie des ensembles flous, le concept de fonction caractéristique est prolongé dans une forme plus généralisée, connue sous le nom de *fonction d'appartenance* $\mu_A(x): U \rightarrow [0, 1]$. Alors qu'une fonction caractéristique existe dans un ensemble de deux éléments $\{0, 1\}$, une fonction d'appartenance peut prendre une valeur comprise dans l'intervalle $[0, 1]$ (noter que les accolades sont utilisées pour représenter l'appartenance discrète tandis que les crochets sont utilisés pour représenter l'adhésion continue). L'ensemble qui est définie par cette fonction d'appartenance étendue est appelé un *ensemble flou*. L'appartenance à un ensemble n'est plus une question de « vrai » ou « faux », « 1 » ou « 0 », mais une question de degré. Le degré d'appartenance devient important.

Zadeh a proposé une notation pour décrire des ensembles flous F :

$$F = \int_U \mu_F(x)/x \text{ pour un univer continu } U \quad (3.27)$$

$$\text{Où } F = \sum_{x \in U} \int_U \mu_F(x) / x \text{ pour un unvier discontinu } U \quad (3.28)$$

La forme exacte de la fonction d'appartenance est très subjective et dépend du concepteur et du contexte de l'application. Alors que les opérations ensemble telles que le *complément*, l'*union* et l'*intersection* ont des définitions simples dans la théorie des ensembles classiques, leur interprétation est plus compliquée dans la théorie des ensembles flous en raison de l'attribut gradué des fonctions d'appartenance. Zadeh [34] a proposé les définitions floues de fonctionnement de consigne suivantes comme une extension des opérations classiques :

$$\text{- Complément } \forall x \in X: \mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.29)$$

$$\text{- Union } \forall x \in X: \mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (3.30)$$

$$\text{- Intersection } \forall x \in X: \mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (3.31)$$

Ces définitions constituent les fondements de base de la théorie de la logique floue. La relation entre un élément dans l'univers du discours et un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance. La nature exacte de la relation dépend de la forme ou le type de fonction d'appartenance utilisée

3.3.3. TYPES DE FONCTIONS D'APPARTENANCE

La figure 3-7, montre différents types de fonctions d'appartenance qui sont couramment utilisées dans la théorie des ensembles flous. Le choix de la forme dépend de l'application individuelle. Dans les applications de la commande floue, les fonctions gaussiennes, en forme de cloche ou S ne sont pas communément utilisées. Des fonctions telles que Γ -fonction, L-fonction et Λ -fonction sont beaucoup plus fréquents.

Les définitions des fonctions d'appartenance les plus utilisées sont :

Γ – function, $\Gamma: U \rightarrow [0, 1]$

$$\Gamma(x; \alpha; \beta) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ (x - \alpha) / (\beta - \alpha) & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1 & x > \beta \end{cases} \quad (3.32)$$

L – function, $L: U \rightarrow [0, 1]$

$$L(x; \alpha; \beta) = \begin{cases} 1 & x < \alpha \\ (x - \beta) / (\alpha - \beta) & \alpha \leq x \leq \beta \\ 0 & x > \beta \end{cases} \quad (3.33)$$

Λ – function, $\Lambda: U \rightarrow [0, 1]$

$$\Lambda(x; \alpha; \beta, \gamma) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ (x - \alpha) / (\beta - \alpha) & \alpha \leq x \leq \beta \\ (x - \gamma) / (\beta - \gamma) & \beta \leq x \leq \gamma \\ 0 & x > \gamma \end{cases} \quad (3.34)$$

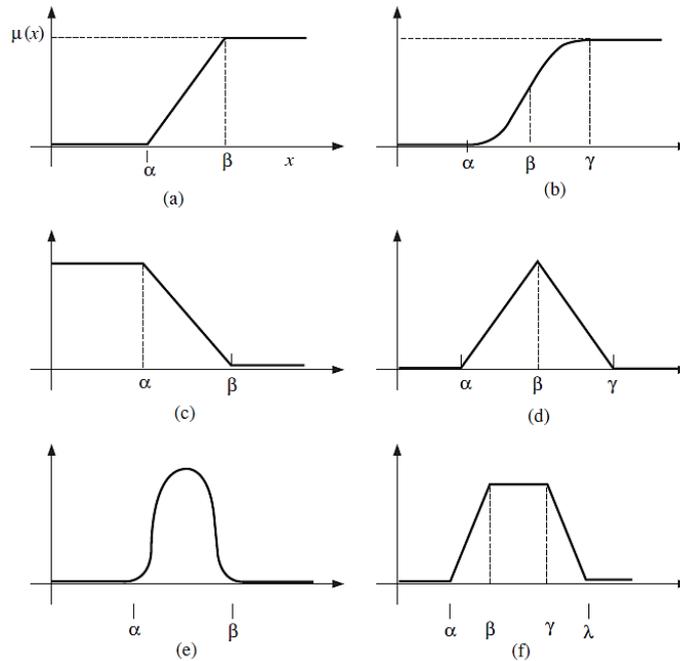


Figure 3-7. Types de fonctions d'appartenance : (a) Γ -fonction (b) fonction en S, (c) fonction en L (d) fonction en Λ ;(e) fonction gaussienne ; (f) fonction en π

3.3.4. LES VARIABLES LINGUISTIQUES

Le concept des *variables linguistiques* est le fondement des systèmes de contrôle de la logique floue. Une variable classique est numérique et précise. Elle n'est pas capable de supporter l'imprécision dans la théorie des ensembles flous. Par définition, une variable linguistique est composée de mots, des phrases ou langue artificielle qui sont moins précis que les chiffres. Elle fournit les moyens de caractérisation approximative des phénomènes complexes ou mal définis. Par exemple, « AGE » est une variable linguistique dont les valeurs peuvent être de « jeunes » et « vieux »

Si X_i est une variable linguistique définie sur l'univers du discours U où $x \in U$ alors : LX_{ik} (for $k = 1, \dots, n$) sont les valeurs linguistiques que X_i peut prendre

n est le nombre de valeurs linguistiques que X_i peut avoir $\mu_{LX_{i,k}}(x)$ est la fonction d'appartenance de LX_{ik} pour la valeur x .

LX_i est l'ensemble contenant LX_{ik} , où $LX_i = \{LX_{i^1}, LX_{i^2} \dots LX_{i^n}\}$

3.3.5. OPERATEURS FLOUS

Les conjonctions logiques sont également définies pour les opérations de la logique floue. Ils sont étroitement liés aux définitions de Zadeh des opérations des ensembles flous. Voici quatre opérations floues qui sont importantes. R désigne la relation entre les ensembles flous A et B .

3.3.5.1. LA NEGATION

$$\mu A(x) = 1 - \mu A(x) \quad (3.35)$$

3.3.5.2. LA DISJONCTION

$$R: A \text{ OR } B \quad \mu R(x) = \max[\mu A(x), \mu B(x)] \quad (3.36)$$

3.3.5.3. LA CONJONCTION

$$R: A \text{ AND } B \quad \mu R(x) = \min[\mu A(x), \mu B(x)] \quad (3.37)$$

3.3.5.4. L'IMPLICATION

$$R: (x = A) \rightarrow (y = B) \text{ IF } x \text{ is } A \text{ THEN } y \text{ is } B \quad (3.38)$$

L'implication floue est un conjonctif important dans les systèmes de commande floue parce que les stratégies de contrôle sont réalisées par des ensembles de règles SI-ALORS (IF-THEN). Il existe plusieurs différentes techniques dans lesquelles implication floue peut être définie. Ces relations sont la plupart du temps dérivée de la théorie de la logique multi-valuée. Voici quelques-unes des techniques courantes d'implication floue trouvées dans la littérature.

A. IMPLICATION CLASSIQUE DE ZADEH

$$\mu R(x, y) = \max\{\min[\mu A(x), \mu B(y)], 1 - \mu A(x)\} \quad (3.39)$$

B. IMPLICATION MAMDANI

$$\mu R(x, y) = \min[\mu A(x), \mu B(y)] \quad (3.40)$$

Notez que l'implication Mamdani est équivalente à l'implication classique de Zadeh quand $\mu A(x) \geq 0.5$ et $\mu B(y) \geq 0.5$ (3.41)

C. IMPLICATION DE GÖDEL

$$\mu R(x, y) = \begin{cases} 1 & \mu A(x) \leq \mu B(y) \\ \mu B(y) & \text{autrement} \end{cases} \quad (3.42)$$

D. IMPLICATION DE LUKASIEWICZ

$$\mu R(x, y) = \min\{1, [1 - \mu A(x) + \mu B(y)]\} \quad (3.43)$$

Il est assez évident en regardant les fonctions mathématiques des différentes implications techniques que la technique de Mamdani est la plus appropriée pour la mise en œuvre matérielle. Elle est aussi la technique la plus populaire dans les applications de contrôle et de commande. [35]

3.3.6. SYSTEME DE COMMANDE FLOU

La figure 3.8 représente le schéma synoptique d'un contrôleur classique de logique floue (*fuzzy logic controller FLC*), et l'installation du système. Il y a cinq éléments principaux à un contrôleur de logique floue tels que le Module Fuzzification (fuzzifier) ; Base de connaissances ; Base de règles ; Moteur d'inférence ; Module Défuzzification (défuzzifier).

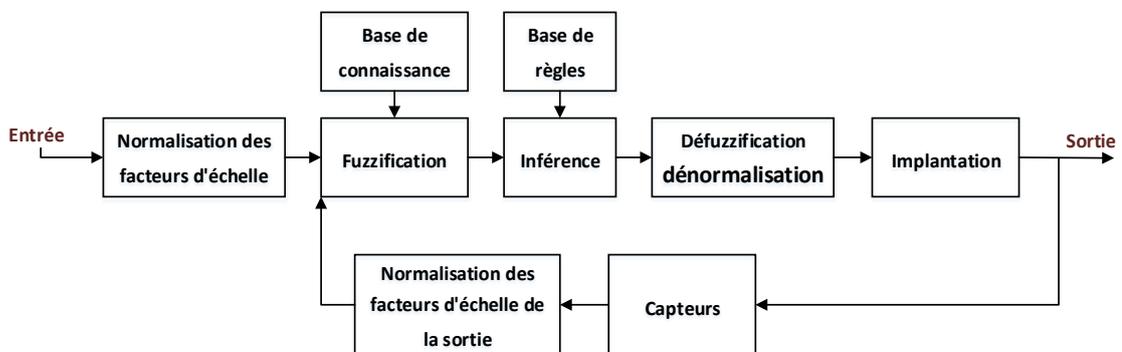


Figure 3-8. Schéma d'un contrôleur flou typique

La modification automatique des paramètres de conception de l'un des cinq éléments crée un contrôleur adaptatif flou. Les systèmes de contrôle flou avec des paramètres fixes sont non-adaptatifs. D'autres éléments non flous qui font également partie du système de contrôle comprennent des capteurs, des convertisseurs analogiques-numériques, les convertisseurs numériques-analogiques et les circuits de normalisation.

3.3.6.1. LA FUZZIFICATION

Le module de logique floue convertit les valeurs nettes et des entrées de commande en valeurs floues de sorte qu'ils sont compatibles avec la représentation des ensembles flous dans la base de règles.

3.3.6.2. BASE DE CONNAISSANCES

La base de connaissances est constituée d'une base de données du système. elle fournit tout les définitions nécessaires pour le processus de fuzzification tels que des

fonctions d'appartenance, la représentation des ensembles flous des variables d'entrées-sorties et des fonctions de correspondance entre les domaine physique et flou.

3.3.6.3. BASE DE REGLES

La base de règles est essentiellement la stratégie de contrôle du système. Elle est généralement obtenue à partir de connaissances ou heuristiques experts et exprimée comme un ensemble de règles SI-ALORS (IF-THEN). Les règles sont basées sur le concept d'inférence floue et les antécédents / conséquents sont associés avec des variables linguistiques.

3.3.6.4. DEFUZZIFICATION

Le diagramme de la Fig. 3.9 montre les fonctions d'appartenance liées à une logique floue typique à variables de sortie de contrôleur définies sur son univers de discours. Le FLC traitera les données d'entrée et trace la sortie à un ou plusieurs de ces valeurs linguistiques. Selon les conditions, les fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques peuvent être coupées. La figure 3.10 montre une condition de sortie avec deux importantes (écrêté au-dessus de zéro) sorties des valeurs linguistiques. L'union des fonctions d'appartenance constitue la valeur de sortie floue du contrôleur.

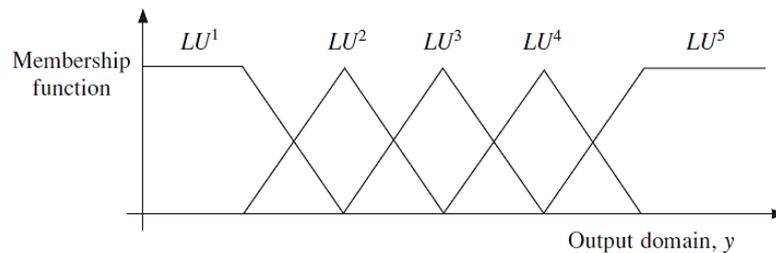


Figure 3-9. La fonction d'appartenance des valeurs linguistiques de sortie

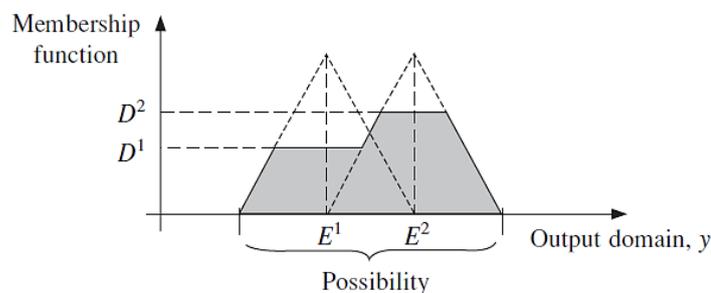


Figure 3-10. Distribution de La possibilité d'une condition de sortie

Ceci est représenté par la zone hachurée sur la Fig. 3.10 et est exprimée par l'ensemble équation floue :

$$S = \bigcup_{i=1}^k S_i, \quad \mu_S(y) = \max_i [\mu_{S_i}(y)] \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (3.44)$$

Où :

S est l'union de toutes les valeurs linguistiques de sortie

S_i est une valeur linguistique de sortie avec une fonction d'appartenance écrêtée

k est le nombre total de sorties valeurs linguistiques définies dans l'univers du discours. Dans la plupart des cas, la valeur de sortie floue S a très peu d'utilité pratique comme la plupart des applications ont besoin des actions de contrôle non floues (nettes). Par conséquent, il est nécessaire de produire une grande netteté pour représenter la distribution de possibilité de la sortie. La procédure mathématique de la conversion des valeurs floues en valeurs nettes est connue sous le nom *Défuzzification*. Un nombre de méthodes de défuzzification ont été suggérées. Les différentes méthodes produisent des résultats similaires mais pas toujours les mêmes pour une condition d'entrée donnée. Le choix méthodes de défuzzification dépend généralement de l'application et de la puissance du processeur disponible.

3.4. ANFIS (ARTIFICIAL NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEMS)

3.4.1. INTRODUCTION

Une limitation de l'utilisation des réseaux de neurone réside dans leur conception car il est difficile de trouver, de manière immédiate, à partir des données de problème à traiter, la meilleure architecture neuronale conduisant aux performances désirées. Cette détermination reste essentiellement empirique et soumise à la réalisation d'essais successifs qui pénalise le délai de conception du système de traitement de données envisagé. Ce problème de conception est lié à l'absence d'interprétation de l'action d'un réseau de neurones sur les données à traiter.

Le tableau 3-1 dresse un comparatif des avantages et des inconvénients respectifs de ces système de traitement de données [31]

Tableau 3-1. Comparatif des avantages et des inconvénients des SIF et RN

Système d'inférence floue	Réseaux de neurones
Intégration de l'expertise humaine	Exploitation de données numériques
Parcours séquentiel de la base de règle	Traitement réparti sur de nombreux processeurs
Interprétation immédiate en termes de règles d'inférence floue	Pas de structure spécialisée particulière
Difficultés dans la construction de la base de règle	Problèmes dans le choix des réseaux de neurone

Jang et al ont proposé l'architecture des ANFIS en 1993 [36]. L'acronyme ANFIS tire son nom de '*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*' ou « système adaptatif d'inférence neuro-floue ». En utilisant une des série entrée / sortie donnée, ANFIS construit un « système d'inférence floue SIF » ou 'fuzzy inference system FIS' dont les paramètres des fonctions d'appartenance sont réglées (ajustées) en utilisant soit un algorithme de rétropropagation de l'erreur seul ou en combinaison avec une des méthodes de type moindre carrés 'least squares type of method'. Cet ajustement permet aux systèmes flous d'apprendre à partir des données à modéliser. [37]

ANFIS est un réseau adaptatif qui permet la mise en œuvre de la topologie du réseau de neurones, conjointement avec la logique floue [38, 39]. L'étude des ANFIS compile ces deux méthodes et utilise les caractéristiques des deux méthodes. Encore, ANFIS rassemble à la fois le réseau de neurones et la logique floue, et est capable de traiter des problèmes complexes et non linéaire [40]. ANFIS est une classe de réseaux adaptatif multicouche à propagation vers l'avant 'adaptive multilayer feeding forward networks', ce qui est fonctionnellement équivalent à un système d'inférence floue.

3.4.2. ARCHITECTURE DES ANFIS

Selon *Jang et al* [36,40] la structure globale des systèmes neuro-flous adaptatifs est représentée sur la figure 3.11:

3.4.2.1. LA COUCHE N° 1

Chaque nœud i dans cette couche est un nœud adaptatif ayant une fonction de nœud :

$$O_i^1 = \mu_{Ai}(x) \quad (3.45)$$

O_i^1 est le *degré d'appartenance* de A_i et il spécifie le degré auquel l'entrée x (ou y) satisfait le quantificateur A_i . $\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x-c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}}$ ou $\mu_{A_i}(x) = \exp \left\{ - \left(\frac{x-c_i}{a_i} \right)^2 \right\}$ (3.46)

Où $\{a_i, b_i, c_i\}$ est l'ensemble de paramètres.

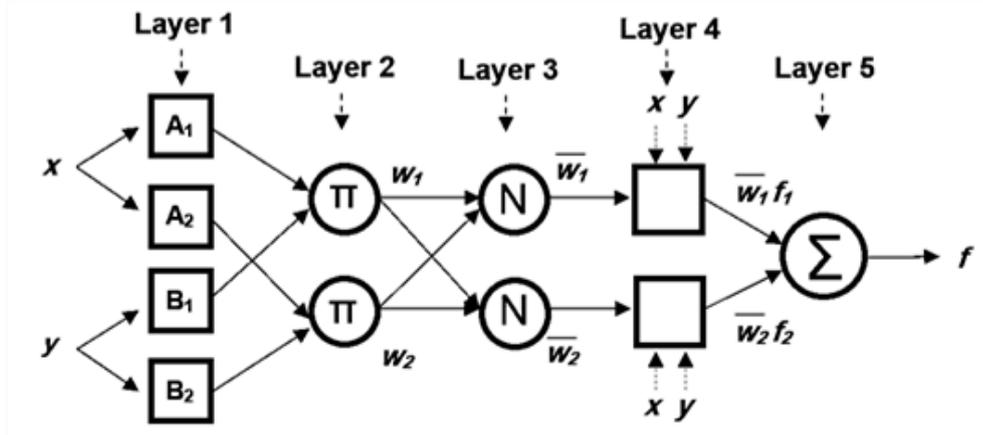


Figure 3-11. structure du system ANFIS

3.4.2.2. LA COUCHE N° 2

La deuxième couche calcule les prémisses de chaque règle comme étant le produit des degrés d'appartenance des variables intervenant dans les prémisses de chaque règle :

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i = 1,2 \quad (3.47)$$

3.4.2.3. LA COUCHE N° 3

La troisième couche est constituée d'opérateurs de normalisation notés N, normalise les résultats de la couche :

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1,2. \quad (3.48)$$

3.4.2.4. LA COUCHE N° 4

La quatrième couche évalue la conclusion de chaque règle :

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (3.49)$$

$\{p_i, q_i, r_i\}$ sont l'ensemble de paramètres de ce nœud qui sont appelés *paramètres conséquents*.

3.4.2.5. LA COUCHE N°5

Les nœuds de cette couche calcule la sortie globale comme étant la somme de tous les signaux entrants :

$$O_i^5 = \text{sortie globale} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (3.50)$$

La règle d'apprentissage de cette structure est basée sur une méthode d'apprentissage de type descente de gradient, analogue à celle utilisée dans le cas des réseaux de neurone non bouclés. [41]

3.4.3. COMPLEXITE DE CALCUL DES ANFIS

Le tableau 3-2 présente des caractéristiques des différentes couches :

Tableau 3-2. Les caractéristiques des couches

N° de couche	Type de couche	N° de nœuds	N° de paramètres
L0	Entrée (input)	n	0
L1	Values (valeurs)	(p•n)	3•(p•n)= S1
L2	Rules (Règles)	p ⁿ	0
L3	Normalize (Normalisation)	p ⁿ	0
L4	Lin.Funct	p ⁿ	(n+1)•pn= S2
L5	Somme (Sum)	1	0

ANFIS utilise deux groups de paramètres : S1 et S2 :

- S1 représente les partitions floues utilisées dans les règles LHS :

$$S1 = \{\{a_{11}, b_{11}, c_{11}\}, \{a_{12}, b_{12}, c_{12}\}, \dots, \{a_{1p}, b_{1p}, c_{1p}\} \dots, \{a_{np}, b_{np}, c_{np}\}\} \quad (3.51)$$

- S2 représente les coefficients des fonctions linéaires dans les règles de l'ERS

$$S2 = \{\{c_{10}, c_{11}, \dots, c_{1n}\}, \dots, \{c_{p^{n0}}, c_{p^{n1}}, \dots, c_{p^{nn}}\}\} \quad (3.52)$$

Les ANFIS utilisent un cycle d'apprentissage en deux phases :

- Phase avant : S1 est fixe et S2 est calculée en utilisant l'algorithme des moindres carrés (*Least Squared Error LSE*) (apprentissage Off-line)
- Phase en arrière : S2 est fixe et S1 est calculée en utilisant un algorithme de descente de gradient (habituellement *rétropropagation*). [42]

3.4.4. DIAGRAMME DE FLUX DE BASE DES CALCULS DANS ANFIS

ANFIS éditeur GUI (MATLAB) applique des techniques d'inférence floue à la modélisation des données ; la figue. 3-12 donne diagramme de flux de base des calculs des ANFIS.

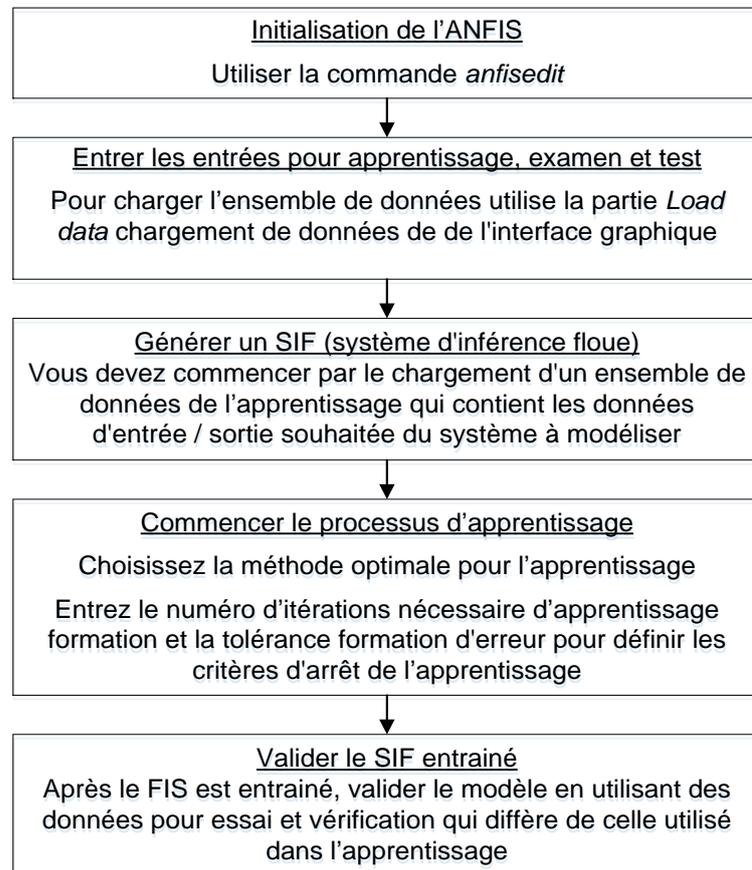


Figure 3-12. Diagramme de flux de base des calculs des ANFIS

3.5. CONCLUSION

Ce chapitre donne une analyse théorique des réseaux de neurones, de la logique floue et de la combinaison entre les deux. Le but essentiel est d'avoir une technique hybride capable de surmonter les inconvénients de chacune et d'amplifier les avantages des deux techniques.

Chapitre 4

APPLICATION DES ANFIS AUX RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

4. APPLICATION DES ANFIS AUX RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

4.1. INTRODUCTION

Dans le chapitre 3 on a présenté une technique novatrice telle que les ANFIS (adaptive neurofuzzy inference system) avec toute sa complexité de calcul. Dans ce chapitre on va appliquer cette technique à l'écoulement de puissance et à la prédiction de la charge en analysant les résultats obtenus.

La démarche de travail est la suivante : premièrement on va simuler l'écoulement de puissance en utilisant une méthode conventionnelle pour l'apprentissage puis en introduit l'optimisation utilisant les ANFIS.

4.2. ECOULEMENT DE PUISSANCE UTILISANT LES ANFIS

L'expansion des réseaux électriques a impliqué la privatisation et la restructuration de certains entre eux ; cela met les gestionnaires de réseau d'électricité dans un marché concurrentiel. En revanche, le développement de systèmes et de logiciels informatiques conduit à de nouveaux concepts tels que *les réseaux intelligents*, donc les programmes de l'écoulement de puissance conventionnels (Power Flow) ont besoin d'être améliorés. [43][44]

Pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance, deux approches différentes sont utilisées, la méthode traditionnelle et la méthode utilisant l'intelligence artificielle ; les systèmes d'intelligence artificielle ont prouvé leur efficacité dans l'analyse des réseaux électriques. Les systèmes à inférence neuro-floue artificiels (ANFIS) sont une combinaison de deux techniques intelligentes : les réseaux de neurones et la logique floue.

Cette partie présente une solution de l'écoulement de puissance en utilisant des systèmes d'inférence neuro-flou adaptatifs (ANFIS) d'un réseau IEEE 39 bus système. L'apprentissage de notre ANFIS est pris à partir des résultats de l'écoulement de puissance en utilisant le logiciel « power world simulator ». [45]

Pour établir notre technique de l'écoulement de puissance, on a utilisé le réseau "IEEE 39 bus system (Fig. 4-1), qui est mieux connu comme *10-machine New-England Power System*. Le générateur n°1 représente une agrégation d'un large nombre de générateurs. [46] [47] [48]

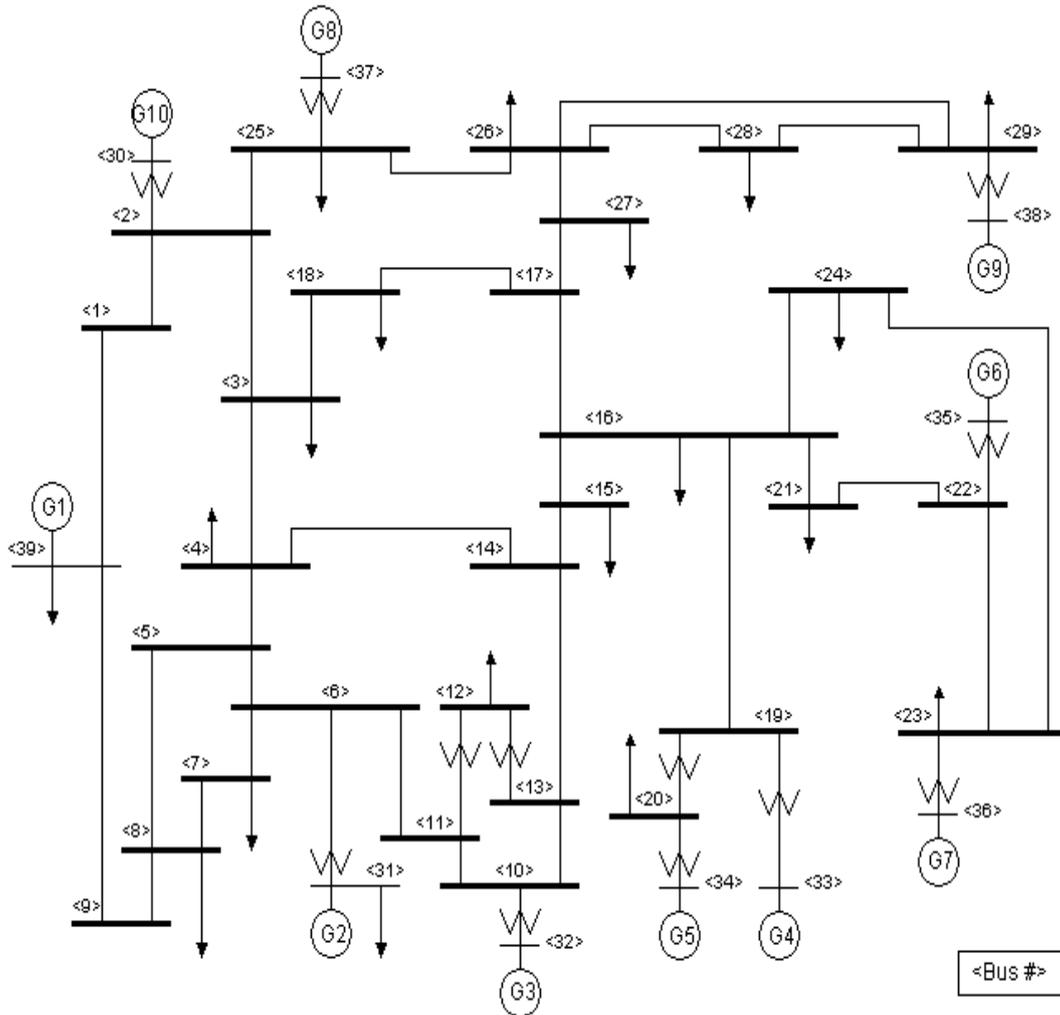


Figure 4-1. Réseau IEEE 39 bus system

4.2.1. LA SIMULATION UTILISANT LES TECHNIQUES CONVENTIONNELLES

La simulation de l'écoulement de puissance a été exécutée par le logiciel *PowerWorld simulator* (Version 18), ce logiciel performe la simulation de l'écoulement de puissance en utilisant une des méthodes conventionnelles citées dans le chapitre 3 (essentiellement la méthode de Newton Raphson).

Le tableau 4-1 montre les résultats de simulation avec *PowerWorld simulator*, ici, nous allons nous concentrer aux tensions et aux angles de phase des noeuds en PU.

Tableau.4-1. Résultats de PowerWorld Simulator

Bus	Load MW	Load MVAR	PU Volt	Angle (Deg)
1	0	0	1.05178	-8.57
2	0	0	1.05987	-6.13
3	322	2.4	1.05655	-8.95
4	500	184	1.05919	-9.78
5	0	0	1.07359	-8.77
6	0	0	1.07428	-8.14
7	233.8	84	1.06115	-10.08
8	522	176	1.05858	-10.52
9	0	0	1.05402	-10.28
10	0	0	1.06106	-5.87
11	0	0	1.06429	-6.66
12	7.5	88	1.04934	-6.64
13	0	0	1.0587	-6.52
14	0	0	1.05614	-8.03
15	320	153	1.04089	-8.31
16	329.4	32.3	1.04853	-6.91
17	0	0	1.05174	-7.87

18	158	30	1.05233	-8.69
19	0	0	1.05599	-2.33
20	680	103	0.99422	-3.72
21	274	115	1.04355	-4.55
22	0	0	1.05611	-0.16
23	247.5	84.6	1.05132	-0.35
24	308.6	-92.2	1.05258	-6.79
25	224	47.2	1.06582	-4.69
26	139	17	1.06229	-5.97
27	281	75.5	1.05173	-7.97
28	206	27.6	1.05541	-2.49
29	283.5	26.9	1.05357	0.25
30	0	0	1.0475	-3.73
31	9.2	4.6	0.982	-1.59
32	0	0	0.9831	1.79
33	0	0	0.9972	2.87
34	0	0	1.0123	1.46
35	0	0	1.0493	4.78
36	0	0	1.0635	7.46
37	0	0	1.0278	2.05
38	0	0	1.0265	7.3
39	1104	250	1.03	-10.06

4.2.2. ESTIMATION DE L'AMPLITUDE DES TENSIONS UTILISANT LES ANFIS

Dans un premier temps, on va se concentrer sur les tensions des nœuds en PU (bus 1 au bus 29) étant donné que *ANFIS Editor* performe une seule sortie pour chaque apprentissage. Donc on va procéder à l'estimations de l'amplitude des tensions nodales après on passe aux angles de phase.

La figure 4-2 montre l'architecture de l'ANFIS de notre cas d'étude :

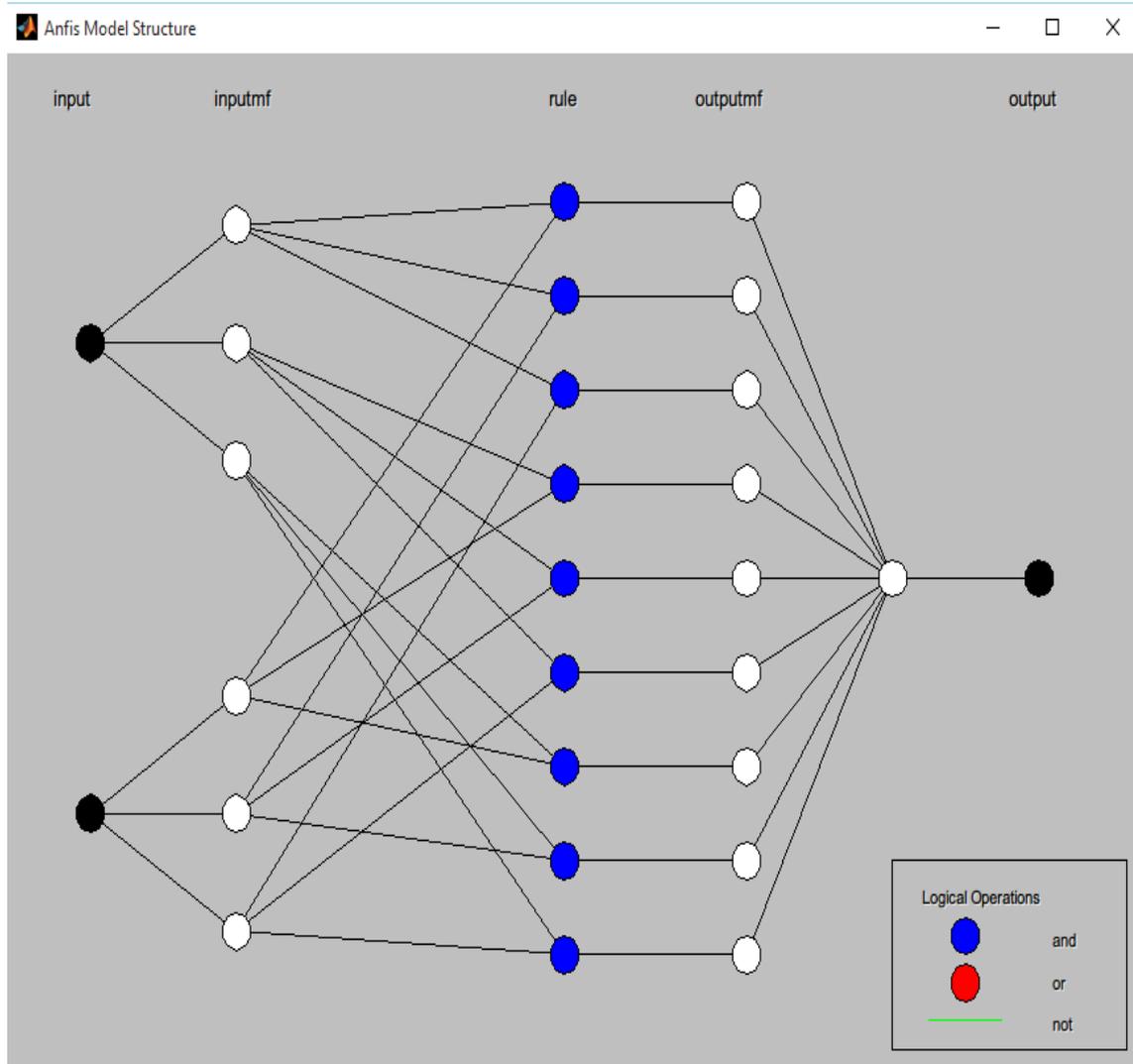


Figure 4-2. Architecture de l'ANFIS utilisé

Dans la structure de la figure 4.2:

- La couche 0 (*input*) contient la matrice d'entrée.
- La couche 1 (*inputmf*) calcule le degré (les valeurs) d'appartenance pour les paramètres de prémisse, ici, on a assigné trois fonctions d'appartenance pour les deux entrées.
- La couche 2 (*rule*) : calcule les prémices de chaque règle comme étant le produit de degré d'appartenance des variables intervenant dans les prémisses (firing strength of the rules).
- La couche 3 (*outputmf*) : normalise les résultats de la couche 2.
- La couche 4 (*output*) : fournit le résultat final. Ce résultat est sous forme d'une matrice contenant 1 colonne et 29 lignes (amplitudes de voltage des 29 barres en PU)

On a obtenu des résultats, interprétés sur des graphiques :

Figure 4-3 montre les données d'apprentissage (cercles bleus) qui sont prises du tableau 4-1 quatrième colonne qui représente les amplitudes des tensions en PU, en fonction la sortie de l'ANFIS (croix rouges) correspondantes. On a obtenu une erreur moyenne d'apprentissage de 0.0056104 PU.

L'erreur d'apprentissage moyenne correspond à la moyenne de la différence point par point entre la sortie de l'apprentissage et la sortie réelle.

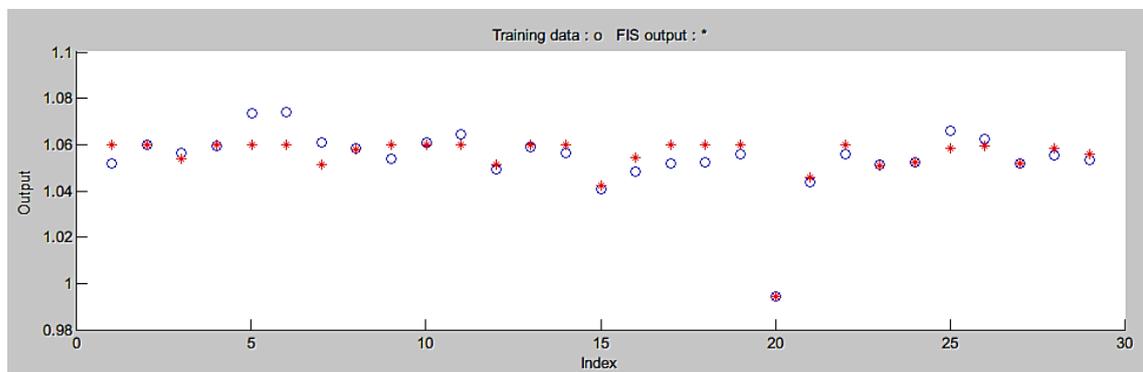


Figure 4-3. Données d'apprentissage en fonction de la sortie ANFIS

Pour tester notre ANFIS on a utilisé un arrangement aléatoire de données. La figure 4-4 montre les résultats de test avec une erreur moyenne de test de 0.0041823 PU.

L'erreur de test moyenne correspond à la moyenne de la différence point par point entre la sortie de test et la sortie réelle.

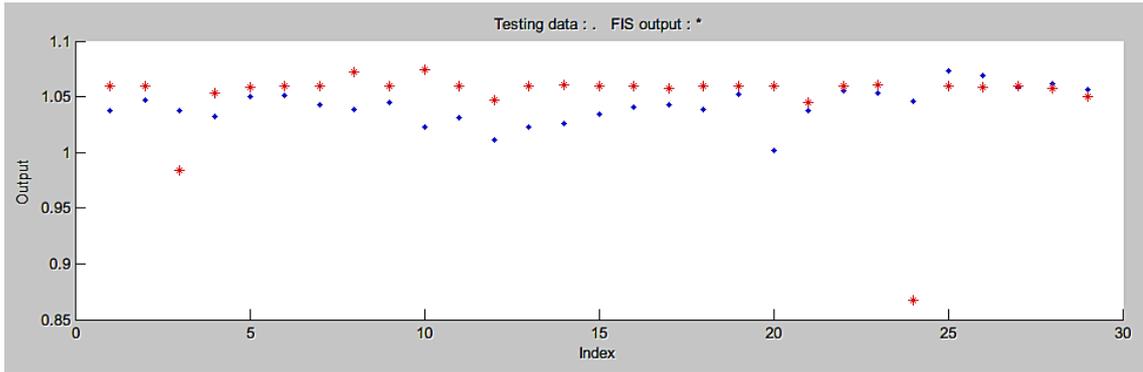


Figure 4-4. Données de test (testing) en fonction de la sortie ANFIS

Pour vérifier le réseau ANFIS, on a utilisé d'autre arrangement de donnée. La figure 4-5 montre les résultats de vérification avec une moyenne d'erreur de vérification de 0.15518 PU.

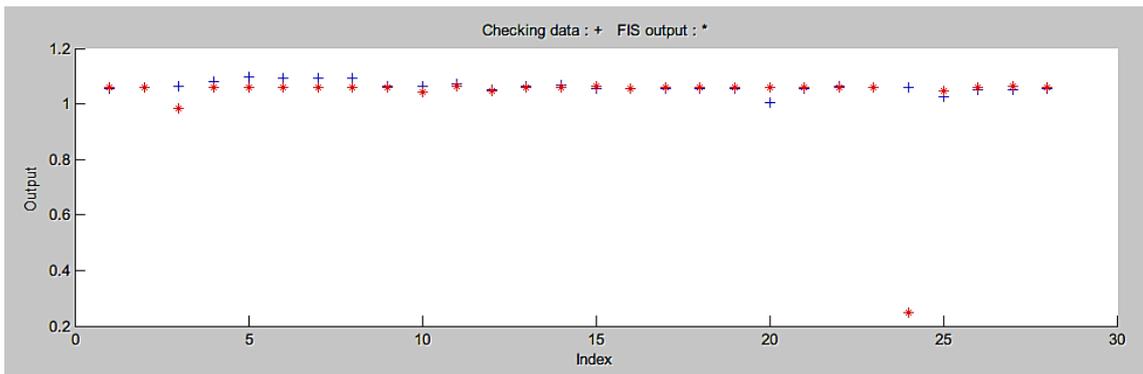


Figure 4-5. Données de vérification (checking) en fonction de la sortie ANFIS

Quelques informations concernant l'ANFIS :

- Nombre de nœuds : 35
- Nombre de paramètres linéaires : 9
- Nombre de paramètres non linéaires : 18
- Nombre total de paramètres : 27
- Nombre de paires de données d'apprentissage : 29
- Nombre de paires de données vérification : 28
- Nombre de règles floues : 9

L'apprentissage de ANFIS est achevé à l'itération 2.

Nous avons obtenu des résultats satisfaisants. Pour avoir moins d'erreur possible il faut créer plus de scénarios comme entrée c'est-à-dire enrichir de plus l'apprentissage.

Comme la plupart des techniques de l'intelligence artificielle, l'ANFIS est basé sur le programme traditionnel pour son *apprentissage, test et vérification*.

Notre but est de mettre en œuvre des techniques d'intelligence artificielle pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance. Le programme traditionnel, qui est basé sur des techniques itératives, donne la solution exacte, cependant, il consomme du temps et utilise une grande capacité de stockage, alors que, le programme ANFIS est rapide et fiable.

4.2.3. ESTIMATION DES ANGLES DE PHASE DES TENSIONS

Dans un deuxième temps, on va se concentrer sur l'angle de phase des tensions des nœuds de charge (bus 1 au bus 29). La figure 4-6 montre l'architecture de l'ANFIS de notre cas d'étude :

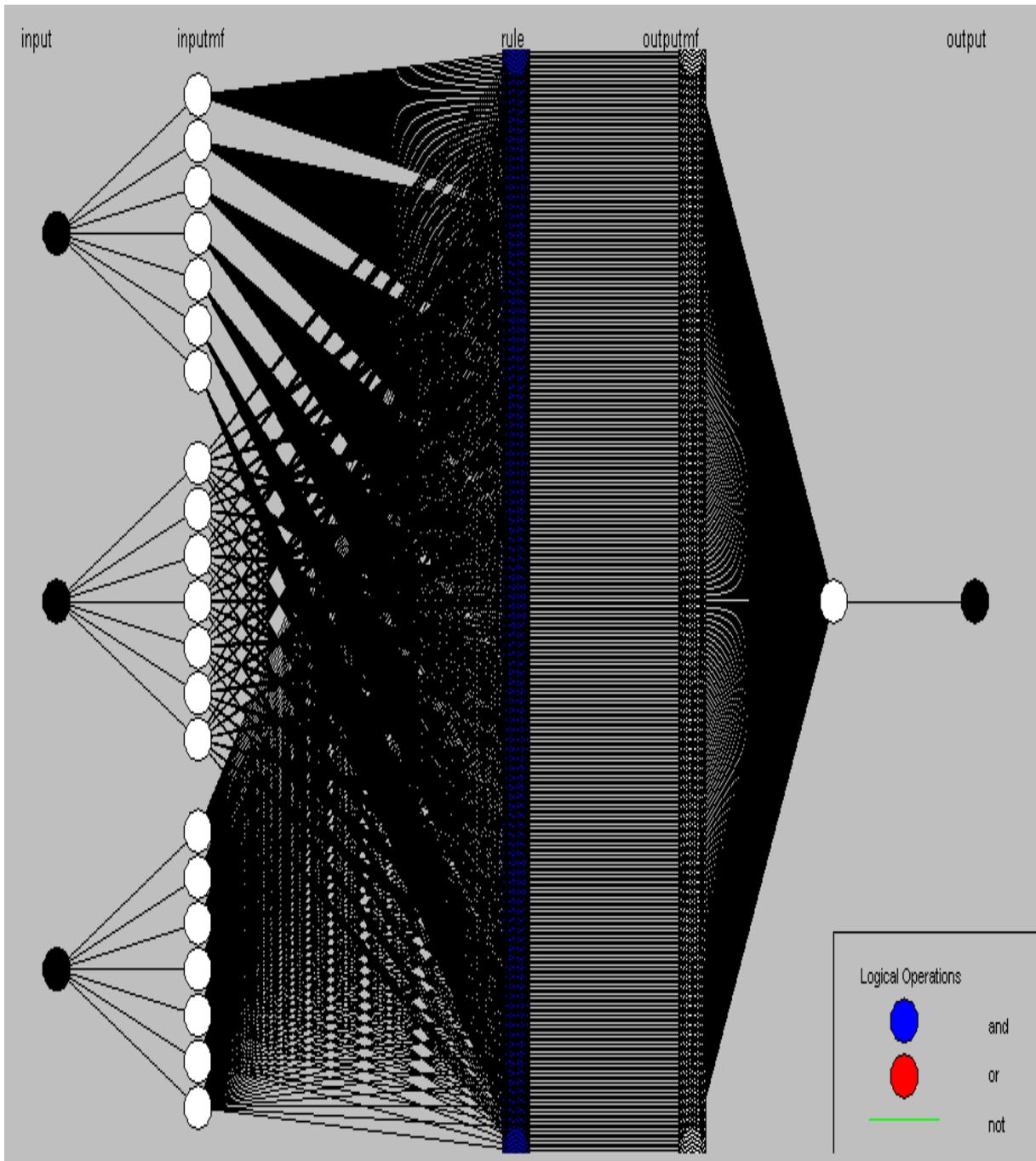


Figure 4-6. Architecture de l'ANFIS utilisé

Quelques informations concernant l'ANFIS :

- Nombre de nœuds : 734
- Nombre de paramètres linéaires : 343
- Nombre de paramètres non linéaires : 84
- Nombre total de paramètres : 427
- Nombre de paires de données d'apprentissage : 29
- Nombre de paires de données vérification : 28
- Nombre de règles floues : 343

L'apprentissage de ANFIS est achevé à l'itération 2.

La figure 4-7 montre les résultats d'apprentissage avec une erreur moyenne d'apprentissage de 1,4994 °.



Figure 4-7. Données d'apprentissage en fonction de la sortie ANFIS

Pour tester notre ANFIS on a utilisé un arrangement aléatoire de données. La figure 4-8 montre les résultats de test avec une moyenne d'erreur de test de 7,789°.

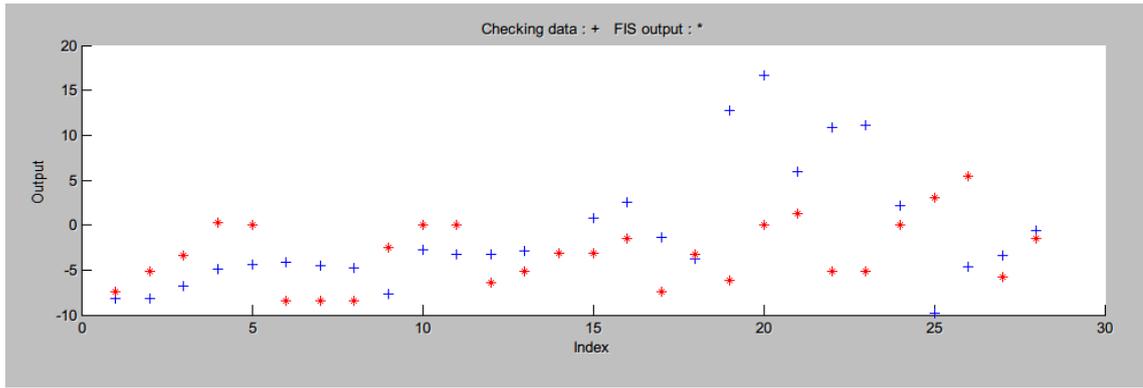


Figure 4-8. Données de test (testing) en fonction de la sortie ANFIS

Pour vérifier notre ANFIS on a utilisé un arrangement aléatoire de données. La figure 4-9 montre les résultats de vérification avec une moyenne d'erreur de 5,892°.

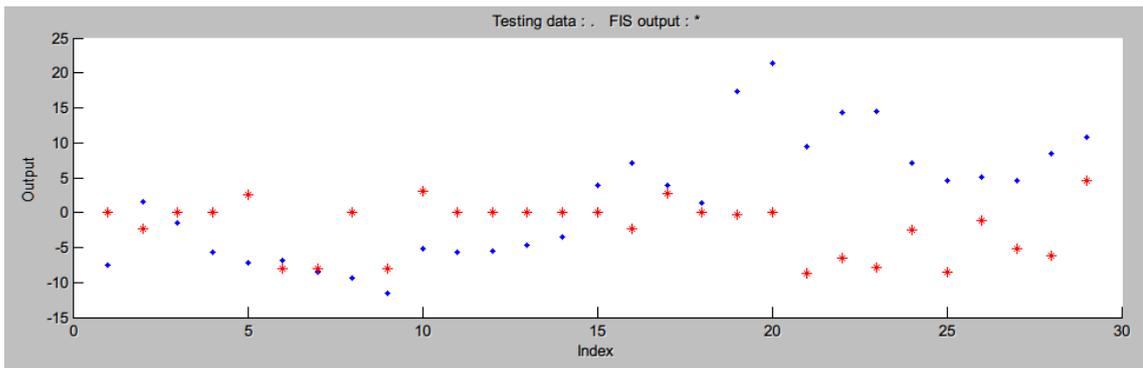


Figure 4-9. Données de vérification (checking) en fonction de la sortie ANFIS

Nous avons abouti à des résultats convaincants en matière de prédiction de l'angle de phase des tensions des nœuds de charge. Comme pour le cas de l'amplitude de la tension, pour avoir moins d'erreur et plus de performance il faut enrichir l'apprentissage.

4.3. ESTIMATION DE LA CONSOMMATION (LOAD FORECASTING) UTILISANT LES ANFIS

L'estimation de la consommation électrique (load forecasting) a de nombreuses applications dans les réseaux électriques, y compris l'achat et la production d'énergie, la commutation des charges, l'évaluation du marché, et le développement des infrastructures. Load forecasting est un processus mathématique complexe caractérisé par des données aléatoires et une multitude de variables d'entrée. Pour résoudre le problème de la prévision de charge, deux approches différentes sont utilisées, l'approche traditionnelle et celle intelligente ; les systèmes intelligents ont prouvé leur efficacité dans le domaine du forecasting. [49] [50]

Dans cette partie, nous allons prévoir les pics de nuit de consommation du système électrique algérien utilisant système adaptatif neuro-floue (ANFIS) à entrée multivariable. On va introduire l'effet de la température et le type du jour comme variables d'entrée.

L'économie algérienne est fortement liée au marché de l'énergie fossile (hydrocarbure et gaz naturel); étant donné que les prix de l'énergie sont fluctuants, la nécessité de développer de nouvelles stratégies de consommation d'énergie augmente, cela pourrait être réalisé en optimisant les opérations de réseau électrique de base, y compris: l'écoulement de puissance, le dispatching économique et les prévisions de charge.

La prévision de charge à court terme est nécessaire pour effectuer de nombreuses fonctions d'électricité, y compris l'engagement d'unité des générateurs, la coordination hydro-thermique, l'entretien à court terme, l'allocation de carburant, la puissance d'échange, l'évaluation de la transaction, ainsi que des fonctions d'analyse de réseau, de la protection et l'écoulement de puissance, la planification de contingence, le délestage des charges, et les stratégies de sécurité de charge. [51]

Une variété de méthodes et d'idées ont été essayées pour le forecasting depuis plusieurs décennies; variant du conventionnel à l'intelligence artificielle ; ces méthodes seront discutées dans la prochaine section.

Dans la prévision de la charge, la problématique réside dans trois aspects :

- Tout d'abord, *l'erreur*, cela signifie que, pour avoir une différence minimale entre les valeurs prévues et celles réelles;

- Deuxièmement, *le temps d'exécution*, en particulier avec un forecasting à court terme, où la réduction du temps de simulation est essentielle;

- Troisièmement, les paramètres externes affectant la consommation, tels que la variabilité météorologique et, à plus long terme, la variabilité du climat; la croissance de la population est l'un de ces paramètres aux côtés du bien-être économique et social de la population.

4.3.1. LES METHODES DE RESOLUTION DE L'ESTIMATION DE LA CONSOMMATION (LOAD FORECASTING)

4.3.1.1. LES METHODES UTILISANT DES SERIES TEMPORELLES

Ces méthodes traitent le modèle de la charge en tant que signal de série temporelle avec des périodicités saisonnières, hebdomadaires et quotidiennes connues. Ces périodicités donnent une prévision approximative de la charge à la saison donnée, jour de la semaine et heure de la journée. La différence entre la prédiction et la charge réelle peut être considérée comme un processus stochastique (signal aléatoire). Les techniques utilisées pour l'analyse de ce signal aléatoire sont les suivants :

- Méthode des Filtres de Kalman ;
- Méthode de Box Jenkins ;
- Processus de régression ;
- Technique d'expansion spectrale. [52] [53] [54]

4.3.1.2. LES METHODES BASEES SUR LA REGRESSION

La procédure générale de l'approche de régression est :

- Sélectionner les variables météorologiques appropriées et / ou disponibles ;
- Supposer des éléments fonctionnels de base ;
- Trouver des coefficients appropriés pour la combinaison linéaire des éléments fonctionnels de base pris en charge.

Tandis que la température est l'information la plus importante de toutes les variables météorologiques, elle est utilisée le plus souvent dans l'approche de régression. Cependant, d'autres variables telles que l'humidité, la vitesse du vent et la couverture nuageuse donnent de meilleurs résultats. La relation fonctionnelle entre les variables météorologiques et la charge n'est pas fixe mais dépend des éléments spatiotemporels.

4.3.1.3. LES SYSTEMES INTELLIGENTS

Un système intelligent peut être défini comme un système qui présente de l'intelligence pour capturer et traiter des informations. En pratique, un système intelligent est celui qui emploie des techniques d'intelligence artificielle pour remplir tout ou une partie de ses besoins de calcul.

A. RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS (voir chapitre 03)

B. SYSTEMES EXPERTS

Un système expert est un programme informatique, qui a la capacité d'agir comme un expert de la connaissance. Cela signifie que ce programme peut raisonner, expliquer et avoir sa base de connaissances étendue si de nouvelles informations sont à sa disposition. Le modèle de prévision de charge peut être construit en utilisant les connaissances sur le domaine de prévision des charges d'un expert dans le domaine. L'ingénieur de connaissance extrait cette connaissance du domaine de consommation électrique (charge). Cette connaissance est représentée comme des faits et des règles en utilisant la première logique de prédicat pour représenter les faits et les règles de production IF-THEN. Certaines des règles ne changent pas au fil du temps, certaines changent très lentement ; tandis que d'autres changent continuellement, et donc ils sont mis à jour de temps en temps. [55]

C. LES SYSTEMES FLOUS (se référer au chapitre 03)

Dans cette partie, nous allons proposer une méthode hybride dans la solution de prévision de charge, qui est une combinaison de réseaux de neurones et la logique floue, cette méthode est appelée systèmes d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS) (chapitre 03).

Notre but est de réduire le temps d'exécution et les erreurs ainsi d'avoir une prévision plus rapide et digne de confiance comparant avec d'autres méthodes utilisées dans le domaine.

4.3.2. APERÇU SUR LE RESEAU ELECTRIQUE ALGERIEN

L'élaboration d'un modèle d'estimation de consommation (load forecasting) du réseau Algérien devient de plus en plus difficile en raison des incertitudes liées aux facteurs utilisés dans sa préparation, en particulier ceux liés aux changements d'habitudes de consommation. En Algérie, ce changement est dû à la sensibilité croissante du consommateur à l'élévation de température et par conséquent, il se reflète dans les changements sur les courbes annuelles et journalières de charge d'été. Le pic de la consommation annuelle, qui a toujours été atteint en hiver, a déplacé à l'été en 2009, lorsque le pic de l'été a dépassé l'hiver de 5,1% (Fig. 4-10).

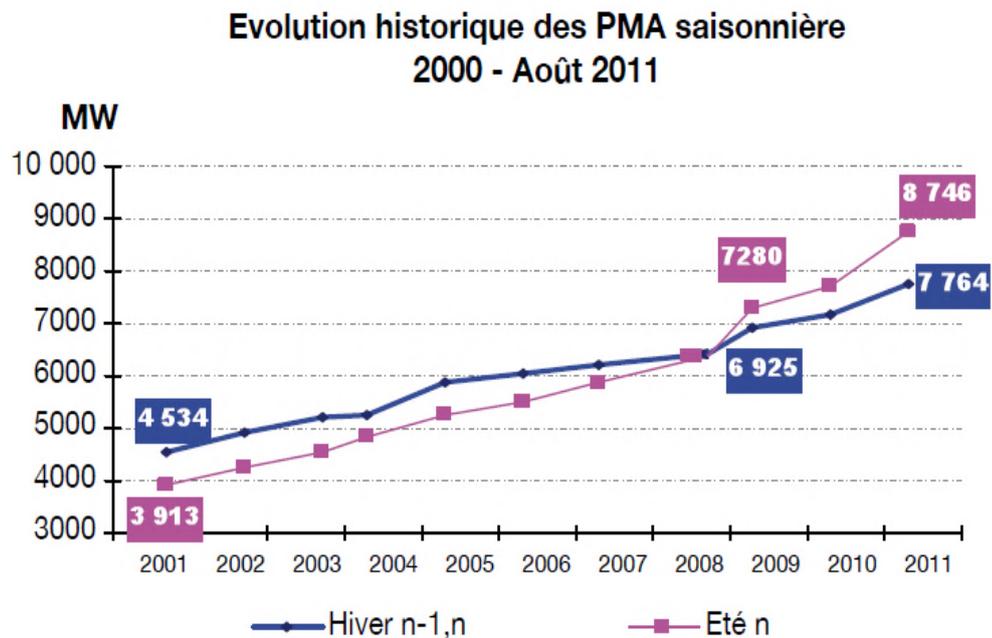


Figure 4-10. L'évolution historique de la demande maximale de 2000 à Août 2011. [56]

La consommation spécifique moyenne par client basse tension a augmenté par 2623 kW en 2009. la consommation moyenne des foyers algériens a augmenté, il est intéressant de noter que cette augmentation est principalement due aux clients de sud qui représentent seulement 10% du nombre total des clients basse tension. Cette particularité est expliquée par l'utilisation massive de la climatisation, étant donné le climat particulier des régions du sud qui se caractérise par des températures élevées durant plusieurs mois de l'année.

La consommation moyenne des clients dans la région nord est expliquée par la densité de la population. Plus de 52% de la clientèle basse tension est située au nord du pays.

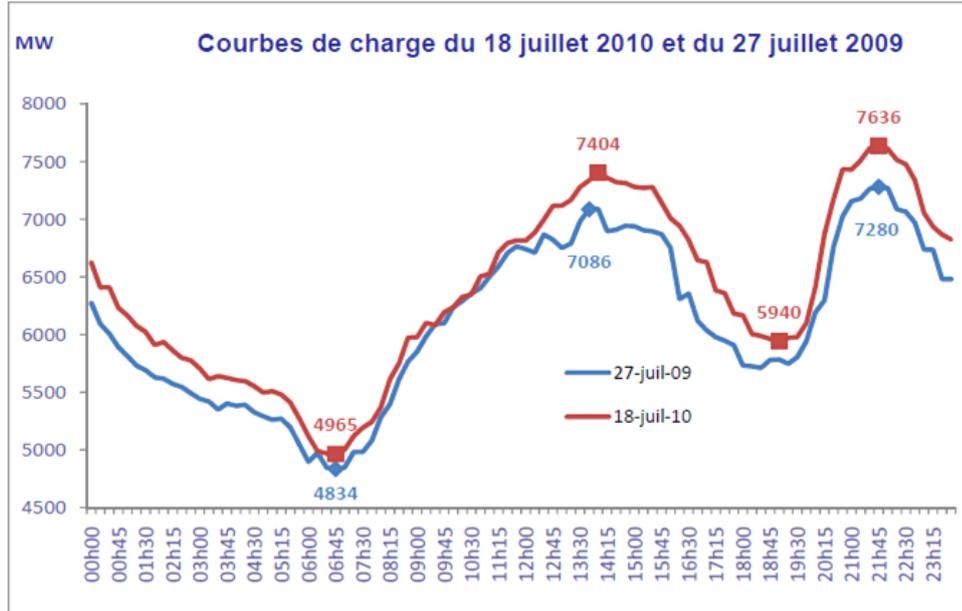


Figure 4-11. Comparaison entre la courbe de charge de deux jours avec des pics de charge [57]

4.3.3. PREPARATION DES DONNEES

Les données utilisées pour l'apprentissage, le test et la vérification de l'ANFIS sont prises de :

- L'historique de courbe de charge quotidienne de SONELGAZ [58]
- La température maximale de In Saleh (Wilaya de Tamanraset) la région la plus chaude en Algérie, et la température minimale de Sétif la région la plus froide en Algérie. Cela peut nous donner une idée générale sur la variation de la température du pays. [59]

4.3.4. ARCHITECTURE DE L'ANFIS

On a utilisé pour l'apprentissage :

- Entrées (Inputs) : matrice de [664x6], un exemple est donné dans le tableau 4-2

Tableau 4-2. Exemple de la matrice input

Journée	Temp Max	Temp Min	Journée ouvrable	Vendredi	Samedi	Pic de Génération
01/03/2010	31	6	1	0	0	5102
02/03/2010	29	3	1	0	0	5251
03/03/2010	29	8	1	0	0	5152
04/03/2010	30	4	1	0	0	5205
05/03/2010	30	3	0	1	0	4294
06/03/2010	30	7	0	0	1	5330
07/03/2010	29	3	1	0	0	5634
08/03/2010	26	3	1	0	0	5682
09/03/2010	28	1	1	0	0	5956
10/03/2010	27	-1	1	0	0	5723
11/03/2010	30	0	1	0	0	5350
12/03/2010	30	5	0	1	0	5231
13/03/2010	29	2	0	0	1	5435

La figure 4-12 montre la structure de l'ANFIS

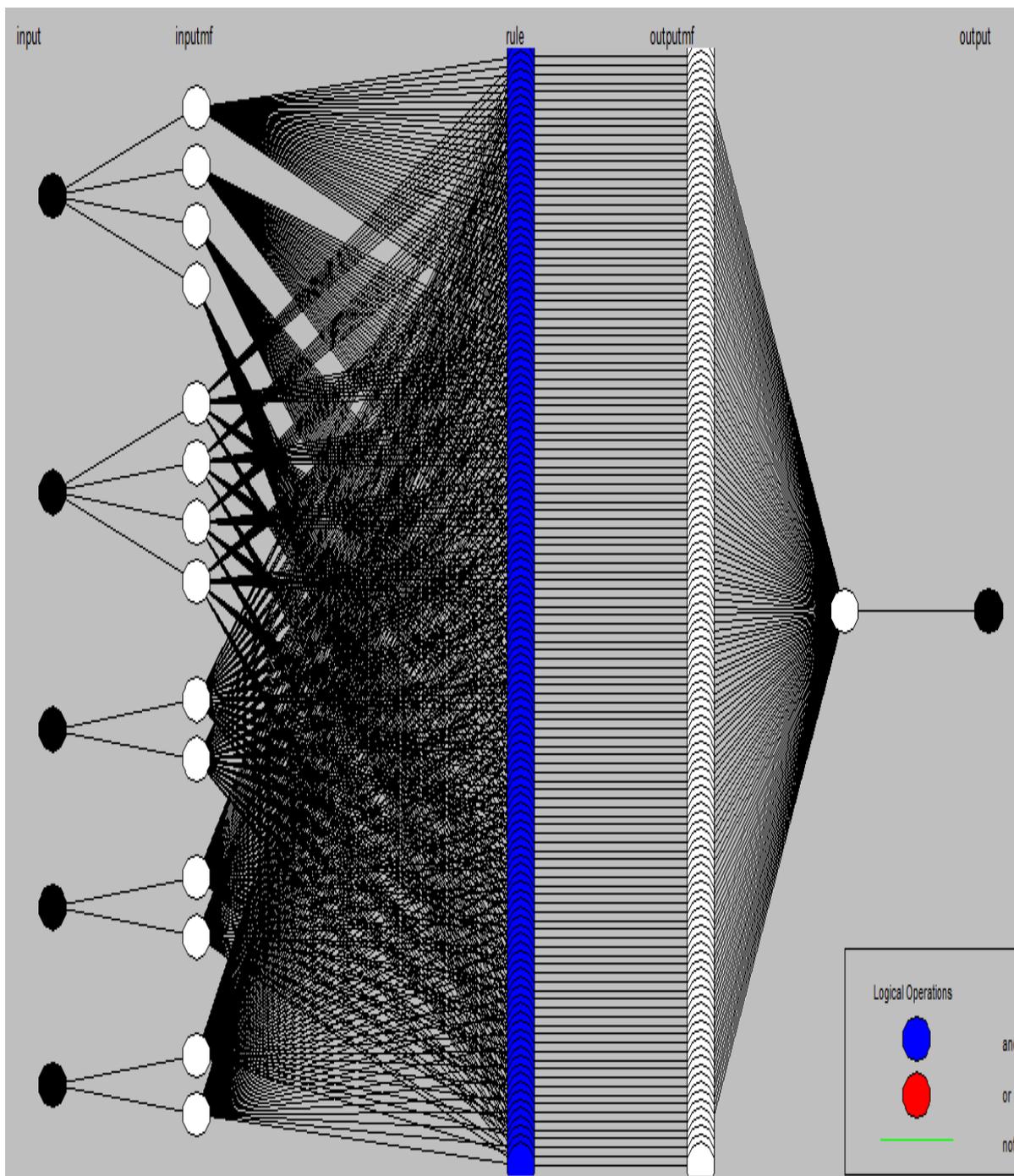


Figure 4-12. Architecture de l'ANFIS

- La couche 1 : (*input*) contient la matrice d'entrée.
- La couche 2 : (*inputmf*) calcule le degré (les valeurs) d'appartenance pour les paramètres de prémisse, ici, on a assigné 4 fonctions d'appartenance pour les deux premières entrées et 2 fonctions d'appartenance pour les trois entrées restant.
- La couche 3 (*rule*) : calcule les prémisses de chacune des 128 règles comme étant le produit de degré d'appartenance des variables intervenant dans les prémisses.
- La couche 4 (*outputmf*) : normalise les résultats de la couche 3.
- La couche 5 (*output*) : fournit le résultat final. Ce résultat représente les pics de charge prédits par le modèle.

La figure 4.13 montre la sortie de l'ANFIS (pics de production prévus représentés par des croix rouges) par rapport à l'entrée (pics réels représentée par des cercles bleus). Nous pouvons voir que l'apprentissage de l'ANFIS est satisfaisant, cela signifie que les résultats sont généralement proches des cibles avec quelques exceptions pour quelques points.

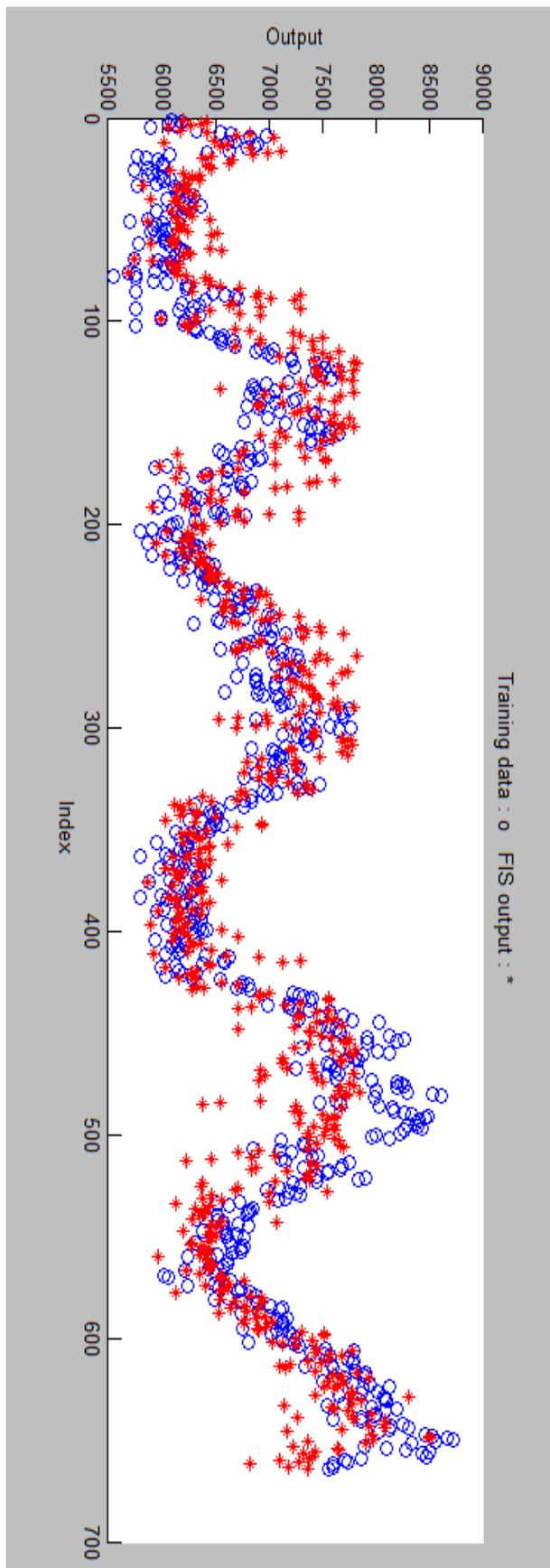


Figure 4-13. Réponse de l'ANFIS de Mars 2010 à Février 2012

4.3.5. TEST DE L'ANFIS

On a utilisé les données de Mars 2012 pour tester notre ANFIS, le résultat est représenté dans la figure 4-14

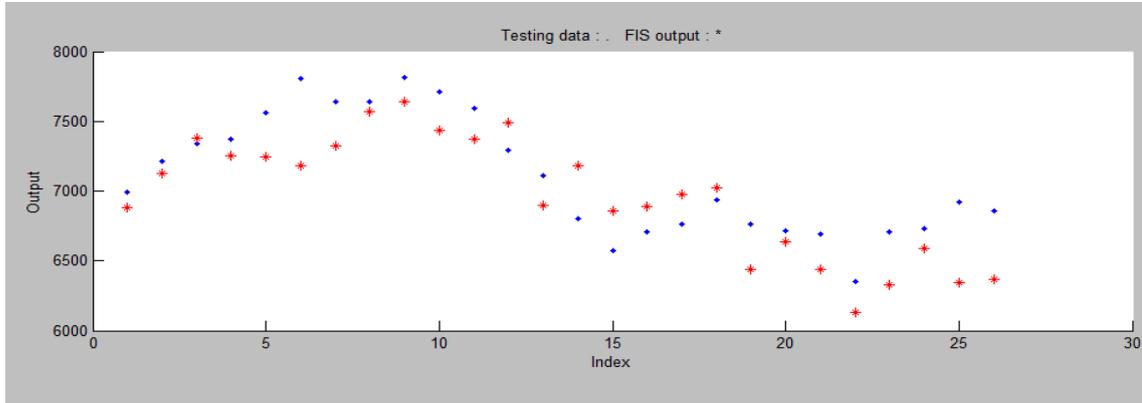


Figure 4-14. Test de réseau à l'aide des données Mars 2012

On peut déduire à partir des résultats représentés sur la figure 4-13 et la figure. 4-14 que nos prévisions en utilisant les ANFIS étaient acceptables. Pour avoir des prévisions plus précises et excellentes, nous devons utiliser plus de données d'entrée pour avoir un bon apprentissage de réseau neuronal.

Notre but est de mettre en œuvre des techniques d'intelligence artificielle pour prévision de la charge en particulier pour réseau électrique algérien. Tandis que la météo et surtout la température représente le principal paramètre influençant la consommation algérienne, la nécessité de développer un modèle de prévision de pics de consommation augmente. L'autre paramètre pris en considération est le type de la journée où nous avons remarqué trois types de jours ; jours ouvrables, les vendredis qui sont des week-ends réels et les samedis qui sont pour certains algériens une journée de travail.

4.4. CONCLUSION

On peut conclure à partir des résultats de simulation des ANFIS utilisés pour l'écoulement de puissance et le forecasting de la charge que cette méthode présente des avantages en termes de vitesse de calcul et d'espace mémoire par rapport aux méthodes conventionnelles.

Pour l'écoulement de puissance on s'est concentré aux nœuds de charge (P, Q) donc on a cherché les inconnus tels que l'amplitude et l'angle de phase des tensions nodales qui sont des caractéristiques de base de l'écoulement de puissance ainsi des réseaux électriques. [45]

Pour la seconde partie, qui est le forecasting des charges (la prévision de la consommation) nous avons, avec succès, introduit l'effet de la température et le type de la journée comme matrice d'entrée utilisée dans le processus d'apprentissage, nous avons donc une prévision de charge rapide et fiable en utilisant ANFIS. [60] [61]

Conclusion Générale

Les techniques de l'intelligence artificielle sont en train de s'implanter dans pratiquement tous les domaines techniques, cela est grâce à l'évolution de l'informatique.

Parmi les techniques d'intelligence artificielle les plus utilisées, on trouve les réseaux de neurone et la logique floue. La combinaison de ces deux techniques en systèmes neuro-flous adaptatifs ou *adaptive neurofuzzy inference systems* ANFIS a donné une nouvelle méthode novatrice profitant des avantages des deux méthodes et surmonte leurs inconvénients.

Dans cette thèse, nous nous sommes concentrés sur l'écoulement de puissance, et plus précisément sur la prédiction de l'amplitude et l'angle de phase des tensions des jeux de barres de charge. La deuxième partie de notre travail est la prédiction de la consommation électrique du réseau Algérien.

L'objectif essentiel de cette thèse est l'optimisation des deux concepts parmi ceux qui sont essentiels des réseaux électriques tels que l'écoulement de puissance et la prédiction de la charge (load forecasting) de manière à contribuer à préparer le réseau électrique pour devenir un réseau intelligent ou *smart grid*.

Notre étude a donné des prévisions d'écoulement de puissance et du load forecasting rapides et fiables en utilisant ANFIS, ce qui nous facilite, donc une meilleure utilisation de nombreuses applications dans les réseaux électriques, y compris l'achat et la production d'énergie, la commutation des charges, l'évaluation du marché, et le développement des infrastructures.

Pour l'avenir, on opte à faire une contribution pour automatiser et développer le réseau Algérien, pour qu'il soit un réseau totalement intelligent, en introduisant les techniques de l'intelligence artificielle dans tous les disciplines des réseaux électriques.

Annexes

ANNEXE 1

A1. FORMATION DES MATRICES DE RÉSEAU

Les formules théoriques qui permettent de construire les matrices de transfert à partir du réseau élémentaire sont rarement utilisées dans la pratique. En effet, le réseau que l'on étudie à un instant donné dans la plupart des cas issu des modifications d'un réseau antérieur par adjonction ou suppression de certains éléments (lignes, câbles, appareillage, générateurs...), il serait inefficace de reconstruire intégralement les matrices de transfert sans tenir compte de cette situation.

A1.1. FORMATION DE LA MATRICE D'ADMITTANCE Y_{bus}

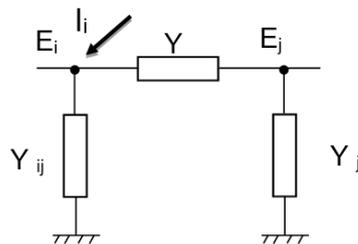


Figure A1-1. Élément du réseau (ligne, câble)

Considérons un élément de réseau constitué d'un nœud i relié à travers des composants de réseau à des nœuds $1, 2, \dots, j, k, \dots$ chaque composant est représenté par un quadripôle formé d'un élément en série entre les nœuds i et j et de plusieurs éléments en parallèle relié au nœud de référence (défini comme le nœud de référence des tensions) ainsi que le montre le schéma de la figure A1-1.

Le schéma de la figure A1-2 permet d'illustrer la mise en équations d'une partie de réseau formé d'un nœud i connecté à des nœuds voisins $1 \dots j, k$.

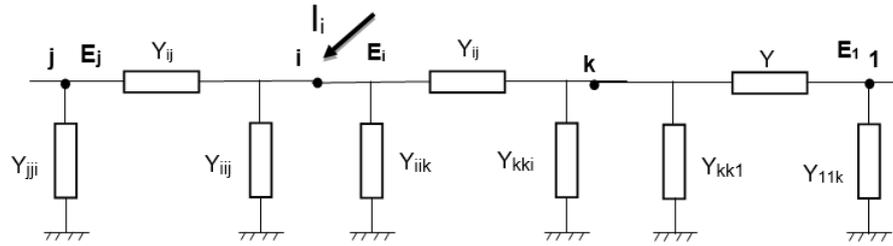


Figure A1-2. Partie de réseau

Le nœud i est relié au nœud j par l'admittance y_{ij} et au nœud de référence par l'admittance y_{iij} .

Le nœud j est relié au nœud i par l'admittance y_{ij} et au nœud de référence par l'admittance y_{jji} et au nœud k par l'admittance y_{jk} et au nœud de référence coté nœud k par y_{jjk} .

Soient $E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_j$ les tensions complexes qui apparaissent aux nœuds $1, 2, \dots, i, \dots, j$, quand un courant I_i est injecté au nœud i .

Ces tensions et le courant I_i sont reliés par l'équation :

$$\begin{aligned} I_i &= (\sum_{j \neq 1} y_{iij}) E_i + (\sum_{j \neq 1} y_{ij})(E_i - E_j) \\ I_i &= (\sum_{j \neq 1} (y_{iij} + y_{ij})) E_i + \sum_{j \neq 1} (-y_{ij} E_j) \\ &= Y_{ii} E_i + \sum_{j \neq 1} Y_{ij} E_j \end{aligned} \quad (\text{A1.1})$$

Nous déduisons l'expression des termes généraux de Y_{bus} en fonction de l'admittance des éléments du réseau par identification des termes de Y_{bus} :

$$Y_{ii} = \sum_{j \neq 1} (y_{iij} + y_{ij}) \quad (\text{A1.2})$$

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad (\text{A1.3})$$

A1.2. FORMATION DE LA MATRICE D'IMPEDANCE Z_{bus}

La formation de la matrice Z_{bus} est simple car elle résulte d'une composition directe des admittances. D'autre part, il n'y a qu'un nombre restreint de connexions entre les différents éléments du réseau ce qui lui donne la structure d'une matrice « creuse », c'est-à-dire qu'il n'y a qu'un petit nombre d'éléments non nuls, ce qui facilite encore sa construction.

En revanche cette structure particulière n'a pas d'influence sur la constitution de Z_{bus} qui est son inverse. En fait, cette propriété particulière de Y_{bus} pourrait être utilisée pour la construction directe de Z_{bus} car l'inversion d'une matrice n'est autre que la résolution d'un nombre de systèmes linéaires égal à l'ordre de la matrice à inverser. Or la résolution d'un système linéaire à matrice creuse par triangularisation de cette matrice est facilitée lorsque cette dernière n'a qu'un petit nombre d'éléments non nuls. Cependant la grande taille des matrices Y_{bus} et Z_{bus} dont les éléments sont de surcroît complexes rend toute construction de Z_{bus} par inversion directe très coûteuse en temps de calcul.

En outre, la structure d'un réseau à un instant donné est le résultat d'un petit nombre de modifications du réseau antérieur de ce réseau par ajout ou suppression de quelques éléments bien identifiés. La matrice Z_{bus} de ce réseau pourra donc se déduire de celle du réseau dans son état antérieur en tenant compte des changements induits par les opérations de modification.

Le réseau antérieur comprend m accès qui sont numérotés de 1 à m ainsi que l'indique la figure qui correspond à une matrice Z_{bus} de dimension $m \times m$. Nous allons étudier les modifications induites sur cette matrice par les deux ajouts illustrés sur la figure A1-3.

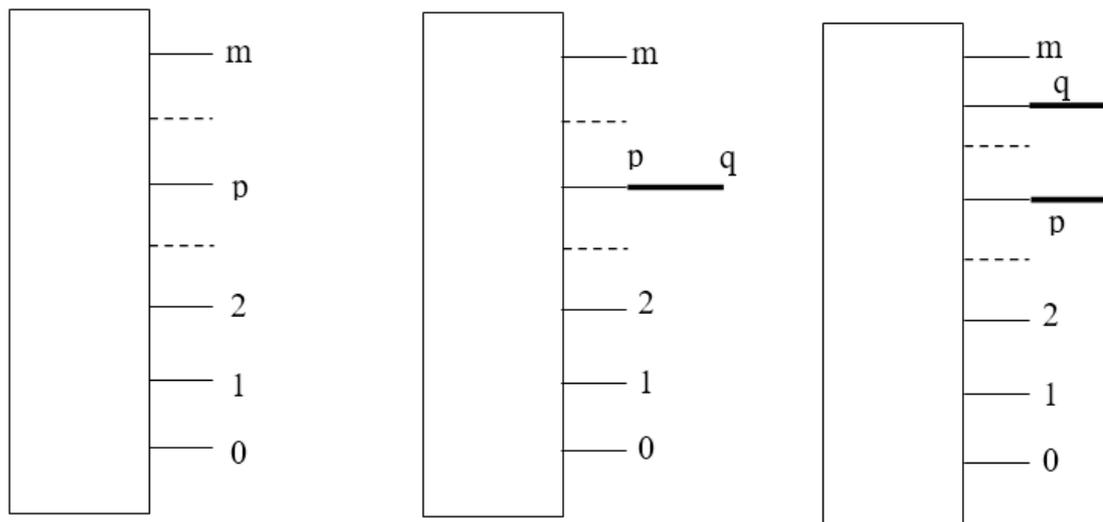


Figure A1-3. Ajout de branche et /ou corde

A1.2.1. ADDITION D'UNE BRANCHE ENTRE LES ACCES P ET Q

Cette opération correspond dans la pratique à la création d'un nouveau poste pour le réseau de distribution en construisant depuis un accès défini une nouvelle ligne qui va

alimenter ce poste. En général cette ligne, qui se situe sur un trajet nouveau, n'a pas de couplage électromagnétique avec des lignes existantes, elle peut donc en côtoyer certaines sur une partie de son trajet ce qui nous conduira à envisager le cas général bien que ce dernier soit relativement rare.

Cette branche est supposée avoir dans le réseau élémentaire une admittance propre $\mathbf{y}_{pq,pq}$ ou une impédance propre $\mathbf{Z}_{pq,pq}$. Elle peut être couplée avec une branche \mathbf{rs} à travers une admittance de couplage \mathbf{y}_{pqrs} .

Cette opération va transformer un réseau à m accès en un réseau à $(m + 1)$ accès, ce qui va transformer \mathbf{Z}_{bus} d'une matrice de dimension $m \times m$ en une nouvelle matrice de dimension $(m + 1) \times (m + 1)$. Cette nouvelle matrice s'écrit :

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ \dots \\ E_p \\ \dots \\ \dots \\ E_m \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & \dots & Z_{1p} & \dots & \dots & Z_{1m} & Z_{1q} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & \dots & Z_{2p} & \dots & \dots & Z_{2m} & Z_{2q} \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ Z_{p1} & Z_{p2} & \dots & \dots & Z_{pp} & \dots & \dots & Z_{pm} & Z_{pq} \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \dots & \dots & Z_{mp} & \dots & \dots & Z_{mm} & Z_{mq} \\ Z_{q1} & Z_{q2} & \dots & \dots & Z_{qp} & \dots & \dots & Z_{qm} & Z_{qq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ \dots \\ I_p \\ \dots \\ \dots \\ I_m \\ I_q \end{bmatrix} \quad (\text{A1.4})$$

Le nouvel accès q est connecté aux précédents à travers le réseau par les impédances de type \mathbf{Z}_{qp} .

A1.2.2. ADDITION D'UNE CORDE

Cette opération correspond au renforcement du réseau par la construction d'une nouvelle ligne entre deux nœuds existants. Elle ne modifie pas le nombre de nœuds et donc la taille et l'ordre de la matrice mais l'insertion de cette nouvelle impédance va modifier l'ensemble des termes de \mathbf{Z}_{bus} .

Le calcul des éléments modifiés sera fait en deux opérations distinctes et successives :

- Dans un premier temps on insère entre les nœuds p et q un nœud fictif l et une source de tension e_l définie de manière à ce que le courant i_{pq} soit nul $i_{pq} = 0$. Au cours de cette opération, la dimension de la matrice \mathbf{Z}_{bus} est augmentée d'une unité.

- Le nœud fictif 1 est éliminé et la source de tension court-circuitée, ce qui ramène la dimension de la matrice à sa valeur initiale en modifiant tous ses éléments au cours de cette seconde opération. [62]

A1.3. EXEMPLE DE CONVERSION DE LA MATRICE Y A LA MATRICE Z

Considérons un système à quatre bus hypothétique, la matrice Y est donnée, on va la transformer en une matrice Z

$$\bar{Y} = \begin{bmatrix} +7 & -2 & 0 & -3 \\ -2 & 5 & -3 & 0 \\ 0 & -3 & 4 & 0 \\ -3 & 0 & 0 & 6 \end{bmatrix}$$

Pivot (3,3) :

$$Y_{31} = \frac{Y_{31}}{Y_{33}} = 0$$

$$Y_{32} = \frac{Y_{32}}{Y_{33}} = \frac{-3}{4} = 0,75$$

$$Y_{33} = \frac{1}{Y_{33}} = 0,25$$

$$Y_{34} = \frac{Y_{34}}{Y_{33}} = 0$$

$$Y_{13} = -\frac{Y_{13}}{Y_{33}} = 0$$

$$Y_{23} = -\frac{Y_{23}}{Y_{33}} = -\left(-\frac{3}{4}\right) = 0,75$$

$$Y_{43} = -\frac{Y_{43}}{Y_{33}} = 0$$

$$Y_{22} = Y_{22} - \frac{Y_{23}Y_{32}}{Y_{33}} = 5 - \frac{(-3)(-3)}{4} = 2,75 \text{ etc.}$$

la matrice transformée est :

$$\begin{bmatrix} +7 & -2 & 0 & -3 \\ -2 & 2,75 & 0,75 & 0 \\ 0 & -0,75 & 0,25 & 0 \\ -3 & 0 & 0 & 6 \end{bmatrix}$$

après, utilisons le pivot (4,4). la matrice transformée est :

$$\begin{bmatrix} 5,5 & -2 & 0 & 0,5 \\ -2 & 2,75 & 0,75 & 0 \\ 0 & -0,75 & 0,25 & 0 \\ -0,5 & 0 & 0 & 0,167 \end{bmatrix}$$

après, utilisons le pivot (2,2) :

$$\begin{bmatrix} 4,045 & 0,727 & 0,545 & 0,5 \\ -0,727 & 0,364 & 0,273 & 0 \\ 0,545 & 0,273 & 0,455 & 0 \\ -0,5 & 0 & 0 & 0,167 \end{bmatrix}$$

Finalement le pivot (1,1) donne la matrice Z :

$$\bar{Z} = \begin{bmatrix} 0,2470 & 0,1797 & 0,1350 & 0,1236 \\ 0,1797 & 0,4950 & 0,3709 & 0,0898 \\ 0,1350 & 0,3709 & 0,528 & 0,0674 \\ 0,1236 & 0,0898 & 0,0674 & 0,2289 \end{bmatrix}$$

ANNEXE 2

A2.1. TACHES D'APPRENTISSAGE

Les différentes catégories de tâches que l'on peut vouloir réaliser avec un réseau de neurones sont énumérées ci-dessous :

A2.1.1 APPROXIMATION

Soit la fonction g telle que

$$d = g(p) \quad (\text{A2.1})$$

où p est l'argument de la fonction (un vecteur) et d la valeur (un scalaire) de cette fonction évaluée en p . Supposons maintenant que la fonction $g(\cdot)$ est inconnue. La tâche d'approximation consiste alors à concevoir un réseau de neurones capable d'associer les éléments des couples entrée-sortie : $\{(p_1, d_1), (p_2, d_2), \dots, (p_Q, d_Q)\}$. Ce problème peut être résolu à l'aide d'un apprentissage supervisé sur les Q exemples, avec les p_i représentant les stimuli, et les d_i représentant les sorties désirées pour chacun de ces stimuli, avec $i = 1, 2, \dots, Q$. Ou inversement, on peut aussi dire que l'apprentissage supervisé est un problème d'approximation de fonction ;

A2.1.2. ASSOCIATION

Il en existe deux types : *l'auto-association* et *l'hétéro-association*. Le problème de l'auto-association consiste à mémoriser un ensemble de patrons (vecteurs) en les présentant successivement au réseau. Par la suite, on présente au réseau une version partielle ou déformée d'un patron original, et la tâche consiste à produire en sortie le patron original correspondant. Le problème de l'hétéro-association consiste quant à lui à associer des paires de patrons : un patron d'entrée et un patron de sortie. L'auto-association implique un apprentissage non supervisé, alors que l'hétéro-association requiert plutôt un apprentissage supervisé.

A2.1.3. CLASSEMENT

Pour cette tâche, il existe un nombre fixe de catégories (classes) de stimuli d'entrée que le réseau doit apprendre à reconnaître. Dans un premier temps, le réseau doit entreprendre une phase d'apprentissage supervisée durant laquelle les stimuli sont présentés en entrée et les catégories sont utilisées pour former les sorties désirées,

généralement en utilisant une sortie par catégorie. Ainsi, la sortie 1 est associée à la catégorie 1, la sortie 2 à la catégorie 2, etc. Pour un problème comportant Q catégories, on peut par exemple fixer les sorties désirées $d = [d_1, d_2, \dots, d_Q]^T$ à l'aide de l'expression suivante :

$$d_i = \begin{cases} 1 & \text{si le stimulus appartient à la catégorie } i \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}, i = 1, \dots, Q. \quad (\text{A2.2})$$

Par la suite, dans une phase de reconnaissance, il suffira de présenter au réseau n'importe quel stimulus inconnu pour pouvoir procéder au classement de celui-ci dans l'une ou l'autre des catégories. Une règle simple de classement consiste, par exemple, à choisir la catégorie associée avec la sortie maximale.

A2.1.4 PREDICTION

La notion de prédiction est l'une des plus fondamentales en apprentissage. Il s'agit d'un problème de traitement temporel de signal. En supposant que nous possédons M échantillons passés d'un signal, $x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-M)$, échantillonnés à intervalle de temps fixe, la tâche consiste à prédire la valeur de x au temps t . Ce problème de prédiction peut être résolu grâce à un apprentissage par correction des erreurs, mais d'une manière non supervisée (*sans professeur*), étant donné que les valeurs de sortie désirée peuvent être inférées directement de la série chronologique. Plus précisément, l'échantillon de $x(t)$ peut servir de valeur désirée et le signal d'erreur pour l'adaptation des poids se calcule simplement par l'équation suivante :

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t | t-1, t-2, \dots, t-M), \quad (\text{A2.3})$$

où $x(t)$ désigne la sortie désirée et $\hat{x}(t | t-1, t-2, \dots, t-M)$ représente la sortie observée du réseau étant donné les M échantillons précédents. La prédiction s'apparente à la construction d'un modèle physique de la série chronologique. Dans la mesure où le réseau possède des neurones dont la fonction de transfert est non-linéaire, le modèle pourra lui-aussi être non-linéaire.

A2.1.5 COMMANDE

La commande d'un processus est une autre tâche d'apprentissage que l'on peut aborder à l'aide d'un réseau de neurones. Considérons un système dynamique non-linéaire $\{u(t), y(t)\}$ où $u(t)$ désigne l'entrée du système et $y(t)$ correspond à la réponse de celui-ci. Dans le cas général, on désire commander ce système de manière à ce qu'il se comporte selon un modèle de référence, souvent un modèle linéaire, $\{r(t), d(t)\}$, où pour tout temps $t \geq 0$, on arrive à produire une commande $u(t)$ telle que :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |d(t) - y(t)| = 0 \quad (\text{A2.4})$$

de manière à ce que la sortie du système suit de près celle du modèle de référence. Ceci peut se réaliser grâce à certains types de réseaux supervisés.

Dans les sections qui suivent, nous allons aborder des réseaux spécifiques en commençant par l'un des plus connus et des plus utilisés : le perceptron simple et le perceptron multicouches et son algorithme de *rétropropagation* des erreurs. [63]

A2.2 REGLE DE CORRECTION D'ERREUR

La règle est fondée sur la correction de l'erreur observée en sortie. Soit $a_i(t)$ la sortie que l'on obtient pour le neurone i au temps t . Cette sortie résulte d'un stimulus $p(t)$ que l'on applique aux entrées du réseau dont un des neurones correspond au neurone i . Soit $d_i(t)$ la sortie que l'on désire obtenir pour ce même neurone i au temps t . Alors, $a_i(t)$ et $d_i(t)$ seront généralement différents et il est naturel de calculer l'erreur $e_i(t)$ entre ce qu'on obtient et ce qu'on voudrait obtenir :

$$e_i(t) = d_i(t) - a_i(t) \quad (\text{A2.5})$$

et de chercher un moyen de réduire autant que possible cette erreur. Sous forme vectorielle, on obtient :

$$e(t) = d(t) - a(t) \quad (\text{A2.6})$$

Avec $e(t) = [e_1(t) e_2(t) \dots e_i(t) \dots e_s(t)]$ qui désigne le vecteur des erreurs observées sur les S neurones de sortie du réseau. L'apprentissage par correction des erreurs consiste à minimiser un *indice de performance* F basé sur les signaux d'erreur

$e_i(t)$, dans le but de faire converger les sorties du réseau avec ce qu'on voudrait qu'elles soient. Un critère très populaire est *la somme des erreurs quadratiques* :

$$F(e(t)) = \sum_{i=1}^s e_i^2(t) = e(t)^T e(t) \quad (\text{A2.7})$$

Maintenant, il importe de remarquer que les paramètres libres d'un réseau sont ses poids. Prenons l'ensemble de ces poids et assemblons les, sous la forme d'un vecteur $w(t)$ au temps t . Pour minimiser $F(e(t)) = F(w(t)) = F(t)$, nous allons commencer par choisir des poids initiaux ($t = 0$) au hasard, puis nous allons modifier ces poids de la manière suivante :

$$w(t + 1) = w(t) + \eta x(t) \quad (\text{A2.8})$$

où le vecteur $x(t)$ désigne la direction dans laquelle nous allons chercher le minimum et η est une constante positive déterminant l'amplitude du pas dans cette direction (*la vitesse d'apprentissage*). L'objectif est de faire en sorte que $F(t + 1) < F(t)$. Mais comment peut-on choisir la direction x pour que la condition précédente soit respectée ? Considérons la série de Taylor de 1^{er} ordre autour de $w(t)$:⁹

$$F(t + 1) = F(t) + \nabla F(t)^T \Delta w(t) \quad (\text{A2.9})$$

où $\nabla F(t)$ désigne *le gradient* de F par rapport à ses paramètres libres (les poids w) et $\Delta w(t) = w(t + 1) - w(t)$. Or, pour que $F(t + 1) < F(t)$, il faut que la condition suivante soit respectée :

$$\nabla F(t)^T \Delta w(t) = \eta \nabla F(t)^T x(t) < 0 \quad (\text{A2.10})$$

⁹ la série de Taylor de $F(x)$ du 1^{er} ordre de la fonction $F(x)$ autour de a est :

$$F(x) = F(a) + \frac{F'(a)}{1!} (x - a)$$

Dans notre cas $F(x) = F(t + 1) = F(w(t + 1))$ et on cherche la décomposition de Taylor autour de $w(t)$

$$F(w(t + 1)) = F(w(t)) + F'(w(t))(w(t + 1) - w(t))$$

$$F(w(t + 1)) = F(w(t)) + F'(w(t))\Delta w(t)$$

$$F(t + 1) = F(t) + F'(t)\Delta w(t)$$

Avec $F'(t) = \nabla(F(t))$ désigne le gradient de F , donc : $F(t + 1) = F(t) + \nabla F(t)^T \Delta w(t)$

N'importe quel vecteur $x(t)$ qui respecte l'inégalité de l'équation précédente pointe donc dans une direction qui *diminue* F . On parle alors d'une direction de «*descente*». Pour obtenir une descente maximum, étant donnée $\eta > 0$, il faut que le vecteur $x(t)$ *pointe dans le sens opposé au gradient* car c'est dans ce cas que le produit scalaire sera minimum :

$$x(t) = -\nabla F(t) \quad (\text{A2.11})$$

Ce qui engendre la règle dite de «*descente du gradient*» :

$$\Delta w(t) = -\eta \nabla F(t) \quad (\text{A2.12})$$

Dans l'espace des poids, la figure A2.1 montre les courbes de niveau de F représentées par des ellipses hypothétiques. La flèche en pointillés montre la direction optimale pour atteindre le minimum de F . La flèche pleine montre la direction du gradient qui est perpendiculaire à la courbe de niveau en $w(t)$.

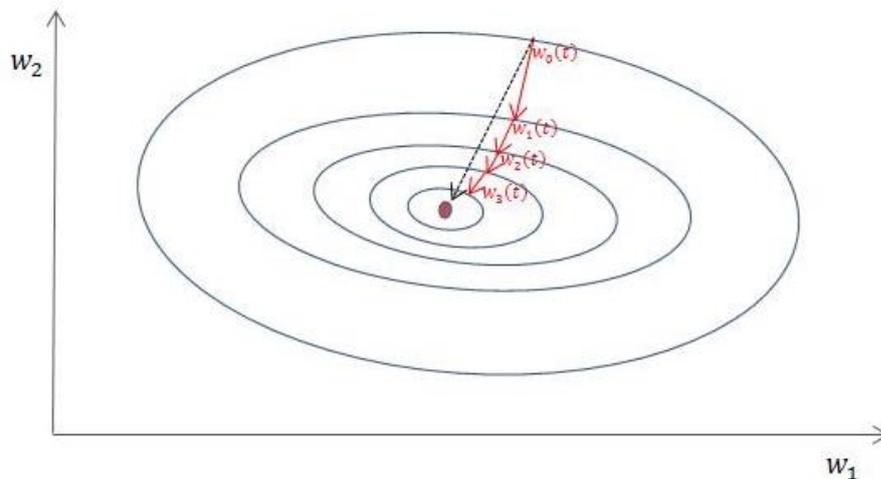


Figure. A2.1– Trajectoire de la descente du gradient

La règle de la correction des erreurs est utilisée pour beaucoup de réseaux de neurones artificiels, bien qu'elle ne soit pas plausible biologiquement. En effet, comment le cerveau pourrait-il connaître a priori les sorties qu'il doit produire ? Cette règle ne peut être utilisée que dans un contexte d'apprentissage supervisé.

Références Bibliographiques

- [1] Dale R. PATRICK et Stephen W. FARDO. Electrical distribution systems, 2nd edition. The Fairmont Press, 2009, 471 pages.
- [2] S. N. SINGH. Electric power generation, transmission and distribution, 2nd edition, 2008, 452 pages.
- [3] Theodore WILDI et Gilbert SYBILLE. Électrotechnique. 4^{ième} édition, De Boeck université, 2005, 1214 pages.
- [4] John J. GRAINGER, Jr et William D. STEVENSON. Power System Analysis, McGraw-Hill Education Pvt Limited. 2003, 785 pages.
- [5] Centrale thermique de Vouvry (Chavalon). Centrale à cycle combiné. [en ligne]. <http://www.chavalon.ch/centrale-%C3%A0-cycle-combin%C3%A9> [page consultée le : 16/05/2016].
- [6] Connaissance des énergies newspaper. Qu'est-ce qui différencie une centrale à gaz à cycle combiné d'une centrale classique. [Image en ligne]. (consultée le 15 avril 2014).
- [7] Leonard L. GRIGSBY. Electric power generation, transmission, and distribution third edition. The electric power engineering handbook, CRS press, Taylor & Francis Group. 2012, 750 pages.
- [8] Groupe EDF. Les différents types de réacteurs nucléaires. [en ligne] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differents-types-de-reacteurs-nucleaires> [page consultée le 20/06/2016].
- [9] Stephen W. Fardo et Dale R. Patrick. Electrical power systems technology. Third edition, CRS press, Taylor & Francis Group. 2009, 481 pages.
- [10] Dictionnaire interactif des sciences et technologies. Produire de l'électricité avec la chaleur du soleil. [Image en ligne] < http://www.sciences-en-ligne.com/DIST/News/actu.php?id_rubrique=33&id_actu=269#.V2LbTJHhDIU> (consultée le 15 mai 2016).
- [11] Syndicat départemental d'énergie de Tarn. Documentation : Réseau électrique. [en ligne]. <http://www.sdet.fr/node/39> [page consultée le : 12/06/2016].
- [12] Publication UTE C 18-15. La norme NF C 18-510 et les guides UTE associés.2010.

- [13] Guide de conception des réseaux électriques industriels, groupe Schneider. Les architectures de réseaux.
- [14] Patrick Jacob, Schéma de principe de la distribution haute tension HTA. [en ligne]. http://jacob.patrick.free.fr/rssBT/co/01_reseaux_de_distribution_web/co/02_DistributionHT.html. [page consultée le : 20/06/2016].
- [15] Tran Khanh Viet Dung, Interconnexion des sources d'énergie renouvelable au réseau de distribution électrique. Thèse doctorat en génie électrique. Université du Québec à Trois-Rivières. Août 2009.
- [16] Jean-Claude SABONNADIÈRE et Nouredine HADJSAÏD. Lignes et réseaux électriques 2 : méthodes d'analyse des réseaux électriques. Collection Sciences et technologies de l'énergie électrique. Lavoisier. 2007
- [17] J. C. DAS. Power System Analysis Short-Circuit Load Flow and Harmonics. Amec, Inc. Atlanta, Georgia. Marcel Dekker. 2002.
- [18] Hady SAADAT. Power system analysis. McGraw-Hill, 2nd Revised edition. 2004. 712 pages.
- [19] H.E. BROWN. Solution of Large Networks by Matrix Methods, Wiley, New York, 1975. 320 pages.
- [20] W. S. MEYER, V. D. ALBERTSON et N. M. PETERSON. "The Interarea Matrix: A Tie Line Flow Model for Power Pools", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Volume: PAS-90, Issue: 1, 1971, p. 36 – 45.
- [21] O. ALSAC et B. SCOTT. "Optimal load flow with steady state security", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PAS-93, No. 3, 1974, p.745–751.
- [22] H.W. DOMMEL et W.F. TINNEY. "Optimal power flow solutions", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-87, No. 10, 1968, p.1866–1876.
- [23] W. F. TINNEY et C. E. HART. "Power Flow Solution by Newton's Method". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-86, No: 11, 1967, p.1449-1460.
- [24] O. I. ELGERD. Electric energy systems theory. Tata McGraw-Hill, 1983. 533 pages.
- [25] E. ACHA, C. R. FUERTE-ESQUIVEL, H. AMBRIZ-PE´REZ et C ANGELES-CAMACHO. FACTS. Modelling and Simulation in Power Networks. John Wiley & Sons, Ltd. 2004, 420 pages.
- [26] Journal officiel de la république algérienne, N°33, page :06, 19 mai 2010.

- [27] D. SOUQUE, L. CHATONNET, É. MONNOT. Technique de l'ingénieur, d4096, Réglage de tension - Rôles, obligations et organisation du producteur pour les besoins du système électrique en France, nov. 2013.
- [28] S. DUDHE. "Reactive Power Compensation Techniques in Transmission lines", *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. Volume: 3 Issue: 5, 2015, p 3224 – 3226.
- [29] V.B. RAO. C++ Neural Networks and Fuzzy Logic, MTBooks, IDG Books Worldwide, Inc. 1995.
- [30] Documentation Matlab R2016a. Neuron Model (logsig, tansig, purelin).
- [31] P. BORNE, M. BENREJEB et J. HAGGÈGE. Les réseaux de neurones : présentation et application, Edition Technip, Paris, 2007, 151 pages.
- [32] K. TOMSOVIC et M.Y. CHOW. Tutorial on Fuzzy Logic Applications in Power Systems, Prepared for the IEEE-PES Winter Meeting in Singapore January, 2000.
- [33] A. M. IBRAHIM. FUZZY LOGIC for Embedded Systems Applications, 2003, Elsevier Science (USA). 313 pages.
- [34] L. A. ZADEH, G. J. KLIR, Bo YUAN. Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems, selected papers by Lotfi A.Zadeh. *Advances in Fuzzy systems- Applications and Theory*, Vol. 6. World Scientific, 1996, 826 pages.
- [35] M.N. CIRSTEAN, A. DINU, J.G. KHOR, M. MCCORMICK. Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems. Elsevier Science, 2002, 397 pages.
- [36] J.S.R. JANG. "ANFIS: Adaptive Network-Based-Fuzzy Inference System", *IEEE transaction on systems, man and cybernetics*, Vol 23, No 3, May/June 1993. p. 665-685.
- [37] Matlab documentation center, ANFIS and the ANFIS Editor GUI, The MathWorks, Inc, MATLAB R2013a.
- [38] J.S.R. JANG et C.T. SUN. "Neurofuzzy modeling and control", *Proc.IEEE*, Volume 83, Issue: 3, Mar 1995, p.378–406.
- [39] J.S.R. JANG, C.T. SUN et E. MIZUTANI. Neurofuzzy and soft computing. Prentice Hall, 1997, p.510–514.
- [40] H. BUNKE et A. KANDEL. Neuro-fuzzy Pattern Recognition. World Scientific Publishing, Singapore, 2000, 264 pages.
- [41] G. XU et Z. WANG. "Power System Load Flow Distribution Research based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems", *Congress on Engineering and Technology (S-CET)*, Spring 2012, p.1-4.

- [42] P. BONISSONE, *Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems (ANFIS): Analysis and Applications*, 2002.
- [43] A. RATHINAM et S. PADMINI. “Composite counterpropagation neural networks for solving power flow problem”, *International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications, 2007.IEEE*, Vol.1, p. 212 – 216.
- [44] C. U. SHANKAR, R. THOTTUNGAL et N. M. SUNDARAM. “Unified power flow controller with matrix converter: Performance evaluation with fuzzy logic control”, *IET Chennai Fourth International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2013)*, IEEE, p. 254 – 258.
- [45] A. DRAIDI et D. LABED. “Power flow analysis using adaptive neuro-fuzzy inference systems”, *IRSEC’15: 3rd international renewable and sustainable energy conference. December 10-13, 2015 Marrakech & Ouarzazate, Morocco*, p. 1 - 5
- [46] Information trust institute website, CSL coordinated science lab, Illinois center for a smarter electric grid.
- [47] A. PAI, *Energy Function Analysis for Power System Stability*, University of Illinois at Champaign/Urbana, Kluwer academic publishers. Appendix A. 1989, 238 pages.
- [48] T. ATHAY, R. PODMORE, et S. VIRMANI. “A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 2, March/April 1979, p. 573-584.
- [49] P. QINGLE et Z MIN. “Very Short-Term Load Forecasting Based on Neural Network and Rough Set”, *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010*, Volume :3, p. 1132 – 1135.
- [50] S. SUHARTONO, I. PUSPITASARI, M. S. AKBAR et M. H. Lee. “Two-level seasonal model based on hybrid ARIMA-ANFIS for forecasting short-term electricity load in Indonesia”, *International Conference on Statistics in Science, Business, and Engineering (ICSSBE)*, 2012, p. 1-5.
- [51] R. E. ABDEL-AAL. “Modeling, Forecasting Electric Daily Peak Loads Using Abductive Networks”. Elsevier, Oxford, United Kingdom, vol. 28, no2, 2006.p. 133-141.
- [52] D.K CHATURVEDI, S PREMDAYAL. “Modified Neural and Neuro-fuzzy Approach for Short Term Load Forecasting”, *2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems 2012*, p.1 – 5.
- [53] A.K MAHALANABIS, D.P KOTHARI et S.I. AHSON. *Computer Aided Power System Analysis and Control*, Tata McGraw Hill Publishing Company limited, New Delhi, 1988, 338 pages
- [54] G. E BOX, G. M JENKINS. *Time Series Analysis Forecasting and control*, Holden-Day, San Fransisco, 1976, 575 pages.

- [55] I.MOGHRAM et S RAHMAN. “Analysis and evaluation of five short-term load forecasting techniques”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.4, No. 4, October 1989, p.1484-1491.
- [56] Equilibres, la lettre de la commission de régulation de l’électricité et du Gaz (CREG), n°14, Septembre 2011.
- [57] Société nationale d’électricité et de gaz algérienne (SONELGAZ). Newsletter press n°09, Aout 2012.
- [58] Archive de courbes de charge quotidienne, Operateur de système électrique, [en ligne]. <http://www.ose.dz/courbes.php>
- [59] Historical weather data website, [en ligne]. <http://www.wunderground.com/history>.
- [60] A. DRAIDI et D LABED, “A neuro-fuzzy approach for predicting load peak profile”, *International Journal of International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 5, No 6, p 1304-1310, December 2015.
- [61] A. DRAIDI et D LABED, "Forecasting the Algerian load peak profile using time series model based on backpropagation neural networks", *POWERENG2013 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives* 13-17 May 2013 ISTANBUL-TURKEY.
- [62] J-C. SABONNADIÈRE et N. HADJSAÏD. Lignes et réseaux électriques 1 : lignes d'énergie électrique. Collection Sciences et technologies de l'énergie électrique. Lavoisier. 2007, 185 pages.
- [63] J.C. PRINCIPE, N.R. EULIANO, W.C. LEFEBVRE, *Neural and Adaptive Systems: Fundamentals through Simulations*, Wiley, 2000, 672 pages.

TITRE

RÉPARTITION OPTIMALE DES PUISSANCES UTILISANT LES TECHNIQUES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Résumé : Les réseaux électriques ont connu un énorme essor suite au développement de l'informatique et des logiciels de commande, on parle aujourd'hui des 'smart grids' ou réseaux intelligents. L'introduction des techniques de l'intelligence artificielle dans les logiciels de commande et de décision, est un élément essentiel dans la recherche et dans le développement des réseaux modernes. Les réseaux de neurones et la logique floue figurent parmi les techniques les plus répondues dans le domaine de l'intelligence artificielle. La répartition optimale des puissances est une technique importante pour le bon fonctionnement du réseau électrique et pour l'acheminement optimal et économique de l'énergie électrique entre les unités de production et les différentes charges du réseau. La prévision de la charge a de nombreuses applications pour les systèmes d'alimentation, y compris l'achat d'énergie et de la production, la commutation des charges, l'évaluation du marché, et le développement des infrastructures.

Dans cette thèse on va introduire une techniques hybride d'intelligence artificielle ANFIS (système adaptatif d'inférence neuro-floue) pour l'optimisation de la répartition des puissances dans les réseaux électriques et l'optimisation de la prévision des charges.

Mots clé : réseaux électriques ; écoulement de puissance ; prévision de la charge ; réseau de neurone ; logique floue ; ANFIS.

TITLE

OPTIMAL POWER FLOW USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES

Abstract: Power grids have been developing following the development of computer systems and control software, today we are interested in smart grids. The introduction of artificial intelligence techniques in the control and the decision is essential in research and development of modern power systems. neural networks and fuzzy logic are among the techniques most used in the field of artificial intelligence. The optimal power flow is an important element for proper optimal and economical delivery of electrical energy between the production units and the various network loads. Load forecasting has many applications for power systems, including energy purchasing and generation, load switching, contract evaluation, and infrastructure development.

In this thesis we will introduce a hybrid artificial intelligence techniques ANFIS (Artificial neuro-fuzzy inference system) to optimize power flow and load forecasting.

Keywords: power systems; load flow; load forecast; neural networks; fuzzy logic; ANFIS

العنوان

تدفق الطاقة الأمثل باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي

المخلص: تطورت شبكات الطاقة بعد تطوير نظم الكمبيوتر والبرمجيات، نحن مهتمون حاليا بالشبكات الذكية. إدخال تقنيات الذكاء الاصطناعي في المراقبة أمر ضروري في بحث وتطوير أنظمة الطاقة الحديثة. الشبكات العصبية والمنطق الضبابي هي من بين أكثر التقنيات المستخدمة في مجال الذكاء الاصطناعي.

تدفق الطاقة الأمثل هو عنصر هام للتسليم الأمثل السليم للطاقة الكهربائية بين وحدات الإنتاج والاستهلاك. التنبؤ بالاستهلاك له العديد من التطبيقات لأنظمة الطاقة، بما في ذلك شراء الطاقة وتوليدها، وتطوير البنية التحتية.

في هذه الأطروحة سوف نقدم تقنية هجينة للذكاء الاصطناعي ANFIS (الشبكات العصبية والمنطق الضبابي) لتحسين تدفق الطاقة والتنبؤ بالاستهلاك.

الكلمات المفتاحية: أنظمة الطاقة. تدفق الطاقة. توقعات الاستهلاك. الشبكات العصبية؛ المنطق الضبابي؛ ANFIS.