

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Batna 2

Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique



THESE

Pour Obtenir le Titre de **Docteur en Science** en Electrotechnique

Spécialité: Réseaux Electriques

Thème:

**Contribution à l'Etude du Choix Optimal de
l'Emplacement du Dispositif UPFC dans les Réseaux
Electriques en Utilisant une des Méthodes Artificielles**

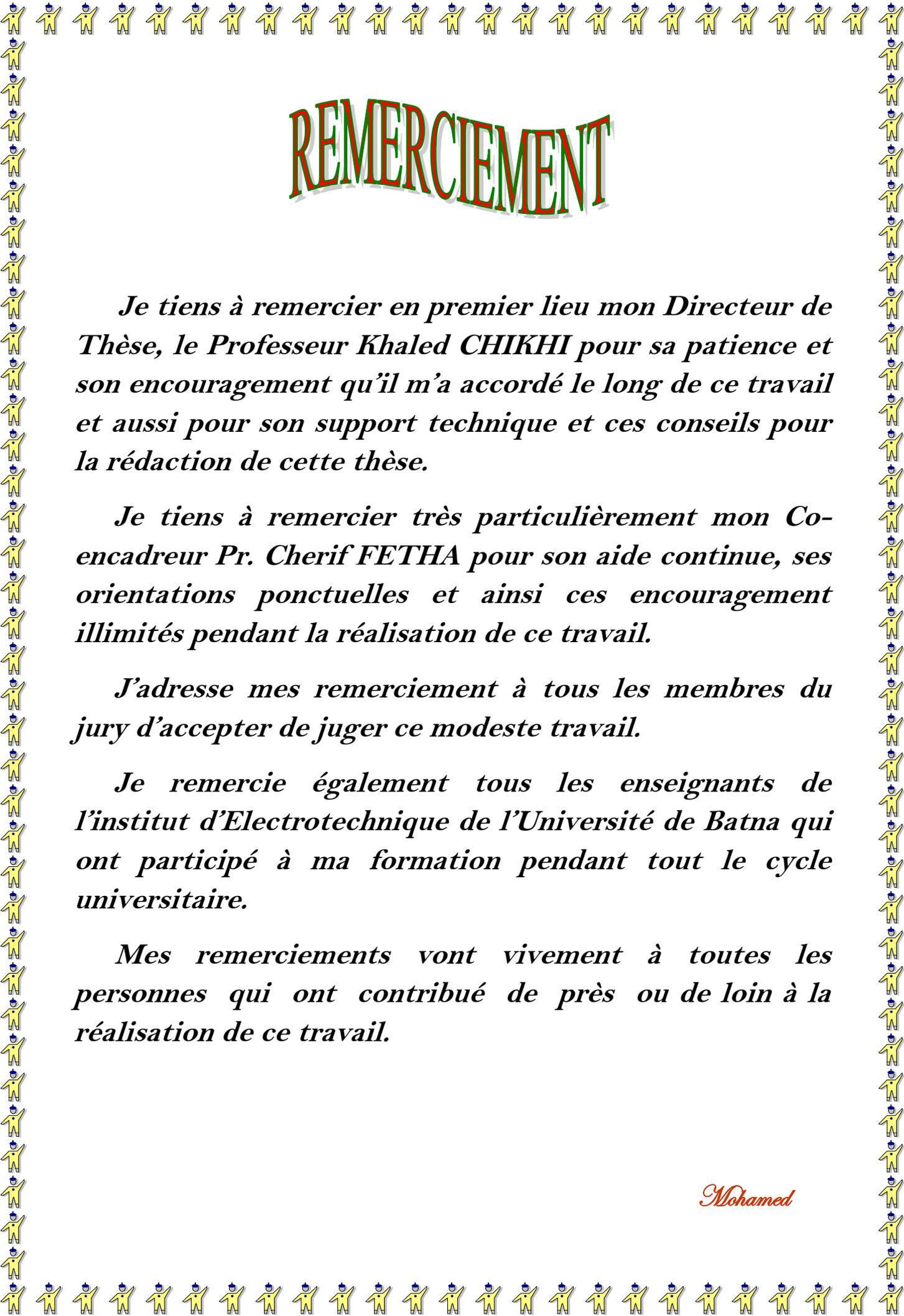
Présentée Par: MEZAACHE Mohamed

Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Université de Batna

Magister en Électrotechnique de l'Université de Batna

Soutenu publiquement le: **30 / 04 / 2016** devant le **jury** composé de:

ABDESSEMED Rachid	Prof.	Université de Batna 2	Président
CHIKHI Khaled	Prof.	Université de Batna 2	Rapporteur
FETHA Cherif	Prof.	Université de Batna 2	Co-Rapporteur
SRAIRI Kamel	Prof.	Université de Biskra	Examineur
LABED Djamel	M.C.A	Université de Constantine 1	Examineur
BAHI Tahar	Prof.	Université d'Annaba	Examineur



REMERCIEMENT

Je tiens à remercier en premier lieu mon Directeur de Thèse, le Professeur Khaled CHIKHI pour sa patience et son encouragement qu'il m'a accordé le long de ce travail et aussi pour son support technique et ces conseils pour la rédaction de cette thèse.

Je tiens à remercier très particulièrement mon Co-encadreur Pr. Cherif FETHA pour son aide continue, ses orientations ponctuelles et ainsi ces encouragements illimités pendant la réalisation de ce travail.

J'adresse mes remerciements à tous les membres du jury d'accepter de juger ce modeste travail.

Je remercie également tous les enseignants de l'institut d'Electrotechnique de l'Université de Batna qui ont participé à ma formation pendant tout le cycle universitaire.

Mes remerciements vont vivement à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Mohamed

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à:



Mes chers parents;



Mes frères et mes sœurs;



Mes encadreurs Pr.Khaled et Pr.Cherif;



Tous mes amis.

Mohamed

Liste des publications

Liste des publications:

Notre travail de recherche a abouti aux publications suivantes:

A. Publications de conférences internationales:

- ❶ **M. Mezaache**, K. Chikhi et C. Fetha, "Evaluation de Comportement du Dispositif UPFC Connecté au Réseau Electrique pour Contrôler l'Écoulement de Puissance", *7^{ème} Conférence Internationale en Génie Electrique (CEE'2012)*, Université de Batna, 08-10 Octobre 2012.
- ❷ **M. Mezaache**, K. Chikhi et C. Fetha, "Contrôle des Transits de Puissance par l'Utilisation d'un UPFC Connecté à une Ligne de Transmission", *2^{ème} Conférence Internationale en Electroniques et Pétrole (ICEO'13)*, Université d'Ouargla, 05-06 Mars 2013.
- ❸ **M. Mezaache**, K. Chikhi et C. Fetha, "Etude de la Performance d'un Dispositif STATCOM Utilisée pour Compenser la Puissance Réactive au Point de Raccordement", *2^{ème} Conférence Internationale en Electroniques, Electrotechnique et Automatique (CIEEA'13)*, ENP d'Oran, 26-27 Novembre 2013.

B. Publications de revues:

- ❶ **Mohamed Mezaache**, Khaled Chikhi, and Cherif Fetha, "UPFC Device: Optimal Location and Parameter Setting to Reduce Losses in Electric-Power Systems Using a Genetic-Algorithm Method", *Transactions on Electrical and Electronic Materials (TEEM)*, Vol. 17, No. 1, pp. 1-6, Seoul, Korea, February 25, 2016.
- ❷ **M. Mezaache**, K. Chikhi, C. Fetha, "SSSC FACTS Device: Analysis and Simulation in Electrical Networks for Damping Power Oscillations", Accepted to be published in *International Journal of Energy Engineering (IJEE)*, Scientific & Academic Publishing, USA.

Liste des figures

Liste des figures:

Figure (I.1): Tensions et fréquences utilisées dans le monde	4
Figure (I.2): Représentation d'un creux de tension	8
Figure (I.3): Représentation d'une surtension	9
Figure (I.4): Représentation des harmoniques	10
Figure (I.5): Représentation d'un déséquilibre	11
Figure (I.6): Représentation d'une fluctuation lente de la tension.....	12
Figure (I.7): Coût global de la continuité de la tension	17
Figure (I.8): Classification des différents types de la stabilité de système de puissance.....	21
Figure (I.9): Mécanisme d'écroulement de tension	22
Figure (I.10): Mécanisme d'écroulement de fréquence	22
Figure (I.11): Mécanisme de cascade de surcharge	23
Figure (I.12): Mécanisme de la perte de synchronisme	23
Figure (II.1): Modélisation par injection de puissances	29
Figure (II.2): Modélisation avec nœud fictif	30
Figure (II.3): Intégration du dispositif FACTS dans une ligne	31
Figure (II.4): Réseau d'AEP équipé de l'UPFC	33
Figure (II.5): Ligne de transport avec UPFC.....	34
Figure (II.6): Schéma équivalent de la ligne de transport avec UPFC	35
Figure (II.7): Diagramme vectoriel des tensions et des courants d'un UPFC	36
Figure (II.8): Relations vectorielles lorsque $P > 0$ et $Q > 0$	40
Figure (II.9): Relations vectorielles lorsque $P < 0$ et $Q > 0$	41
Figure (II.10): Relations vectorielles lorsque $P > 0$ et $Q < 0$	41
Figure (II.11): Relations vectorielles lorsque $P < 0$ et $Q < 0$	42
Figure (II.12): Relations vectorielles lorsque $P > 0$ et $Q = 0$	43
Figure (II.13): Relations vectorielles lorsque $P < 0$ et $Q = 0$	43
Figure (II.14): Relations vectorielles lorsque $P = 0$ et $Q > 0$	44
Figure (II.15): Relations vectorielles lorsque $P = 0$ et $Q < 0$	45
Figure (II.16): Représentation d'un UPFC avec ces degrés de liberté	46
Figure (II.17): Représentation physique d'un convertisseur UPFC branché au réseau.....	47
Figure (II.18): Schéma bloc du convertisseur série	49
Figure (II.19): Schéma bloc du convertisseur shunt.....	51

Figure (II.20): Représentation d'un DC-Link de l'UPFC	52
Figure (II.21): Schéma bloc du DC-link.....	54
Figure (II.22): Schéma bloc intégrant les références du convertisseur série	55
Figure (II.23): Schéma bloc de calcul des références du convertisseur shunt.....	57
Figure (II.24): Schéma d'un UPFC avec indication de la circulation des puissances.....	58
Figure (II.25): Schéma bloc du correcteur PI permettant de déterminer la puissance P_{loss}	60
Figure (III.1): Représentation de la variable « Vitesse ».....	64
Figure (III.2): Support, noyau et hauteur d'un ensemble flou.....	65
Figure (III.3): Formes usuelles des fonctions d'appartenance	66
Figure (III.4): Diagramme d'un ensemble des lettres de l'alphabet	68
Figure (III.5): Diagramme d'un ensemble des températures ambiantes	68
Figure (III.6): Structure interne d'un régulateur flou	69
Figure (III.7): Organigramme d'un AG standard	75
Figure (III.8): Constitution interne d'une population.....	78
Figure (III.9): Illustration schématique du codage d'un individu	79
Figure (III.10): Sélection par roulette biaisée.....	81
Figure (III.11): Croisement un point	83
Figure (III.12): Croisement multipoints ($m = 5$)	84
Figure (III.13): Croisement uniforme	85
Figure (III.14): Exemple de mutation.....	87
Figure (III.15): Neurone biologique et ses principaux composants	92
Figure (III.16): Exemple d'un réseau de neurones avec une structure en couches.....	93
Figure (III.17): Exemple d'un réseau de neurones récurrent	93
Figure (III.18): Exemple d'un réseau de neurones en couches.....	94
Figure (III.19): Représentation d'un neurone formel	95
Figure (III.20): Schéma des poids de l'axone	99
Figure (III.21): Schéma d'apprentissage du perceptron	99
Figure (III.22): Perceptron multicouches	101
Figure (III.23): Différents cas de la convergence.....	105
Figure (III.24): Organigramme de la rétropropagation	106
Figure (III.25): Architecture du réseau.....	107
Figure (IV.1): Graphe de fonctions coût des dispositifs FACTS (SVC, TCSC et UPFC) ...	113
Figure (IV.2): Impacts de certains dispositifs FACTS	120
Figure (IV.3): Codage d'une solution représentant une configuration de FACTS.....	121

Figure (IV.4): Exemples de solutions voisines de la configuration courante	126
Figure (IV.5): Exemple d'un croisement de deux individus.....	127
Figure (IV.6): Mutations d'un individu	127
Figure (IV.7): Organigramme d'optimisation par l'AG	128
Figure (IV.8): Influence des dispositifs TCVRs sur les tensions de nœuds (14 nœuds)	132
Figure (IV.9): Pertes totales en lignes en utilisant seulement les TCVRs (14 nœuds).....	132
Figure (IV.10): Influence des dispositifs FACTS sur les tensions de nœuds (30 nœuds)....	133
Figure (IV.11): Pertes totales en lignes en utilisant deux types de FACTS (30 nœuds)	133
Figure (IV.12): Influence des dispositifs FACTS sur les tensions de nœuds (57 nœuds)....	134
Figure (IV.13): Pertes totales en lignes en utilisant les différents FACTS (57 nœuds).....	134
Figure (V.1): Influence des dispositifs UPFCs sur les tensions de nœuds (14 nœuds)	142
Figure (V.2): Pertes totales en lignes en utilisant seulement les UPFCs (14 nœuds)	142
Figure (V.3): Influence des dispositifs UPFCs sur les tensions de nœuds (30 nœuds)	143
Figure (V.4): Pertes totales en lignes en utilisant seulement les UPFCs (30 nœuds).....	143
Figure (V.5): Influence des dispositifs UPFCs sur les tensions de nœuds (57 nœuds)	144
Figure (V.6): Pertes totales en lignes en utilisant seulement les UPFCs (57 nœuds).....	144

Liste des tableaux

Liste des tableaux:

Tableau (I.1): Différentes perturbations électromagnétiques	12
Tableau (I.2): Différentes effets des perturbations	13
Tableau (I.3): Différentes solutions pour améliorer la QEE.....	15
Tableau (II.1): Contribution des systèmes FACTS dans les réseaux électriques.....	27
Tableau (II.2): Statistiques des dispositifs FACTS autour du monde	32
Tableau (III.1): Résultats de l'évaluation des individus dans la population initiale	81
Tableau (III.2): Résultats de sélection.....	82
Tableau (III.3): Résultats de l'évaluation des individus dans la nouvelle population	88
Tableau (III.4): Fonctions d'activation les plus utilisées	96
Tableau (III.5): Comparaison entre la mémoire humaine et la mémoire d'ordinateur	109
Tableau (IV.1): Codage de la position des dispositifs FACTS	122
Tableau (IV.2): Codage du type des dispositifs FACTS	122
Tableau (IV.3): Valeurs typiques des paramètres de réglage de l'AG	130
Tableau (IV.4): Résultats d'emplacements des FACTS dans les réseaux choisis.....	131
Tableau (IV.5): Nombre optimisé de FACTS selon le réseau sélectionné.....	136
Tableau (V.1): Résultats d'emplacements des UPFCs dans les réseaux choisis	140

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles et abréviations:

S.1. Abréviations:

QEE: Qualité de l'Énergie Électrique.

GRT: Grand River Transit.

EPRI: Electric Power Research Institute.

FACTS: Flexible Alternating Current Transmission Systems.

UPFC: Unified Power Flow Controller.

TCSC: Thyristor Controlled Series Capacitor.

SSSC: Static Synchronous Series Compensator.

SVC: Static Var Compensator.

STATCOM: STATic COMPensator.

TCVR: Thyristor Controlled Voltage Regulators.

TCPST: Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer.

IPFC: Interline Power Flow Controller.

SPS: Static Phase Shifters.

GTO: Gate Turn-Off thyristor.

MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.

PI: Proportionnel Intégral (régulateur).

PID: Proportionnel Intégral Dérivé (régulateur).

AG: Algorithme Génétique.

PSO: Particle Swarm Optimization.

RNA: Réseaux de Neurones Artificiels.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

MATLAB: MATrix LABoratory (language of technical computing).

EN 50160: est une norme a été créée afin de caractériser la qualité de la tension fournie. Cette norme présente les différents types de perturbations de la tension observés au point de livraison du client, fonction de la forme d'onde, du niveau de la tension, de la fréquence et du déséquilibre du système triphasé. Elle liste ainsi les paramètres à surveiller et la durée de la surveillance.

S.2. Variables:

P : Puissances active transportée par la ligne.

P_s : Puissance active au point de départ s (le générateur).

P_r : Puissance active au point d'arrivée r (le récepteur).

P_{seff} : Puissance active au point $seff$.

P_{pq} : Puissance injectée par le convertisseur série, par rapport à la tension V_{pq} .

P_c : puissance fournie par le convertisseur shunt.

Q : Puissances réactive transportée par la ligne.

Q_r : Puissance réactive au point d'arrivée r (le récepteur).

Q_{seff} : Puissance réactive au point $seff$.

Q_{pq} : Puissance absorbée par le convertisseur série, par rapport à la tension V_{pq} .

V_s : Tension au point de départ s .

V_r : Tension au point d'arrivée r .

V_{seff} : Tension au point $seff$.

V_{pq} : Tension au borne de deux point s et $seff$.

V_x : Tension en avance de 90° sur le vecteur de courant I (entre les deux vecteurs V_r et V_{seff}).

V_{xo} : Tension entre les deux vecteurs V_s et V_r .

V_{se} : Tension générée par le compensateur série.

V_{sed} : Composante directe de la tension générée par le compensateur série.

V_{seq} : Composante quadrature de la tension générée par le compensateur série.

V_{sh} : Tension générée par le compensateur shunt.

V_{shd} : Composante directe de la tension générée par le compensateur shunt.

V_{shq} : Composante quadrature de la tension générée par le compensateur shunt.

U_{DC} : Tension du convertisseur shunt au niveau de DC-link.

I : Courant de la ligne.

I_p : Courant I sur l'axe parallèle p à la tension V_{seff} .

I_q : Courant I sur l'axe perpendiculaire q à la tension V_{seff} .

I_{se} : Courant fournit par le compensateur série.

I_{sed} : Composante directe du courant fournit par le compensateur série.

I_{seq} : Composante quadrature du courant fournit par le compensateur série.

I_{sh} : Courant fournit par le compensateur shunt.

I_{shd} : La composante directe du courant fournit par le compensateur shunt.

I_{shq} : Composante quadrature du courant fournit par le compensateur shunt.

I_C : Courant à la borne de condensateur.

δ : Angle de charge (Angle entre la tension de départ V_s et la tension d'arrivée V_r).

δ_{seff} : Angle de phase entre les deux tensions V_{seff} et V_r .

φ : Angle de phase entre le courant I et la tension V_{seff} .

ρ : Angle de phase tel que doit être ($0 \leq \rho \leq 2\pi$) de V_{pq} .

Fit : Fonction objectif (fitness).

λ : Facteur de charge du système.

λ_{max} : Facteur de charge maximale du système.

S.3. Paramètres:

R : Résistance de la ligne.

R_{se} : Résistance de l'ensemble du convertisseur série.

R_{sh} : Résistance de l'ensemble constitué du convertisseur shunt et de la ligne shunt.

X : Réactance de la ligne.

L_{se} : Inductance de l'ensemble du convertisseur série.

L_{sh} : Inductance de l'ensemble constitué du convertisseur shunt et de la ligne shunt.

C : Capacité du circuit continu commun DC.

Résumé

Résumé:

Résumé: Avec la demande croissante d'énergie électrique, le fonctionnement du système d'alimentation devient plus complexe à opérer dans les normes de la qualité d'énergie électrique, et donc deviendra moins sûr. L'avènement de technologie des systèmes de transmission en courant alternatif flexibles (FACTS) a coïncidé avec la restructuration majeure de la production d'énergie électrique; ils peuvent fournir des bénéfices importants en augmentant la capacité de transmission du système et la flexibilité de contrôle de flux d'énergie et la rapidité. Plusieurs types de FACTS existent et le choix du dispositif approprié dépend des objectifs à atteindre. Le contrôleur du transit de puissance unifié (UPFC) est l'un des systèmes les plus efficaces de dispositifs FACTS pour renforcer la sécurité du système électrique; cependant, dans quelle mesure les performances d'UPFC peut être mis en évidence, il dépend fortement du réglage de l'emplacement et les paramètres de ce dispositif dans le système. Un grand nombre de travaux de recherche ont été réalisés sur la détermination des emplacements optimaux de dispositifs FACTS dans les réseaux électriques. Il existe plusieurs méthodes permettant de déterminer les emplacements optimaux de dispositifs FACTS selon des critères et des contraintes spécifiés. Parmi ces méthodes on trouve la méthode d'Algorithme Génétique (AG). Cette dernière est une technique de recherche et optimisation globale qui est basée sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique; elle peut rechercher simultanément de plusieurs solutions possibles et ne nécessite aucune connaissance préalable de la fonction objectif. Dans cette thèse, la technique des algorithmes génétiques sont utilisés pour résoudre le problème du choix de l'emplacement et les valeurs nominales des FACTS à installer. Cinq types de dispositifs FACTS ont été utilisés dans cette étude à savoir: SVC, TCSC, TCVR, TCPST et UPFC. Ces FACTS sont utilisés pour augmenter la capacité de transfert de puissance dans le réseau. Leur position et leur taille sont déterminées à l'aide de coefficients calculés lors d'accroissements de la charge. Pour valider l'efficacité de la technique utilisée, a été appliquée à un ensemble de réseaux tests standards IEEE 14, 30 et 57 jeux de barres à l'aide du programme MATLAB.

Mots clés: Normes de la qualité d'énergie électrique, FACTS, UPFC, AG, optimisation globale, fonction objectif, SVC, TCSC, TCVR, TCPST, capacité de transfert de puissance, programme MATLAB.

Sommaire

Sommaire:

Remerciement

Dédicace

Liste des publications

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et abréviations

Résumé

Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités sur la qualité de l'énergie électrique	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Qualité de l'énergie électrique	3
I.2.1. Qualité de la tension	3
A. Amplitude.....	3
B. Fréquence	4
C. Forme d'onde	5
D. Symétrie du système triphasé.....	5
I.2.2. Qualité du courant	5
I.3. Objectifs de la mesure de la qualité de l'énergie électrique	5
I.3.1. Application contractuelle	5
I.3.2. Maintenance corrective	5
I.3.3. Optimisation du fonctionnement des installations électriques	6
I.3.4. Enquêtes statistiques	6
A. Enquêtes sur les performances générales d'un réseau	6
B. Enquêtes sur les performances en un point particulier du réseau	6
I.4. Dégradation de la qualité de l'énergie électrique	7
I.4.1. Creux de tension et coupures brèves	7
A. Creux de tension.....	7
B. Coupures brèves	8
I.4.2. Surtensions	8
I.4.3. Harmoniques et interharmoniques	9
A. Harmoniques	9

B. Interharmoniques.....	10
I.4.4. Déséquilibre du système triphasé de tensions	10
I.4.5. Fluctuations lentes de la tension.....	11
I.4.6. Résumé.....	12
I.5. Effets des perturbations sur les charges	13
I.6. Solutions pour améliorer la QEE	14
I.7. Maîtrise de la qualité de l'électricité	15
I.7.1. Continuité de la tension.....	16
I.7.2. Qualité de la tension.....	17
A. Amplitude, forme d'onde et symétrie.....	17
A.1. Amplitude sous l'angle des creux de tension et coupures brèves	17
A.2. Amplitude sous l'angle des fluctuations rapides, forme d'onde et symétrie.....	18
B. Fréquence	18
I.8. La sécurité des réseaux de transport	18
I.8.1. La sécurité statique.....	19
I.8.2. La sécurité dynamique	19
I.9. Les différents types de la stabilité de système de puissance.....	20
I.10. Mécanismes des instabilités du système électrique	21
I.10.1. Mécanisme d'écroulement de tension	21
I.10.2. Mécanisme d'écroulement de fréquence.....	22
I.10.3. Mécanisme de cascade de surcharge	23
I.10.4. Mécanisme de la perte de synchronisme.....	23
I.11. Conclusion	24
Chapitre II: Etude de technologies des FACTS (UPFC)	25
II.1. Introduction	25
II.2. Généralités sur les dispositifs FACTS.....	25
II.2.1. Nécessité des dispositifs FACTS	26
II.2.2. Bénéfices offerts par la technologie FACTS	27
II.2.3. Contribution des systèmes FACTS dans les réseaux électriques.....	27
II.2.4. Modélisation des dispositifs FACTS	28
A. Injection de puissance aux extrémités de la ligne	28
B. Création d'un nœud fictif.....	30
C. Modification de la matrice d'admittance nodale	30

II.2.5. Coût des dispositifs FACTS.....	31
II.2.6. Applications pratiques des dispositifs FACTS	32
II.3. Etude profonde d'un dispositif FACTS (UPFC)	32
II.3.1. Première invention de l'UPFC.....	32
II.3.2. Principes de l'UPFC	33
A. Description d'un UPFC.....	33
B. Schéma vectoriel d'un UPFC	34
C. Diagramme vectoriel des tensions et des courants d'un UPFC	35
D. Etude des flux de puissances P et Q selon le diagramme vectoriel	37
D.1. Transfert de puissances active et réactive	39
D.2. Transfert de puissance active uniquement.....	39
D.3. Transfert de puissance réactive uniquement	39
II.3.3. Modélisation du système physique	45
A. Introduction à la modélisation.....	45
B. Description mathématique des modèles	47
B.1. Modèle série et équations associées	48
B.2. Modèle shunt et équations associées	50
B.3. Model du DC-link.....	51
II.3.4. Commande du système physique.....	54
A. Commande du convertisseur série	54
B. Commande du convertisseur shunt	56
B.1. Calcul des courants de référence $I_{sh_d_ref}$ et $I_{sh_q_ref}$	58
B.2. Calcul de la puissance active de référence P_{1B_ref}	59
B.3. Calcul de la puissance réactive de référence Q_{1B_ref}	60
II.4. Conclusion	61
Chapitre III: Les intelligences artificielles	62
III.1. Introduction	62
III.2. La logique floue	62
III.2.1. Historique	62
A. Apparition de la logique floue	62
B. Premières applications.....	63
C. Essor	63
III.2.2. Quand utiliser un régulateur flou et pourquoi?.....	63

A. Cas d'utilisation	63
B. Points forts.....	63
III.2.3. Utilisation de la logique floue pour le contrôle	63
III.2.4. Généralités sur la logique floue	64
A. Variables linguistiques	64
B. Ensembles flous.....	65
C. Fonctions d'appartenance.....	65
D. Règles d'inférences	66
III.2.5. Comparaison entre l'ensemble flou-non flou	67
A. Exemple d'un ensemble non flou.....	67
B. Exemple d'un ensemble flou.....	68
C. Remarque	68
III.2.6. Description et structure d'une commande par la logique floue.....	68
A. Interface de fuzzification	69
B. Mécanisme d'inférence.....	69
C. Base de règles.....	70
D. Interface de défuzzification.....	70
III.2.7. Avantages et inconvénients d'un régulateur flou	71
A. Les avantages	71
B. Les inconvénients	71
III.2.8. Domaines d'applications de la logique floue	71
III.3. Les algorithmes génétiques	72
III.3.1. Historique	72
III.3.2. Pourquoi utiliser les AGs?.....	73
III.3.3. Fondements des algorithmes génétiques	73
III.3.4. Caractéristiques d'un AG	74
III.3.5. Principe de base d'un AG standard	74
III.3.6. Paramètres d'un AG	75
III.3.7. Fonctions objectif et de performance	76
A. Fonction objectif	76
B. Fonction de performance.....	77
III.3.8. Les opérateurs génétiques.....	77
A. Initialisation	77

B. Codage.....	78
B.1. Codage binaire.....	78
B.2. Codage de Gray.....	78
B.3. Codage réel.....	79
C. Evaluation.....	79
D. Sélection.....	79
E. Croisement.....	82
E.1. Croisement un point (discret).....	82
E.2. Croisement multipoints.....	84
E.3. Croisement uniforme (continu).....	84
F. Mutation.....	85
F.1. Mutation uniforme.....	86
F.2. Mutation non uniforme.....	86
G. Création de la génération suivante et critères d'arrêt.....	87
III.3.9. Paramètres de réglage de l'AG.....	88
A. Taille de la population.....	88
B. Probabilité de croisement.....	89
C. Probabilité de mutation.....	89
III.3.10. Avantages et inconvénients des AGs.....	89
A. Les avantages.....	89
B. Les inconvénients.....	89
III.3.11. Domaines d'applications des AGs.....	90
III.4. Les réseaux de neurones.....	90
III.4.1. Historique.....	90
III.4.2. Pourquoi on utilise les réseaux de neurones?.....	91
III.4.3. Définitions.....	91
A. Neurone.....	91
B. Neurone biologique.....	92
C. Réseaux de neurones artificiels.....	92
III.4.4. Types de réseaux de neurones.....	93
A. Les réseaux à couches (non bouclés).....	93
B. Les réseaux récurrents (bouclés).....	93
III.4.5. Nombre de neurones cachés.....	94

III.4.6. Neurone formel.....	94
III.4.7. Fonctions d'activation	95
III.4.8. Comment choisir les poids?.....	96
III.4.9. Apprentissage	96
A. Apprentissage non supervisé.....	97
B. Apprentissage semi-supervisé (apprentissage par renforcement)	97
C. Apprentissage supervisé.....	97
III.4.10. Apprentissage du perceptron	98
A. Perceptron monocouche.....	98
A.1. Loi de Hebb	98
A.2. Règle du perceptron.....	99
A.3. Règle du Widrow-Hoff.....	100
A.4. Algorithme d'apprentissage	100
B. Perceptron multicouches	101
B.1. Dimensionnement d'un perceptron multicouches	102
B.2. Apprentissage par descente de gradient.....	102
B.2.1. Qu'est-ce qu'un gradient?.....	102
B.2.2. Méthode d'apprentissage	102
B.3. Règle Delta généralisée	103
B.4. Rétropropagation de l'erreur	105
B.4.1. Algorithme de rétropropagation du gradient.....	106
B.4.2. Architecture du réseau	107
B.4.3. Calcul des fonctions d'apprentissage.....	108
B.4.4. Choix des paramètres du réseau.....	109
III.4.11. Comparaison entre la mémoire humaine-ordinateur	109
III.4.12. Avantages et inconvénients des RNA	109
A. Les avantages	109
B. Les inconvénients.....	109
III.4.13. Domaines d'applications des RNA.....	110
III.5. Conclusion.....	110
Chapitre IV: Emplacements et valeurs optimaux des FACTS pour augmenter la capacité de charge du système.....	112
IV.1. Introduction.....	112
IV.2. Choix des emplacements optimaux des FACTS.....	112

IV.3. Optimisation des réseaux de transport par les FACTS	114
IV.3.1. Variables d'optimisation	115
A. Variables de contrôle	115
B. Variables d'état	116
C. Variables de sortie	116
IV.3. 2. Formulation mathématique du problème d'optimisation.....	117
IV.3. 3. Valeurs de consigne des FACTS	118
A. Compensateur statique de puissance réactive (SVC).....	118
B. Compensateur série contrôlé par thyristors (TCSC)	118
C. Régulateur de tension commandé par thyristor (TCVR)	119
D. Régulateur de phase du transformateur commandé par thyristor (TCPST).....	119
E. Contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC).....	119
IV.4. Placement optimal des FACTS dans les réseaux	120
IV.4.1. Codage des solutions	121
A. Emplacements des FACTS	121
B. Type de dispositif	122
C. Taille des dispositifs.....	123
IV.4.2. Objectif d'optimisation des réseaux.....	123
IV.4.3. Méthode d'emplacement des FACTS (algorithmes génétiques).....	125
A. Population initiale et voisinage	125
B. Sélection et reproduction.....	127
C. Croisement	127
D. Mutation	127
E. Critères d'arrêt.....	128
IV.4.4. Exemples de configuration	129
A. Paramètres de réglage utilisés pour l'algorithme génétique	129
A.1. Générations.....	129
A.2. Taille de la population.....	129
A.3. Nombre des individus d'élite	129
A.4. Croisement.....	130
A.5. Mutation	130
A.6. Limite de la fonction fitness	130
A.7. Limite de temps (délai).....	130

B. Quelques notes liés à λ	131
C. Résultats de simulation.....	131
C.1. Pour le système test 14 nœuds	132
C.2. Pour le système test 30 nœuds	133
C.3. Pour le système test 57 nœuds	134
D. Interprétation des résultats	135
E. Remarques	135
E.1. Dispositifs choisis	135
E.2. Nombre de dispositifs FACTS.....	136
E.3. Cas spécial pour le dispositif UPFC	136
IV.5. Conclusion	137
Chapitre V: Site optimal de l'UPFC et sa valeur appropriée dans les réseaux.....	138
V.1. Introduction	138
V.2. Optimal placement de l'UPFC	138
V.3. Technique d'optimisation de l'UPFC.....	139
V.4. Systèmes étudiés et résultats de simulation.....	140
V.4.1. Résultats de simulation	140
A. Pour le système test 14 nœuds	142
B. Pour le système test 30 nœuds.....	143
C. Pour le système test 57 nœuds.....	144
V.4.2. Discussions	145
V.4.3. Remarques	145
V.5. Conclusion.....	145
Conclusion générale	147
Perspectives.....	148
Annexe	
Références bibliographiques	

Introduction générale

Introduction générale:

Depuis plus d'une vingtaine d'années une attention toute particulière est portée sur l'étude de réseaux électriques afin d'améliorer leur dimensionnement, leur qualité, leur sécurité et leurs performances. En effet, les réseaux deviennent de plus en plus complexes avec l'apparition de nouvelles sources d'énergie de nature diverse et l'augmentation de dispositifs d'électronique de puissance qui servent d'interfaces de connexion ou de dispositifs de contrôle [1].

Les dispositifs FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Le concept FACTS introduit en 1986 par EPRI (Electric Power Research Institute), regroupe l'ensemble des dispositifs basés sur l'électronique de puissance, qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. Son développement est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le GTO, le MOSFET et l'IGBT. Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs statiques très rapides, ce qui confère aux composants FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques [2]. Ces composants selon leur connexion au réseau sont distingués en compensateurs série, shunt et hybride tels que: SSSC (Static Synchronous Series Compensator), STATCOM (STATIC COMPensator) et UPFC (Unified Power Flow Controller) respectivement [3]. Chacun de ces composants possède ses propres caractéristiques et peut être utilisé pour répondre à des besoins bien précis; donc le choix du dispositif approprié est essentiel et dépend des objectifs à atteindre [4].

L'UPFC est l'un des développements récents des dispositifs FACTS qui ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (tension, déphasage et impédance); ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes. C'est pour ça, nous avons choisi d'étudier l'UPFC comme un dispositif FACTS dans cette thèse.

L'intégration des FACTS dans le réseau électrique permet de pousser loin les capacités de ce dernier en lui permettant d'améliorer les performances en terme de stabilité, qualité et fiabilité. Cependant, avec un contrôle mal conçu ou un mauvais choix des paramètres de contrôleurs FACTS, on risque de ne pas bénéficier de leurs avantages. Le choix d'emplacement des dispositifs FACTS est la plus importante opération lors du dimensionnement des FACTS dans les grands réseaux électriques. Pour cela, l'utilisation des

techniques intelligentes permet de concevoir des contrôleurs qui s'adaptent aux toutes situations de fonctionnement du réseau électrique [5].

Actuellement, on peut dire que le rôle des techniques des intelligences artificielles dans les didacticiels n'est pas de simuler l'intelligence humaine per se. Les techniques sont utilisées pour soutenir les interactions avec l'apprenant. Modéliser l'expertise permet au système d'entrer dans le problème avec l'apprenant, négocier les étapes intermédiaires, expliquer ses décisions, et raisonner sur la connaissance de l'apprenant (diagnostic).

Parmi les techniques intelligentes, on trouve la logique floue, les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones artificiels. La logique floue permet de modéliser puis de remplacer l'expertise de conduite de processus, expertise en provenance du concepteur ou de l'utilisateur. Elle est un outil d'amélioration de la qualité et de la productivité, elle procure aussi des avantages concurrentiels à l'industriel en quête d'optimisation technico-économique [6]. Les algorithmes génétiques fournissent des solutions proches de la solution optimale à l'aide des mécanismes de sélection, d'hybridation et de mutation. Ils sont applicables à de nombreux problèmes [7]. Pourquoi les réseaux de neurones artificiels ont-ils de l'avenir? Parce qu'ils répondent à plusieurs critères de l'entreprise moderne, dont le fait de trouver des solutions rapidement à des problèmes de plus en plus complexes. De plus, les réseaux de neurones artificiels sont robustes, versatiles et peuvent s'adapter [8].

Cette thèse s'articule principalement autour de l'étude des emplacements et des valeurs optimaux des FACTS en utilisant les algorithmes génétiques comme une méthode d'optimisation pour une exploitation plus sûre des réseaux électriques.

La rédaction de cette thèse est structurée comme suit:

Le premier chapitre comporte des généralités sur la qualité de l'énergie électrique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de technologies des FACTS spécialement l'UPFC.

Le troisième chapitre est traité en détail les intelligences artificielles (la logique floue, les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones).

Le quatrième chapitre est dédié à l'application des algorithmes génétiques pour résoudre le problème des emplacements et des valeurs optimaux des FACTS. L'efficacité de cette méthode d'optimisation a été validée sur des réseaux tests (IEEE 14, 30 et 57 nœuds) pour augmenter la capacité de charge du système.

Le dernier chapitre est orienté sur le site optimal de l'UPFC et sa valeur appropriée dans les réseaux.

Chapitre I

Généralités sur la qualité
de l'énergie électrique

Chapitre I

Généralités sur la qualité de l'énergie électrique

I.1. Introduction:

Depuis de nombreuses années, le distributeur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de la fourniture d'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle [9].

Le développement économique, social et industriel dans la société actuelle a contribué à une augmentation de la consommation de l'énergie électrique, qui a pour conséquence, un accroissement de puissances à générer, à transporter et à distribuer. Par conséquent, les réseaux d'énergie électrique deviennent de plus en plus grands et compliqués, d'où l'intérêt permanent de chercher les moyens adéquats afin de les exploiter efficacement et économiquement.

I.2. Qualité de l'énergie électrique:

La notion de qualité signifie les propriétés de la production, on peut dire qu'on a une production de bonne ou de mauvaise qualité, s'il s'agit de l'énergie électrique, on exige une bonne qualité de celle-ci qu'on se basant sur les indices techniques (normes nominales).

Alors, la qualité de l'énergie électrique (QEE) est un sujet stratégique pour assurer la compétitivité des entreprises. L'ouverture du marché de l'électricité et la diffusion en masse des équipements à la fois sensibles et générateurs de perturbations doivent être maîtrisées par les services d'exploitation et de maintenance électrique.

La QEE est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et du courant.

I.2.1. Qualité de la tension:

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales: amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie du système triphasé.

A. Amplitude:

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale.

Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude, on distingue deux grandes familles de perturbations:

- Les creux de tension, coupures et surtensions: Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques;
- Les variations de tension: Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.

B. Fréquence:

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays (voir figure plus bas). Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge.

Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques.

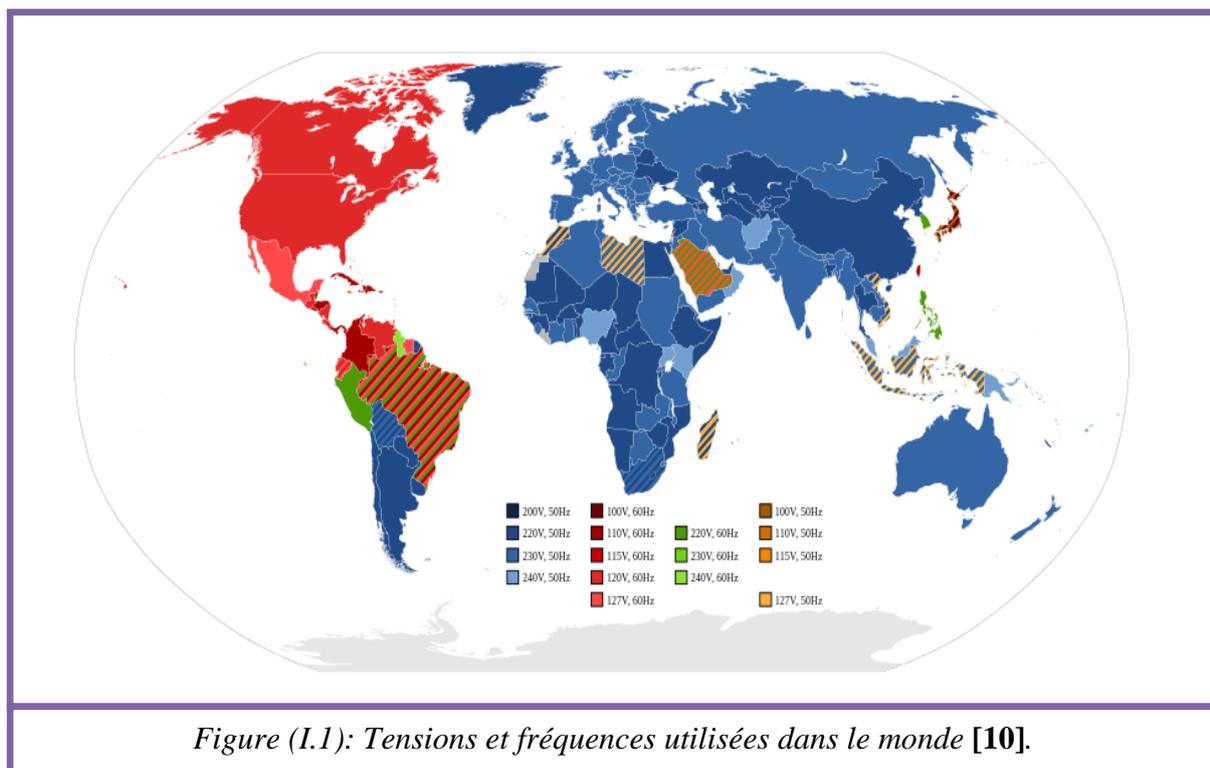


Figure (I.1): Tensions et fréquences utilisées dans le monde [10].

C. Forme d'onde:

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50 Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits.

D. Symétrie du système triphasé:

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.

I.2.2. Qualité du courant:

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres: amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de $2\pi/3$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension » [11].

I.3. Objectifs de la mesure de la qualité de l'énergie électrique:

I.3.1. Application contractuelle:

Des relations contractuelles peuvent s'établir entre fournisseur d'électricité et utilisateur final, mais aussi entre producteur et transporteur ou entre transporteur et distributeur dans le cadre d'un marché dérégulé. Une application contractuelle nécessite que les termes soient définis en commun et acceptés par les différentes parties. Il s'agit alors de définir les paramètres de mesure de la qualité et de comparer leurs valeurs à des limites prédéfinies voire contractuelles. Cette application implique souvent le traitement d'un nombre important de données.

I.3.2. Maintenance corrective:

Malgré le respect des règles de l'art (conception de schéma, choix des protections, du régime de neutre et mise en place de solutions adaptées) dès la phase de conception, des dysfonctionnements peuvent apparaître en cours d'exploitation:

- Les perturbations peuvent avoir été négligées ou sous-estimées;
- L'installation a évolué (nouvelles charges et/ou modification).

C'est généralement suite à ces problèmes qu'une action de dépannage est engagée.

L'objectif est souvent d'obtenir des résultats aussi rapidement que possible, ce qui peut conduire à des conclusions hâtives ou infondées.

Des systèmes de mesure portatifs (sur des temps limités) ou des appareils fixes (surveillance permanente) facilitent le diagnostic des installations (détection et archivage des perturbations et déclenchement d'alarmes).

I.3.3. Optimisation du fonctionnement des installations électriques:

Pour réaliser des gains de productivité (économies de fonctionnement et/ou réduction des coûts d'exploitation), il faut avoir un bon fonctionnement des procédés et une bonne gestion de l'énergie (deux facteurs qui dépendent de la QEE). Disposer d'une QEE adaptée aux besoins est un objectif des personnels d'exploitation, de maintenance et de gestion de sites tertiaires ou industriels.

Des outils logiciels complémentaires assurant le contrôle-commande et la surveillance permanente de l'installation sont alors nécessaires.

I.3.4. Enquêtes statistiques:

A. Enquêtes sur les performances générales d'un réseau:

Elles permettent, par exemple de:

- Planifier et cibler les interventions préventives grâce à une cartographie des niveaux de perturbations sur un réseau. Ceci permet de réduire les coûts d'exploitation ainsi qu'une meilleure maîtrise des perturbations. Une situation anormale par rapport à un niveau moyen peut être détectée et être corrélée avec le raccordement de nouvelles charges. Les tendances saisonnières ou des dérives peuvent aussi être étudiées;
- Comparer la QEE fournie par différents distributeurs en différents lieux géographiques.

Des clients potentiels peuvent en effet demander des caractéristiques de fiabilité pour la fourniture de l'électricité avant d'installer de nouvelles usines.

B. Enquêtes sur les performances en un point particulier du réseau:

Elles permettent de:

- Déterminer l'environnement électromagnétique auquel une installation future ou un nouvel équipement sera soumis. Des actions d'amélioration du réseau de distribution

et/ou de désensibilisation du réseau du client peuvent alors être engagées de façon préventive;

- Spécifier et vérifier les performances auxquelles le fournisseur d'électricité s'engage de façon contractuelle. Ces informations sur la qualité de l'électricité sont particulièrement stratégiques pour les compagnies d'électricité qui dans le contexte de la libéralisation du marché de l'énergie recherchent la meilleure compétitivité, la satisfaction des besoins et la fidélisation de leurs clients [12].

I.4. Dégradation de la qualité de l'énergie électrique:

Les perturbations électromagnétiques susceptibles de perturber le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont en général rangées en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées:

- Basse fréquence (< 9 kHz);
- Haute fréquence (≥ 9 kHz);
- De décharges électrostatiques.

La mesure de QEE consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau):

- Creux de tension et coupures brèves;
- Surtensions;
- Harmoniques et interharmoniques;
- Déséquilibres du système triphasé de tension;
- Fluctuations lentes de la tension [12].

I.4.1. Creux de tension et coupures brèves:

A. Creux de tension:

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension. Il est caractérisé par:

- Sa profondeur " ΔU ";
- Sa durée " Δt ".

La norme EN 50160 fixe la diminution de la tension à une valeur située entre 1% et 90% de la tension nominale pendant une durée de $\frac{1}{2}$ période à 50 Hz soit 10 ms jusqu'à une minute.

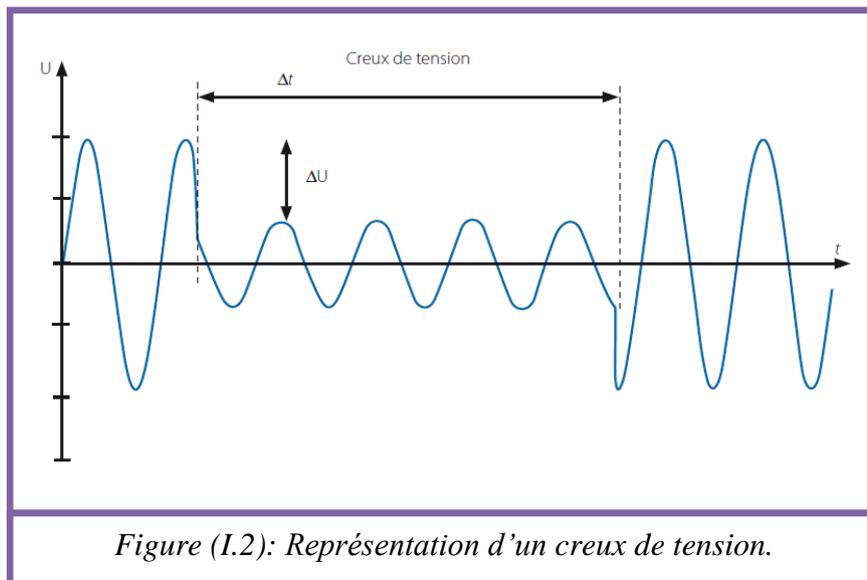
La mesure d'un creux de tension s'effectue par la détermination de la valeur efficace de la tension toutes les $\frac{1}{2}$ périodes (avec recouvrement d'une $\frac{1}{2}$ période).

Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution.

B. Coupures brèves:

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Sa profondeur est supérieure à 90% et elle est caractérisée uniquement par sa durée inférieure à 3 minutes. Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes.

Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des réseaux de distribution (réenclencheurs, isolations de défaut) [9].



I.4.2. Surtensions:

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension [12].

Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions [11].

La norme EN 50160 fixe les niveaux de surtensions selon le schéma de liaison à la terre de l'installation:

- Réseaux à neutre à la terre (raccordé directement ou avec une impédance): La surtension ne devra pas dépasser $1.7U_n$ (U_n est la tension nominale);
- Réseaux à neutre isolé ou résonant: La surtension ne devra pas dépasser $2U_n$.

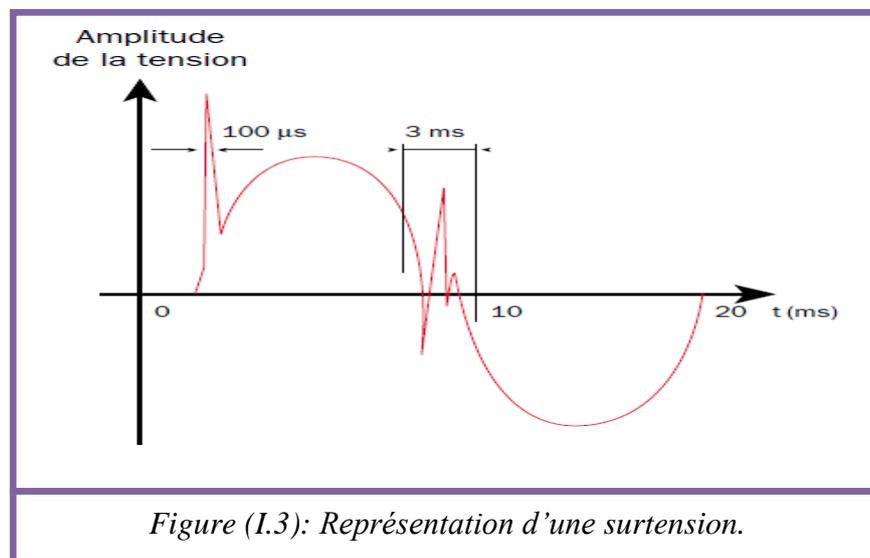
Les surtensions sont de trois natures:

- Surtensions temporaires: Les surtensions temporaires prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre phase et terre, lors d'une surcompensation de l'énergie réactive ou encore lors d'une ferro-résonance provoquée par un circuit inductif et un condensateur;

- Surtensions de manœuvre: Les surtensions de manœuvre découlent d'une modification de la structure du réseau, mise en service de gradins de condensateur d'une ligne à vide;
- Surtensions atmosphériques (foudre): Les surtensions atmosphériques sont provoquées par la foudre soit directement, soit indirectement par augmentation du potentiel de la terre.

Elles apparaissent selon deux modes:

- Mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre);
- Mode différentiel (entre conducteurs actifs, phase-phase ou phase-neutre) [9].



I.4.3. Harmoniques et interharmoniques:

A. Harmoniques:

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle [Voir Figure (I.4)]. Ils sont générés par des charges dites non-linéaires. Certains appareils ne présentent pas une impédance constante durant la durée de l'alternance de la sinusoïde de tension à 50 Hz. Ils absorbent alors un courant non sinusoïdal qui se propage dans le réseau et déforme ainsi l'allure de la tension.

Une tension ou un courant déformé par rapport à la sinusoïde de référence peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence multiples à celle du fondamental (50 Hz pour le réseau de distribution).

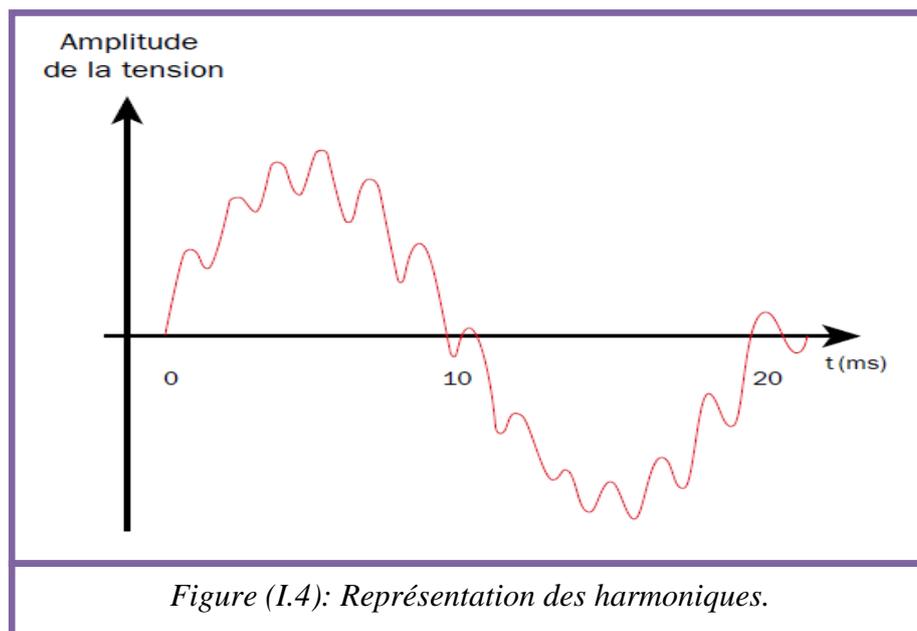
Chaque composante est caractérisée par son rang (par exemple rang 5 pour une composante à la fréquence de 250 Hz, soit 5×50 Hz) et par son amplitude exprimée en pourcentage par rapport à celle du fondamental.

B. Interharmoniques:

Les interharmoniques sont des signaux non multiples de la fréquence industrielle. Les variateurs de vitesses pour machines asynchrones, les fours à arcs sont les principaux générateurs d'interharmoniques.

On distingue deux types des effets:

- Les effets instantanés: Ces effets font suite à un phénomène de résonance entre l'impédance du réseau et les condensateurs de compensation. Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement (condensateurs, disjoncteur,...). D'autres troubles fonctionnels sont liés à la déformation de l'onde de tension tels que: couples pulsatoires sur les moteurs d'entraînement, vibrations, erreurs des systèmes de mesure (selon leur bande passante), perte de la détection du passage au zéro de tension pour les dispositifs de régulation.
- Les effets à terme: Ces effets se traduisent par une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements [9].



I.4.4. Déséquilibre du système triphasé de tensions:

Le déséquilibre du système triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou déphasées de 120° les unes par rapport aux autres.

La quantification du phénomène fait appel à la décomposition de la composante fondamentale selon les composantes symétriques de Fortescue [9].

La méthode des composantes symétriques de Fortescue consiste à substituer à un système déséquilibré de q grandeurs complexes quelconques un système de q grandeurs génératrices,

permettant de définir q systèmes « q phasés » équilibrés. Ces dernières grandeurs sont les composantes symétriques du système initial.

La transformation est assurée par un opérateur matriciel complexe, appelé matrice de Fortescue, d'ordre q noté $[F_q]$.

On a donc, pour le système initial:

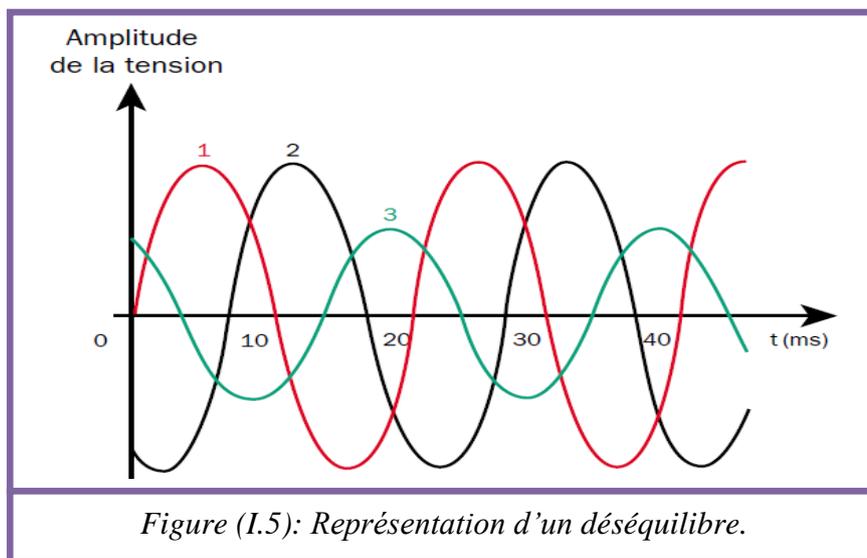
$$[\underline{V}] = [\underline{V}_1, \underline{V}_2, \dots, \underline{V}_q]^t = [F_q][\underline{V}'] \quad (I.1)$$

Et pour le système transformé:

$$[\underline{V}'] = [\underline{V}'_1, \underline{V}'_2, \dots, \underline{V}'_q]^t = [F_q]^{-1}[\underline{V}] \quad (I.2)$$

Les grandeurs $\underline{V}'_1, \underline{V}'_2, \dots, \underline{V}'_q$ sont les composantes symétriques du système initial défini par $\underline{V}_1, \underline{V}_2, \dots, \underline{V}_q$.

En électricité, un circuit symétrique polyphasé, soumis à l'action de tensions et courants déséquilibrés, peut être représenté par autant de schémas équivalents indépendants monophasés qu'il y a de phases; la superposition de tous ces modes équilibrés restitue le fonctionnement déséquilibré du circuit symétrique considéré [13].

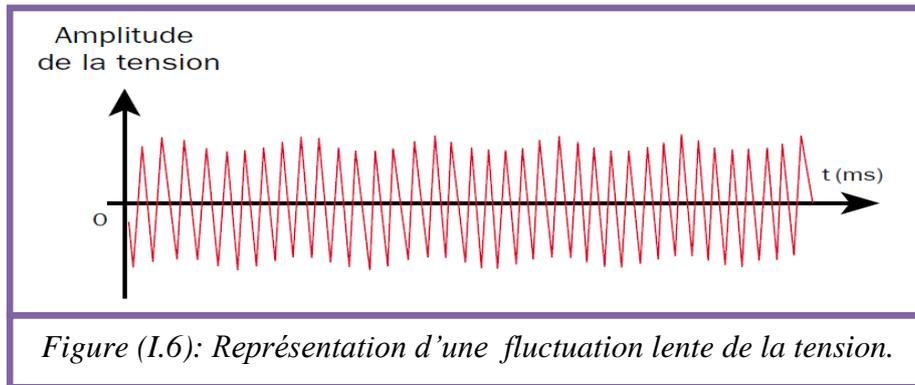


I.4.5. Fluctuations lentes de la tension:

La fluctuation lente de la tension (flicker) est une diminution de la valeur efficace de la tension de moins de 10%. La tension est modulée en amplitude par une enveloppe dont la fréquence est comprise entre 0.5 Hz et 25 Hz.

Le phénomène est dû à la propagation sur les lignes du réseau d'appels de courants importants à la mise en service ou hors service d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide (les fours à arcs, les machines à souder, les moteurs à démarrages fréquents,...).

Les conséquences de la fluctuation lente de la tension s'observent essentiellement sur des lampes à incandescence où elle provoque un papillotement du flux lumineux. Cette gêne visuelle est perceptible pour une variation de 1% de la tension [9].



I.4.6. Résumé:

Le tableau suivant résume les différentes perturbations précédentes [12]:

Tableau (I.1): Différentes perturbations électromagnétiques.

Perturbations	Creux de tension	Surtensions	Harmoniques	Déséquilibres	Fluctuations de tension
Formes d'onde caractéristiques					
Origine de la perturbation					
■ Réseau					
<input type="checkbox"/> Défaut d'isolement, rupture du conducteur de neutre...					
<input type="checkbox"/> Manœuvres et ferrorésonance					
<input type="checkbox"/> Foudre					
■ Equipements					
<input type="checkbox"/> Moteur asynchrone					
<input type="checkbox"/> Moteur synchrone					
<input type="checkbox"/> Machine à souder					
<input type="checkbox"/> Four à arc					
<input type="checkbox"/> Convertisseur					
<input type="checkbox"/> Charges informatiques					
<input type="checkbox"/> Eclairage					
<input type="checkbox"/> Onduleur					
<input type="checkbox"/> Batterie de condensateurs					

■ : Phénomène occasionnel ■ : Phénomène fréquent

I.5. Effets des perturbations sur les charges:

D'une façon générale, quelle que soit la perturbation, les effets peuvent être classés de deux façons différentes:

- Effets instantanés: Manœuvres intempestives de contacteurs ou d'organes de protection, mauvais fonctionnement ou arrêt d'une machine. L'impact financier de la perturbation est alors directement chiffrable;
- Effets différés: Pertes énergétiques, vieillissement accéléré du matériel dû aux échauffements et aux efforts électrodynamiques supplémentaires engendrés par les perturbations. L'impact financier (par ex. sur la productivité) est plus difficilement quantifiable.

Le tableau ci-après résume les principaux effets des perturbations [12]:

Tableau (I.2): Différentes effets des perturbations.

Equipements	Sensibilité aux perturbations					
	Creux de tension		Surtensions	Harmoniques	Déséquilibres	Fluctuations de tension
	< 0,5 s	> 0,5 s				
■ Moteur asynchrone						
■ Moteur synchrone						
■ Actionneur						
■ Variateur de vitesse						
■ Charge informatique, commande numérique						
■ Four à induction						
■ Eclairage						
■ Batterie de condensateurs						
■ Transformateur						
■ Onduleur						
■ Disjoncteur						
■ Câble						

I.6. Solutions pour améliorer la QEE:

Une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques.

Ceci suppose trois éléments:

- Un ou plusieurs générateurs de perturbations;
- Un ou plusieurs récepteurs sensibles à ces perturbations;
- Un chemin de propagation de ces perturbations entre les deux.

Les solutions consistent à agir sur tout ou partie de ces trois éléments soit de façon globale (installation) soit de façon locale (un ou plusieurs récepteurs).

Ces solutions peuvent être mise en œuvre pour:

- Corriger un dysfonctionnement dans une installation;
- Agir de façon préventive en vue du raccordement de charges polluantes;
- Mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie;
- Réduire la facture énergétique (réduction de l'abonnement en kVA, réduction de la consommation).

Les récepteurs n'étant pas sensibles aux mêmes perturbations et avec des niveaux de sensibilité différents, la solution adoptée, en plus d'être la plus performante d'un point de vue technico-économique, doit garantir un niveau de QEE sur mesure et adapté au besoin réel.

Un diagnostic préalable effectué par des spécialistes, de façon à déterminer la nature des perturbations contre lesquelles il faut se prémunir (par ex. les remèdes sont différents selon la durée d'une coupure), est indispensable. Il conditionne l'efficacité de la solution retenue. L'étude, le choix, la mise en œuvre et la maintenance (qui assure l'efficacité dans le temps) de solutions doivent aussi être effectués par des spécialistes.

L'utilité même de choisir une solution et de la mettre en œuvre dépend:

- Du niveau de performance souhaité: Un dysfonctionnement peut être inadmissible s'il met en jeu la sécurité des personnes (hôpitaux, balisage des aéroports, éclairages et systèmes de sécurité des locaux recevant du public, auxiliaires de centrale,...);
- Des conséquences financières du dysfonctionnement: Tout arrêt non programmé, même très court de certains procédés (fabrication de semi-conducteurs, sidérurgie, pétrochimie,...) conduit à une perte ou à une non qualité de la production;

- Du temps de retour sur investissement souhaité: C'est le rapport entre les pertes financières (matières premières, pertes de production,...) provoquées par la non-qualité de l'énergie électrique et le coût (étude, mise en œuvre, fonctionnement, maintenance) de la solution.

D'autres critères tels que les habitudes, la réglementation et les limites de perturbations imposées par le distributeur sont aussi à prendre en compte.

Le tableau suivant résume les différentes solutions pour améliorer la QEE [12]:

Tableau (I.3): Différentes solutions pour améliorer la QEE.

Types de perturbation	Origines	Conséquences	Exemples de solutions (équipement spécifiques et modifications)
Variations et fluctuations de tension	Variations importantes de charges (machines à souder, fours à arc...).	Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).	Compensateur électromécanique d'énergie réactive, compensateur automatique en temps réel, compensateur électronique série, régulateur en charge.
Creux de tension	Court-circuit, commutation de charges de forte puissance (démarrage moteur...).	Perturbation ou arrêt du procédé : pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage de moteurs, extinction de lampes à décharge.	ASI, compensateur automatique en temps réel, régulateur électronique dynamique de tension, démarreur progressif, compensateur électronique série. Augmenter la puissance de court-circuit (Pcc). Modifier la sélectivité des protections.
Coupures	Court-circuit, surcharges, maintenance, déclenchement intempestif.		ASI, permutation mécanique de sources, permutation statique de sources, groupe à temps zéro, disjoncteur shunt, téléconduite.
Harmoniques	Charges non linéaires (variateurs de vitesse, fours à arc, machines à souder, lampes à décharge, tubes fluorescents...).	Surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré, dégradation du rendement énergétique, perte de productivité.	Self anti-harmonique, filtre passif ou actif, filtre hybride, inductance de ligne. Augmenter la Pcc. Confiner les charges polluantes. Déclasser les équipements.
Inter-harmoniques	Charges fluctuantes (fours à arc, machines à souder...), convertisseur de fréquence.	Perturbation des signaux de tarification, papillotement (flicker).	Réactance série.
Surintensités transitoires	Manœuvre d'appareillages et de condensateurs, foudre.	Verrouillage de variateurs de vitesse, déclenchements intempestifs, destruction d'appareillage, incendies, pertes d'exploitation.	Parafoudre, parasurtenseur, enclenchement synchronisé, résistance de préinsertion, self de choc, compensateur automatique statique.
Déséquilibres de tension	Charges déséquilibrées (charges monophasées de forte puissance...).	Couples moteurs inverses (vibrations) et surchauffement des machines asynchrones.	Équilibrer les charges. Compensateur électronique shunt, régulateur électronique dynamique de tension. Augmenter la Pcc.

ASI: Alimentation Statique sans Interruption.

I.7. Maîtrise de la qualité de l'électricité:

Lorsqu'on dispose de moyens de mesure et d'évaluation, il est possible de définir des objectifs de qualité et de vérifier leur satisfaction. La tendance semble être de faire payer des pénalités aux GRT ("Grand River Transit" offre des services et des technologies pour rendre le transport accessible à tous) qui ne rencontrent pas les objectifs requis; certains seraient même partisans du paiement d'une compensation pour toute interruption de fourniture. D'autre part, il y a une tendance à vouloir réduire le coût du transport et de la distribution, ce qui

reviendrait à éviter des standards excessifs de qualité. Il ne suffit donc pas de pouvoir évaluer les niveaux existants de qualité. Il y a un besoin croissant de pouvoir les contrôler [14].

Il faut que, deux aspects principaux doivent être considérés: la continuité et la qualité de la tension. On peut relier ceci aux deux aspects généraux caractérisant la fourniture de produits et services:

- Le produit ou service doit être fourni en respectant le délai souhaité;
- Le produit ou service doit être de bonne qualité (la qualité souhaitée).

I.7.1. Continuité de la tension:

Diverses expressions moins spécifiques, telles que « fiabilité de l'alimentation », sont fréquemment utilisées pour désigner la continuité de la tension. Cette continuité résulte du comportement de l'ensemble du système production-transport-distribution qui doit satisfaire simultanément à des conditions de bonnes performances statiques (adéquation) et dynamiques (sûreté).

Le concept d'adéquation implique la disponibilité d'équipements permettant de satisfaire la demande des consommateurs à tout moment. La sûreté désigne la capacité du système à faire face au processus dynamique qui apparaît lors de la transition entre un état stable et un autre (par exemple, lors de la perte d'une grosse unité de production). Habituellement, les indices prévisionnels sont uniquement basés sur l'adéquation, tandis que les statistiques rendant compte a posteriori des performances du système concernent sa fiabilité globale (adéquation + sûreté) [15].

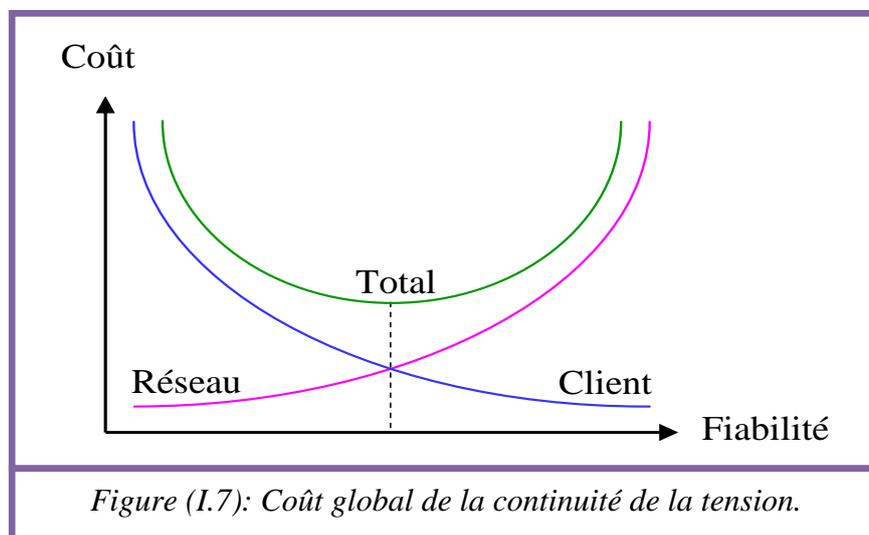
L'avènement du marché compétitif de l'électricité entraîne beaucoup de changements. La séquence classique production-transport-distribution n'est plus d'actualité parce que:

- La production se répartit entre divers producteurs indépendants, en compétition les uns avec les autres;
- La production décentralisée, souvent raccordée dans les réseaux de distribution, joue un rôle croissant.

La pratique dominante pour la planification des réseaux de transport est une approche déterministe. Cependant, la tendance actuelle semble vouloir privilégier l'obligation de résultats par rapport à l'obligation de moyens et il y a des tentatives de jeter des ponts entre approches déterministe et probabiliste, plutôt que les considérer comme les branches mutuellement exclusives d'une alternative. On essaie par exemple d'établir des liens entre objectifs de continuité de la tension et spécifications de fiabilité des matériels électriques, en utilisant deux méthodes complémentaires:

- Une approche descendante, appelée « allocation d'objectifs probabilistes », qui déduit les spécifications de fiabilité des matériels des postes à partir des objectifs de continuité de la tension;
- Une approche montante qui calcule la fiabilité des postes HT à partir de la fiabilité des composants, permettant une comparaison entre diverses architectures.

La conception du système n'est évidemment pas l'unique facteur influençant le niveau final de continuité de la tension (de fiabilité de l'alimentation). Celui-ci résulte des trois activités techniques fondamentales du gestionnaire de réseau: la conception, l'entretien et l'exploitation du réseau. Les coûts ont une importance décisive - notamment les coûts des coupures - en vue d'atteindre l'optimum décrit par la courbe bien connue de la figure ci-dessous:



I.7.2. Qualité de la tension:

Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales: fréquence, amplitude, forme d'onde et symétrie.

A. Amplitude, forme d'onde et symétrie:

On étudie les deux cas suivants:

A.1. Amplitude sous l'angle des creux de tension et coupures brèves:

De même que les coupures longues, les creux de tension et coupures brèves sont influencés par la conception du système, la fiabilité des composants, la sélectivité des protections, les procédures de maintenance et d'exploitation. Des logiciels de simulation peuvent être très utiles à plusieurs égards:

- Comme outils complémentaires pour la surveillance « monitoring » permanente (on sait qu'il faut beaucoup d'années avant d'accumuler des données statistiquement

significatives et que le système peut évoluer dans l'intervalle), notamment en vue de fournir une information adéquate pour les utilisateurs;

- Comme outils d'aide à la décision, pour choisir entre diverses possibilités (l'évolution du réseau, les équipements ou les procédures);
- Comme aide pour l'évaluation du risque financier lié à certaines clauses contractuelles spécifiques ou à certains engagements généraux de qualité.

A.2. Amplitude sous l'angle des fluctuations rapides, forme d'onde et symétrie:

Ces aspects de la qualité ont un point commun: les phénomènes perturbateurs (flicker, harmoniques et déséquilibre) proviennent principalement du fonctionnement normal des installations dites perturbatrices. La qualité doit dès lors être maîtrisée via la spécification de limites d'émission adéquates pour ces installations.

B. Fréquence:

On sait que la responsabilité du GRT est de veiller au respect de la part que doit prendre sa zone de réglage dans les réglages primaire et secondaire de la fréquence du système synchrone. Il s'agit à cette fin de spécifier correctement la contribution des producteurs qui sont actifs dans la zone de réglage (les services auxiliaires correspondants peuvent, par exemple être achetés par le GRT à certains des producteurs) [14].

I.8. La sécurité des réseaux de transport:

Le réseau électrique est une infrastructure vitale et stratégique pour les sociétés modernes. Aujourd'hui, la perte du réseau est une véritable catastrophe quand cela arrive. Pourtant, c'est un système très énergétique qui doit constamment préserver un équilibre fragile entre la production et la consommation, du fait que l'électricité ne se stocke pas en grande quantité. Or, le réseau est un système complexe de grande dimension et multicouches qui est sujet en permanence à des perturbations diverses, ce qui rend son comportement chaotique et difficile à maîtriser.

Pourtant, dans les sociétés de consommation actuelles, la rupture de l'alimentation en électricité est de moins en moins acceptée. Cela peut éventuellement être discutable lorsque cette énergie est utilisée pour des fonctions directement liées au confort des usagers, cela l'est beaucoup moins lorsqu'il s'agit de fonctions plus prioritaires (industries, hôpitaux, aéroports, échanges internationaux,...etc.). Dans tous les cas, une panne majeure du réseau, selon son étendue, peut coûter des dizaines de milliards de capitaux et affecter des dizaines de millions de consommateurs. L'impact économique et social d'une panne peut donc être considérable.

Le niveau de sécurité d'un réseau est jugé satisfaisant, si d'une part, il est apte à assurer l'équilibre production-consommation en respectant certaines limites admissibles liées aux transits de puissance dans les lignes, aux tensions en chaque nœud et aux points de fonctionnement des groupes de production, et si d'autre part, il est apte à survivre à une perturbation plus ou moins violente.

I.8.1. La sécurité statique:

La sécurité statique concerne le bon fonctionnement du réseau en régime permanent qui ne peut être garanti que si:

- Toutes les consommations actives et réactives sont satisfaites. Il s'agit là de l'objectif fondamental d'un réseau (assurer l'alimentation de toutes les charges qui sont connectées). Cet équilibre est nécessaire pour maintenir la fréquence à sa valeur nominale;
- Les tensions en tous les nœuds du réseau sont comprises entre des limites maximales et minimales. En effet, des tensions trop basses peuvent conduire à un effondrement généralisé et des tensions trop élevées peuvent endommager les équipements ou dégrader leur fonctionnement (vieillesse prématurée des isolants, saturation des transformateurs);
- Les transits dans les lignes et les transformateurs sont inférieurs aux limites admissibles, que ce soit pour les courants (limite thermique pour l'échauffement des conducteurs) ou pour les puissances (limite de stabilité). A noter que des lignes surchargées peuvent être déclenchées par leurs protections, ce qui dégrade le plan de tension et peut entraîner un effondrement. Une autre conséquence possible est que le report des transits des lignes déclenchées sur d'autres lignes peut les surcharger à leur tour et provoquer des déclenchements en cascade, éventuellement jusqu'à la panne généralisée;
- Les points de fonctionnement en puissance active et réactive des groupes de production restent à l'intérieur d'un diagramme de groupe, qui permet de garantir que le courant nominal n'est pas dépassé.

I.8.2. La sécurité dynamique:

La sécurité dynamique concerne l'évolution temporelle du réseau après une perturbation. Si la perturbation est forte et brutale, comme par exemple la perte d'un ouvrage ou un court-circuit, les variations importantes des grandeurs physiques peuvent faire perdre le synchronisme aux générateurs. De telles perturbations sont susceptibles de provoquer des comportements non

linéaires du système. On parlera alors de problème de stabilité transitoire, ou stabilité de première oscillation. Celle-ci dépend fortement de l'ampleur, de la durée (dans le cas d'un court-circuit) et de la position de la perturbation, ainsi que de l'état initial du réseau.

Inversement, si les perturbations sont faibles, comme par exemple des variations graduelles de charges, nous parlerons de stabilité en petits signaux.

En fait, les termes transitoire et dynamique caractérisent des phénomènes à échelle de temps différente. Le régime transitoire concerne les instants immédiats après la perturbation (quelques millisecondes à quelques secondes) alors que le régime dynamique désigne la période suivant le régime transitoire jusqu'à ce que le système revienne à l'état d'équilibre (quelques secondes à quelques dizaines de secondes), ou qu'il ne devienne instable [16].

I.9. Les différents types de la stabilité de système de puissance:

La stabilité d'un système de puissance est la capacité d'un système d'énergie électrique, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de retrouver le même état ou un autre état d'équilibre après avoir subi une perturbation physique, en gardant la plupart des variables de système dans leurs limites, de sorte que le système entier reste pratiquement intact.

Alors, la stabilité représente la propriété du mouvement du système autour d'un état d'équilibre (c.-à-d. les conditions de fonctionnement initiale).

Dans un état d'équilibre, toutes les différentes forces opposées sont:

- Soit instantanément: C'est le cas des points d'équilibre;
- Soit périodiquement: C'est le cas des variations périodiques lentes en raison des petites fluctuations continues sur les charges ou la génération.

Ainsi, la stabilité dépend non seulement des conditions de fonctionnement initiales, elle dépend également de la nature physique et de l'amplitude de la perturbation.

En raison de la taille, de l'importance et de la complexité des problèmes de stabilité, il est très intéressant de faire des simplifications et des hypothèses appropriées pour représenter analytiquement le système.

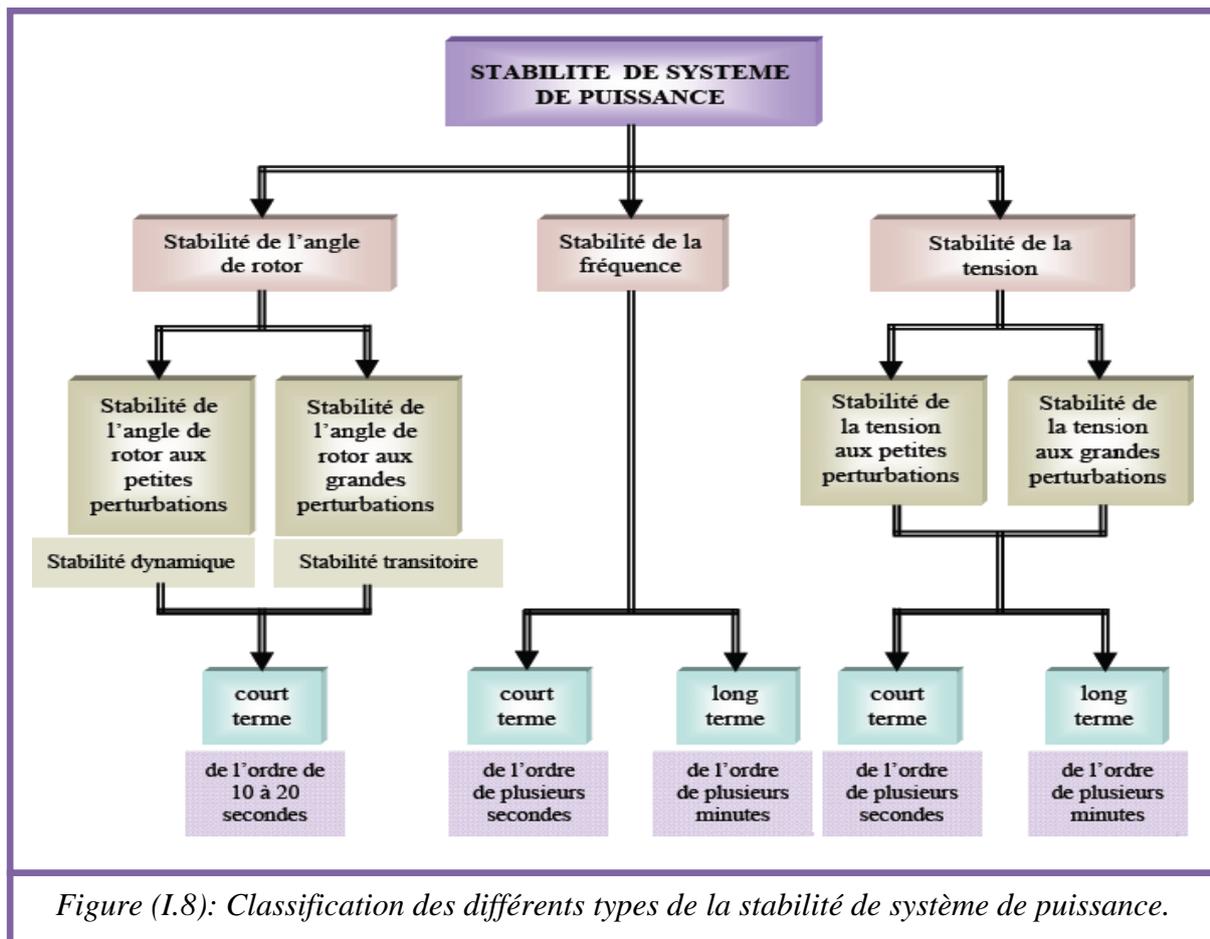
Pour analyser et résoudre les problèmes d'instabilité dans les systèmes de puissance, il est indispensable de regrouper les différents groupes de stabilité. Cette classification de la stabilité est basée sur les considérations suivantes:

- La nature physique de l'instabilité résultante;
- L'amplitude de la perturbation;
- La plage de temps nécessaire pour assurer la stabilité;
- Les dispositifs et les processus nécessaires pour assurer la stabilité.

Habituellement, la stabilité est divisée en trois groupes, à savoir:

- La stabilité de l'angle de rotor;
- La stabilité de la fréquence;
- La stabilité de la tension.

La figure suivante représente ces principales catégories de stabilité d'un système de puissance et leurs sous-catégories [17].

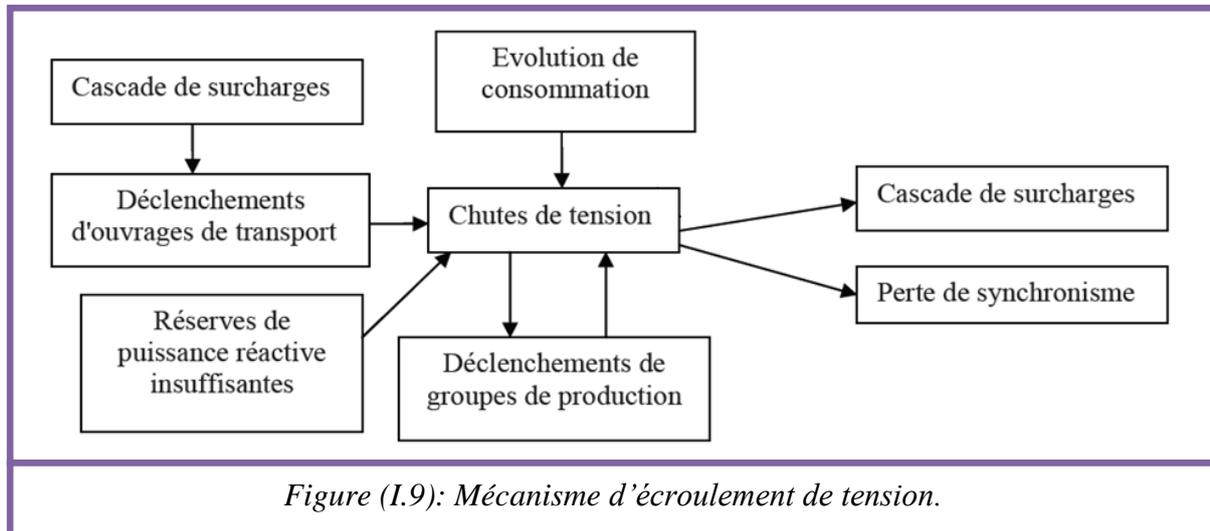


I.10. Mécanismes des instabilités du système électrique:

I.10.1. Mécanisme d'écroulement de tension:

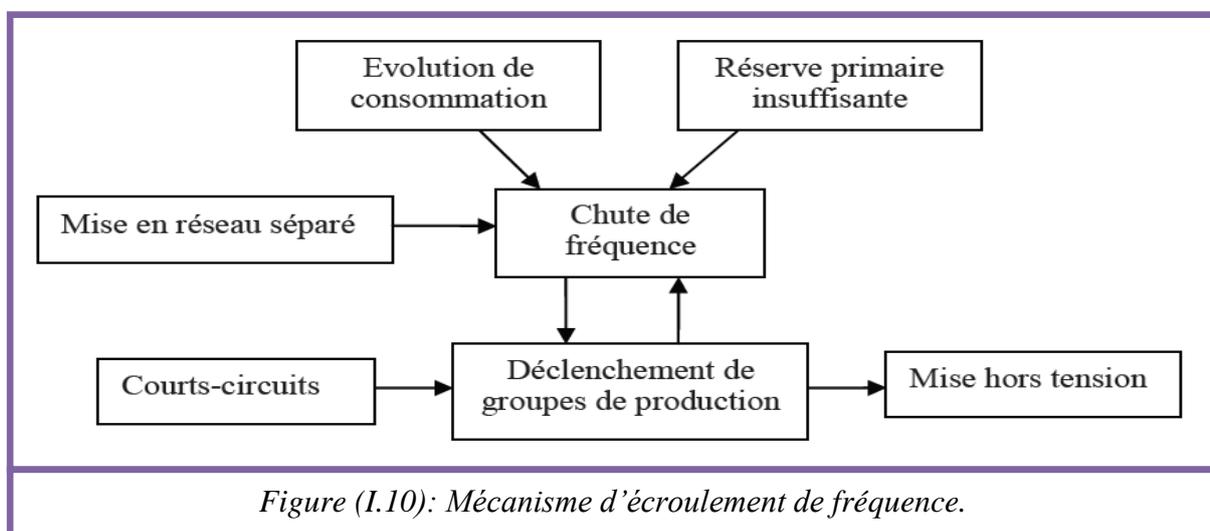
Avant l'écroulement de tension, le plan de tension est bas à cause d'une consommation importante, une ligne proche de la limite de puissance transmissible, une production trop éloignée de la consommation et/ou une insuffisance de moyens de compensation. Les pertes réactives du réseau sont en augmentation. Si la consommation augmente encore, une ligne ou un transformateur peuvent déclencher à cause de la surcharge. Les pertes réactives du réseau augmentent encore et le plan de tension continue de baisser. Les prises des régleurs en charge des transformateurs et les puissances réactives des générateurs ou des compensateurs

augmentent pour élever la tension. Les pertes réactives du réseau augmentent continûment, et de plus en plus de lignes sont en surcharge et déclenchent. Quand les puissances réactives des générateurs ou des compensateurs et/ou les prises des régulateurs arrivent à leurs limites, la tension baisse rapidement et l'écroulement de tension se produit. La dynamique observée d'un écroulement de tension est de quelques secondes à quelques dizaines de minutes.



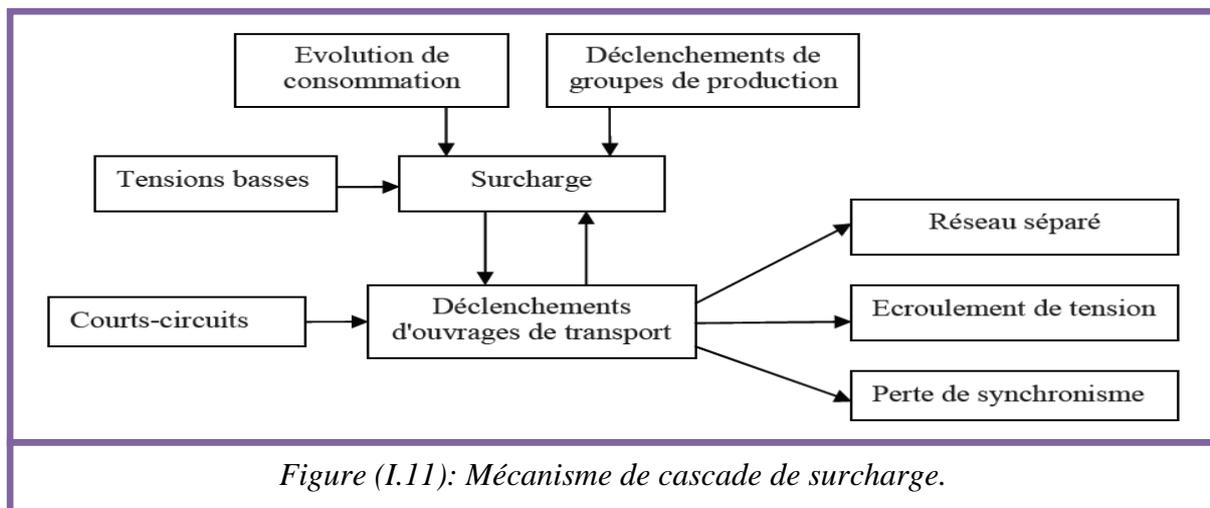
I.10.2. Mécanisme d'écroulement de fréquence:

Quand la réserve primaire de puissance active est insuffisante dans le réseau. Si des groupes de production déclenchent, le réseau se sépare, ou la consommation évolue; l'équilibre entre production et consommation ne peut être maintenu. La fréquence ne peut pas être ramenée dans une plage de fonctionnement correcte. L'écroulement peut être accéléré par le déclenchement en cascade des groupes de production par leur protection de découplage, dès que la fréquence est située hors de la plage de fonctionnement autorisée. La dynamique généralement observée d'un écroulement de fréquence est de l'ordre de la seconde.



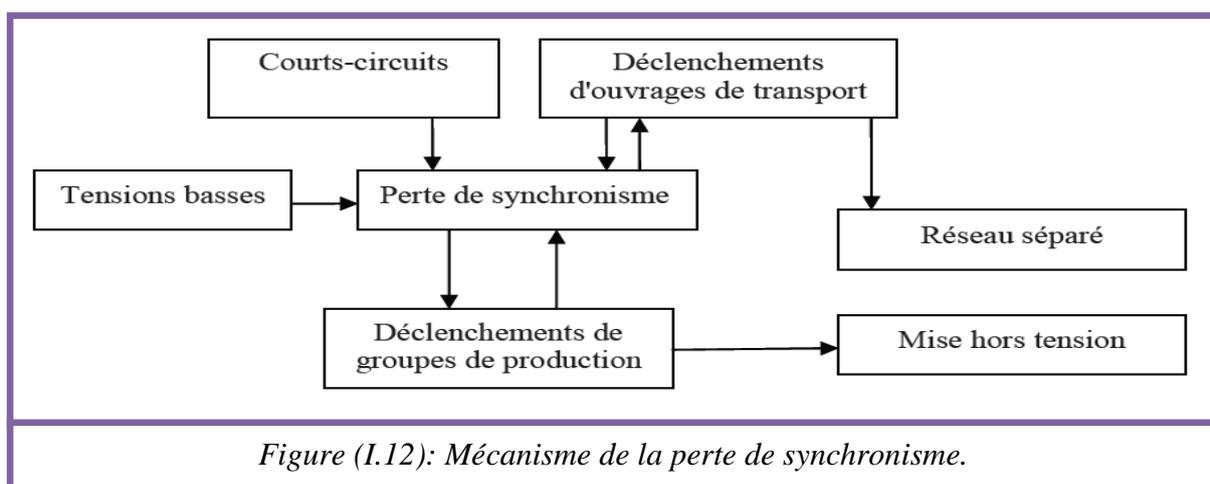
I.10.3. Mécanisme de cascade de surcharge:

La cascade de surcharge commence par l'évolution de la consommation, des tensions basses, le déclenchement d'une ligne ou d'un transformateur. Lors d'incidents sérieux, à cause du phénomène de report de charge sur les autres ouvrages, la cascade de surcharge apparaît. La situation du réseau devient de plus en plus dégradée lorsque plusieurs d'ouvrages déclenchent. Le réseau se sépare, l'écroulement de tension, ou/et la perte de synchronisme apparaissent. La dynamique observée d'une cascade de surcharge est de dizaines de minutes dues aux temporisations de déclenchement des protections de surcharge des lignes.



I.10.4. Mécanisme de la perte de synchronisme:

Les déclenchements d'ouvrages de transport, les courts-circuits, les tensions basses ou les déclenchements de groupes de production peuvent tendre à affaiblir les liens électriques entre la région concernée et le reste du réseau; la perte de synchronisme se produit. Alors, généralement la dynamique observée d'une perte de synchronisme est de l'ordre de la seconde [18].



I.11. Conclusion:

La recherche d'une meilleure compétitivité des entreprises, la dérégulation du marché de l'énergie électrique font que la qualité de l'électricité est devenu un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance, de gestion de sites tertiaires ou industriels ainsi que pour les constructeurs d'équipements.

Cependant, les perturbations ne doivent pas être subies comme une fatalité car des solutions existent. Leur définition et leur mise en œuvre dans le respect des règles de l'art, ainsi que leur maintenance par des spécialistes permettent une qualité d'alimentation personnalisée adaptée aux besoins de l'utilisateur [12].

Devant l'évolution récente des réseaux électriques, l'accroissement considérable des interconnexions ainsi que les contraintes économiques, la stabilité des réseaux électriques devient plus critique. L'utilisation de la nouvelle technologie FACTS améliore les performances dynamiques du système électriques tel que;

- Une meilleure utilisation de moyens de transmissions existants;
- Augmenter la capacité du transfert du système de transmission;
- Améliorer la stabilité des réseaux électriques et la qualité de service.

Malgré le coût élevé de cette solution, mais vu l'évolution récente des réseaux électriques et leurs contraintes, cette solution est très efficace [19].

Chapitre II

Etude de technologies
des FACTS (UPFC)

Chapitre II

Etude de technologies des FACTS (UPFC)

II.1. Introduction:

Les moyens classiques de compensation de l'énergie réactive comme les bancs de condensateurs, le moteur synchrone surexcité présentent plusieurs inconvénients, où la valeur de la puissance réactive injectée au réseau reste indifférente aux changements de l'appel de puissance du réseau ce qui provoquera des conséquences néfastes (échauffement, surtension, chute de tension,...). Ainsi le recours à un système flexible avec les demandes de puissance instantanées est devenu inévitable [20].

Les dispositifs FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) sont des moyens utilisés pour augmenter la puissance transmissible [21]. Ils permettent de repousser les limites de stabilité et de transit de puissance en modifiant artificiellement la longueur électrique apparente de la ligne [22].

L'UPFC (Unified Power Flow Controller), est l'un des plus performants des systèmes FACTS. Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment la puissance active et la puissance réactive de la ligne. Il peut améliorer la stabilité transitoire des générateurs connectés aux réseaux et garantir une bonne fiabilité de fonctionnements des générateurs de production [23].

II.2. Généralités sur les dispositifs FACTS:

Le consortium de recherche américain EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé le projet FACTS en 1988. C'est un projet à long terme qui vise à rendre les réseaux plus flexibles au moyen de dispositifs à base d'électronique de puissance, et plus particulièrement de thyristors.

Il existe de nombreux types de systèmes FACTS. Nous allons faire ici une description sommaire des principaux dispositifs. Dans la famille des FACTS, on peut donc distinguer:

- Les compensateurs séries réglables (*Thyristors Controlled Series Compensator* "TCSC", *Static Synchronous Series Compensator* "SSSC",... etc.): La compensation est de type série. Ils permettent de modifier l'impédance apparente des lignes, et donc la puissance transmise ainsi que d'amortir les oscillations de puissance basse fréquence;
- Les compensateurs statiques d'énergie réactive (*Static Var Compensator* "SVC", *STATic COMpensator* "STATCOM",... etc.): La compensation est de type shunt. Ils

réalisent le soutien local de la tension en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive à l'endroit où ils sont connectés. Ils sont également utilisés pour améliorer la stabilité dynamique du système, en leur ajoutant une boucle de régulation supplémentaire pour l'amortissement des oscillations de puissance;

- Les déphaseurs statiques (*Static Phase Shifters "SPS"*): Ils sont des transformateurs à rapport de transformation complexe dont le réglage est effectué par des thyristors. Ils assurent un contrôle de l'angle de transmission sur les lignes où ils sont implantés, et donc un contrôle de la puissance qui transite par ces lignes;
- Le déphaseur-régulateur universel (*Unified Power Flow Controller "UPFC"*): Il englobe les caractéristiques des compensations shunt et série, ainsi que des déphaseurs. Il est donc capable d'agir sur les trois paramètres (tension, impédance et déphasage) qui permettent de contrôler le transit de puissance sur une ligne de transport.

Alors, l'insertion de dispositifs FACTS dans des réseaux complexes et interconnectés, pour une meilleure exploitation et une amélioration de leurs performances en régime permanent, introduit une nouvelle dimension en termes de dynamique que l'on se doit d'examiner attentivement pour que cette insertion puisse se faire avec succès.

Il est donc essentiel que ces dispositifs soient coordonnés entre eux; mais aussi avec les autres équipements du réseau, pour éviter que leurs actions n'aient un effet négatif sur la sécurité globale du réseau [16].

II.2.1. Nécessité des dispositifs FACTS:

La compensation de l'énergie réactive au niveau des lignes de transmission permet la régulation du profil de la tension le long de ces lignes avec un bon contrôle de la puissance active transmise. Il est reconnu que, la stabilité peut être améliorée quelque soit son type, si la compensation réactive du système de transmission varie rapidement. Les méthodes de compensation de l'énergie réactive classiques se basent sur les batteries de condensateurs ou les bobines fixes ou commandées mécaniquement, ces méthodes sont non efficaces dans le contrôle du réseau électrique quand il est sévèrement perturbé.

Grâce aux avancées récentes dans la technologie de: GTO (thyristor blocable par la gâchette), MOSFET (transistor à effet de champ à grille isolée) et IGBT (transistor bipolaire à grille isolée), le temps de réaction de ces dispositifs est diminué à quelques milli secondes, il est possible donc de répondre à la demande par l'utilisation d'une compensation rapide en utilisant les dispositifs FACTS [19].

II.2.2. Bénéfices offerts par la technologie FACTS:

Les bénéfices que peut fournir la technologie des FACTS et leurs implémentations sont:

- Contrôle de l'écoulement de puissance: C'est la fonction principale des FACTS. L'utilisation du contrôle de l'écoulement de puissance peut satisfaire les demandes de charge, atteindre un fonctionnement optimal et surmonter les conditions d'urgence;
- Amélioration de la stabilité dynamique: Cette fonction supplémentaire des FACTS comprend l'amélioration de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations de puissance et le contrôle de stabilité de la tension;
- Fournir des connections sécurisées entre les compagnies de production et les régions par la diminution de la réserve de la puissance à générer requise par les deux zones;
- Augmenter la capacité de transport de lignes à leurs capacités thermiques, y compris les demandes à court terme et saisonnière [24].

II.2.3. Contribution des systèmes FACTS dans les réseaux électriques:

L'application de compensateurs séries, shunts ainsi que les compensateurs hybrides dépend du problème à résoudre. Le tableau ci-dessous résume l'utilisation des FACTS dans les différents problèmes rencontrés dans les réseaux électriques [5].

Tableau (II.1): Contribution des systèmes FACTS dans les réseaux électriques.

Sujet	Problème	Action corrective	Eléments FACTS
Limite des tensions	Chute de tension à une charge extrême	Fournir de l'énergie réactive	SVC, STATCOM
		Réduire la réactance de la ligne	TCSC
	Surtension suite à une ouverture d'une grande charge	Absorption de l'énergie réactive	SVC, STATCOM
	Surtension à charge réduite	Absorption de l'énergie réactive	SVC, STATCOM
	Chute de tension suite à un court-circuit	Fournir de l'énergie réactive	SVC, STATCOM
Limite thermique	Surcharge des lignes de transport	Augmenter la capacité de transport	TCSC, SSSC, UPFC
Ecoulement de puissance	Distribution de la puissance sur des lignes en parallèle	Ajuster la réactance de la ligne	TCSC, UPFC, SSSC
		Ajuster l'angle de transport	UPFC, SSSC
	Inverser l'écoulement de puissance	Ajuster l'angle de transport	UPFC, SSSC
Courts-circuits	Les courants intenses des courts-circuits	Limitation des courants des courts-circuits	TCSC, UPFC
Stabilité	Puissance transmissible limitée	Réduire la réactance de la ligne	TCSC, SSSC

II.2.4. Modélisation des dispositifs FACTS:

Différentes façons de modéliser les dispositifs FACTS ont été développées pour l'étude des régimes stationnaires. Elles se différencient principalement par la méthode utilisée pour intégrer les FACTS dans le calcul de la répartition de charges (load flow). Les trois modélisations rencontrées le plus souvent dans la littérature sont basées respectivement sur l'injection de puissance équivalente, la création d'un nœud fictif ou encore la modification de la matrice d'admittance.

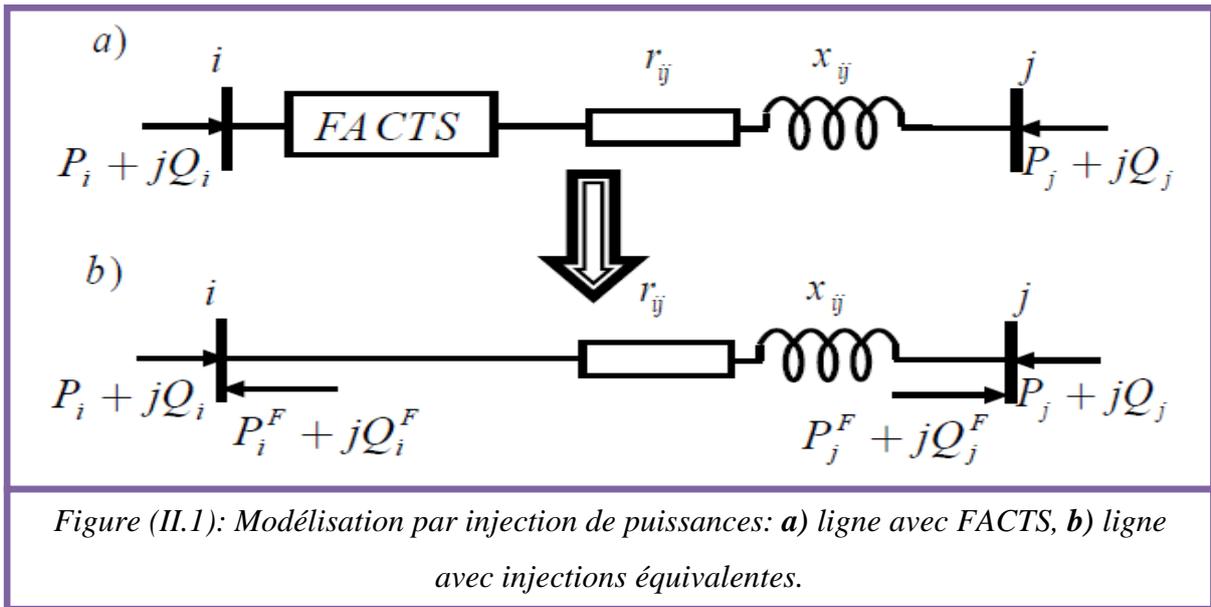
A. Injection de puissance aux extrémités de la ligne:

Le calcul de répartition des puissances ou écoulement des puissances (power flow) consiste à déterminer l'ensemble des transits de puissances et des tensions dans le réseau pour un cas de charge donné. Quatre grandeurs sont associées à chaque nœud du système: les puissances active et réactive ainsi que le module et la phase de la tension. Seules deux de ces quatre variables sont connues en un nœud, les deux autres étant déterminées lors du calcul. Trois combinaisons définissant trois types de nœuds, sont généralement utilisées:

- Nœud de charge (PQ): C'est un nœud connecté directement avec la charge, il ne possède aucune source d'énergie. Les puissances active et réactive sont considérées connues;
- Nœud générateur (PV): C'est un nœud connecté directement avec un générateur ou une source d'énergie réactive. La puissance active et la tension sont considérées connues. La production de l'énergie réactive est limitée par des valeurs inférieures et supérieures (Q_g^{min} et Q_g^{max}) respectivement. Si l'une des deux limites est atteinte, la valeur se fixe à cette limite et la tension se libère, le nœud devient alors un nœud (PQ);
- Nœud de référence (Slack bus): C'est un nœud connecté avec un générateur relativement puissant; il est considéré dans le calcul d'écoulement de puissance afin de compenser les pertes actives et assurer l'égalité entre la demande et la génération de la puissance active. Dans un nœud de référence, l'amplitude et l'angle de la tension sont supposés connus.

Une des méthodes les plus répandues consiste à représenter les dispositifs FACTS sous forme d'injections de puissances aux nœuds telles que représentées à la figure (II.1).

Le principe consiste à remplacer l'effet dû au dispositif FACTS sur les transits de puissances dans la ligne [Voir Figure (II.1.a)], par des injections de puissances aux deux extrémités [Voir Figure (II.1.b)].



Les injections de puissances active et réactive au nœud i sont données par:

$$P_i^F = P_{ij} - P_{ij}^F \quad (II.1)$$

$$Q_i^F = Q_{ij} - Q_{ij}^F \quad (II.2)$$

Avec:

P_i^F et Q_i^F sont des injections équivalentes de puissances active et réactive au nœud i .

P_{ij} et Q_{ij} sont des transits de puissances active et réactive sans dispositifs FACTS.

P_{ij}^F et Q_{ij}^F sont des transits de puissances active et réactive avec dispositifs FACTS dans la ligne.

Deux relations similaires sont obtenues pour le nœud j . Ces quatre injections équivalentes, ainsi que le modèle standard de la ligne sont utilisées dans les équations de la répartition de charges. Elles sont traitées comme des charges ou des générations aux nœuds i et j . Les injections de puissances actives aux nœuds PV et PQ s'écrivent:

$$P_i + P_i^F = V_i \sum_{k=1}^n V_j [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (II.3)$$

Les puissances réactives injectées aux nœuds PQ valent:

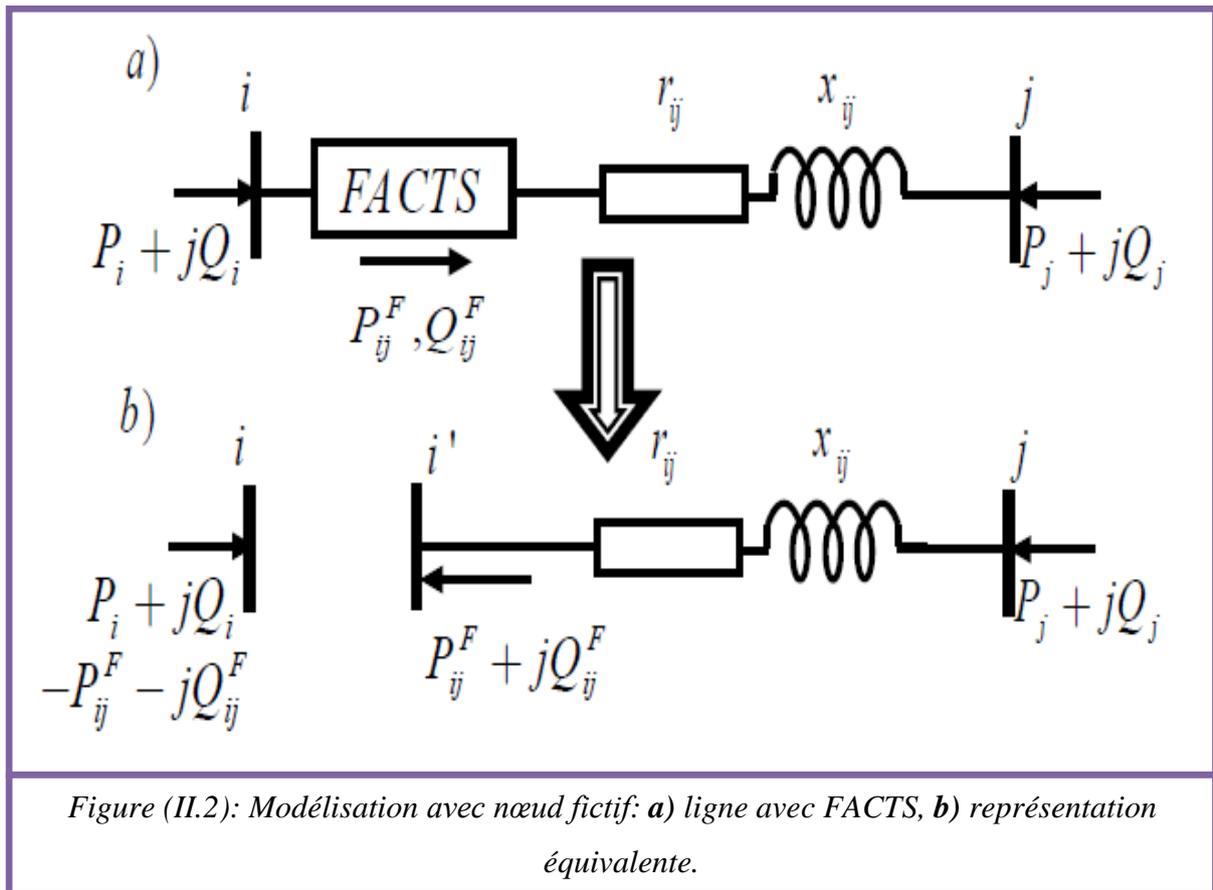
$$Q_i + Q_i^F = -V_i \sum_{k=1}^n V_j [g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (II.4)$$

Avec: V_i et V_j sont les tensions des jeux de barres i et j ; n est le nombre de nœuds du système; δ_i et δ_j sont les angles de tension des jeux de barres i et j ; g_{ij} et b_{ij} sont respectivement la partie réelle de l'admittance (conductance) et la partie imaginaire (susceptance) de la ligne de transmission.

Les effets des FACTS sur les transits de puissances dans les lignes et ceux sur le contrôle des tensions aux nœuds y sont traités séparément.

B. Création d'un nœud fictif:

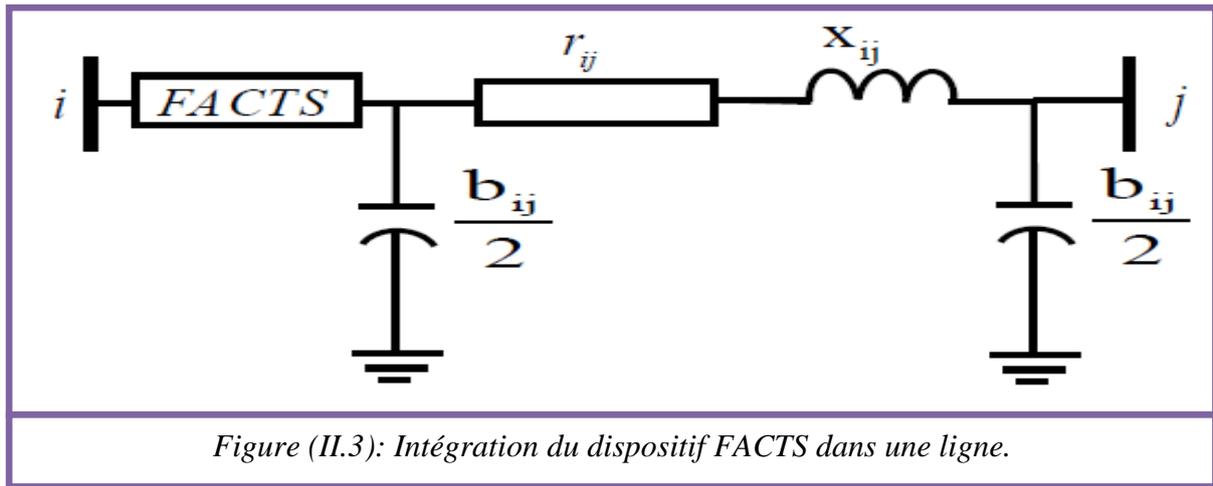
Une modélisation de FACTS est basée sur la création d'un nœud fictif. Le modèle d'un dispositif de type UPFC permettant de contrôler les transits de puissances active et réactive, est illustré à la figure (II.2).



Les valeurs de consigne des dispositifs sont directement exprimées en termes de puissances circulant dans les lignes ou injectées aux nœuds [Voir Figure (II.2.a)]. Un nœud fictif i' dans lequel la ou les puissances contrôlées sont injectées est temporairement créé. Pour conserver le bilan de puissance, la puissance injectée au nœud i' est soustraite au nœud i [Voir Figure (II.2.b)]. Le nouveau nœud est pris en compte dans le calcul de répartition des puissances.

C. Modification de la matrice d'admittance nodale:

Généralement la ligne de transport est modélisée par un schéma équivalent en π , qui se compose d'une résistance r en série avec une réactance inductive x et une admittance shunt qui consiste en une susceptance capacitive b en parallèle avec une conductance d'isolation g . Voir la figure (II.3).



La matrice d'admittance nodale d'une ligne reliant un nœud i à un nœud k est donné par:

$$Y_{Bus} = \begin{bmatrix} y_{ij} + y_{ij0}/2 & -y_{ij} \\ -y_{ij} & y_{ij} + y_{ij0}/2 \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

Où les admittances longitudinales valent:

$$y_{ij0} = g_{ij0} + jb_{ij0} \quad (II.6)$$

$$y_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (II.7)$$

Avec: r_{ij} est la résistance longitudinale; x_{ij} est la réactance longitudinale; b_{ij} est la susceptance transversale; et g_{ij} est la conductance d'isolation transversale.

Les FACTS sont envisagés comme des éléments venant modifier directement la matrice d'admittance nodale du réseau. Ils sont insérés dans la ligne selon la représentation de la figure (II.3). Selon le type de FACTS modélisé, le dispositif peut être placé au milieu ou à une extrémité de la ligne.

Les paramètres d'une ligne équivalente sont déterminés et substitués à ceux de la ligne sans FACTS dans la matrice d'admittance nodale. Cette dernière est modifiée de la manière suivante [25]:

$$Y_{nod} = \begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix}}_{\text{Ligne}} + \underbrace{\begin{bmatrix} y_{ii}^F & y_{ij}^F \\ y_{ji}^F & y_{jj}^F \end{bmatrix}}_{\text{FACTS}} \quad (II.8)$$

II.2.5. Coût des dispositifs FACTS:

Mis à part les avantages techniques apportés par les dispositifs FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un

dispositif FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation. Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que: les performances requises, la puissance de l'installation, le niveau de tension du système et la technologie du semi-conducteur utilisée.

II.2.6. Applications pratiques des dispositifs FACTS:

Les systèmes FACTS sont habituellement connus comme nouvelle technologie, mais des centaines d'installations dans le monde, plus particulièrement du SVC depuis 1970 avec une puissance totale installée de "90.000 (MVAR)", prouvent l'acceptation de ce genre de technologie. Le tableau suivant montre des chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde avec les puissances totales installées [19].

Tableau (II.2): Statistiques des dispositifs FACTS autour du monde.

Type	Nombre	Puissances installées en (MVAR)
SVC	600	90.000
STATCOM	15	1.200
TCSC	10	2.000
UPFC	2-3	250

II.3. Etude profonde d'un dispositif FACTS (UPFC):

L'évolution progressive vers un réseau électrique plus intelligent demande de nombreuses avancées technologiques. Le contrôle de flux de puissance est un problème qui provient typiquement des réseaux de transport. Il existe un dispositif flexible avec topologie universelle appelé contrôleur de transit de puissance unifié "UPFC", qui sert surtout à contrôler le flux de puissance en régime permanent mais il présente aussi d'autres fonctionnalités telles que l'amélioration de la stabilité transitoire du réseau face aux évènements, l'amortissement des oscillations dynamiques (habituellement de basse fréquence) et l'augmentation de la capacité de transport.

II.3.1. Première invention de l'UPFC:

Ce dispositif a été installé depuis 1998 à Inez (Kentucky - USA), dans le système d'interconnexion du réseau "138 (kV)" d'AEP (American Electric Power).

Il est caractérisé par:

- Double ligne de transmission, 138 kV;
- UPFC avec deux onduleurs de tension de 3 niveaux, 48 impulsions, 160 MVA;
- Différents modes d'opération.

Pourquoi on utilise l'UPFC dans ce réseau?

- Pour optimiser l'utilisation du système de transmission existant;
- Pour avoir une capacité de transmission suffisante (charge de 2000 MW);
- Pour minimiser le besoin de nouveaux équipements;
- Pour diminuer les pertes de puissance active et les émissions de CO₂ [26].

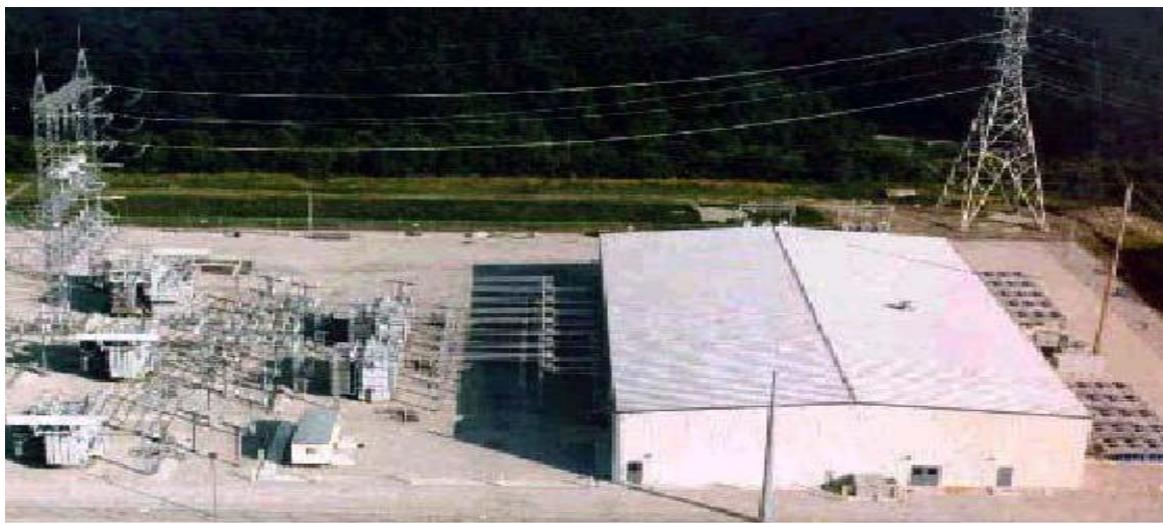


Figure (II.4): Réseau d'AEP équipé de l'UPFC.

II.3.2. Principes de l'UPFC:

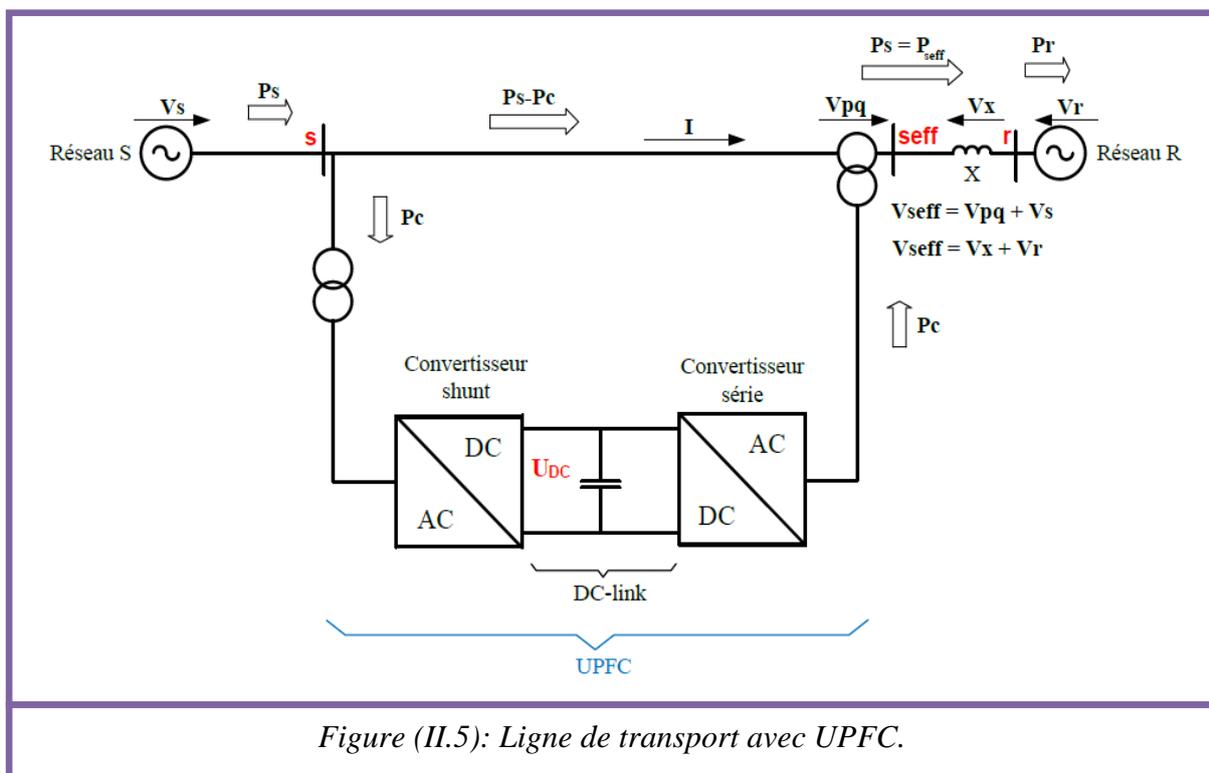
A. Description d'un UPFC:

La structure de l'UPFC est représentée dans la figure (II.5), où les connexions des deux convertisseurs peuvent être observées: un des convertisseurs (celui de gauche) est branché en parallèle dans le point s (dispositif STATCOM), l'autre convertisseur (celui de droite) est connecté en série avec la ligne entre le point s et le point $seff$ (dispositif SSSC). Les deux convertisseurs sont reliés par une liaison en courant continu (DC-link) pour permettre un flux bidirectionnel de la puissance active entre la sortie série du SSSC et la sortie shunte du STATCOM. La tension de DC-link est soutenue par un condensateur.

Le convertisseur série remplit la principale fonction de l'UPFC: l'injection de la tension V_{pq} . En effet, grâce au contrôle de la grandeur V_{pq} et de l'angle de phase ρ , on peut faire varier à volonté les puissances active et réactive qui circulent par la ligne. La valeur de l'amplitude

V_{pq} atteint des valeurs entre zéro et V_{pqmax} , et le vecteur V_{pq} peut tourner sans contrainte. La valeur maximale de V_{pq} est imposée par les limites de tension du transformateur et du convertisseur ($0 \leq V_{pq} \leq V_{pqmax}$) et l'angle de phase peut tourner dans toutes les directions ($0 \leq \rho \leq 2\pi$). L'angle de phase ρ est référencé par rapport à la tension V_s .

Le convertisseur shunt fournit par la liaison DC la puissance active dont le convertisseur série aura besoin. A cet effet, le convertisseur shunt assure que la tension U_{DC} reste constante au niveau de DC-link. Donc, l'UPFC est capable d'assurer un contrôle de la tension, l'impédance et l'angle de ligne ainsi qu'assurer une compensation en énergie réactive. Ceci rend l'UPFC un des éléments FACTS clé dans l'exploitation moderne des réseaux électriques.



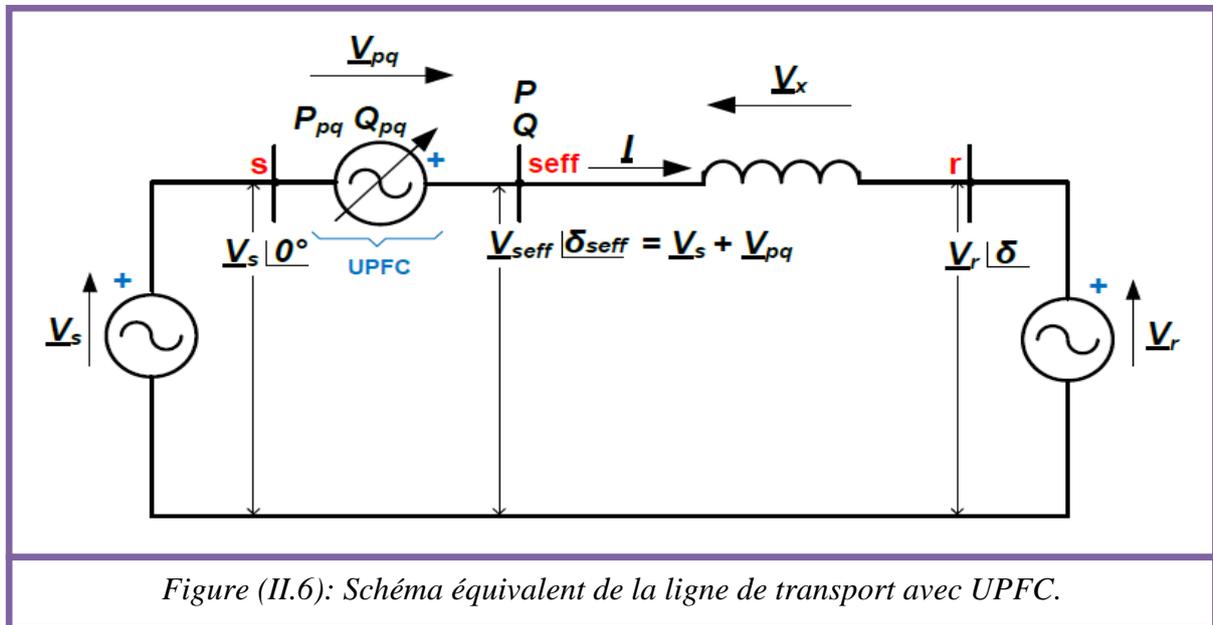
B. Schéma vectoriel d'un UPFC:

Pour expliquer le fonctionnement et la raison d'être du contrôleur UPFC, considérons deux réseaux (réseau s et réseau r) reliés, pour simplifier uniquement par une ligne inductive. Les tensions V_s et V_r ont des amplitudes inégales et sont déphasées d'un angle de transmission δ (V_s est en avance de V_r).

Le schéma équivalent de la figure (II.6) est un circuit unifilaire. En réalité, il y a un circuit de même type pour chaque phase. Si le réseau est équilibré, les trois phases auront des schémas équivalents similaires. Dans le cas contraire, les valeurs de leurs composants seront différentes.

Dans les schémas de la figure précédente, on suppose que la résistance du réseau est négligeable devant sa réactance. On considère que la tension V_s du réseau s est en avance par rapport à la tension V_r du réseau r . Par conséquent, la puissance active circulera du réseau s au réseau r de la façon suivante:

- Nous souhaitons que le réseau r reçoive une puissance P_r provenant du réseau s . Comme la tension V_r est connue, on peut calculer l'intensité I qui doit circuler par la ligne pour obtenir la puissance P_r ;
- Si on connaît l'intensité I qui doit circuler par la ligne, on peut calculer la tension V_{pq} que le convertisseur série doit injecter pour établir cette intensité et obtenir la puissance P_r désirée au point r ;
- Pour créer et injecter la tension V_{pq} , le convertisseur série aura besoin d'absorber une puissance P_c , cette puissance sera fournie par le convertisseur shunt;
- Le convertisseur shunt absorbe la puissance P_c du réseau s ;
- Si il n'y a pas de pertes ni dans l'UPFC, ni dans la ligne, le réseau s fournira une puissance P_s de valeur $P_s = P_{seff} = P_r$;
- La puissance P_s sera fournie par deux chemins: Par l'UPFC (la puissance P_c) et par la ligne (le reste de la puissance $P_s - P_c$).



C. Diagramme vectoriel des tensions et des courants d'un UPFC:

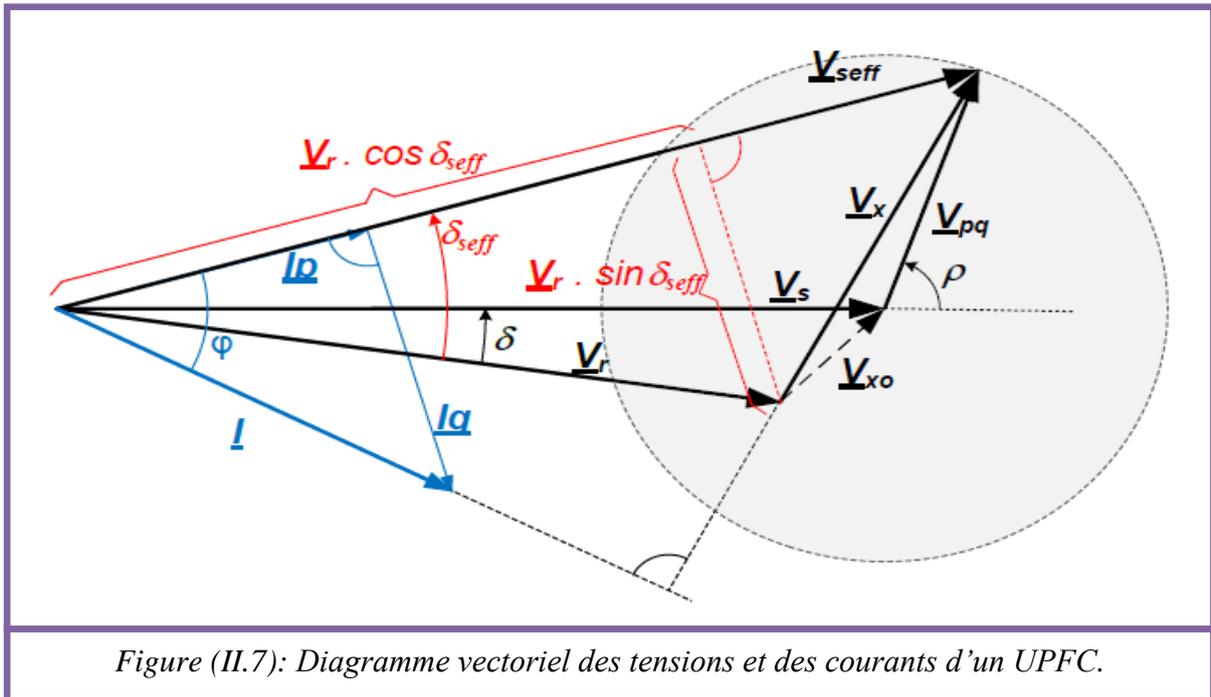
En se référant à la figure (II.6), on peut écrire les équations de Kirchhoff suivantes:

$$-V_s - V_{pq} + jXI + V_r = 0 \quad (II.9)$$

$$-V_s - V_{pq} + V_x + V_r = 0 \quad (II.10)$$

Où: $j X I = V_x$

On choisit la tension V_{seff} qui existe au point *seff* comme vecteur auquel on va référencer les puissances active et réactive qui circulent sur la ligne. Comme la ligne est purement inductive la puissance active au point *seff* est égale à la puissance active au point *r* ($P_{seff} = P_r$), mais les puissances réactives ne se correspondent pas ($Q_{seff} \neq Q_r$). On suppose également que le vecteur V_s est en avance sur V_r d'un angle δ . On obtient alors le diagramme vectoriel de la figure (II.7). Dans ce diagramme, le vecteur de courant I est nécessairement perpendiculaire au vecteur de tension V_x ($V_x = j X I$, où V_x est toujours en avance de 90° sur le vecteur I), tandis que le vecteur I est en retard par rapport au vecteur V_{seff} d'un angle φ .



La projection du vecteur de courant I sur les axes p et q qui sont l'axe parallèle et perpendiculaire à la tension V_{seff} respectivement donnent les valeurs de I_p et I_q . On pourra également remarquer qu'on aurait pu aussi référer le courant à la tension V_s ou à la tension V_r pour calculer les puissances dans le point s ou le point r , respectivement. Par conséquent, en prenant V_{seff} comme vecteur de référence.

Les nomenclatures utilisées pour le calcul des puissances active et réactive sont:

- P_{seff} : Puissance active qui circule par la ligne. Elle est positive quand la puissance circule du réseau s au réseau r ;
- Q_{seff} : Puissance réactive débitée/absorbée au point *seff*. Dans le cas de la figure (II.7) la puissance réactive est débitée au point *seff*, car la relation $(V_{seff} - V_r \cos \delta_{seff} > 0)$ est vérifiée;

- V_r : Tension efficace du réseau r ;
- δ_{seff} : Angle d'avance de V_{seff} sur V_r ;
- X : Réactance inductive de la ligne.

On va exprimer les puissances active et réactive qui circulent par la ligne au point *seff*. Pour la puissance active, on tient compte des équations obtenues à partir de la figure précédente:

$$\begin{cases} P_{seff} = V_{seff} I_p = V_{seff} I \cos \varphi \\ V_r \sin \delta_{seff} = V_x \cos \varphi \\ I = \frac{V_x}{X} \end{cases} \quad (II.11)$$

A partir de l'équation (II.11), nous obtenons l'expression de la puissance active suivante:

$$P_{seff} = \frac{V_{seff} V_r}{X} \sin \delta_{seff} \quad (II.12)$$

L'équation ainsi obtenue est une relation majeure qui va exprimer le transfert de la puissance active. Nous avons plusieurs paramètres sur lesquels nous pouvons agir:

- Si on change l'impédance X de la ligne, on va modifier le transfert de puissance P_{seff} , ceci peut être réalisé par un compensateur série ou par une réactance variable qui est insérée dans la ligne et qui va donc nécessairement modifier la réactance de la ligne. Par conséquent, on peut agir sur la valeur du transfert de puissance à travers le dénominateur de l'équation (II.12);
- Nous avons aussi la possibilité de modifier l'angle relatif δ_{seff} entre les deux tensions V_{seff} et V_r . L'angle δ_{seff} est également un paramètre sur lequel nous avons la possibilité d'agir;
- Nous pouvons aussi agir sur les amplitudes des tensions V_{seff} et V_r .

Par ailleurs pour la puissance réactive, on utilise les équations suivantes qui ont été obtenues à partir de la figure (II.7).

$$\begin{cases} Q_{seff} = V_{seff} I_q = V_{seff} I \sin \varphi \\ V_x \sin \varphi = V_{seff} - V_r \cos \delta_{seff} \\ I = \frac{V_x}{X} \end{cases} \quad (II.13)$$

Selon l'équation (II.13), nous obtenons la puissance réactive suivante:

$$Q_{seff} = \frac{V_{seff}^2 - V_{seff} V_r \cos \delta_{seff}}{X} = \frac{V_{seff}}{X} (V_{seff} - V_r \cos \delta_{seff}) \quad (II.14)$$

D. Etude des flux de puissances P et Q selon le diagramme vectoriel:

Dans le but d'alléger les illustrations et de faciliter la compréhension, on va se concentrer sur le cas d'une ligne purement réactive comme le montre la figure (II.6). Nous allons décrire en

détail les combinaisons possibles des vecteurs de courant et de tension qui définissent les puissances active et réactive pour cette ligne.

La puissance active circule toujours de la source dont la tension est en avance vers la source dont la tension est en retard. L'amplitude de la tension n'affecte pas la direction de la puissance active, seule sa phase la conditionne. Par exemple, si comme dans la figure (II.6), la tension V_{seff} est en avance sur la tension V_r d'un angle δ_{seff} . [Voir les représentations vectorielles des figures (II.8) et (II.10)], la puissance active circule du point $seff$ au point r et par conséquent, du réseau s vers le réseau r . Par contre, si V_{seff} retarde sur la tension V_r d'un angle δ_{seff} [Voir les représentations vectorielles des figures (II.9) et (II.11)], la puissance active circulera du point r au point $seff$ et par conséquent du réseau r vers le réseau s .

Une source débite de la puissance réactive lorsque Q est positive. Cette condition se produit lorsque: $(V_{seff} > V_r \cos \delta_{seff})$ [Voir l'équation (II.14)]. Dans le cas contraire, la source reçoit de la puissance réactive. Par exemple dans les figures (II.8) et (II.9) où $(V_{seff} > V_r \cos \delta_{seff})$, la source au point $seff$ de la figure (II.6) débite de la puissance réactive, cela veut dire que la puissance réactive circulera du réseau s vers le réseau r . Par contre, si $(V_{seff} < V_r \cos \delta_{seff})$ [Voir les figures (II.10) et (II.11)], la source au point $seff$ de la figure (II.6) absorbera la puissance réactive, la puissance réactive circulera donc du réseau r vers le réseau s . **On retiendra que la puissance réactive tend à circuler de la tension la plus élevée à celle qui est la moins élevée.**

Le vecteur de la tension V_{pq} va être imposé en angle ρ et en amplitude par notre convertisseur série. **Grâce au contrôle de l'amplitude ($0 \leq V_{pq} \leq V_{pqmax}$) et de l'angle de phase ρ tel que doit être: ($0 \leq \rho \leq 2\pi$) de V_{pq} , on peut faire varier à volonté les puissances active et réactive qui circulent par la ligne.** L'angle de phase ρ est référencé à la tension V_s [Voir la figure (II.7)].

Par ailleurs, on peut noter que la magnitude et l'angle du vecteur V_{pq} définissent la valeur de tension V_{seff} , où: $(V_{seff} = V_s + V_{pq})$. Si on choisit de référencer la tension V_{seff} par rapport à la tension V_r (grâce à l'angle δ_{seff}), nous pourrions aussi dire que grâce au contrôle du vecteur de la tension V_{pq} , l'angle δ_{seff} et l'amplitude V_{seff} de cette tension permettent de commander les puissances P et Q .

Il faut remarquer que, si on fait varier l'angle ρ de la tension V_{pq} générée par le convertisseur série tout en gardant l'amplitude de V_{pq} constante. L'extrémité du vecteur V_{pq} décrira un cercle, ce cercle est indiqué en pointillés à la figure (II.8). Par conséquent, l'angle δ_{seff} changera progressivement d'une valeur maximale positive à une valeur maximale négative en passant par une valeur nulle. La valeur maximale de V_{pq} est limitée par les caractéristiques de

notre convertisseur série, la surface intérieure du cercle représente toutes les valeurs possibles auxquelles le vecteur V_{seff} peut être placé.

Par conséquent, selon les équations (II.12) et (II.14), les puissances électriques (P et Q) transportées par la ligne peuvent être positives ou négatives, elles peuvent circuler dans les deux sens. Il faut aussi signaler qu'on peut faire circuler les puissances active et réactive dans le même sens ou en sens inverse en fonction de la régulation du convertisseur. Grâce à l'UPFC, la source peut ainsi débiter de la puissance active et absorber de la puissance réactive en même temps.

De ce fait, trois configurations sont envisageables dans le circuit de la figure (II.6):

D.1. Transfert de puissances active et réactive:

On trouve les cas suivants:

- Cas où $P > 0$ et $Q > 0$;
- Cas où $P < 0$ et $Q > 0$;
- Cas où $P > 0$ et $Q < 0$;
- Cas où $P < 0$ et $Q < 0$.

D.2. Transfert de puissance active uniquement:

On trouve les cas suivants:

- Cas où $P > 0$ et $Q = 0$;
- Cas où $P < 0$ et $Q = 0$.

D.3. Transfert de puissance réactive uniquement:

On trouve les cas suivants:

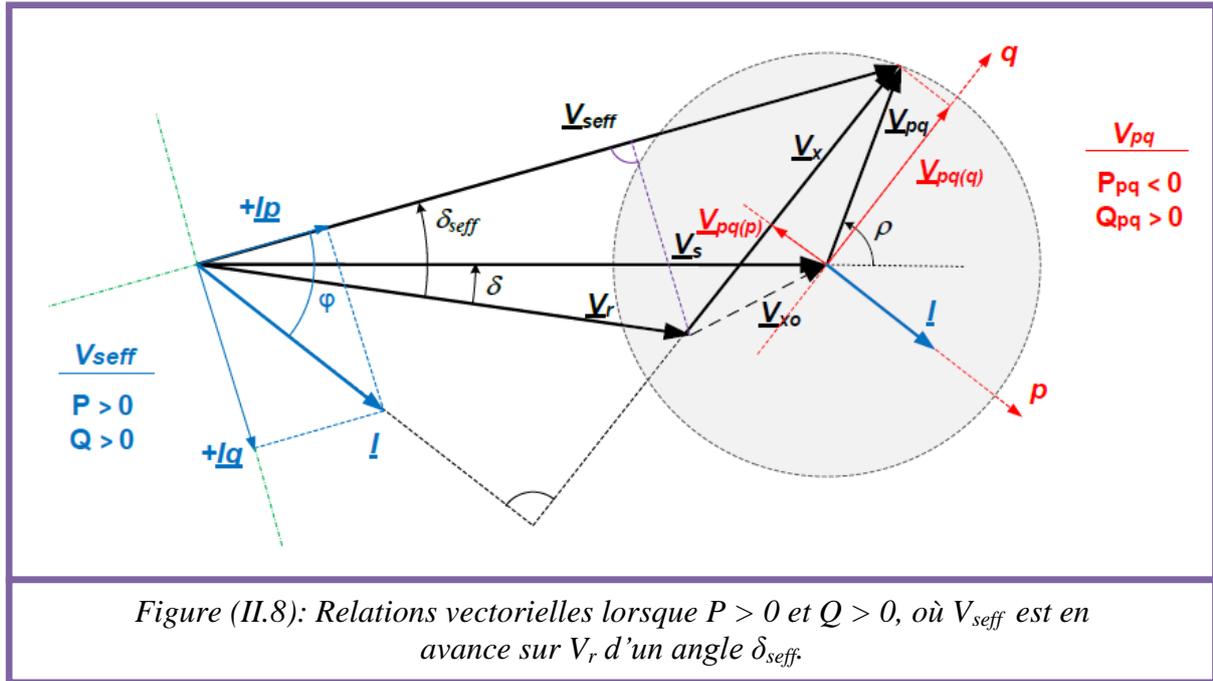
- Cas où $P = 0$ et $Q > 0$;
- Cas où $P = 0$ et $Q < 0$.

Nous allons maintenant décrire chacun des cas précédents. Néanmoins, on rappelle que les amplitudes des vecteurs des tensions V_s et V_r sont inégales et présentent un angle de transmission δ .

❶ Cas où $P > 0$ et $Q > 0$:

Si V_{seff} est en avance sur V_r , la puissance active circule du réseau s vers le réseau r . De plus, si la relation ($V_{seff} > V_r \cos \delta_{seff}$) est vérifiée, la puissance réactive est positive et circule du point $seff$ au réseau r , le courant de ligne est en retard par rapport à la tension au point $seff$ (comportement inductif). Dans ce cas, les deux puissances P et Q (au point $seff$) seront positives, et elles circuleront dans le même sens.

Voir la figure (II.8).



Ce diagramme vectoriel montre les conditions lorsque V_{pq} est en avance sur V_s d'un angle ρ , et que V_{seff} est en avance sur V_r d'un angle δ_{seff} .

On vient de voir le comportement des puissances P et Q qui circulent par la ligne, par rapport à la tension V_{seff} . Maintenant on va voir aussi, le comportement des puissances P_{pq} et Q_{pq} injectées/absorbées par le convertisseur série, par rapport à la tension V_{pq} .

Dans la figure (II.8) les projections du vecteur V_{pq} sur les axes d et q ont été représentées en rouge. Elles donnent lieu aux tensions $V_{pq(p)}$ et $V_{pq(q)}$, et si on prendre compte que le convertisseur série injecte/absorbe au réseau une puissance apparente de valeur:

$$S_{pq} = V_{pq} I_{se}^* \quad (II.15)$$

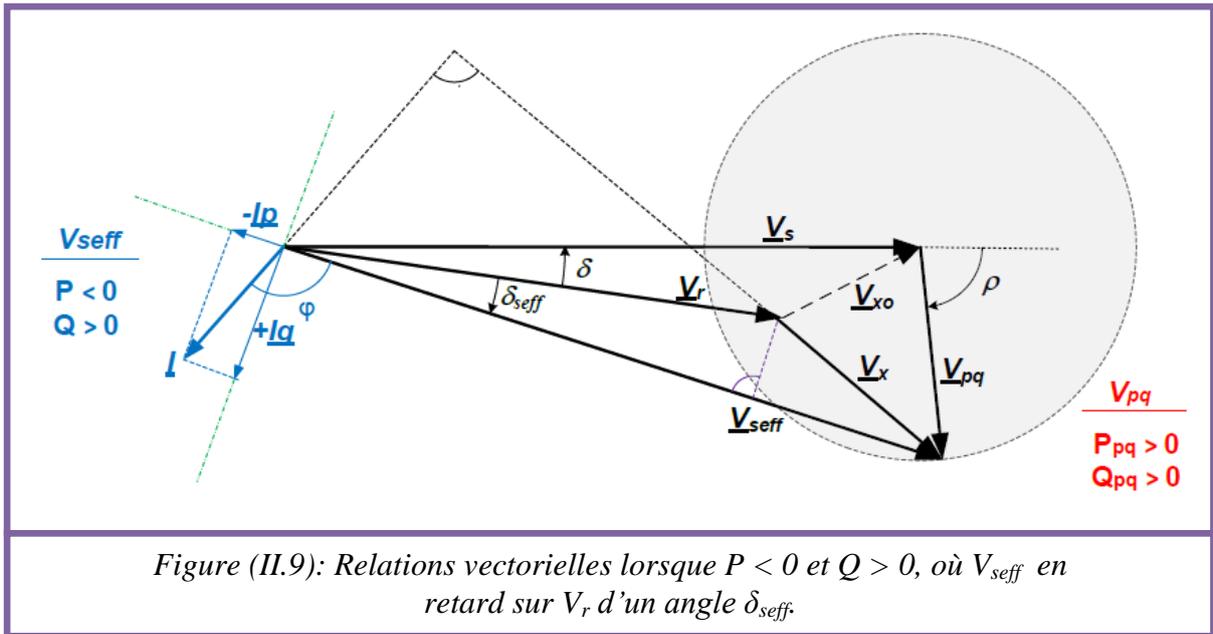
$$P_{pq} = \Re\{V_{pq} I_{se}^*\} \quad (II.16)$$

$$Q_{pq} = \Im\{V_{pq} I_{se}^*\} \quad (II.17)$$

Pour ce cas, la puissance active P_{pq} est négative et la puissance réactive Q_{pq} est positive. Le convertisseur série absorbe de la puissance active et débite de la puissance réactive. Tandis que, la composante de tension en quadrature avec le courant est en avance sur le courant.

❷ Cas où $P < 0$ et $Q > 0$:

Si V_{seff} est en retard sur V_r [Voir la figure (II.9)], la puissance active circule du réseau r vers le réseau s . De plus, comme ($V_{seff} > V_r \cos \delta_{seff}$), la puissance réactive est positive au point $seff$ débite et circule de point $seff$ au réseau r . Dans ce cas, la puissance active P au point $seff$ est négative tandis que la puissance réactive Q au point précédent est positive. Elles circuleront donc en sens inverse.

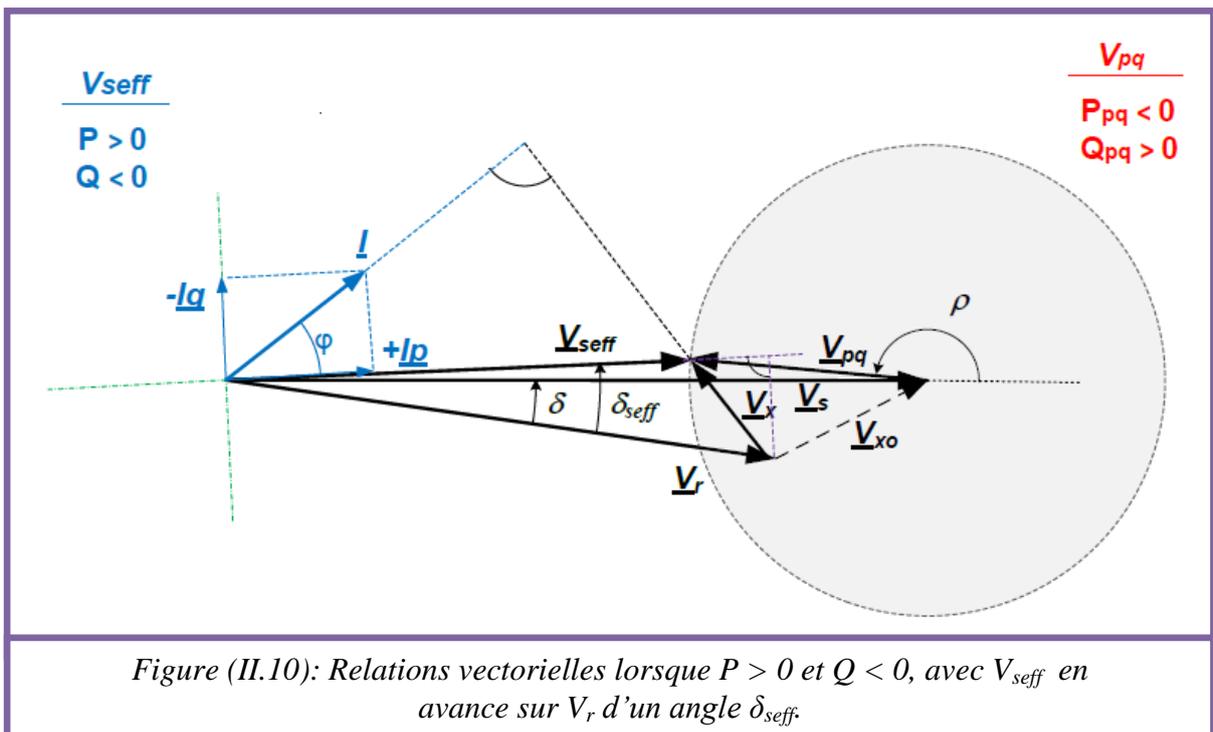


Dans ce cas, le convertisseur série injecte une puissance active et une puissance réactive. La tension V_{pq} est en avance sur I .

③ Cas où $P > 0$ et $Q < 0$:

Si V_{seff} est en avance sur V_r et si ($V_{seff} < V_r \cos \delta_{seff}$) [Voir la figure (II.10)], la puissance active circule du réseau s vers le réseau r et la puissance réactive est négative (absorbe au point $seff$) et circule du réseau r au point $seff$.

Dans le cas de la figure (II.10), le convertisseur série absorbe de la puissance active et débite de la puissance réactive, il injecte une tension V_{pq} en avance sur le courant de la ligne.

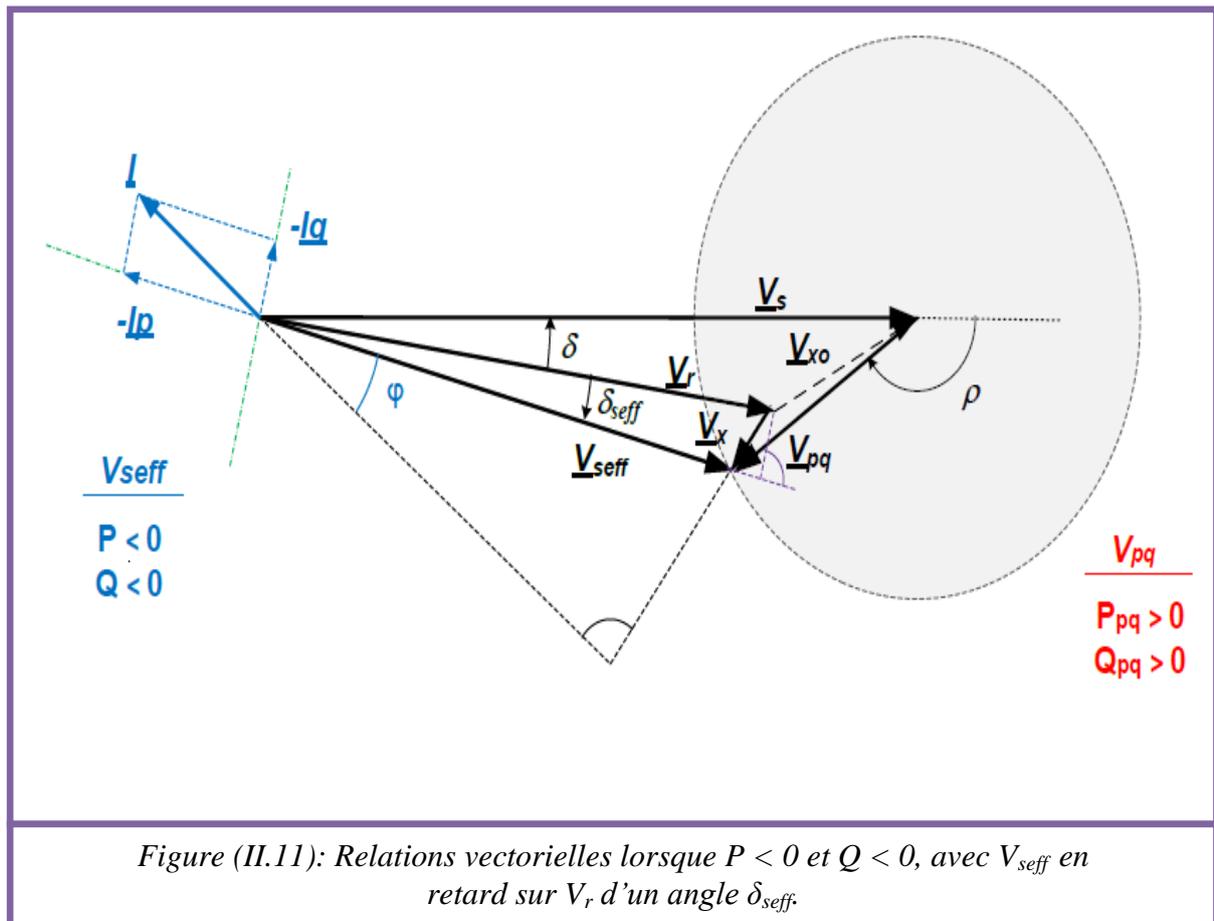


④ Cas où $P < 0$ et $Q < 0$:

Si V_{seff} est en retard sur V_r et si ($V_{seff} < V_r \cos \delta_{seff}$), la puissance active circule du réseau r vers le réseau s et la puissance réactive est négative (absorbe au point $seff$) et circule du réseau r au point $seff$.

Dans le cas de la figure (II.11), le convertisseur série injecte de la puissance active et de la puissance réactive. La tension V_{pq} est en avance sur I .

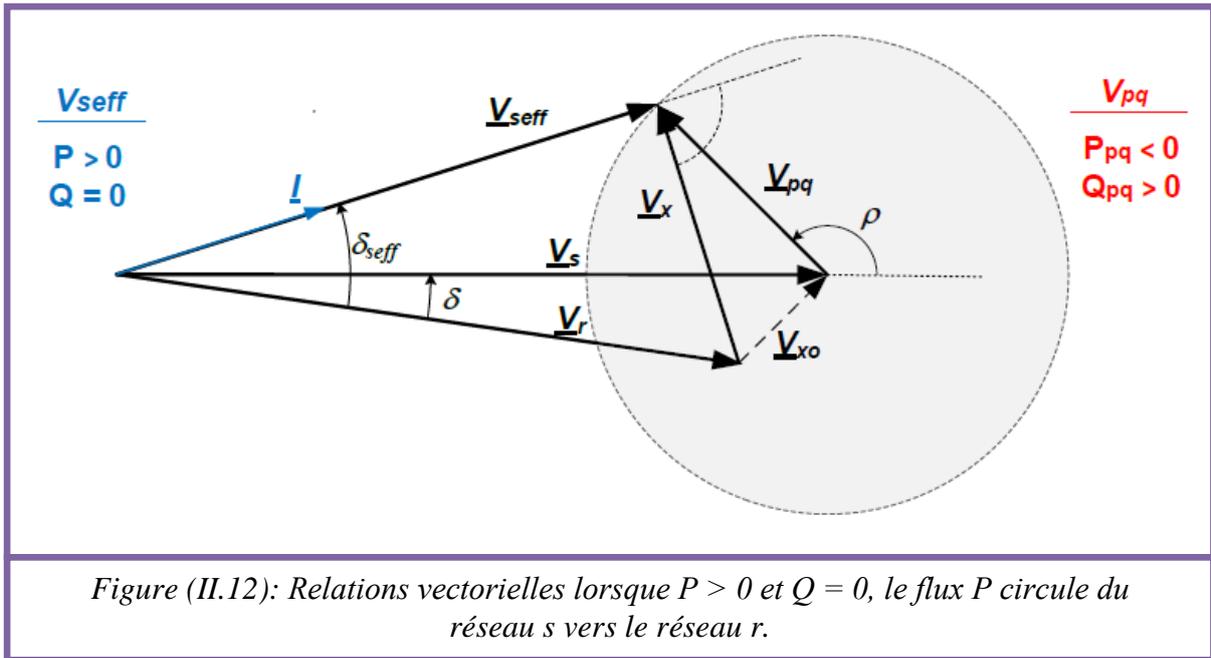
Voir la figure (II.11).



⑤ Cas où $P > 0$ et $Q = 0$:

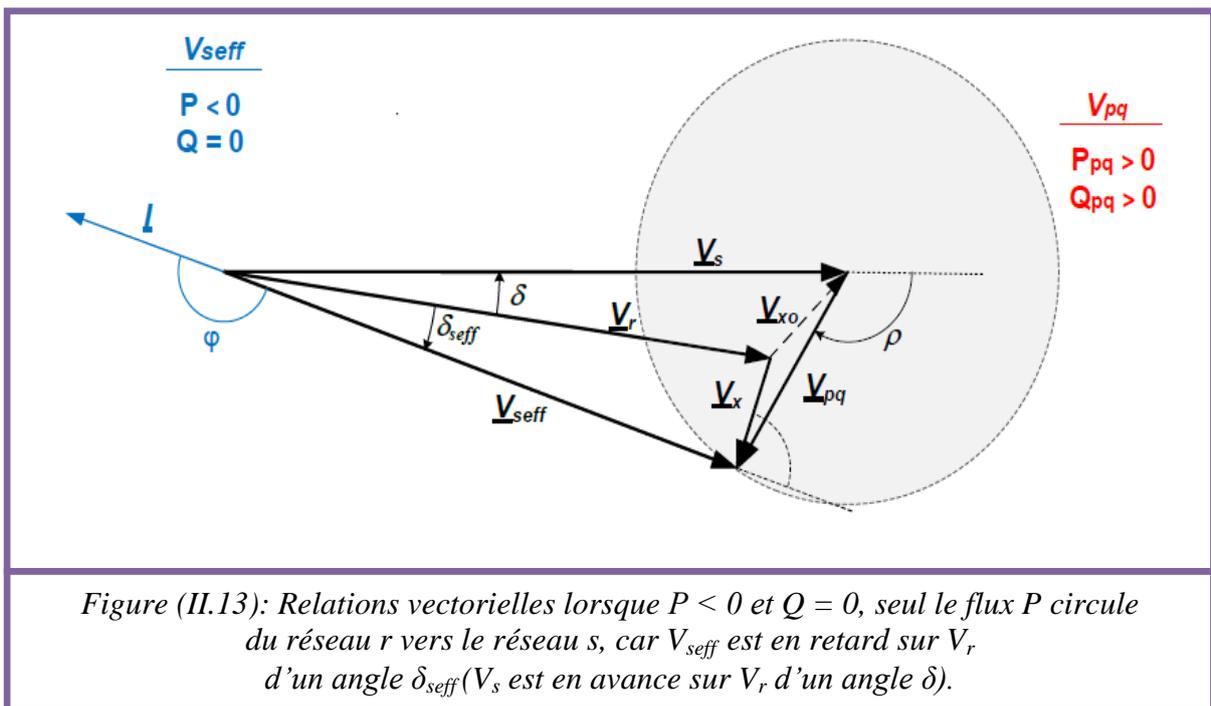
Si l'angle ρ de V_{pq} est ajusté afin que l'angle du courant par rapport à la tension V_{seff} , l'angle φ soit nul; c'est-à-dire, si le vecteur de tension V_{seff} est en phase avec le courant I [Voir la figure (II.12)], le vecteur intensité I comportera seulement une composante active I_p tandis que sa composante réactive I_q sera nulle. Selon les équations antérieures (II.11) et (II.13), l'angle φ implique que la puissance réactive Q est nulle et comme la tension V_{seff} est en avance sur la tension V_r , le flux de puissance P au point $seff$ circulera du réseau s vers le réseau r .

Dans le cas de la figure (II.12), le convertisseur série absorbe de la puissance active et débite de la puissance réactive. La tension V_{pq} est en avance sur I .



⑥ Cas où $P < 0$ et $Q = 0$:

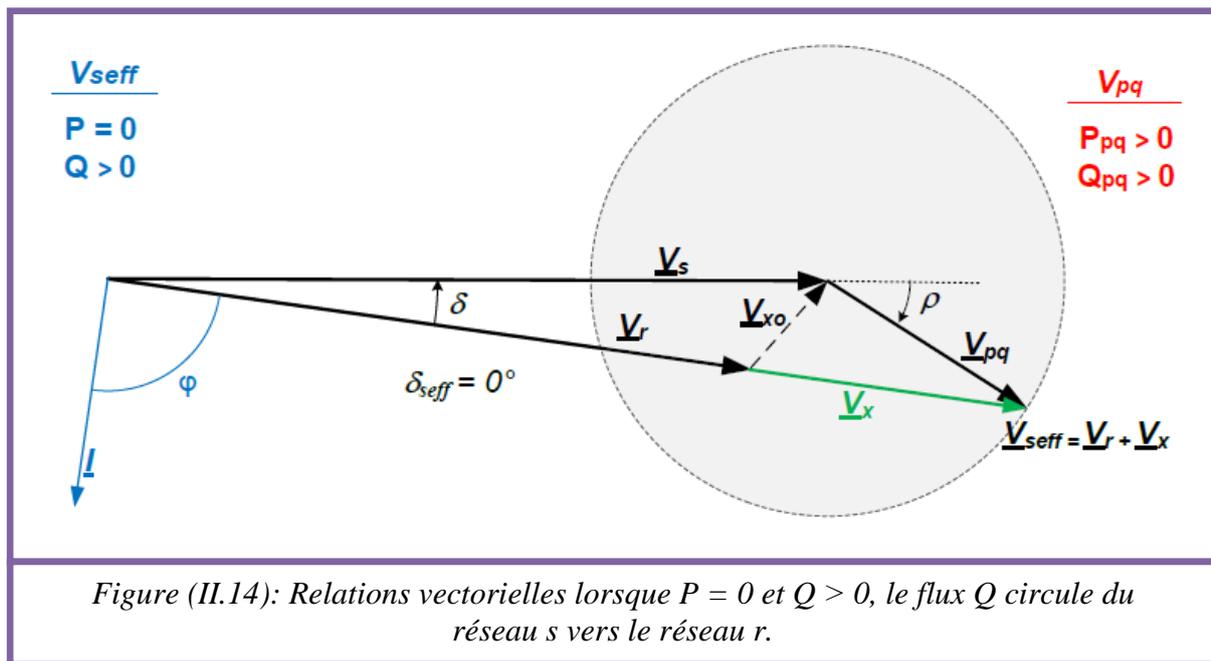
Si l'angle ρ du vecteur V_{pq} est ajusté afin que l'angle du courant par rapport à la tension; l'angle φ soit en opposition de phase ($\varphi = 180^\circ$). Le vecteur I aura uniquement la composante active " I_p ". La composante réactive du courant I_q sera nulle. Comme la tension V_{seff} est en retard par rapport à la tension V_r , le flux de puissance P circulera du réseau r vers le réseau s . Dans le cas de la figure (II.13), le convertisseur série injecte de la puissance active et de la puissance réactive. La tension V_{pq} est en avance sur I .



7 Cas où $P = 0$ et $Q > 0$:

Lorsque l'angle ρ de V_{pq} est ajusté afin que la tension V_{seff} soit en quadrature avec l'intensité I , le vecteur I aura seulement sa partie réactive " I_q " [Voir la figure (II.14)]. Sa composante active I_p sera nulle selon l'équation (II.11); l'angle φ soit égale à 90° , implique que la puissance active soit nulle.

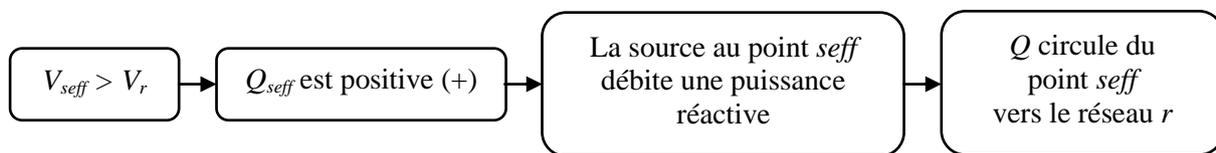
Afin qu'il y ait un transfert de puissance réactive et aucune puissance active; il faut que les tensions V_{seff} et V_r soient en phase, c'est-à-dire que l'angle δ_{seff} soit nul. Par ailleurs, le vecteur $V_x = jXI$ est toujours en avance de 90° sur le vecteur I .



Le vecteur V_x est en phase avec V_{seff} . Cela veut dire que: $V_{seff} = V_r + V_x$

$$Q_{seff} = \frac{V_{seff}}{X} (V_{seff} - V_r) \tag{II. 18}$$

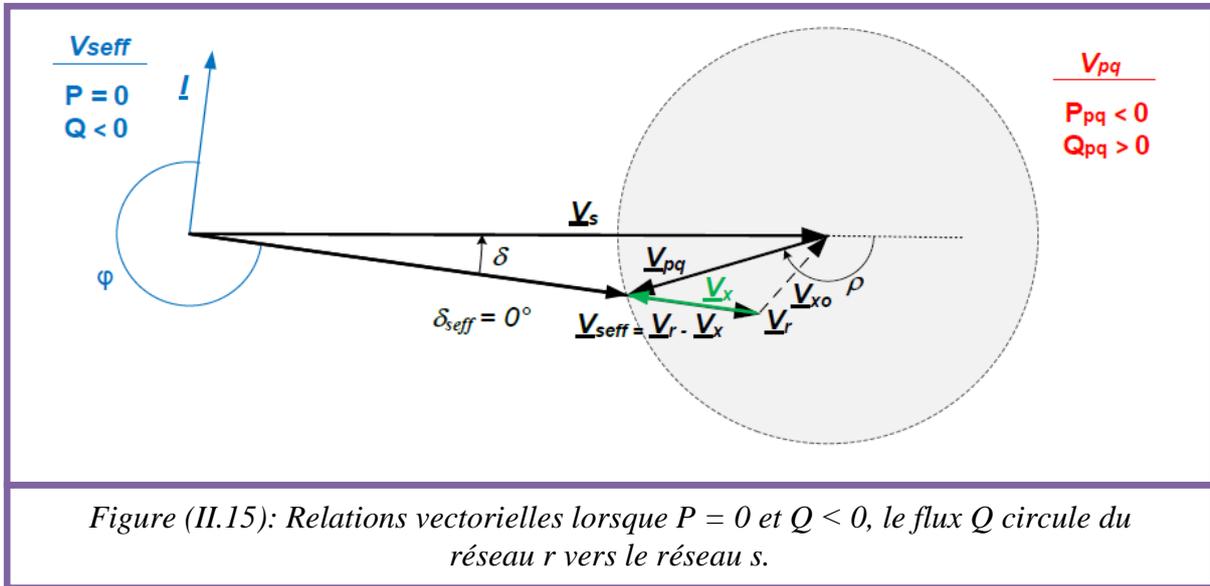
Et comme dans cette équation $V_{seff} > V_r$, on peut tirer les conclusions suivantes:



8 Cas où $P = 0$ et $Q < 0$:

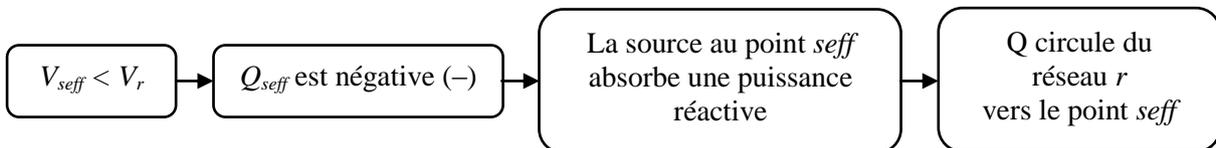
Comme dans le cas précédent, lorsque l'angle ρ du vecteur V_{pq} est ajusté afin que la tension V_{seff} soit déphasée de 270° par rapport à l'intensité I ($\varphi = 270^\circ$). Dans ces conditions, le vecteur I aura pour seule composante, sa partie réactive I_q . Sa composante active I_p sera nulle selon l'équation (II.11): l'angle φ implique que la puissance active soit nulle.

Afin qu'il y ait uniquement un transfert de puissance réactive et aucune transmission de puissance active, il faut que les tensions V_{seff} et V_r soient en phase, c'est-à-dire que l'angle ($\delta_{seff} = 0^\circ$).



Le vecteur V_x est en opposition de phase avec V_{seff} , cela veut dire que: $V_{seff} = V_r - V_x$

Si on tient compte que ($\delta_{seff} = 0$), l'équation (II.18) sera aussi valable dans ce cas et comme dans cette équation ($V_{seff} < V_r$), on peut tirer les conclusions suivantes [27]:



II.3.3. Modélisation du système physique:

Lors de la modélisation de notre système, nous tiendrons compte que nous avons deux convertisseurs commandés comme sources de tension. Un de ces convertisseurs est connecté en série (cas d'un SSSC), tandis que l'autre est connecté en parallèle (cas d'un STATCOM).

A. Introduction à la modélisation:

Dans la configuration représentée à la figure (II.16), nous avons deux degrés de liberté par convertisseur.

- A l'entrée du convertisseur série, le vecteur des tensions V_{se}^* est commandé en module et en argument. Ces paramètres correspondent aux deux degrés de liberté de ce convertisseur. Comme les projections de ce vecteur dans le repère dq nous donnent les

tensions $V_{se_d}^*$ et $V_{se_q}^*$. Ces deux grandeurs permettent également d'accéder à ses deux degrés de liberté.

- De la même façon, à l'entrée du convertisseur shunt, le vecteur des tensions V_{sh}^* est commandé en module et en argument ses deux degrés de liberté. Les projections de ce vecteur dans un repère dq nous déterminent les grandeurs $V_{sh_d}^*$ et $V_{sh_q}^*$.

A partir de l'amplitude et de l'angle du vecteur de tension du convertisseur série V_{pq} , on peut contrôler les puissances active et réactive. On rappelle que la tension V_{pq} est la tension de sortie du convertisseur série vers la ligne au point *seff*, tandis que le vecteur de tension V_{se}^* est la tension de référence en entrée du convertisseur série. De plus, les projections du vecteur V_{pq} dans le repère dq déterminent les tensions V_{se_d} et V_{se_q} , tandis que celles du vecteur V_{se}^* fournissent les tensions $V_{se_d}^*$ et $V_{se_q}^*$.

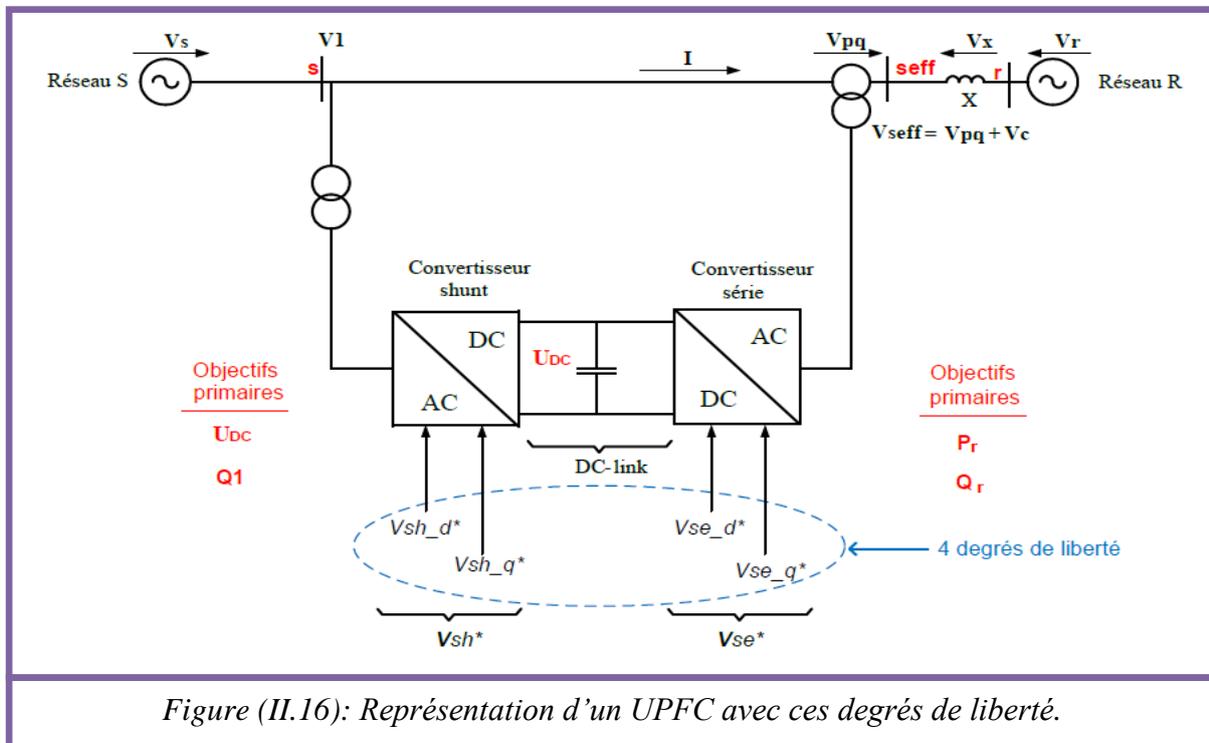


Figure (II.16): Représentation d'un UPFC avec ces degrés de liberté.

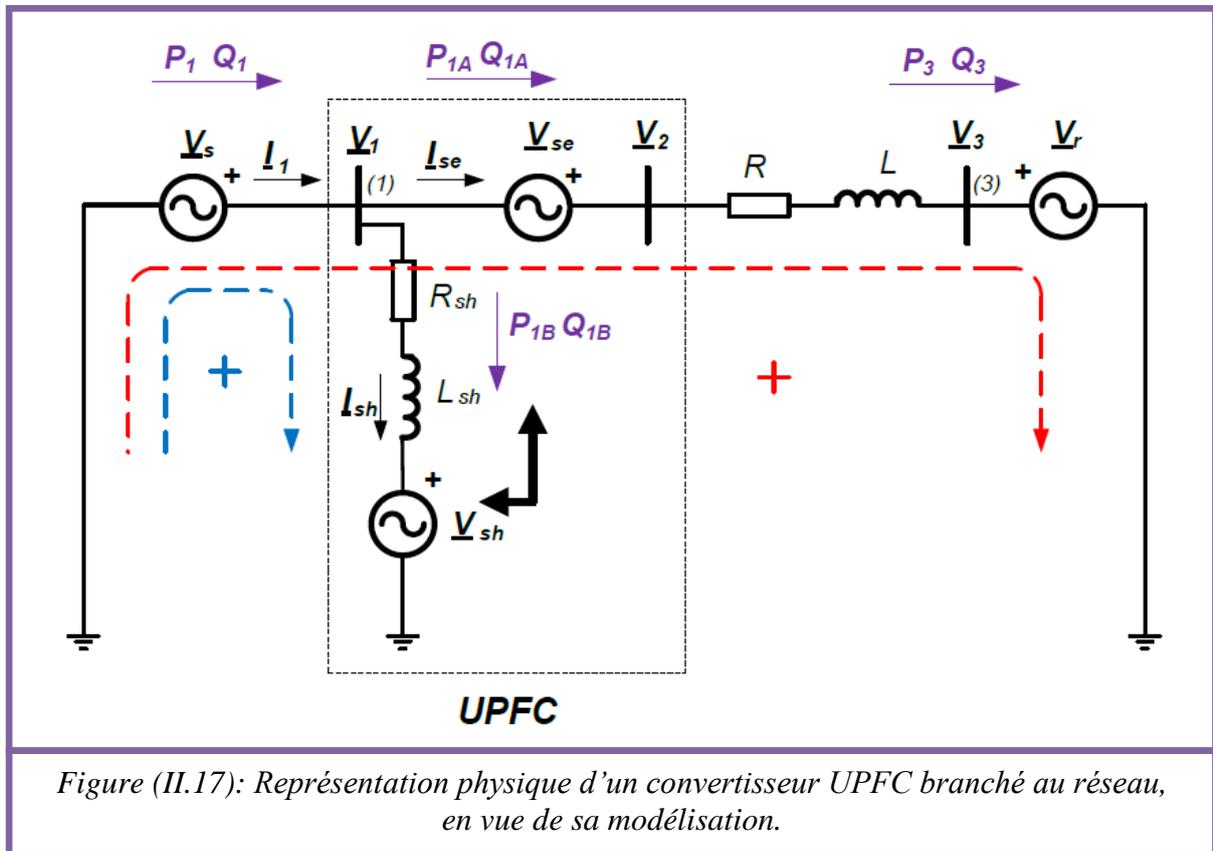
Au total, notre UPFC présente quatre degrés de liberté. Cela veut dire qu'on va pouvoir piloter quatre objectifs de commande de manière indépendante et simultanée. Dans notre cas, nous avons choisi les objectifs suivants:

- Pour le convertisseur série, on impose les puissances P_r et Q_r ;
- Pour le convertisseur shunt, on impose la tension du bus DC " U_{DC} " ainsi que la puissance réactive délivrée par le réseau à la section Q_I .

Il faut signaler que, pour le convertisseur shunt, la tension V_s correspond à la tension V_I ($V_s = V_I$), car on considère qu'une impédance nulle les sépare.

B. Description mathématique des modèles:

Nous allons modéliser les équations du système physique afin de pouvoir le contrôler. Le modèle simple de l'UPFC peut être représenté sous la forme suivante:



On va considérer que:

- Le circuit est équilibré;
- La résistance R_{se} et l'inductance L_{se} de l'ensemble du convertisseur, du transformateur et du filtre sont prises nulles. En réalité, elles sont incluses dans les valeurs de la résistance R et de l'inductance L de la ligne;
- La résistance R_{sh} et l'inductance L_{sh} représentent la résistance et l'inductance de l'ensemble constitué du convertisseur shunt et de la ligne shunt;
- Les modules des vecteurs des tensions V_s et V_r sont les mêmes ($|V_s| = |V_r|$);
- On choisit l'angle du vecteur tension V_r comme angle de référence. Cela signifie que $V_r = V_r$ et $V_s = V_s e^{j\theta}$;
- Les potentiels V_s et V_1 sont les mêmes ($V_s = V_1$);
- Les potentiels V_r et V_3 sont les mêmes ($V_r = V_3$);
- La réactance totale de la ligne se trouve d'un seul côté du convertisseur (à droite), car l'UPFC se trouve à proximité de la source V_s ;

- Les pertes internes de l'UPFC sont négligées;
- La puissance active dont à besoin le compensateur série est fournie par le compensateur shunt via le DC-link.

Dans la figure (II.17), la tension V_{se} injectée/absorbée par le compensateur série correspond à la différence entre les tensions V_2 et V_1 . L'intensité I_{sh} fournie/absorbée par le convertisseur shunt est la différence entre les courants I_1 et I_{se} .

$$V_{se} = V_2 - V_1 \quad (II.19)$$

$$I_{sh} = I_1 - I_{se} \quad (II.20)$$

B.1. Modèle série et équations associées:

Pour modéliser le système physique série de la figure (II.17), on va suivre le raisonnement suivant:

Nous allons écrire sous forme vectorielle les équations électriques du circuit série. Pour cela nous appliquons la deuxième loi de Kirchhoff, en considérant le sens horaire (signalé en rouge) comme sens provisoire du courant. On obtient alors l'équation suivante:

$$V_s + V_{se} - RI_{se} - L \frac{dI_{se}}{dt} - V_r = 0 \quad (II.21)$$

Cette équation (II.21) peut être exprimée dans le référentiel abc sous la forme:

$$V_{s(abc)} + V_{se(abc)} - V_{r(abc)} - [R]I_{se(abc)} - [L] \frac{dI_{se(abc)}}{dt} = 0 \quad (II.22)$$

L'équation (II.22) peut se réécrire sous forme matricielle de la manière suivante:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sea} \\ V_{seb} \\ V_{sec} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sea} \\ I_{seb} \\ I_{sec} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dI_{sea}}{dt} \\ \frac{dI_{seb}}{dt} \\ \frac{dI_{sec}}{dt} \end{bmatrix} = 0 \quad (II.23)$$

Nous utilisons ensuite les équations de Park pour passer dans le référentiel dq . Deux termes de couplage (ωLI_{seq} et ωLI_{sed}) liés à la rotation induite par la transformation de Park apparaissent dans les équations (II.24) et (II.25).

$$V_{sd} + V_{sed} - V_{rd} - RI_{sed} - L \frac{dI_{sed}}{dt} + \omega LI_{seq} = 0 \quad (II.24)$$

$$V_{sq} + V_{seq} - V_{rq} - RI_{seq} - L \frac{dI_{seq}}{dt} - \omega LI_{sed} = 0 \quad (II.25)$$

Si on tient compte de l'égalité des tensions V_s et V_1 et des tensions V_r et V_3 , les équations précédentes peuvent s'exprimer sous la forme suivante:

$$\frac{dI_{sed}}{dt} = \frac{1}{L} [V_{1d} + V_{sed} - V_{3d}] - \frac{R}{L} I_{sed} + \omega I_{seq} \tag{II.26}$$

$$\frac{dI_{seq}}{dt} = \frac{1}{L} [V_{1q} + V_{seq} - V_{3q}] - \frac{R}{L} I_{seq} - \omega I_{sed} \tag{II.27}$$

Nous appliquons ensuite la transformation de Laplace à ces équations. Cette transformation fournit les relations suivantes:

$$I_{sed}(S) = \frac{1}{S} \left[\frac{1}{L} (V_{1d} + V_{sed} - V_{3d}) - \frac{R}{L} I_{sed}(S) + \omega I_{seq}(S) \right] \tag{II.28}$$

$$I_{seq}(S) = \frac{1}{S} \left[\frac{1}{L} (V_{1q} + V_{seq} - V_{3q}) - \frac{R}{L} I_{seq}(S) - \omega I_{sed}(S) \right] \tag{II.29}$$

Les expressions des courants du convertisseur série peuvent être réécrites dans le domaine de Laplace sous la forme suivante:

$$I_{sed}(S) = \frac{1}{\left(S + \frac{R}{L}\right)} \left[\frac{1}{L} (V_{1d} + V_{sed} - V_{3d}) + \omega I_{seq}(S) \right] \tag{II.30}$$

$$I_{seq}(S) = \frac{1}{\left(S + \frac{R}{L}\right)} \left[\frac{1}{L} (V_{1q} + V_{seq} - V_{3q}) - \omega I_{sed}(S) \right] \tag{II.31}$$

Ces équations correspondent à notre modèle de convertisseur série. Les équations (II.28) et (II.29) sont représentées par le schéma bloc suivant:

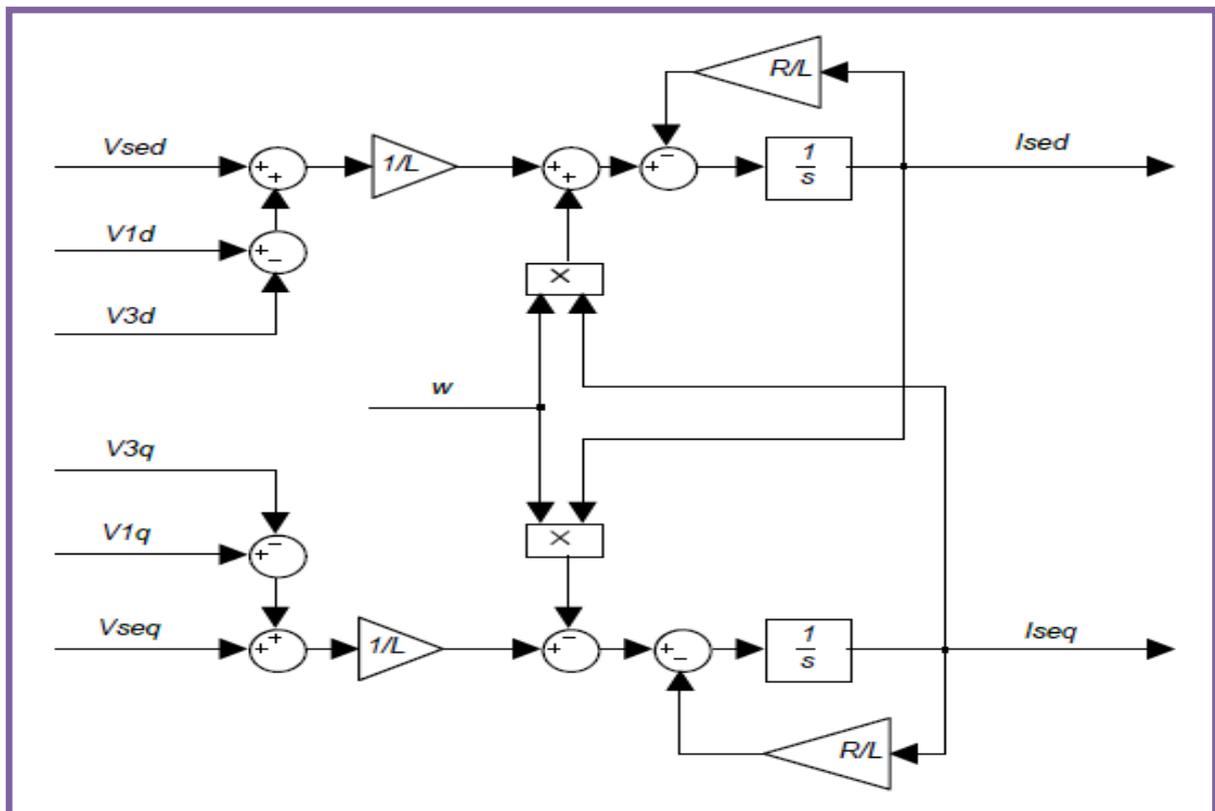


Figure (II.18): Schéma bloc du convertisseur série.

B.2. Modèle shunt et équations associées:

Pour modéliser le système physique du circuit shunt de la figure (II.17), on adopte le raisonnement suivant:

En utilisant la même méthode du modèle série, les équations électriques du circuit shunt peuvent être écrites sous forme vectorielle. Pour cela, nous appliquons la deuxième loi de Kirchhoff en choisissant le sens horaire (signalé en bleu) comme sens provisoire du courant.

On obtient alors pour chaque phase l'équation suivante:

$$V_s - V_{sh} - R_{sh} I_{sh} - L \frac{dI_{sh}}{dt} = 0 \quad (II.32)$$

L'équation (II.32) peut être exprimée dans le référentiel abc sous la forme:

$$V_{s(abc)} - V_{sh(abc)} - [R_{sh}] I_{sh(abc)} - [L_{sh}] \frac{dI_{sh(abc)}}{dt} = 0 \quad (II.33)$$

En passant à la forme matricielle, on obtient la relation suivante:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{sha} \\ V_{shb} \\ V_{shc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{sh} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sh} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sha} \\ I_{shb} \\ I_{shc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_{sh} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sh} & 0 \\ 0 & 0 & L_{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dI_{sha}}{dt} \\ \frac{dI_{shb}}{dt} \\ \frac{dI_{shc}}{dt} \end{bmatrix} = 0 \quad (II.34)$$

En utilisant les équations de Park pour passer du repère abc au repère dq , on introduit deux termes de couplage ($\omega L_{sh} I_{shq}$ et $\omega L_{sh} I_{shd}$). On obtient alors le couple d'équations suivant:

$$V_{sd} - V_{shd} - R_{sh} I_{shd} - L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} + \omega L_{sh} I_{shq} = 0 \quad (II.35)$$

$$V_{sq} - V_{shq} - R_{sh} I_{shq} - L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - \omega L_{sh} I_{shd} = 0 \quad (II.36)$$

Si on tient compte de l'égalité des tensions V_s et V_l , le système d'équations précédent peut s'exprimer sous la forme suivante:

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = \frac{1}{L_{sh}} [V_{1d} - V_{shd}] - \frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega I_{shq} \quad (II.37)$$

$$\frac{dI_{shq}}{dt} = \frac{1}{L_{sh}} [V_{1q} - V_{shq}] - \frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shq} - \omega I_{shd} \quad (II.38)$$

Nous lui appliquons ensuite la transformation de Laplace. Nous obtenons ainsi les équations suivantes:

$$I_{shd}(S) = \frac{1}{S} \left[\frac{1}{L_{sh}} (V_{1d} - V_{shd}) - \frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd}(S) + \omega I_{shq}(S) \right] \quad (II.39)$$

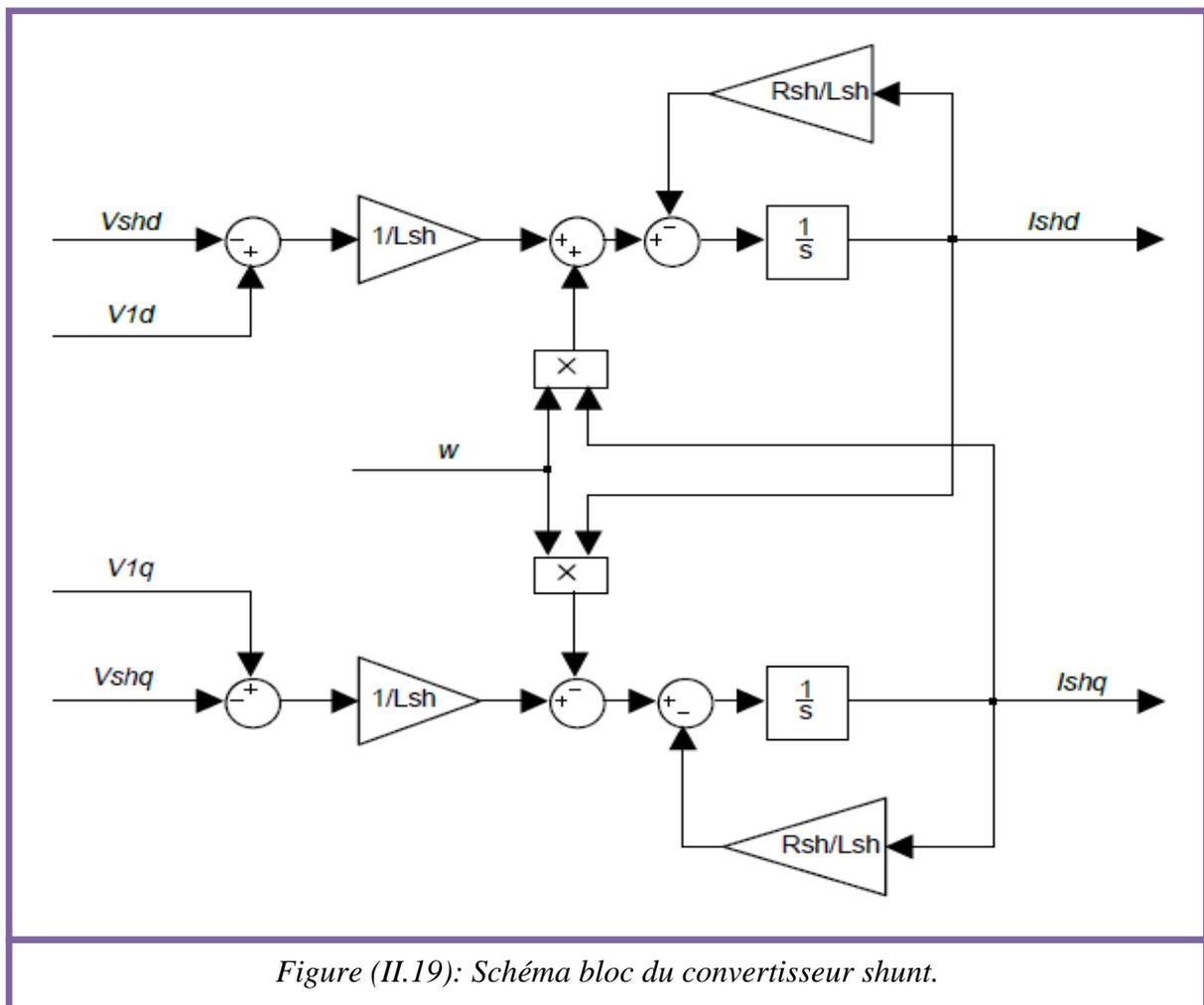
$$I_{shq}(S) = \frac{1}{S} \left[\frac{1}{L_{sh}} (V_{1q} - V_{shq}) - \frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shq}(S) + \omega I_{shd}(S) \right] \quad (II.40)$$

Les expressions des intensités du convertisseur shunt peuvent aussi s'écrire sous la forme suivante:

$$I_{shd}(S) = \frac{1}{\left(S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right)} \left[\frac{1}{L_{sh}} (V_{1d} - V_{shd}) + \omega I_{shq}(S) \right] \quad (II.41)$$

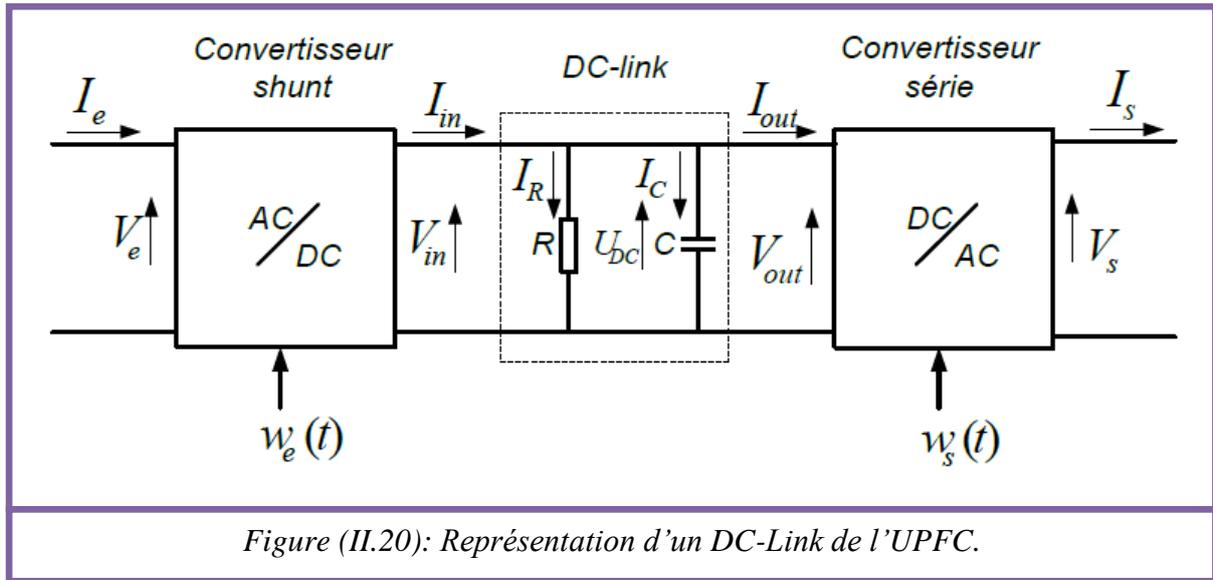
$$I_{shq}(S) = \frac{1}{\left(S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right)} \left[\frac{1}{L_{sh}} (V_{1q} - V_{shq}) - \omega I_{shd}(S) \right] \quad (II.42)$$

Le système d'équations ainsi obtenu correspond au modèle du convertisseur shunt. Les équations (II.39) et (II.40) sont représentées par le schéma bloc suivant:



B.3. Model du DC-link:

Le DC-Link relie le convertisseur série et le convertisseur shunt de l'UPFC. Il est représenté dans le schéma unifilaire de la figure (II.5) et dans le schéma équivalent de la figure (II.6). Pour modéliser le DC-link, nous utiliserons le modèle monophasé du convertisseur, comme suit:



Nous allons d'abord définir les relations d'entrée/sortie de nos convertisseurs. On va les assimiler à un quadripôle dont la fonction de modulation $w(t)$ relie leurs entrées et leurs sorties de la façon suivante:

- Pour le convertisseur shunt:

l'équation vérifiée par le quadripôle est la suivante:

$$\begin{bmatrix} I_e \\ V_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{w_e(t)} & 0 \\ 0 & w_e(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{in} \\ V_{in} \end{bmatrix} \quad (II.43)$$

Dans la matrice carrée, en raison de l'indépendance du courant I_e vis-à-vis de la tension V_{in} , le terme croisé $M_{(12)}$ est nul. Comme le courant I_{in} ne dépend pas non plus de la tension V_e , le terme croisé $M_{(21)}$ est également nul.

Les termes de l'équation (II.43) peuvent être réécrits sous la forme suivante:

$$V_e = w_e(t) V_{in} \quad (II.44)$$

$$I_e = \frac{1}{w_e(t)} I_{in} \quad (II.45)$$

Dans ce quadripôle, la puissance instantanée est conservée. La relation suivante est donc vérifiée: $I_e V_e = I_{in} V_{in}$.

- Pour le convertisseur série:

De la même façon que pour le convertisseur shunt, on peut écrire:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{w_s(t)} & 0 \\ 0 & w_s(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{out} \\ V_{out} \end{bmatrix} \quad (II.46)$$

Dans la matrice carrée, comme le courant I_s ne dépend pas de la tension V_{out} , le terme croisé $M_{(12)}$ est nul. De même, le courant I_{out} étant indépendant de la tension V_s , le terme croisé $M_{(21)}$ est nul.

Les termes de l'équation (II.46) peuvent être réécrits sous la forme suivante:

$$V_s = w_s(t) V_{out} \quad (II.47)$$

$$I_s = \frac{1}{w_s(t)} I_{out} \quad (II.48)$$

Dans ce quadripôle, la puissance instantanée est conservée. La relation suivante est donc vérifiée: $I_s V_s = I_{out} V_{out}$.

Les équations vérifiées par le DC-link présenté à la figure (II.20) sont les suivantes:

$$\begin{cases} \frac{dU_{DC}}{dt} = \frac{1}{C} I_c \\ I_c = I_{in} - I_R - I_{out} \\ I_R = \frac{V_{in}}{R} \end{cases} \quad (II.49)$$

En raison de l'égalité des tensions U_{DC} , V_{in} et V_{out} ($U_{DC} = V_{in} = V_{out}$), on obtient à partir des équations (II.49), l'expression de U_{DC} suivante:

$$\frac{dU_{DC}}{dt} = -\frac{1}{RC} U_{DC} + \frac{1}{C} I_{in} - \frac{1}{C} I_{out} \quad (II.50)$$

L'équation précédente peut être exprimée en fonction des courants I_e et I_s observés des parties alternatives à travers les fonctions de modulation des intensités.

$$\frac{dU_{DC}}{dt} = -\frac{1}{RC} U_{DC} + \frac{1}{C} w_e(t) I_e - \frac{1}{C} w_s(t) I_s \quad (II.51)$$

Dans l'équation précédente; si, nous remplaçons les termes $w_e(t)$ et $w_s(t)$ par la fonction modulation des tensions, on obtient la relation suivante:

$$\frac{dU_{DC}}{dt} = -\frac{1}{RC} U_{DC} + \frac{1}{C} \frac{V_e}{U_{DC}} I_e - \frac{1}{C} \frac{V_s}{U_{DC}} I_s \quad (II.52)$$

Mais, comme les puissances actives du côté shunt et série ont pour valeurs respectives $P_{sh} = P_e = V_e I_e$ et $P_{se} = P_s = V_s I_s$, on peut écrire:

$$\frac{dU_{DC}}{dt} = -\frac{1}{RC} U_{DC} + \frac{1}{C} \frac{P_{sh}}{U_{DC}} - \frac{1}{C} \frac{P_{se}}{U_{DC}} \quad (II.53)$$

En multipliant à gauche et à droite, l'équation (II.53) par U_{DC} , on aura:

$$U_{DC} \frac{dU_{DC}}{dt} = -\frac{1}{RC} (U_{DC})^2 + \frac{1}{C} P_{sh} - \frac{1}{C} P_{se} \quad (II.54)$$

Si nous appelons $Z = (U_{DC})^2$, la dérivée de Z sera $\frac{dZ}{dt} = 2U_{DC} \frac{dU_{DC}}{dt}$. La relation (II.54) devient:

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{2}{RC}Z + \frac{2}{C}P_{sh} - \frac{2}{C}P_{se} \quad (II.55)$$

En remplaçant Z par $(U_{DC})^2$, on obtient l'équation finale suivante:

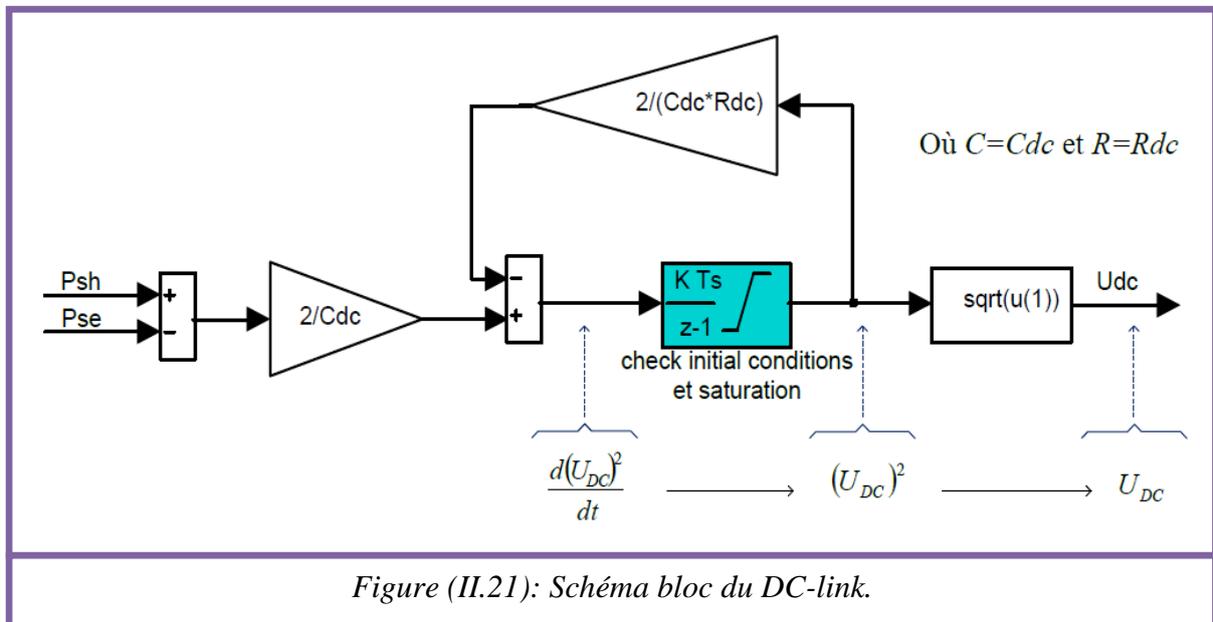
$$\frac{d(U_{DC})^2}{dt} = -\frac{2}{RC}(U_{DC})^2 + \frac{2}{C}(P_{sh} - P_{se}) \quad (II.56)$$

Si on regarde l'équation (II.56), on voit que la puissance active fait varier la tension du condensateur. La variation de tension du condensateur dépend donc du transfert de la puissance active.

Nous avons calculé notre modèle à partir d'un convertisseur triphasé où la puissance active a pour valeur : $P_e = V_e I_e$ et $P_s = V_s I_s$, les puissances actives de chaque phase sont [27]:

$$P_e = V_{e-a} I_{e-a} + V_{e-b} I_{e-b} + V_{e-c} I_{e-c} = V_{e-d} I_{e-d} + V_{e-q} I_{e-q} \quad (II.57)$$

$$P_s = V_{s-a} I_{s-a} + V_{s-b} I_{s-b} + V_{s-c} I_{s-c} = V_{s-d} I_{s-d} + V_{s-q} I_{s-q} \quad (II.58)$$



II.3.4. Commande du système physique:

L'objectif principal de notre convertisseur est de contrôler la puissance active P et la puissance réactive Q de la ligne. Pour cela, il nous faut traiter/contrôler les courants qui circulent par la ligne, qui sont des signaux triphasés et alternatifs.

A. Commande du convertisseur série:

Le système physique du convertisseur série est commandé par un système en boucle fermée dans lequel il y a un correcteur proportionnel intégrateur "PI". Ce système en boucle fermée a besoin des intensités de référence $I_{se_d_ref}$ et $I_{se_q_ref}$.

Pour calculer les courants de référence $I_{se_d_ref}$ et $I_{se_q_ref}$ à appliquer au système en boucle fermée, on utilise les équations que les lient avec les grandeurs P_3 , Q_3 , V_{3d} et V_{3q} . On

s'intéressera en particulier aux puissances P_3 et Q_3 , car elles font partie des objectifs premiers de notre convertisseur. Nous voulons demander à notre convertisseur d'atteindre les valeurs de P_3 et Q_3 présélectionnées à travers les références imposées au système P_{3_ref} et Q_{3_ref} .

La figure (II.22) représente le schéma bloc qui intègre les grandeurs de référence à fournir à la commande série.

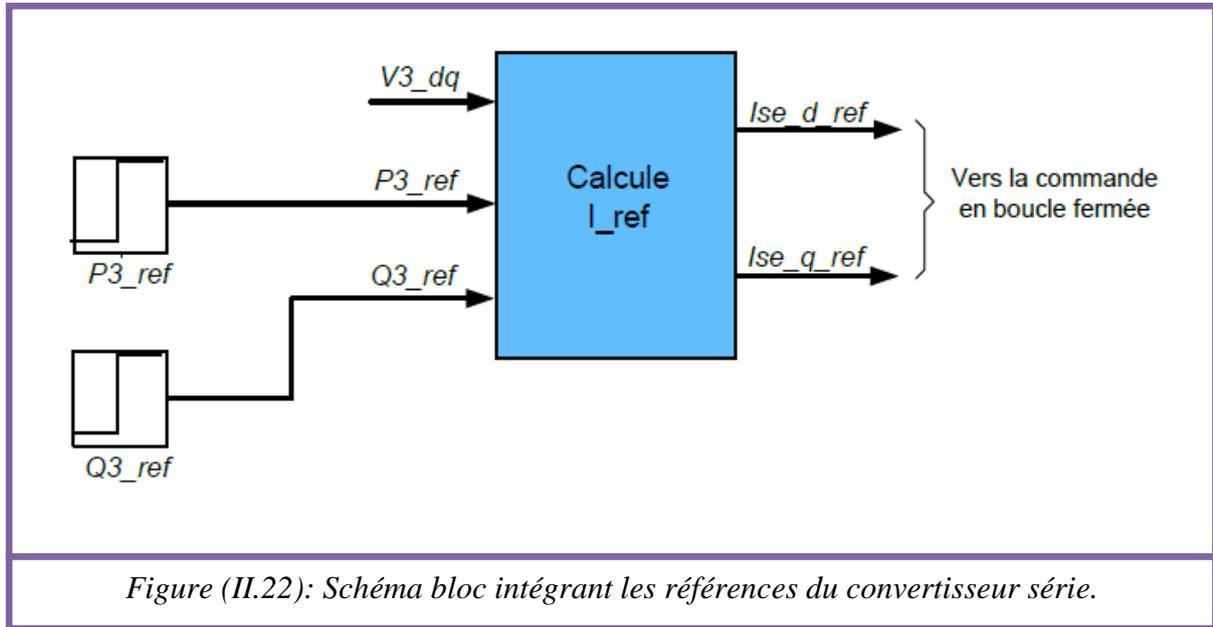


Figure (II.22): Schéma bloc intégrant les références du convertisseur série.

Pour déduire ces équations, on va se référer à la figure (II.17). Nous en déduisons que la puissance apparente qui traverse la ligne série (au point 3 par exemple) est la suivante:

$$S_3 = \frac{3}{2} V_3 I_{se}^* = P_3 + jQ_3 \quad (II.59)$$

Il faut remarquer que le coefficient $1/2$ vu dans l'équation précédente n'est utilisé que si les valeurs de la tension et du courant sont exprimées en valeurs efficaces.

On sait aussi que les vecteurs de la tension et du courant peuvent être décomposés selon deux termes:

$$\begin{cases} V_3 = V_{3d} + jV_{3q} \\ I_{se} = I_{sed} + jI_{seq} \end{cases} \quad (II.60)$$

Dans l'équation (II.59); si, on introduit les termes V_3 et I_{se} obtenus précédemment, on a l'expression suivante:

$$S_3 = \frac{3}{2} (V_{3d} + jV_{3q})(I_{sed} + jI_{seq})^* \quad (II.61)$$

Donc, on trouve la formule finale de S_3 comme suit:

$$S_3 = \frac{3}{2} [(V_{3d}I_{sed} + V_{3q}I_{seq}) + j(V_{3q}I_{sed} - V_{3d}I_{seq})] \quad (II.62)$$

Dans l'expression obtenue, les termes de la puissance active P_3 et de la puissance réactive Q_3 sont les suivants:

$$\begin{cases} P_3 = \frac{3}{2}(V_{3d}I_{sed} + V_{3q}I_{seq}) \\ Q_3 = \frac{3}{2}(V_{3q}I_{sed} - V_{3d}I_{seq}) \end{cases} \quad (II.63)$$

Dans l'expression précédente, l'intensité I_{se} et les puissances P_3 et Q_3 qu'on veut faire circuler sur la ligne correspondent à nos valeurs de référence, c'est-à-dire on a: $I_{se} = I_{se_ref}$, $P_3 = P_{3_ref}$ et $Q_3 = Q_{3_ref}$. Si on introduit ces conditions dans l'équation (II.63), on obtient pour le courant de référence les valeurs suivantes:

$$\begin{cases} I_{sed_ref} = \frac{2}{3} \frac{P_{3_ref} V_{3d} + Q_{3_ref} V_{3q}}{V_{3d}^2 + V_{3q}^2} \\ I_{seq_ref} = \frac{2}{3} \frac{P_{3_ref} V_{3q} - Q_{3_ref} V_{3d}}{V_{3d}^2 + V_{3q}^2} \end{cases} \quad (II.64)$$

B. Commande du convertisseur shunt:

Le système physique du convertisseur shunt est aussi commandé par un système en boucle fermée dans lequel il y a un correcteur PI. Ce système en boucle fermée a besoin des courants de référence $I_{sh_d_ref}$ et $I_{sh_q_ref}$ qui sont calculés par les blocs de la figure (II.23).

Les hypothèses faites pour le calcul des références de la commande du circuit shunt sont les suivantes:

- Les intensités de référence $I_{sh_d_ref}$ et $I_{sh_q_ref}$ sont calculées à partir des valeurs des puissances active et réactive de référence P_{IB_ref} et Q_{IB_ref} respectivement absorbées ou injectées par la partie parallèle de l'UPFC au point de connexion. Pour cela, on utilise le bloc bleu « Calcul I_{ref} » de la figure (II.23);
- La puissance active fournie par le convertisseur série provient:
 - Du convertisseur shunt (en régime permanent);
 - De la capacité du bus DC (en régime transitoire).

Dans un cas idéal, sans pertes et en régime permanent, la puissance active P_{IB} serait égale à la puissance active P_{se} sollicitée par le convertisseur série, $P_{IB_ref} = P_{se}$, voir la figure (II.24). Cependant, ceci ne constitue pas un cas réaliste.

En effet, le réseau est affecté par des phénomènes transitoires et des pertes qui imposent que la puissance fournie par le convertisseur shunt soit supérieure à celle demandée par le convertisseur série. La valeur de la puissance de référence P_{IB_ref} doit tenir compte de ces pertes et phénomènes transitoires " P_{loss} ", afin de garantir un flux

de puissance active équilibré et d'éviter d'éventuelles fluctuations de la tension du bus DC. L'expression de cette puissance de référence est:

$$P_{1B_ref} = P_{se} + P_{loss} \tag{II.65}$$

Si on n'avait pas tenu compte des pertes P_{loss} , la puissance active du convertisseur série P_{se} n'aurait pas été totalement satisfaite par la puissance du convertisseur shunt P_{1B} . Dans ces conditions, la tension V_{dc} du DC-link aurait subi des fluctuations.

Pour calculer P_{1B_ref} , les deux blocs représentés en vert dans la figure (II.23) sont utilisés: un bloc pour le calcul de la puissance P_{se} et un autre bloc pour le calcul de la puissance P_{loss} .

Néanmoins, on peut avancer que pour calculer la puissance P_{loss} un contrôle en boucle fermée avec un correcteur PI est utilisé. Si V_{dc} est différent de V_{dc_ref} , le contrôleur PI injecte la puissance P_{loss} pour que la tension V_{dc} atteigne la valeur de la tension de consigne V_{dc_ref} ;

- Le facteur de puissance au point 1 de la figure (II.24) est choisi comme unitaire, c'est-à-dire que l'UPFC consomme de la puissance active mais pas de puissance réactive ($Q_{1_ref} = 0$). Si la première loi de Kirchhoff est appliquée sous ces conditions, on pourrait écrire:

$$Q_{1_ref} + Q_{1A} + Q_{1B_ref} = 0 \rightarrow Q_{1B_ref} = 0 - Q_{1A} \tag{II.66}$$

Pour calculer la puissance réactive Q_{1A} , le bloc jaune de la figure (II.23) est utilisé.

La représentation des différents blocs décrits précédemment est la suivante:

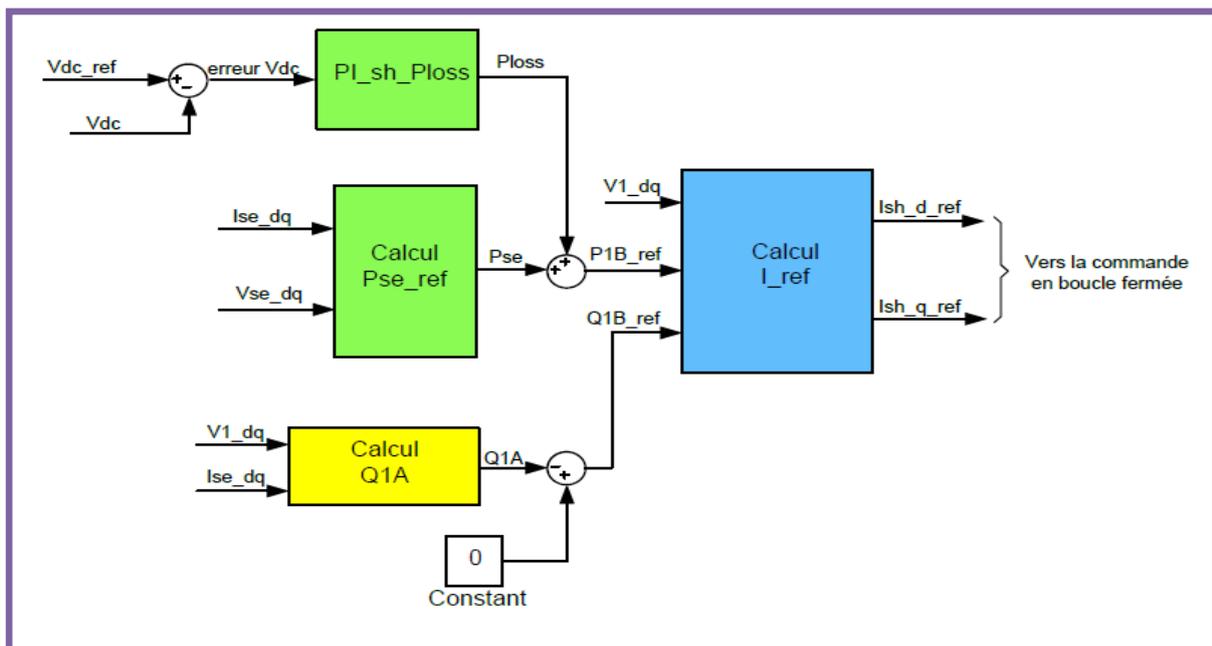
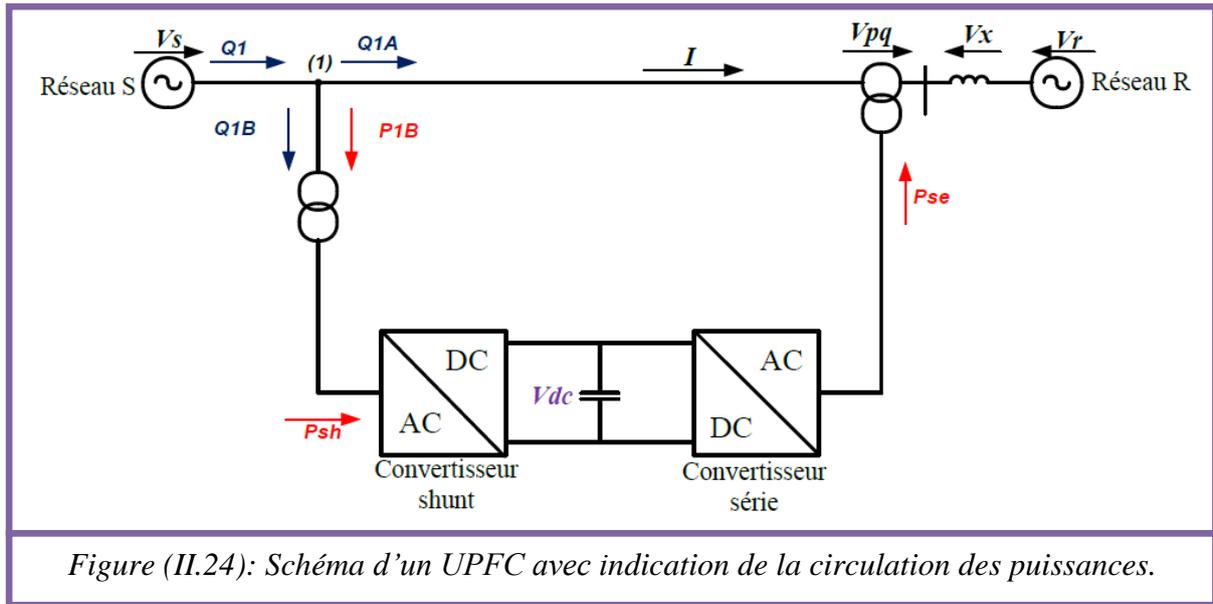


Figure (II.23): Schéma bloc de calcul des références du convertisseur shunt.



Dans la suite de ce paragraphe, trois calculs de références sont décrits:

- Calcul des courants de référence $I_{sh_d_ref}$ et $I_{sh_q_ref}$;
- Calcul de la puissance active de référence P_{1B_ref} ;
- Calcul de la puissance réactive de référence Q_{1B_ref} .

B.1. Calcul des courants de référence $I_{sh_d_ref}$ et $I_{sh_q_ref}$:

Le calcul des courants de référence $I_{sh_d_ref}$ et $I_{sh_q_ref}$ est réalisé de façon analogue au calcul des références du courant de la boucle série. A cet effet, les équations qui lient ces grandeurs avec P_{1B} , Q_{1B} , V_{1d} et V_{1q} sont employées.

Pour déduire ces équations, la figure (II.17) est prise comme référence. La puissance apparente qui traverse la ligne shunt (à l'origine du point 1) est la suivante:

$$S_{1B} = \frac{3}{2} V_1 I_{sh}^* = P_{1B} + jQ_{1B} \quad (II.67)$$

On sait aussi que les vecteurs de la tension et du courant peuvent se décomposer en deux termes:

$$\begin{cases} V_1 = V_{1d} + jV_{1q} \\ I_{sh} = I_{shd} + jI_{shq} \end{cases} \quad (II.68)$$

Si on introduit dans l'équation (II.67) les termes V_1 et I_{sh} obtenus précédemment, on obtient l'expression suivante:

$$S_{1B} = \frac{3}{2} (V_{1d} + jV_{1q})(I_{shd} + jI_{shq})^* \quad (II.69)$$

Donc, on trouve la formule finale de S_{1B} comme suit:

$$S_{1B} = \frac{3}{2} [(V_{1d}I_{shd} + V_{1q}I_{shq}) + j(V_{1q}I_{shd} - V_{1d}I_{shq})] \quad (II.70)$$

Dans cette expression, les termes de la puissance active P_{1B} et de la puissance réactive Q_{1B} sont les suivantes:

$$\begin{cases} P_{1B} = \frac{3}{2}(V_{1d}I_{shd} + V_{1q}I_{shq}) \\ Q_{1B} = \frac{3}{2}(V_{1q}I_{shd} - V_{1d}I_{shq}) \end{cases} \quad (II.71)$$

Dans les expressions de l'équation (II.71), l'intensité I_{sh} et les puissances (P_{1B} et Q_{1B}) sont des valeurs de référence, c'est-à-dire que on a: $I_{sh} = I_{sh_ref}$, $P_{1B} = P_{1B_ref}$ et $Q_{1B} = Q_{1B_ref}$. Si on intègre convenablement ces grandeurs dans l'équations (II.71), on obtient les valeurs des courants de référence suivantes:

$$\begin{cases} I_{shd_ref} = \frac{2}{3} \frac{P_{1B_ref} V_{1d} + Q_{1B_ref} V_{1q}}{V_{1d}^2 + V_{1q}^2} \\ I_{shq_ref} = \frac{2}{3} \frac{P_{1B_ref} V_{1q} - Q_{1B_ref} V_{1d}}{V_{1d}^2 + V_{1q}^2} \end{cases} \quad (II.72)$$

B.2. Calcul de la puissance active de référence P_{1B_ref} :

Comme indiqué précédemment, la puissance active de référence de la partie shunt de l'UPFC P_{1B_ref} est la somme de la puissance active série P_{se} et de la puissance des pertes P_{loss} .

- Pour calculer la puissance P_{se} , l'équation (II.63) du circuit série est exploitée. Elle est cependant référencée par rapport au convertisseur série et non pas par rapport au point 3 de la ligne série, voir la figure (II.17). De ce fait, l'équation (II.63) devient:

$$P_{se} = \frac{3}{2}(V_{sed}I_{sed} + V_{seq}I_{seq}) \quad (II.73)$$

Dans l'équation (II.73), les valeurs de V_{sed} , V_{seq} , I_{sed} et I_{seq} sont mesurées avec le système physique série;

- Pour calculer la puissance P_{loss} , on utilise un système de contrôle en boucle fermée pour lequel la tension V_{dc} referme la boucle par le système physique. Malgré la nature non linéaire de la boucle de régulation de bus DC, le système utilisé comporte un correcteur PI qui est représenté sur la figure (II.25). Il est composé de deux termes: un terme proportionnel K_p et un terme intégral K_i .

Comme le calcul des paramètres est difficile à partir d'une méthode analytique, le correcteur PI a été synchronisé de manière empirique par des essais.

L'intégrateur du correcteur PI utilisé en mode discret sur Matlab prend la valeur

$$\frac{K T_s}{z - 1}$$

La représentation du diagramme de blocs du PI qui permet de déterminer P_{loss} est la suivante:

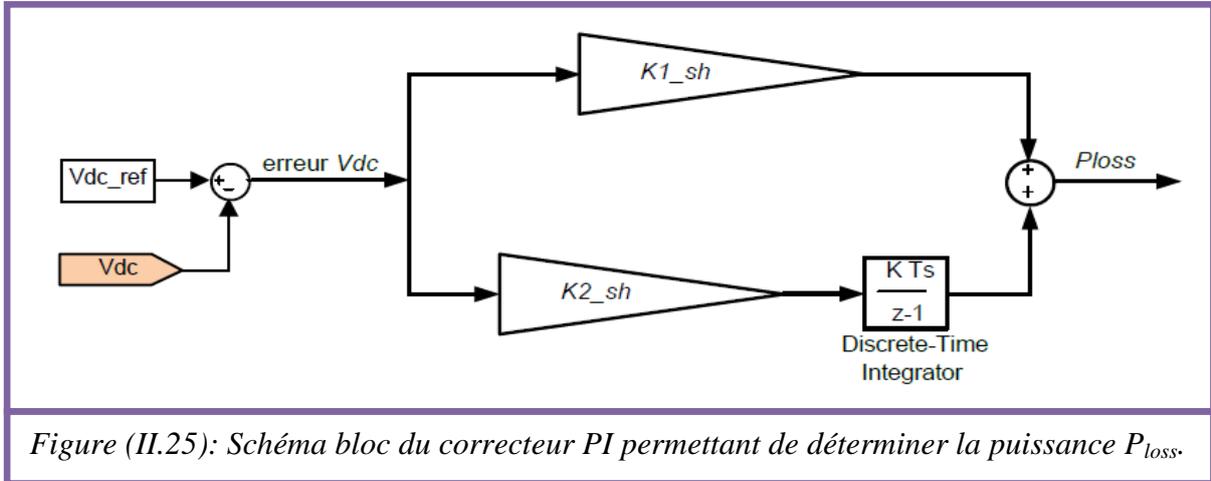


Figure (II.25): Schéma bloc du correcteur PI permettant de déterminer la puissance P_{loss} .

B.3. Calcul de la puissance réactive de référence Q_{IB_ref} :

Comme indiqué précédemment, la puissance réactive de la partie shunt de l'UPFC est égale à la différence entre la puissance réactive du système Q_I et la puissance réactive série Q_{IA} .

Comme on considère que la puissance Q_I est nulle, la puissance Q_{IB_ref} est égale en magnitude à la puissance Q_{IA} , mais se trouve selon l'équation (II.66), en opposition de phase ($Q_{IB_ref} = -Q_{IA}$). Ce rapport correspond dans le diagramme bloc de la figure (II.23) au comparateur alimenté par le signal positif provenant du bloc de valeur nulle qui représente la puissance Q_I et par le signal négatif provenant du bloc jaune qui fournit la puissance Q_{IA} .

Pour calculer la puissance réactive Q_{IA} de la branche série, on va utiliser l'équation qui la lie avec les grandeurs V_{1d} , V_{1q} , I_{sed} et I_{seq} . Pour déduire cette équation, on va se référer à la figure (II.17). Nous pouvons dire que la puissance apparente qui traverse la ligne série (à l'origine du point 1) est la suivante:

$$S_{1A} = \frac{3}{2} V_1 I_{se}^* = P_{1A} + jQ_{1A} \quad (II.74)$$

Les vecteurs de la tension et du courant peuvent se décomposer en deux termes:

$$\begin{cases} V_1 = V_{1d} + jV_{1q} \\ I_{se} = I_{sed} + jI_{seq} \end{cases} \quad (II.75)$$

Si on insère dans l'équation (II.74) les termes V_1 et I_{se} obtenus précédemment, l'expression suivante est obtenue:

$$S_{1A} = \frac{3}{2} (V_{1d} + jV_{1q})(I_{sed} + jI_{seq})^* \quad (II.76)$$

Donc, on trouve la formule finale de S_{1A} comme suit:

$$S_{1A} = \frac{3}{2} [(V_{1d}I_{sed} + V_{1q}I_{seq}) + j(V_{1q}I_{sed} - V_{1d}I_{seq})] \quad (II.77)$$

Dans l'expression obtenue, les termes de la puissance active P_{1A} et de la puissance réactive Q_{1A} sont les suivants [27]:

$$\begin{cases} P_{1A} = \frac{3}{2} (V_{1d}I_{sed} + V_{1q}I_{seq}) \\ Q_{1A} = \frac{3}{2} (V_{1q}I_{sed} - V_{1d}I_{seq}) \end{cases} \quad (II.78)$$

II.4. Conclusion:

De manière générale, les dispositifs FACTS agissent en fournissant ou en absorbant de la puissance réactive, en augmentant ou en réduisant la tension aux nœuds, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les phases des tensions [2]. Avec le développement rapide de l'électronique de puissance, les systèmes FACTS ont été créés et implémentés dans les réseaux électriques. L'installation des FACTS est devenue indispensable pour augmenter la capacité et la contrôlabilité d'un réseau électrique.

L'énorme avantage de l'UPFC est bien sûr la flexibilité qu'il offre en permettant le contrôle des trois paramètres associés au transit de puissance; la tension, l'angle de transport et l'impédance de la ligne en un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension [21].

Chapitre III

Les intelligences
artificielles

Chapitre III

Les intelligences artificielles

III.1. Introduction:

De nos jours, nos problèmes impliquent souvent des systèmes de plus en plus complexes et à une échelle très grande. S'ajoute à cela une forte poussée vers une sophistication de plus en plus subtile mettant de fortes contraintes sur la solution désirée et faisant cette recherche de la solution une tâche phénoménale [28].

On pourrait dire que la logique floue, les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques constituent des approches qui tout compte fait, ne sont pas nouvelles. Leur développement se fait à travers les méthodes par lesquelles l'homme essaye de copier la nature et de reproduire des modes de raisonnement et de comportement qui lui sont propres. Bien que ces approches paraissent naturelles, et si elles se sont imposées dans des domaines allant du traitement de l'image à la gestion financière, elles commencent à peine à être utilisées dans les domaines de l'électrotechnique et de l'industrie afin de résoudre les problèmes d'identification, de régulation de processus, d'optimisation, de classification, de détection de défauts ou de prise de décision [29].

III.2. La logique floue:

La commande floue a montré de plusieurs années sa fiabilité et sa capacité d'adaptation aux problèmes industriels concrets.

La logique floue est extrêmement utile dans les applications à procédé complexe, qu'il est impossible de modéliser mathématiquement en raison de ses non-linéarités ou de réponses variables dans le temps. Souvent, les méthodes de commande classiques, comme la régulation PID, ne peuvent pas fournir une commande adéquate pour ces types d'applications. Cependant, il est en principe, encore possible de commander ces procédés grâce à l'expertise des opérateurs qui ont appris comment le procédé répond aux diverses conditions d'entrée [30].

III.2.1. Historique:

A. Apparition de la logique floue:

Le terme d'ensemble flou apparaît pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi A. Zadeh de l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé « ensembles flous ». Il a réalisé depuis de nombreuses avancées théoriques majeures dans le domaine et a été rapidement accompagné par de nombreux chercheurs développant des travaux théoriques.

B. Premières applications:

Parallèlement, certains chercheurs se sont penchés sur la résolution par logique floue de problèmes réputés difficiles. Ainsi en 1975, le professeur E.H. Mamdani à Londres développe une stratégie pour le contrôle des procédés et présente les résultats très encourageants qu'il a obtenus sur la conduite d'un moteur à vapeur. En 1978, la société Danoise F.L. Smidth réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est là la première véritable application industrielle de la logique floue.

C. Essor:

C'est au Japon, où la recherche n'est pas seulement théorique mais également très applicative, que la logique floue connaît son véritable essor. A la fin des années 1980, c'est d'un véritable boum qu'il faut parler. Les produits grand public, machines à laver, appareils photographiques et autres caméscopes estampillés ne se comptent plus. Dans l'industrie, le traitement des eaux, les grues portuaires, les métros, les systèmes de ventilation et de climatisation sont touchés. Enfin, des applications existent dans des domaines très différents tels que la finance ou le diagnostic médical. A partir de 1990, c'est en Allemagne que des applications apparaissent en grand nombre ainsi qu'à une moindre échelle aux USA. Enfin en France, la logique floue devient aujourd'hui une réalité [6].

III.2.2. Quand utiliser un régulateur flou et pourquoi?

A. Cas d'utilisation:

- Coût de la modélisation trop élevé;
- Problèmes difficiles à modéliser (processus complexes, non-linéaires, etc.);
- Amélioration des performances de régulateurs classiques.

B. Points forts:

- Structure simple;
- Coût de la synthèse et de l'implémentation faible;
- Proche du langage courant, facilité de modification [31].

III.2.3. Utilisation de la logique floue pour le contrôle:

La logique floue est bien connue des automaticiens pour ses applications dans le contrôle-commande de procédés, appelé alors couramment « contrôle flou ». Tout comme un contrôleur (correcteur) classique, le contrôleur flou s'insère dans la boucle de régulation et calcule la commande à appliquer au procédé suivant une ou plusieurs consignes et une ou plusieurs mesures effectuées sur celui-ci.

Les bases de règles floues sont intéressantes en commande car elles permettent:

- De prendre en compte une expertise existante de nature qualitative;
- De prendre en compte des variables que l'on sait difficilement intégrer dans la boucle;
- D'améliorer le fonctionnement de contrôleurs classiques, par:
 - Autoréglage hors ligne ou en ligne des gains de ces contrôleurs;
 - Modification de leur sortie en fonction d'événements qui ne peuvent pas être pris en compte par une technique classique [6].

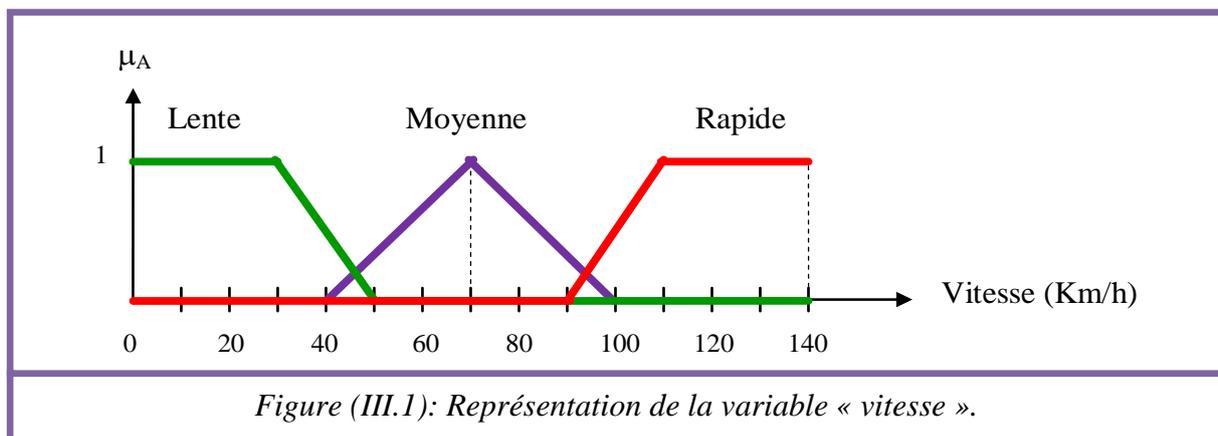
III.2.4. Généralités sur la logique floue:

On a mentionné que le principe général et la théorie de base de la logique floue englobent des aspects de la théorie des possibilités qui fait intervenir des ensembles d'appartenances appelés ensembles flous caractérisant les différentes grandeurs du système à commander et le raisonnement flou qui emploie un ensemble de règles floues établies par le savoir faire humain et dont la manipulation permet la génération de la commande adéquate ou la prise de la décision. Ainsi, les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont:

- Les variables linguistiques;
- Les ensembles flous;
- Les fonctions d'appartenance;
- Les règles d'inférences [30].

A. Variables linguistiques:

Une variable linguistique appelée aussi attribut linguistique, peut être définie à partir du triplet (x, X, T_x) où x est une variable définie sur l'univers de discours X ; et $T_x = A_1, A_2, \dots$ est un ensemble composé de sous-ensembles flous de X qui caractérise x . On associe souvent à chaque sous-ensemble flou de T_x une valeur ou un terme linguistique (étiquette). La Figure suivante illustre un exemple de la variable linguistique (vitesse) avec trois termes linguistiques: lente, moyenne et rapide [5].



Où:

Univers du discours: $X = [0,140]$.

Variable linguistique: La vitesse.

Termes linguistiques: "lente", "moyenne" et "rapide".

B. Ensembles flous:

Soit X une collection d'objets ou de valeurs notées par x ; où: $X \rightarrow [0,1]$.

Un ensemble flou A est caractérisée par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui attribut un degré d'appartenance à tous les éléments dans l'univers de discours X :

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) / x \in X \}$$

Il existe quatre caractéristiques essentielles caractérisant l'ensemble flou: le type, le support, le noyau et la hauteur.

- **Les types:** Elles peuvent être triangulaire, gaussienne, trapézoïdale, sigmoïdale...etc.
- **Le support:** C'est l'ensemble des éléments de X qui appartiennent au moins un peu à A . Il est défini par:

$$s(A) = \{ x \in X / \mu_A(x) > 0 \}$$

- **Le noyau:** Le noyau d'un ensemble flou est défini par:

$$\eta(A) = \{ x \in X / \mu_A(x) = 1 \}$$

- **La hauteur:** C'est la valeur maximale de la fonction d'appartenance, elle est définie par:

$$h(A) = \text{Max}_{x \in X} \{ \mu_A(x) \}$$

La figure (III.2) représente les caractéristiques d'une fonction trapézoïdale [32].

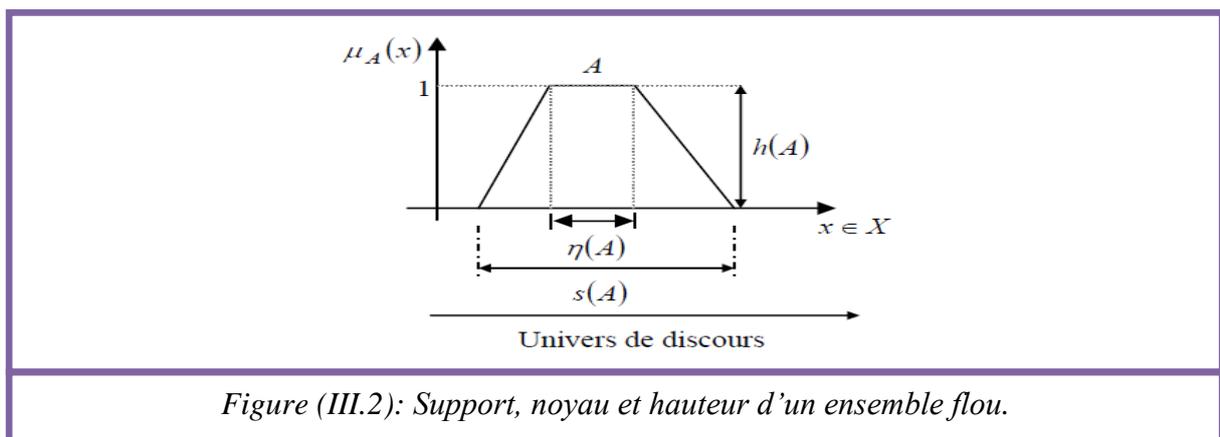


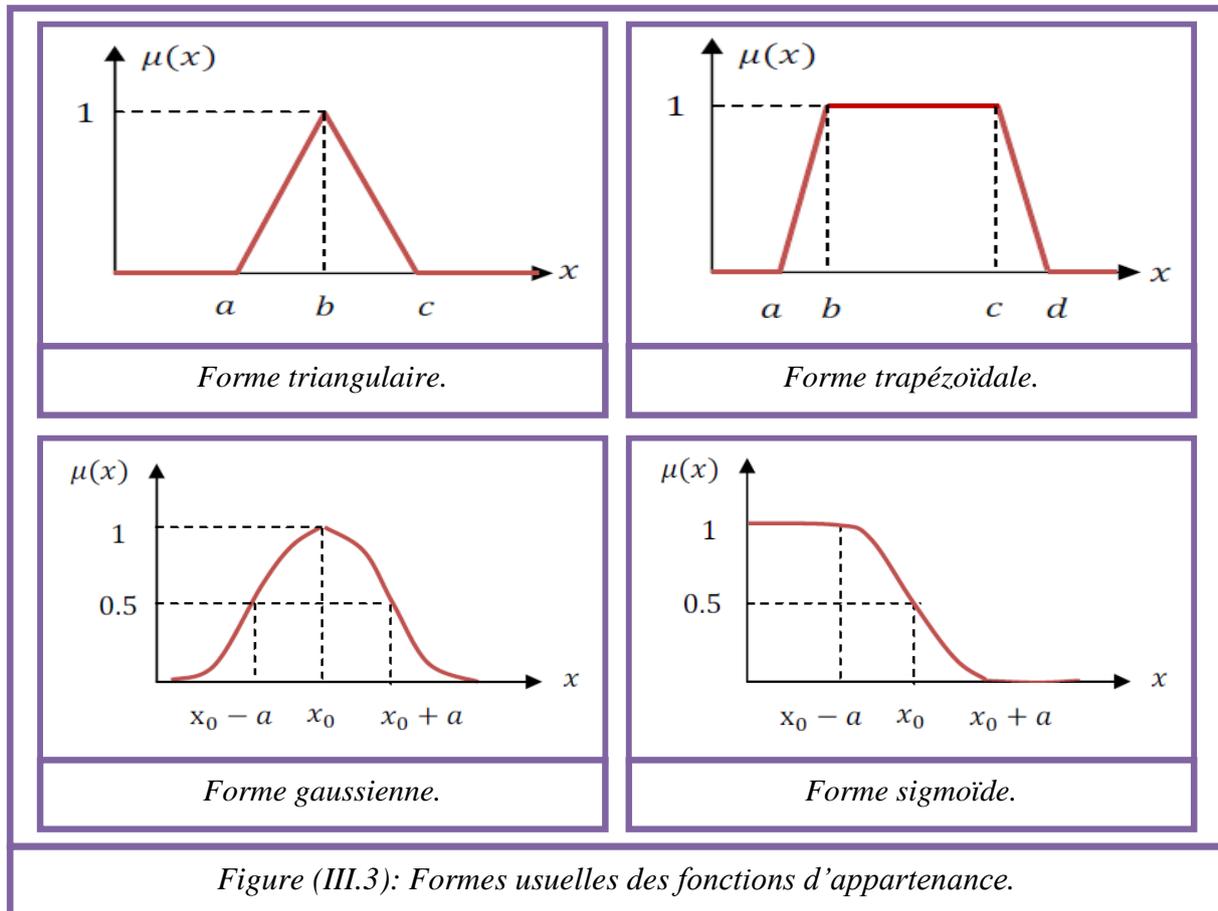
Figure (III.2): Support, noyau et hauteur d'un ensemble flou.

C. Fonctions d'appartenance:

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme, mais en général, les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont définies par des formes

géométriques ou des fonctions, les fonctions d'appartenance sont le plus souvent représentées par les fonctions triangulaire et trapézoïdale. Dans la plupart des cas, et en particulier pour le réglage par la logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous.

Les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont représentées dans la figure suivant:



D. Règles d'inférences:

On appelle règles d'inférence l'ensemble des différentes règles reliant les variables floues d'entrée d'un système aux variables floues de sortie de ce système. Ces règles se présentent sous la forme:

Si [condition(s)] **alors** [action(s)] sur les sorties.

L'exemple suivant tiré de la vie quotidienne, permet d'illustrer ceci:

Lorsque l'on prend une douche, un des problèmes qui se présente est de régler la température de l'eau. La variable d'entrée du système homme-douche est la température de l'eau mesurée à l'aide de nos capteurs de température. Les variables de sorties sont les deux robinets eau chaude et eau froide. Dans la pratique, le réglage de la température se fait en utilisant notre

expérience, expérience qui recouvre à la fois nos préférences et notre connaissance de l'installation sanitaire utilisée. Ce réglage se fait en utilisant des règles du genre:

- *Si* la température est très froide *alors* ouvrir à fond l'eau chaude;
- *Si* la température est un peu trop froide *alors* fermer un peu l'eau froide;
- *Si* la température est bonne *alors* laisser les deux robinets dans leur état;
- *Si* la température est trop chaude *alors* fermer un peu l'eau chaude et ouvrir un peu l'eau froide.

En termes d'intelligence artificielle, ces règles résument en fait l'expérience de l'expert et elles ne sont en général pas définissables de façon unique puisque chaque individu crée ses propres règles [33].

III.2.5. Comparaison entre l'ensemble flou-non flou:

Comment faire en sorte d'exprimer les imprécisions en termes logiques?

- Logique classique: Une proposition est *vraie* ou *fausse*.

Exemples:

- C'est personne est grande. *Vrai* ou *faux*?
- Soit il fait froid, soit il ne fait pas froid.
 - Pas flexible...

- Logique intuitionniste (multivaluée): Une proposition peut avoir plusieurs valeurs.

Exemples:

- C'est personne est grande. *Vrai, à moitié vrai* ou *faux*?
- On ne peut pas prouver qu'il fasse froid ou qu'il ne fasse pas froid.
 - Un peu plus flexible...

- Logique floue: Une proposition peut avoir autant de valeurs que l'on veut.

Exemples:

- C'est personne est grande. C'est vrai à 30%.
- Soit il fait froid, soit il ne fait pas froid, soit il fait un peu froid.

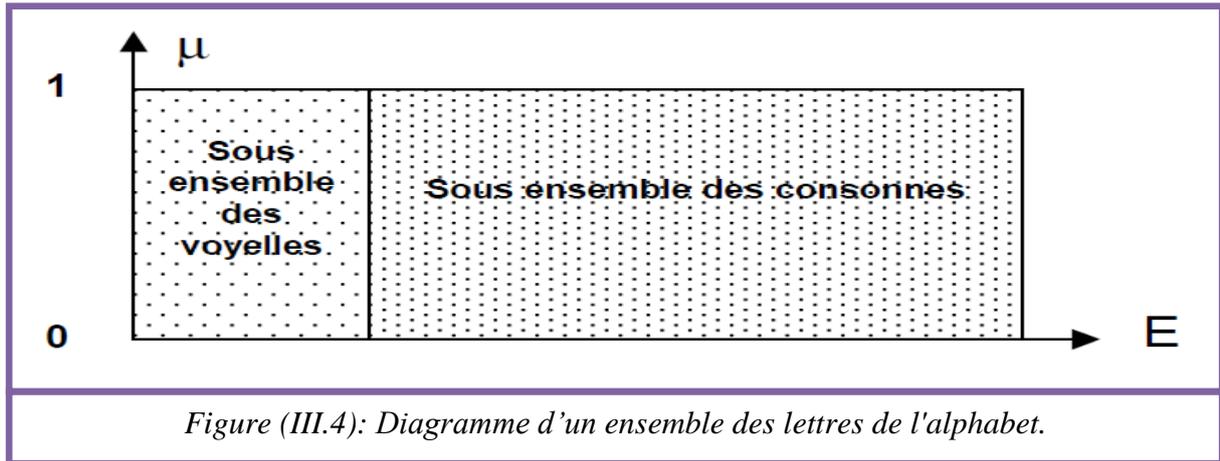
Avec « un peu » entre 0 et 1.

 - Flexible! [34], [35].

La relation d'appartenance entre une variable et un sous ensemble se dit « fonction d'appartenance ». En d'autre termes, on parle de fonction d'appartenance d'une variable a à un sous ensemble B et on le note de la manière suivante: $\mu_B(a)$.

A. Exemple d'un ensemble non flou:

$E = \{a, b, c, \dots, x, y, z\}$ ensemble des lettres de l'alphabet.



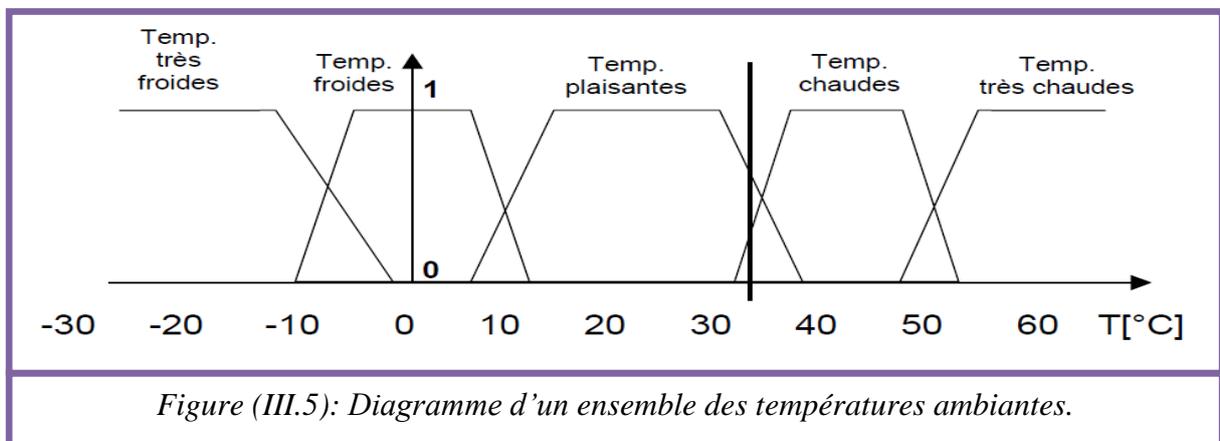
$$\mu_V(i) = 1 ; \mu_C(i) = 0 ; \mu_V(g) = 0 ; \mu_C(g) = 1.$$

B. Exemple d'un ensemble flou:

Soit une température de 30°C une variable de l'ensemble des températures appartenant au sous ensemble « plaisante ».

Mais une température de 30°C peut aussi appartenir en partie au sous-ensemble « plaisante » et en partie au sous-ensemble « chaude ».

Soit: $T = \{ \dots, -10, 0, 10, 20, 30, \dots, 60, \dots \}$ ensemble des températures ambiantes.



$$\mu_P(32^\circ\text{C}) = 0.6 ; \mu_C(32^\circ\text{C}) = 0.28.$$

C. Remarque:

Les fonctions d'appartenance n'ont pas forcément un total de 1.

Lorsqu'on parle d'ensembles « flous », ce n'est pas tout à fait exact. En effet, l'ensemble de référence n'est pas « flou », il est ordonné. Ce sont ses sous ensembles qui sont « flous » [36].

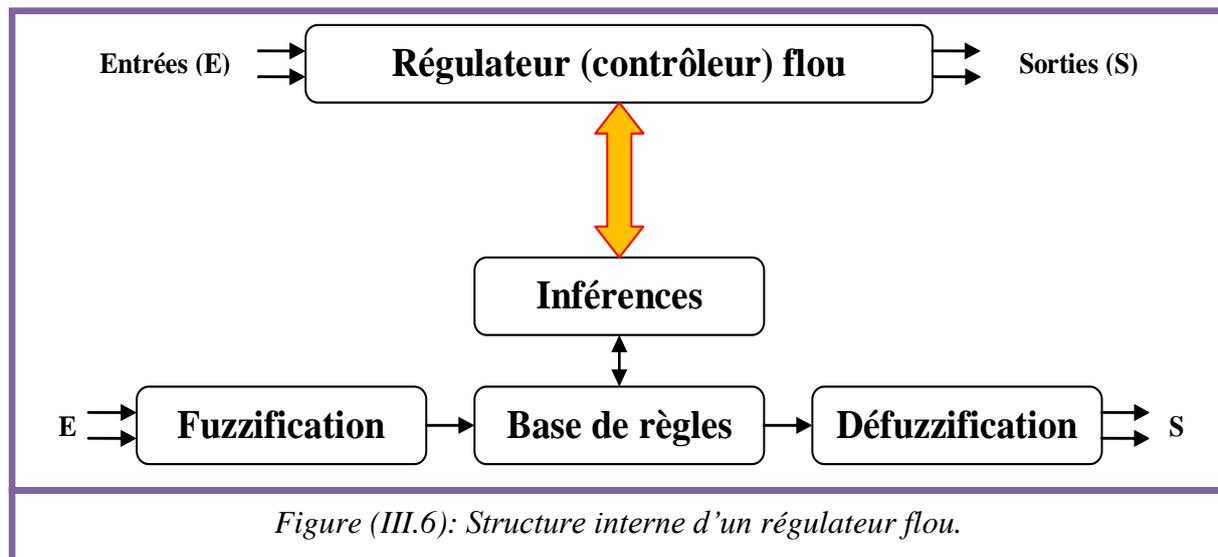
III.2.6. Description et structure d'une commande par la logique floue:

Contrairement aux techniques de réglage classique, le réglage par la logique floue n'utilise pas des formules ou des relations mathématiques bien déterminées ou précises. Mais, il

manipule des inférences avec plusieurs règles floues à base des opérateurs flous « *et*, *ou*, *alors*,... » appliquées à des variables linguistiques.

On peut distinguer quatre parties principales constituant la structure d'un régulateur flou [Voir la figure (III.6)]:

- L'interface de fuzzification;
- Le mécanisme d'inférence;
- La base de règles;
- L'interface de défuzzification [30].



A. Interface de fuzzification:

Le processus de la fuzzification consiste à simplement attribuer aux différentes variables linguistiques d'entrée des fonctions d'appartenance convenables. Cette opération est nécessaire vu que la mesure de la sortie S et la donnée de la référence ou consigne sont toujours exprimées en des variables qui sont nettes et précises et que le régulateur flou ne peut traiter que des variables floues [28].

B. Mécanisme d'inférence:

C'est un mécanisme de décision. Il permet à partir d'un fait observé de la base des règles floues une décision en exploitant le raisonnement approximatif. Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs « *et*, *ou* ». L'opérateur « *et* » s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle tandis que l'opérateur « *ou* » lie les différentes règles.

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs dans une inférence et qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance à savoir:

- Méthode d'inférence max-min (Mamdani);
- Méthode d'inférence max-produit (Larsen);
- Méthode d'inférence somme-produit (Sugeno) [37].

Chacune de ces trois méthodes utilise un traitement numérique propre des opérateurs de la logique floue:

- Pour la méthode d'inférence max-min, l'opérateur « *et* » est réalisé par la formation du minimum, l'opérateur « *ou* » est réalisé par la formation du maximum, et « *alors* » (l'implication) est réalisée par la formation du minimum;
- Pour la méthode d'inférence max-produit, l'opérateur « *et* » est réalisé par la formation du produit, l'opérateur « *ou* » est réalisé par la formation du maximum, et « *alors* » est réalisée par la formation du produit;
- Pour la méthode d'inférence somme-produit, on réalise au niveau de la condition, l'opérateur « *ou* » par la formation de la somme (valeur moyenne), et l'opérateur « *et* » par la formation du produit. Pour la conclusion, l'opérateur « *alors* » est réalisé par un produit [38].

C. Base de règles:

La base de règles a pour but de structurer la connaissance que l'on a sur le contrôle du processus en produisant des règles de la forme:

Si « état du processus » Alors « action en sortie »

La partie "Si" est appelée antécédent (prémisse) de la règle, la partie "Alors" est appelée conséquence de la règle [31].

D. Interface de défuzzification:

A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer du « monde flou » au « monde réel », c'est la défuzzification.

Dans la commande en temps réel, un critère de choix de la méthode de défuzzification est la simplicité de calcul, plusieurs méthodes existent, on peut mentionner:

- Le centre de gravité;
- La méthode de la hauteur;
- La méthode de la hauteur modifiée;
- La méthode de la valeur maximum;
- La méthode de la moyenne des maxima « mom ».

La plus souvent rencontrée étant le calcul du « centre de gravité » de l'ensemble flou.

Le calcul du centre de gravité permet bien d'obtenir une seule valeur pour la grandeur de sortie. Son calcul est cependant relativement complexe puisqu'il nécessite le calcul d'une intégrale, ou dans le cas simple de fonctions d'appartenance en raies, d'une somme pondérée [6], [33], [37].

III.2.7. Avantages et inconvénients d'un régulateur flou:

La commande par logique floue comporte évidemment un certain nombre d'avantages et d'inconvénients.

A. Les avantages:

Les avantages essentiels sont:

- La non-nécessité d'une modélisation du processus à commander, ainsi que d'une analyse mathématique profonde;
- La possibilité de bénéficier et d'implémenter des connaissances et des expertises humaines sur le système à commander;
- La maîtrise de systèmes à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser), aussi cette approche offre la possibilité d'utiliser des processeurs spécialisés (dit processeurs flous), afin d'augmenter la précision ainsi la vitesse de calcul [37];
- Plus robuste (plus facile à mettre au point en changeant les fonctions d'appartenance) [39].

B. Les inconvénients:

Par contre, les inconvénients sont:

- Le manque de méthodes systématiques précises pour la conception et la synthèse d'une commande par logique floue;
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de commande en toute généralité (en absence d'un modèle valable);
- La cohérence des inférences est non garantie à priori (apparition possible des règles d'inférence contradictoires) [37];
- Problème de saturation si les fonctions d'appartenance ne sont pas bien définies [39].

III.2.8. Domaines d'applications de la logique floue:

- Contrôleurs des:
 - Aviation (Rockwell);
 - Boite de vitesses (Nissan, Subaru);
 - Amarrage de navettes spatiales (NASA);

- Métro (Sendai) comme:
 - Contrôle de la vitesse;
 - Contrôle du freinage;
 - Prise en compte du confort des voyageurs;
 - Plus grande précision de la position d'arrêt;
 - Plus grand confort pour les voyageurs;
 - Réduction de la consommation électrique.
- Ordonnancements des:
 - Ascenseurs (Mitsubishi,...).
- Traitement du signal tels:
 - Reconnaissance de caractères (Palm Sony);
 - Autofocus (Sanyo, Canon);
 - Stabilisateur d'images (Panasonic) [40].
- Analyse de risque.
- Evaluation de prêt.
- Planification stratégique [39].

III.3. Les algorithmes génétiques:

Les algorithmes génétiques (AGs) sont des techniques de recherche et d'optimisation dérivées de la génétique et des mécanismes de la sélection naturelle et de l'évolution. Leurs champs d'application sont très vastes: économie, finance, optimisation de fonctions, planification, et bien d'autres domaines [41].

Les algorithmes génétiques appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes. Leur but est d'obtenir une solution approchée à un problème d'optimisation, lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte (ou que la solution est inconnue) pour le résoudre en un temps raisonnable [42].

III.3.1. Historique:

L'utilisation d'algorithmes génétiques dans la résolution de problèmes est à l'origine le fruit des recherches de John Holland et de ses collègues et étudiants de l'université du Michigan (États-Unis) qui ont dès 1960, travaillé sur ce sujet. La nouveauté introduite par ce groupe de chercheurs a été la prise en compte de l'opérateur d'enjambement en complément des mutations.

Cet opérateur qui permet le plus souvent de se rapprocher de l'optimum d'une fonction en combinant les gènes contenus dans les différents individus de la population. Le premier

aboutissement de ces recherches a été la publication en 1975 de « Adaptation in Natural and Artificial System ».

La popularisation des algorithmes génétiques sera l'œuvre de David Goldberg à travers son livre « Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning » en 1989, qui décrit l'utilisation de ces algorithmes dans le cadre de résolution de problèmes concrets, a permis de mieux faire connaître ces derniers dans la communauté scientifique et a marqué le début d'un nouvel intérêt pour cette technique d'optimisation, notamment après la parution de puissants calculateurs dans les années 90 [20], [42].

III.3.2. Pourquoi utiliser les AGs?

Les caractéristiques à prendre en compte sont les suivantes:

- La simplicité de leurs mécanismes;
- La facilité de leur mise en application et leur efficacité même pour des problèmes complexes;
- Nombre de solutions important: Les performances des algorithmes génétiques par rapport aux algorithmes classiques sont plus marquées lorsque les espaces de recherches sont importants;
- Pas d'algorithme déterministe adapté et raisonnable [43].

III.3.3. Fondements des algorithmes génétiques:

Les techniques de recherche et d'optimisation sont en général classées en trois catégories: énumératives, déterministes et stochastiques. Les AGs font partie de la troisième catégorie et sont fondés sur:

- Une représentation chromosomique des solutions du problème;
- Une méthode pour générer une population initiale de solutions;
- Une méthode d'évaluation qui classe les solutions selon leurs aptitudes;
- Des opérateurs génétiques, qui définissent la manière dont les caractéristiques des parents sont transmises aux descendants.

Les AGs se caractérisent selon quatre axes qui sont:

- Ils utilisent un codage des paramètres, et non les paramètres eux-mêmes;
- Ils travaillent sur une population de points, au lieu d'un point unique;
- Ils n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée, pas sa dérivée ou une connaissance auxiliaire;
- Ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

Il est donc clair qu'un AG manipule un ensemble d'individus à la fois, où chaque individu est caractérisé par une empreinte génétique, c.-à-d. un ensemble de chromosomes.

L'évolution des AGs se fait par deux mécanismes: la sélection naturelle et la reproduction; la sélection naturelle fait que seuls les individus les mieux adaptés survivent et se reproduisent, quant à la reproduction sexuée, elle assure un brassage de l'ensemble des solutions. Ce phénomène (sélection/reproduction) réitéré plusieurs fois sur une population produit après plusieurs générations des individus très bien adaptés au milieu dans lequel ils vivent [44].

III.3.4. Caractéristiques d'un AG:

Les principales caractéristiques relatives à cette technique se concentrent autour de trois points suivants:

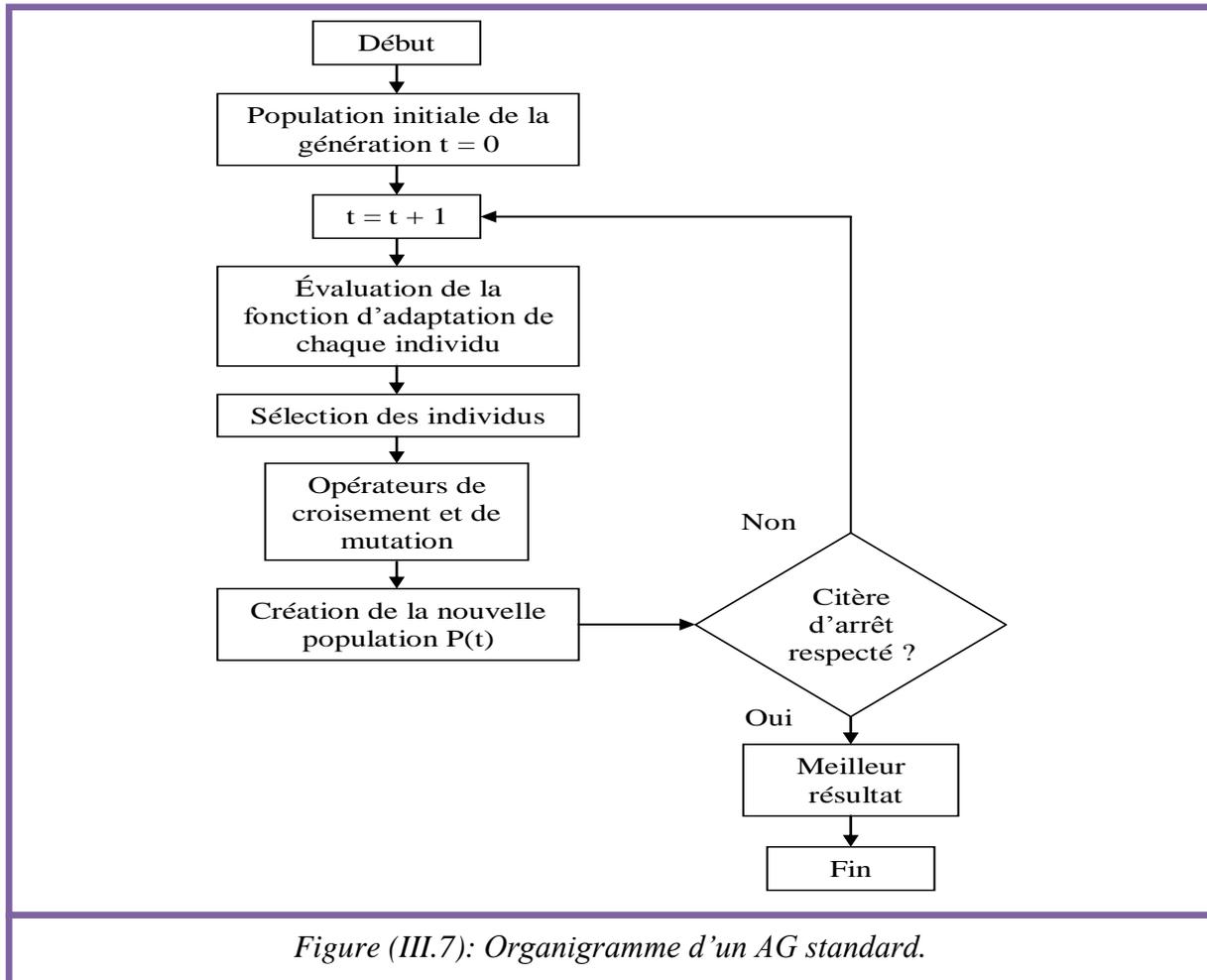
- Le parallélisme: L'algorithme génétique travaille en parallèle sur un certain nombre de candidats et non pas sur un candidat unique. La méthode de recherche est globale et couvre tout l'espace de recherche;
- L'utilisation minimale d'informations: Il n'a besoin que de la mesure d'adéquation (la qualité d'une solution), il ne repose sur aucune autre information, par exemple des dérivées ou des hypothèses telles que la continuité et la différentiabilité. Il ne requiert qu'une capacité à classer les solutions entre elles;
- L'utilisation de règles probabilistes plutôt que déterministes dans l'exploration de l'espace de recherche: L'introduction du hasard est très bénéfique pour l'optimisation des fonctions présentant plusieurs optima et aussi en cas de fonction non permanente (déplacement ou changement des optima au cours du temps) [45].

III.3.5. Principe de base d'un AG standard:

Un AG standard nécessite en premier le codage de l'ensemble des paramètres du problème d'optimisation en une chaîne de longueur finie. Le principe d'un AG est simple, il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus jusqu'à un critère d'arrêt. On commence par générer une population initiale d'individus de façon aléatoire. Puis, à chaque génération des individus sont sélectionnés, cette sélection est effectuée à partir d'une fonction objectif appelée fonction d'adaptation. Puis, les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués et une nouvelle population est créée. Ce processus est itéré jusqu'à un critère d'arrêt. Le critère le plus couramment utilisé est le nombre maximal de générations que l'on désire effectuer. La figure (III.7) présente le principe d'un AG standard.

L'AG débute par la génération d'une population initiale et l'évaluation de la fonction d'adaptation de tous les individus qui composent cette première population. Puis, des

individus sont sélectionnés aléatoirement pour la reproduction selon le principe de la survie du plus adapté. Ensuite, des individus enfants (les descendants) sont générés en appliquant les deux opérateurs génétiques suivants: le croisement et la mutation. Ces enfants sont placés dans une nouvelle population $P(t)$ et vont se substituer, en tout ou en partie, à la population de la génération précédente. De nouvelles populations d'individus vont ensuite se succéder, d'une génération (t) à la génération ($t+1$), chaque génération représentant une itération jusqu'à l'atteinte du critère d'arrêt [46].



III.3.6. Paramètres d'un AG:

Pour appliquer un AG à un problème réel, on doit posséder les éléments suivants:

- Un codage des éléments appartenant à la population, le codage des solutions du problème à résoudre doit être choisi avec soin;
- Une fonction d'évaluation, d'adéquation ou d'adaptation de l'individu qui mesure la qualité de l'individu;
- Un processus d'évolution des générations;

- Des opérateurs pour modifier les individus d'une population de la génération (t) à la génération ($t+1$) comme le croisement et la mutation;
- Des paramètres de l'AG: Les opérateurs précédents dépendent de plusieurs paramètres qui sont fixés à l'avance et dont dépend fortement la convergence de l'algorithme:
 - La taille de la population: C'est à dire le nombre d'individus dans la population. Si la taille est trop petite, l'AG peut ne pas converger; par contre si elle est trop grande, l'évaluation des individus peut être très longue;
 - Une probabilité de croisement et de mutation: Les valeurs de ces probabilités peuvent varier d'une application à l'autre;
 - Un critère d'arrêt: C'est-à-dire le nombre maximal de générations à effectuer [47].

III.3.7. Fonctions objectif et de performance:

A. Fonction objectif:

A l'inverse des méthodes déterministes d'optimisation, les algorithmes génétiques ne requièrent pas d'hypothèse particulière sur la régularité de la fonction à optimiser (objectif).

Ainsi, les algorithmes génétiques n'utilisent pas les dérivées successives de la fonction objectif, ce qui rend leurs domaines d'application très vaste. Aucune hypothèse sur la continuité n'est également requise. Le peu d'hypothèses requises permet de traiter des problèmes très complexes. La fonction objectif peut être le résultat d'une simulation ou d'un modèle mathématique.

Généralement, la fonction objectif d'un problème quelconque d'optimisation à K contraintes peut être formulée comme suit:

Optimisation $\{Fobj(X) : X \in D_k\}$

Avec:

$$D_k = \left\{ \begin{array}{l} X \in D : \\ H_K(X) \leq b_k \\ \forall k : k = 1, \dots, K \\ b_k \in \mathfrak{R} \text{ et } H_k : D \mapsto \mathfrak{R} \end{array} \right\} \quad (III.1)$$

$Fobj(X)$: est la fonction objectif du problème.

X : est l'individu.

D_k : est l'espace des solutions réalisables (c.-à-d. l'ensemble des solutions potentielles en respectant les contraintes).

D : est l'ensemble des solutions potentielles du problème.

H_k : est la fonction de contrainte.

b_k : est une constante.

\mathfrak{R} : est l'ensemble des nombres réels.

B. Fonction de performance:

Chaque chromosome apporte une solution potentielle au problème à optimiser.

Néanmoins, ces solutions n'ont pas toutes le même degré de pertinence. C'est à la fonction de performance (fitness) de mesurer cette efficacité pour permettre à l'AG de faire évoluer la population dans un sens bénéfique en cherchant la solution meilleure. Autrement dit, la fonction de performance $fp(X)$, doit pouvoir attribuer à chaque individu un indicateur représentant sa pertinence pour le problème que nous cherchons à résoudre.

La performance sera donc donnée par une fonction à valeurs positives réelles. La construction d'une fonction de performance appropriée est très importante pour obtenir un bon fonctionnement de l'AG.

Dans le cas du codage binaire, la fonction de performance doit affecter une valeur positive au codage binaire correspondant (phénotype) à chaque chaîne binaire (génotype).

Ainsi, elle permet de déterminer l'efficacité de la solution présentée par le génotype pour résoudre le problème.

La fonction de performance $fp(X)$ est généralement dérivée de la fonction objectif " $Fobj(X)$ " du problème. Elle est généralement donnée par la relation suivante:

$$fp(X) = g(Fobj(X))$$

Où: g représente la transformation de la fonction objectif en performance relative [17].

III.3.8. Les opérateurs génétiques:

Ces opérateurs sont la base des AGs, définissent la manière dont les individus se recombinent et s'agencent pendant la phase de reproduction.

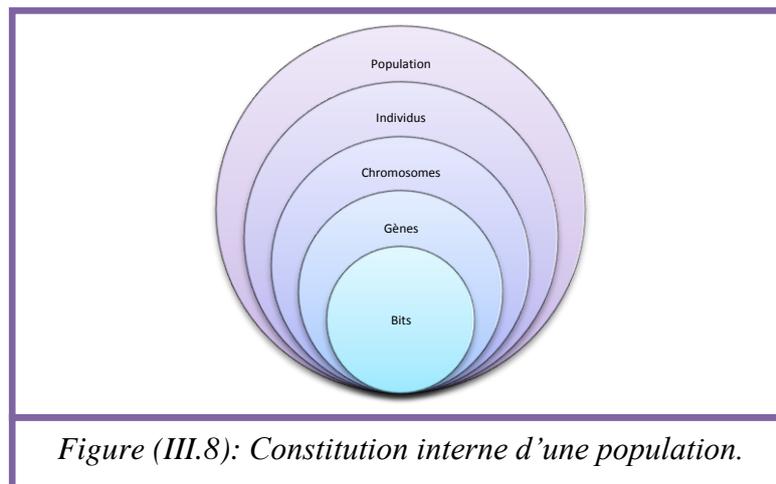
Les différents opérateurs de l'algorithme génétique tel que: le codage, l'évaluation, la sélection et la reproduction avec le croisement et la mutation vont maintenant être étudiés dans ce qui suit:

A. Initialisation:

L'initialisation sert à constituer la population initiale. C'est une étape à ne pas négliger car si la population n'est pas uniformément répartie au départ, l'évolution risque de se concentrer sur un optimum local duquel il peut être difficile de sortir. Classiquement, pour chaque individu de la population, le mécanisme d'initialisation consiste à effectuer un tirage aléatoire de chacun des bits dans une chaîne. Dans le cas d'une représentation binaire par exemple, le tirage s'effectue dans l'ensemble $\{0, 1\}$ [48].

B. Codage:

Chaque paramètre d'une solution est assimilé à un gène, toutes les valeurs qu'il peut prendre sont les allèles de ce gène, il doit trouver une manière de coder chaque allèle différent de façon unique. Pour continuer avec les parallèles entre le codage et le domaine de la génétique, on parle de chromosome pour une suite de gène. On peut regrouper dans un chromosome des paramètres similaires. Dans ce cas, on identifiera chaque gène par sa position: son locus sur le chromosome. Au final chaque individu est représenté par un ensemble de chromosomes, et une population est un ensemble d'individus [49].



Plusieurs codes d'informations sont utilisés. Les plus fréquemment utilisés sont le code « binaire » naturel et le code de « Gray ». Plus récemment le codage « réel » a fait son apparition.

B.1. Codage binaire:

Ce codage consiste pour un individu donné, à concaténer toutes ses variables codées en binaire. Le codage binaire présente plusieurs avantages comme l'alphabet minimum, la facilité de mise en place d'opérateurs génétiques et l'existence de résultats théoriques. Néanmoins, ce codage présente quelques inconvénients comme:

- Les performances de l'algorithme sont diminuées lorsque la longueur de la chaîne augmente;
- Deux nombres décimaux voisins (exemple: 7 et 8) peuvent être très éloignés dans le codage binaire naturel (1000 et 0111). Ce problème peut être réglé en remplaçant le code binaire naturel par le code binaire de Gray [38].

B.2. Codage de Gray:

Le codage de Gray est un codage qui a comme propriété qu'entre un élément n et un élément $n+1$, donc voisin dans l'espace de recherche, un seul bit diffère [50].

B.3. Codage réel:

Ce codage consiste tout simplement à la concaténation des gènes d'un individu. Ce codage présente des avantages majeurs. Il est plus précis que le codage binaire et l'espace de recherche est le même que l'espace du problème. Il a le mérite d'être simple à utiliser, l'évaluation de la fonction coût est plus rapide. Le codage réel évite de faire le transcodage du binaire naturel ou de Gray vers les réels à chaque évaluation.

Néanmoins, il possède deux inconvénients, son alphabet est infini, et il a besoin d'opérateurs appropriés [38].

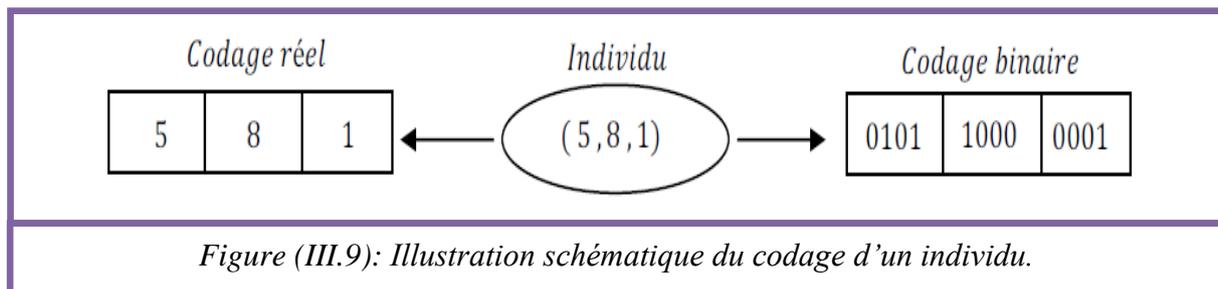


Figure (III.9): Illustration schématique du codage d'un individu.

C. Evaluation:

Pour calculer le coût d'un point de l'espace de recherche, on utilise une fonction d'évaluation ou d'adaptation. L'évaluation d'un individu ne dépend pas de celle des autres individus, le résultat fourni par la fonction d'évaluation va permettre de sélectionner ou de refuser un individu pour ne garder que les individus ayant le meilleur coût en fonction de la population courante: c'est le rôle de la fonction fitness. Cette méthode permet de s'assurer que les individus performants seront conservés, alors que les individus peu adaptés seront progressivement éliminés de la population [38].

D. Sélection:

Cet opérateur permet de sélectionner les individus de P qui vont être sauvegardés dans la nouvelle famille composée P' et vont servir de parents (application de l'opérateur de croisement). On sélectionne toujours autant d'individus qu'on en supprime.

L'opérateur de la sélection est très important puisqu'il gère la population en permettant à certains éléments de rester ou en supprime d'autres. Il est préférable que la survie d'un individu soit en accord avec son efficacité à résoudre le problème. On trouve les plus souvent quatre types de méthodes de sélection différentes:

- **La méthode de la roulette biaisée (loterie Wheel):** Cette méthode très utilisée, sélectionne chaque individu en fonction de sa performance. Donc les individus les plus adaptés à répondre au problème ont plus de chance d'être sélectionnés.

- **La méthode élitiste:** Cette méthode sélectionne les n individus dont on a besoins pour la nouvelle génération P' en prenant les n meilleurs individus de la population P .
- **La sélection par tournois:** Cette méthode sélection deux individus de P et on compare leur taux de satisfaction. Le plus intéressant est sélectionné avec une probabilité p comprise entre 0.5 et 1 . Cette méthode est très intéressante car elle présente une variance très élevée.
- **La sélection universelle stochastique:** Cette méthode peut être vue comme le fait de prendre un segment découpé en autant de sous-segment qu'il y a d'individus. Les individus sélectionnés sont désignés par un ensemble de points équidistants. Mais cette méthode a une variance très faible, donc très peu utilisé [49].

Considérons un problème simple de maximisation, on utilise la méthode de sélection par la roulette biaisée.

Dans un codage binaire, le principe de cette méthode consiste à associer à chaque individu X_i (d'une population de taille N_{ind}) une probabilité $R_{p,i}$ proportionnelle à sa performance $fp(X_i)$. Cette probabilité (dite la fonction de performance normalisée) peut être ainsi calculée comme le taux de la performance du $i^{ème}$ individu pondéré par la somme des performances de toute la population:

$$R_{p,i} = \frac{fp(X_i)}{\sum_{i=1}^{N_{ind}} fp(X_i)} \quad (III.2)$$

On doit donc effectuer autant de tirages aléatoires qu'il y a d'individus dans la population. Chaque individu est alors reproduit avec la probabilité $R_{p,i}$; certains individus (notés les bons) auront plus de chance d'être reproduits, les autres (notés mauvais) seront éliminés.

Dans la pratique, nous associons à chaque individu un secteur (ou un segment) dont la surface est proportionnelle à sa performance. Ces éléments sont ensuite concaténés sur une base normalisée entre 0 et 1. Enfin, nous reproduisons le principe de tirage aléatoire utilisé dans les roulettes de casinos, d'où le nom de ce mécanisme de sélection, avec une caractéristique linéaire (sélection proportionnelle à la performance). Nous tirons alors un nombre aléatoire de distribution uniforme entre 0 et 1 et nous déterminons l'individu sélectionné. Ainsi, les grands secteurs (c.-à-d. les bons individus) auront plus de chance d'être choisis que les petits secteurs. Les individus ayant une forte performance sont donc privilégiés au détriment des individus moins forts, tout en gardant la notion de tirage aléatoire. Ainsi, avec cette méthode, un même individu pourra être sélectionné plusieurs fois. Mais une certaine diversité est cependant maintenue, car même les individus les moins performants conservent une chance

d'être choisis. Pour garder la même taille de la population initiale dans la population suivante, on doit lancer la roulette autant de fois qu'il y a d'individus de la population.

La fonction objectif est donnée par la forme suivante:

$$Fobj = 4x(1-x)$$

L'espace de recherche de la variable x est $D = [0,1]$.

Nous traitons ce problème en décodant les points de l'espace de recherche en chaînes binaires de longueur $l_s = 8$, et en initialisant une population de départ de 4 individus ($N_{ind} = 4$).

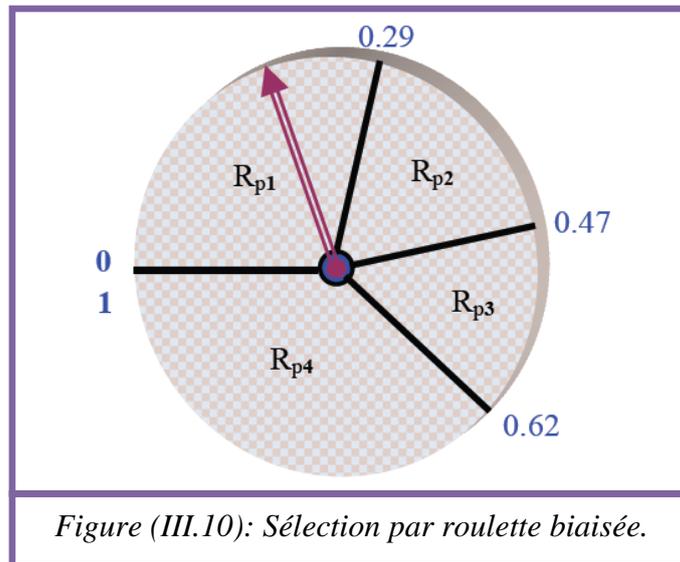
Pour appliquer la méthode de la roulette biaisée, nous calculons en premier lieu, pour chaque individu, la fonction de performance $fp(X_i)$ et la probabilité correspondante $R_{p,i}$.

Le tableau suivant résume le résultat pour chaque élément:

Tableau (III.1): Résultats de l'évaluation des individus dans la population initiale.

N° d'individu	Chromosome S_i	Valeurs décodées X_i (individus)	Performance $fp(X_i) = Fobj = 4x(1-x)$	Probabilité $R_{p,i} = fp(X_i) / \sum(fp(X_i))$	Intervalles de probabilité
1	1 0 1 1 1 0 1 0	0.7294	0.7895	0.29	[0, 0.29]
2	1 1 0 1 1 1 1 0	0.8706	0.4507	0.18	[0.29, 0.47]
3	0 0 0 1 1 0 1 0	0.1020	0.3665	0.15	[0.47, 0.62]
4	0 1 1 0 1 1 0 0	0.4235	0.9766	0.38	[0.62, 1]

Ensuite, nous associons à chaque intervalle de probabilité un secteur équivalent de la roulette, comme le montre la figure suivante:



Enfin, nous effectuons le tirage d'un nombre aléatoire dans l'intervalle $[0,1]$ et nous reproduisons ce tirage 4 fois. Nous sélectionnons ainsi les individus en positionnant chaque nombre obtenu par tirage dans le secteur équivalent de la roulette. Le tableau ci-dessous donne la valeur obtenue pour chaque tirage et les individus sélectionnés correspondants.

Tableau (III.2): Résultats de sélection.

N° de tirage	Valeurs obtenues	Individus sélectionnés	Chromosomes équivalents
1	0.43	X_2	$X_{a1} = 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0$
2	0.89	X_4	$X_{a2} = 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0$
3	0.18	X_1	$X_{a3} = 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0$
4	0.75	X_4	$X_{a4} = 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0$

Nous trouvons que l'individu X_3 est éliminé de la population tandis que l'individu X_4 est reproduit deux fois.

E. Croisement:

Dans les AGs, le croisement est considéré comme le principal opérateur pour produire des nouveaux chromosomes. Comme son homologue dans la nature, le croisement produit de nouveaux individus en leur transférant quelques parties de la matière génétique de leurs parents. L'objectif du croisement est donc d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Initialement, le croisement associé au codage par chaînes de bits (codage binaire) est le croisement à découpage de chromosomes.

Ainsi, dans le codage binaire, les individus qui résultent de la sélection sont groupés de manière aléatoire par paire définissant ainsi les parents. Ensuite, chaque couple peut subir un croisement avec une probabilité de croisement " P_c " donnée. Cette étape peut être effectuée comme suit:

Pour chaque couple, un nombre aléatoire P est tiré dans l'intervalle $[0,1]$ et comparé ensuite avec la probabilité de croisement P_c :

- Si $P > P_c$: Le couple ne subit pas de croisement et un clonage de chromosome aura lieu. Les deux enfants produits sont ainsi une copie exacte de leurs parents;
- Si $P < P_c$: Le croisement a lieu et un échange des parties des chromosomes des parents va produire deux enfants par couple de parents.

Après avoir tiré les couples qui vont être "croisés", l'opérateur de croisement peut être donc appliqué. Plusieurs types de croisement sont présentés dans la littérature, tels: le croisement seul point, le croisement multipoints, le croisement uniforme,...etc.

E.1. Croisement un point (discret):

Dans ce type de croisement, un point de croisement est choisi aléatoirement pour le couple, la position de ce point M est définie par: $M \in \{1, 2, \dots, l_s - 1\}$

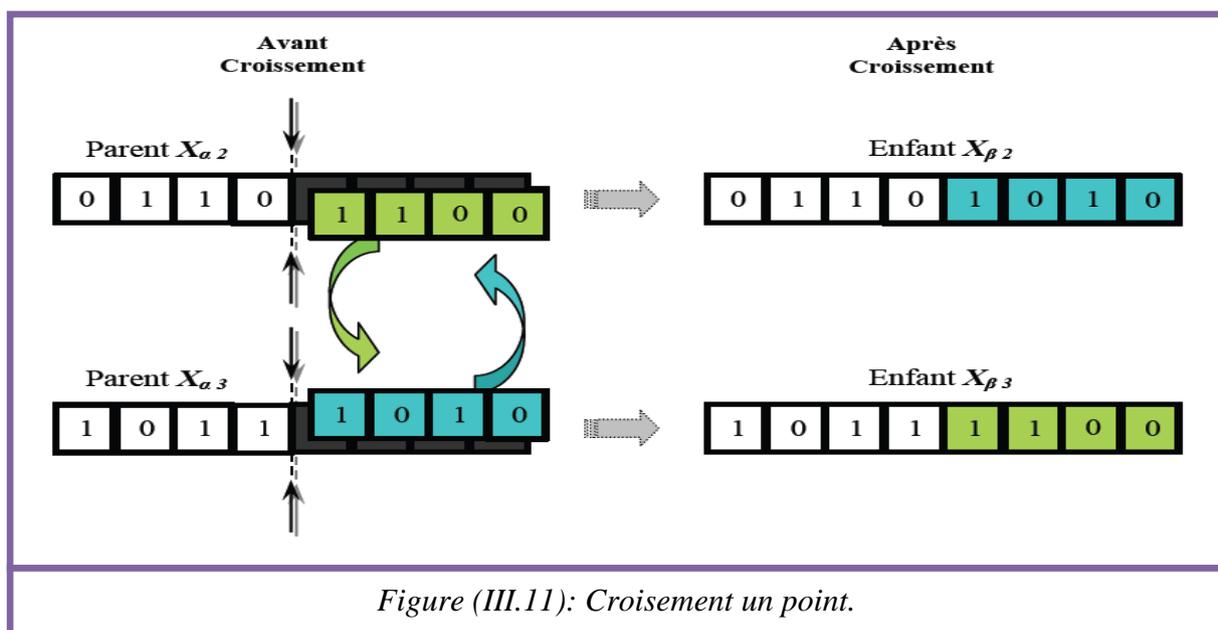
Où: l_s est la longueur de chromosome (nombre de bits dans le chromosome).

Les deux parents seront ainsi divisés en deux segments (tête et queue). Le segment tête du premier parent est combiné avec le segment queue du deuxième parent: on obtient ainsi le premier enfant. La combinaison entre le segment tête de deuxième parent et le segment queue de premier parent produit le deuxième enfant.

Pour mieux expliciter ce type de croisement, nous allons présenter un exemple d'un individu à huit gènes.

Considérons la population de quatre individus déterminée par l'opération de sélection, nous pouvons la diviser aléatoirement en deux couples qui peuvent être par exemple: $[(X_{\alpha 1}, X_{\alpha 4}), (X_{\alpha 2}, X_{\alpha 3})]$. Considérons ensuite une probabilité de croisement $P_c = 50\%$ (nous avons choisi une faible probabilité de croisement étant donné la petite taille de la population considérée). Cela signifie que nous pouvons tirer seulement un seul couple au hasard et lui appliquer le croisement chromosomique. Supposons que le hasard a désigné le deuxième couple $(X_{\alpha 2}, X_{\alpha 3})$ pour croisement, il nous faut maintenant déterminer la position du point M de croisement dans les parents. Cette position peut être tirée au hasard ou choisie préalablement. Afin de rendre l'exemple plus parlant, nous décidons d'appliquer ce croisement sur le milieu " $M = 4$ " du chromosome, comme le montre la figure (III.11).

Ainsi, l'application de l'opération de croisement engendre deux nouveaux individus (les deux enfants $X_{\beta 2}$ et $X_{\beta 3}$). Le croisement en un seul point a l'avantage d'être simple et facile à appliquer. De plus, ce type de croisement donne de bons résultats dans des applications où certaines informations importantes sur le problème sont déjà connues. Enfin, pour des problèmes d'optimisation en temps réel ou des problèmes ayant un grand nombre de variables, cette méthode peut donner une convergence rapide vers une solution optimale.

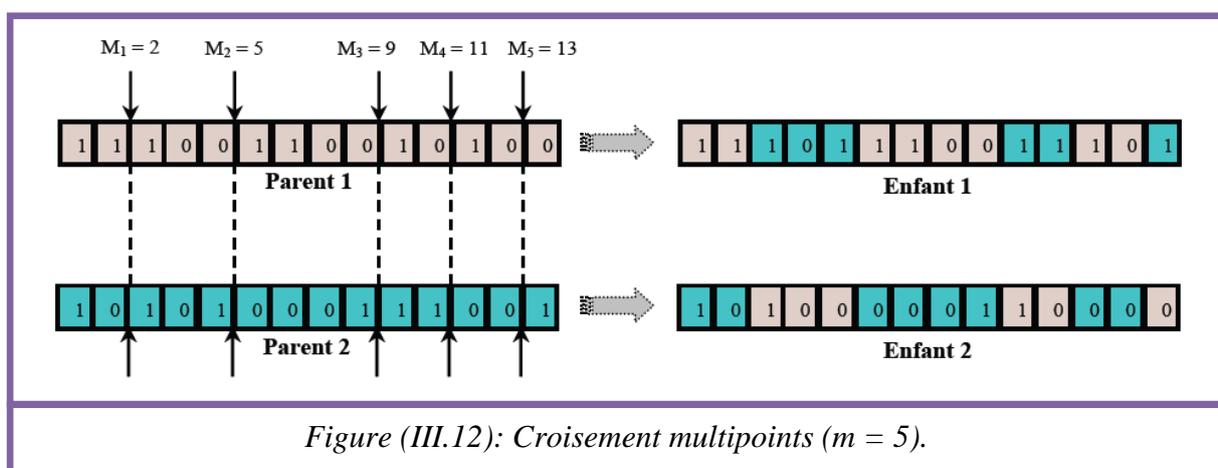


E.2. Croisement multipoints:

A la différence du croisement seul point, ce type de croisement s'applique en plusieurs points (m points) et chaque chromosome sera ainsi découpé en " $m+1$ " segments. La position de chaque point M_i , se détermine aléatoirement avec: $M_i \in \{1, 2, \dots, l_s - 1\}$; et $i = 1, 2, \dots, m$

Où: m est le nombre de points de croisement donné (Pour $m = 1$, on retourne au cas du croisement seul point).

Ensuite, les bits entre deux points de croisement successifs du premier parent vont être échangés avec les bits correspondants du deuxième parent. La figure (III.12) montre un croisement en cinq points " $m = 5$ ", les points de croisement M_i étant $\{2, 5, 9, 11, 13\}$:

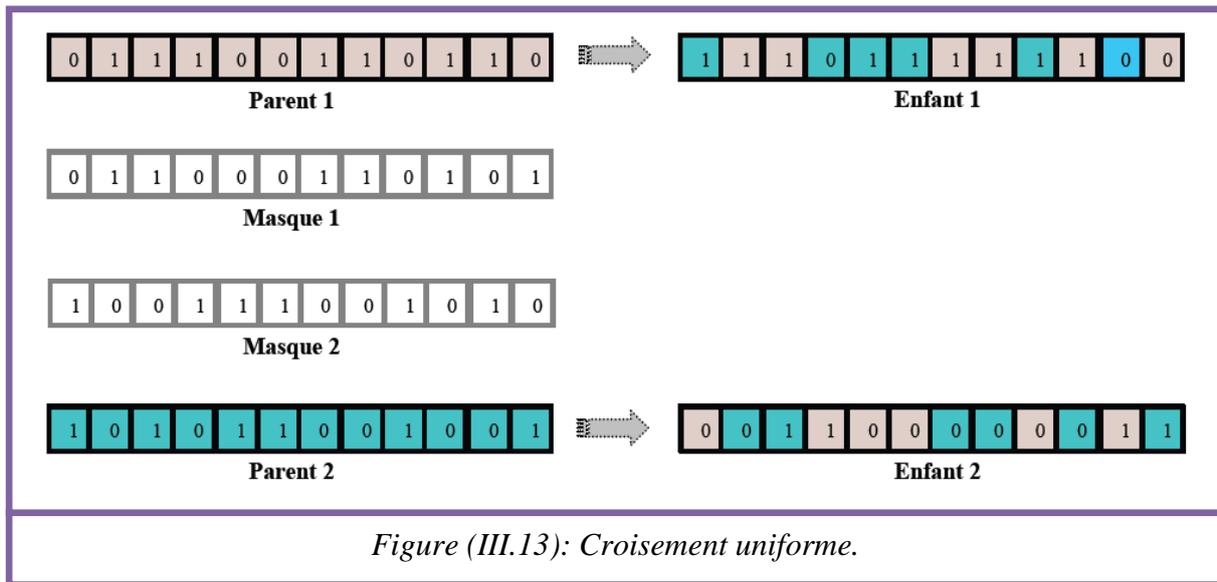


La nature complexe du croisement multipoints permet d'obtenir une bonne exploration de l'espace de recherche au détriment d'une convergence rapide vers la bonne solution comme le ferait la première méthode. Ainsi, cette méthode de croisement est beaucoup plus robuste.

E.3. Croisement uniforme (continu):

Dans le croisement multipoints, chaque segment du chromosome compris entre deux points de croisement successifs, peut contenir un ou plusieurs bits. Le croisement uniforme généralise ce schéma pour lier à chaque bit un point de croisement. Pour ce faire, un chromosome masque, de même longueur que le chromosome des parents est créé: la valeur de ses bits étant aléatoire. La parité de chaque bit dans le masque détermine successivement le parent qui va donner ses bits à l'enfant. L'enfant généré va copier le bit de son premier parent si le bit correspondant de masque est 1, ou de son deuxième parent si le bit correspondant de masque est 0. Ce schéma ne fait générer qu'un seul enfant.

Pour générer le deuxième, un autre chromosome masque est nécessaire. Les bits de ce dernier sont créés par complémentarité des bits du premier masque. L'explication de cette méthode est décrite par l'exemple ci-dessus:



La nature complexe du croisement uniforme comme pour le croisement multipoints, améliore encore l'exploration de l'espace de recherche. Avec le croisement uniforme, basé sur le transfert de matière génétique d'un parent à un enfant par bit de chromosome, on obtient un algorithme génétique beaucoup moins dépendant du schéma de codage. Enfin, cette méthode peut être plus précise dans l'identification d'optima globaux.

F. Mutation:

A la suite des opérateurs de sélection et de croisement, on mime à nouveau un phénomène biologique, celui de la mutation. Au niveau biologique, une mutation est une modification de l'information génétique par dégradation ou substitution locale de paire de base: ceci permet de produire une nouvelle structure génétique. L'opérateur de mutation dans le cas des AGs possède la propriété d'ergodicité du parcours de l'espace de recherche: cette propriété indique que l'AG sera susceptible d'atteindre tous les points de l'espace, sans pour autant les parcourir tous dans le processus de résolution. La séquence des opérations de sélection et de croisement peut mener l'AG à stagner dans un ensemble de solutions identiques. Dans de telles conditions, tous les chromosomes deviennent identiques et ainsi, la performance moyenne de la population ne s'améliore plus. Dans ce cas, la mutation aide l'AG à éviter la perte de diversité génétique et par conséquent, elle garantit que l'AG ne va pas être bloquée dans un optimum local.

Le principe de la mutation consiste à modifier avec une probabilité P_m faible certains bits des chromosomes. Nous tirons tout d'abord pour chaque bit un nombre aléatoire P dans l'intervalle $[0,1]$. Puis, nous le comparons avec une probabilité de mutation P_m donnée:

- Si $P > P_m$, le bit ne subira pas aucune modification.

- Si $P < P_m$, la mutation est appliquée au bit correspondant.

Ainsi, le bit choisi pour muter sera remplacé par une valeur aléatoire, souvent proche de la valeur initiale. Dans le cas du codage binaire, cette mutation s'effectue simplement en remplaçant le bit 0 par 1 et vice versa [17].

Il existe plusieurs types d'opérateurs de mutation, nous citons ici les deux types suivants:

F.1. Mutation uniforme:

La mutation uniforme est identique à celle du codage binaire. Ainsi, chaque gène g_i est changée selon une certaine probabilité en un nombre aléatoire tiré dans une distribution uniforme sur l'intervalle $[a, b]$, avec a et b les bornes inférieures et supérieures de g_i .

F.2. Mutation non uniforme:

La mutation non uniforme revient à changer le gène g_i en un nombre tiré dans une distribution non uniforme. Cette nouvelle valeur du gène muté g_{im} est telle que:

$$g_{im} = \begin{cases} g_i + (b - g_i)f(G_c), & \text{si } \lambda_1 < 0.5 \\ g_i - (a + g_i)f(G_c), & \text{si } \lambda_1 \geq 0.5 \end{cases} \quad (III. 3)$$

Avec:

$$f(G_c) = \left(\lambda_2 \left(1 - \frac{G_c}{G_{max}} \right) \right)^\varphi \quad (III. 4)$$

Où: a, b : sont des constantes.

λ_1, λ_2 : sont des nombres aléatoires $\in [0,1]$.

G_c : est la génération courante.

G_{max} : est la génération pour laquelle l'amplitude de la mutation s'annule.

φ : est un paramètre déterminant le degré de non uniformité [38].

Pour continuer la présentation de l'opérateur de mutation, nous reprenons l'exemple précédent (paragraphe croisement) et nous appliquons la mutation sur la population résultante du croisement.

Rappelons les individus résultants:

$$X_{\beta 1} = 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0$$

$$X_{\beta 2} = 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0$$

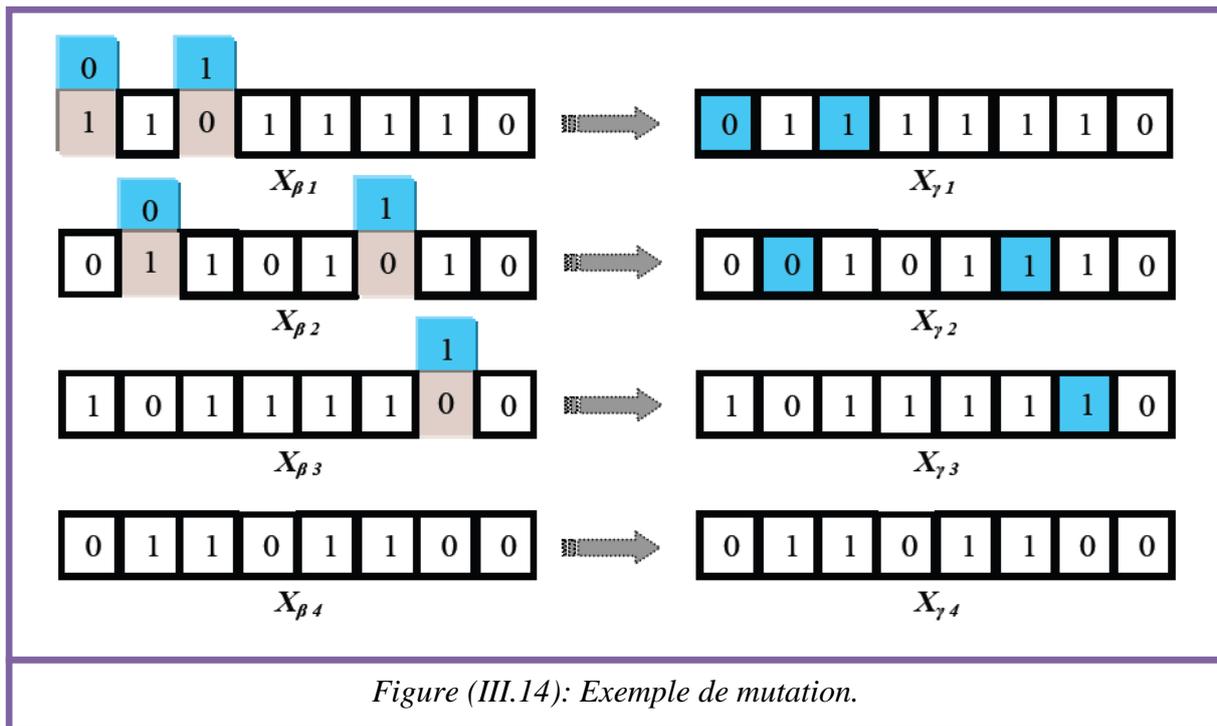
$$X_{\beta 3} = 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0$$

$$X_{\beta 4} = 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0$$

Nous proposons arbitrairement une probabilité de mutation ($P_m = 0.01$).

Pour déterminer les bits qui subiront une mutation, nous tirons un nombre aléatoire compris entre 0 et 1 pour chaque bit et nous le comparons avec P_m .

La figure suivante montre les bits choisis pour la mutation et l'application de cet opérateur:



Les individus résultants de la mutation ($X_{\gamma 1}$, $X_{\gamma 2}$, $X_{\gamma 3}$, $X_{\gamma 4}$) vont former la nouvelle population qui va remplacer la population initiale pour la deuxième génération.

G. Création de la génération suivante et critères d'arrêt:

Pour réaliser une boucle d'une itération de l'AG, ce dernier doit d'abord regrouper les individus survivants après mutation dans une nouvelle population. Ensuite, l'AG va calculer la performance pour chaque nouvel individu. Enfin, si un critère d'arrêt de l'algorithme n'est pas encore atteint, la nouvelle population doit alors remplacer la population actuelle et une nouvelle boucle sera ainsi lancée.

Puisque les AG sont des méthodes de recherches stochastiques, il est difficile de spécifier de façon rigoureuse des critères de convergence. Par exemple, la performance d'une population peut rester stable pour un certain nombre de générations avant qu'un individu supérieur puisse apparaître. Ainsi, l'application d'un critère d'arrêt devient une vraie problématique. Une pratique commune est d'arrêter l'AG après certain nombre de générations et d'examiner ensuite la qualité de la solution trouvée par rapport à la définition du problème.

Un nombre typique de générations peut aller de 50 jusqu'à 500 générations.

Par ailleurs, d'autres critères peuvent être appliqués pour déterminer l'arrêt de l'AG tels que:

- L'amélioration de la solution ne dépasse plus un certain seuil;
- La fonction objectif du problème atteint une valeur donnée;
- Le temps de calcul atteint une valeur prédéterminée.

Nous terminons l'exemple que nous avons commencé de traiter par le calcul de la performance de chaque nouvel individu:

Tableau (III.3): Résultats de l'évaluation des individus dans la nouvelle population.

N° d'individu	Chromosome S_{γ_i}	Valeurs décodées X_{γ_i}	Performance $fp(X_i) = Fobj$
1	0 1 1 1 1 1 1 0	0.4941	0.9999
2	0 0 1 0 1 1 1 0	0.1804	0.5914
3	1 0 1 1 1 1 1 0	0.7451	0.7597
4	0 1 1 0 1 1 0 0	0.4235	0.9766

En comparant le tableau (III.1) de l'évaluation de la population initiale et le tableau (III.3) de l'évaluation de la nouvelle population, nous pouvons tirer les remarques suivantes:

- Le meilleur individu X_{γ_1} dans la nouvelle population est un nouvel individu (issu d'une opération de mutation);
- Ce nouvel individu présente une performance supérieure à celle du meilleur individu de la population initiale " $fp(X_{\gamma_1}) = 0.9999$ " contre " $fp(X_1) = 0.7895$ ";
- L'individu X_4 reste toujours présent dans la nouvelle population (renommé X_{γ_4});
- La nouvelle performance totale (et donc la performance moyenne) est supérieures à la valeur de départ " $\sum fp(X_{\gamma_i}) = 3.3276$ " contre " $\sum fp(X_i) = 2.5831$ ";
- L'individu X_{γ_1} , associé à la performance maximale $fp(X_{\gamma_1})$, peut être ainsi considéré comme une solution optimale du problème.

Etant donné que le problème traité est très simple, l'AG a pu atteindre une solution optimale dès la première itération.

III.3.9. Paramètres de réglage de l'AG:

Il y a principalement trois paramètres de base pour le fonctionnement d'un AG:

- Le nombre d'individus dans la population " N_{ind} " (dit la taille de la population) ;
- La probabilité de croisement " P_c " ;
- La probabilité de mutation " P_m " .

La réussite et la rapidité d'un AG dépendent fortement des valeurs choisies pour ces paramètres. Le bon réglage de ces paramètres est un problème parfois délicat.

Nous discutons ci-dessous l'influence de chaque paramètre et la gamme de valeurs qu'il peut prendre:

A. Taille de la population:

Ce paramètre doit être judicieusement réglé en fonction de la taille du problème.

Généralement, nous pouvons dire que, si la taille de la population est:

- TROP faible: L'AG peut converger trop rapidement vers de mauvaises solutions;
- TROP grande: Le temps de calcul de l'AG peut s'avérer très important.

En règle générale, plus la taille de la population est grande, plus le nombre de solutions potentielles évaluées est élevé. La littérature montre que les meilleures valeurs de taille de population sont comprises entre 50 et 100 individus.

B. Probabilité de croisement:

Comme nous l'avons dit, la probabilité de croisement joue un rôle très important dans l'exploration de l'espace de recherche du problème. En générale, plus la probabilité de croisement est élevée, plus il y aura de nouvelles structures apparaissant dans la nouvelle population. Ainsi, si la probabilité de croisement est:

- TROP élevée: Les bonnes structures apportées par la sélection risquent d'être détruites trop vite;
- TROP faible: La recherche de la solution optimale risque de stagner.

Le taux habituel de la probabilité de croisement est choisi entre 0.7 (70%) et 0.95 (95%).

C. Probabilité de mutation:

La mutation comme nous l'avons vu, est un opérateur secondaire, mais elle reste très importante pour l'AG. Elle a pour objectifs l'introduction de diversité dans la population et la meilleure exploitation de l'espace de recherche. Ainsi, si la probabilité de mutation est:

- TROP élevée: La mutation rend la recherche très aléatoire.
- TROP faible: La recherche risque de stagner.

Le taux habituel de la probabilité de mutation est choisi entre 0.005 (0.5%) et 0.01 (1%) [17].

III.3.10. Avantages et inconvénients des AGs:

A. Les avantages:

- Elimination de solutions non valides;
- Permet de traiter des espaces de recherche important (beaucoup de solutions, pas de parcours exhaustif envisagé);
- Nombre de solutions important;
- Relativité de la qualité de la solution selon le degré de précision demandé.

B. Les inconvénients:

- Nécessitent plus de calculs que les autres algorithmes métaheuristiques (notamment la fonction évaluation);

- Paramètres difficiles à fixer (taille population, % mutation);
- Choix de la fonction d'évaluation délicat;
- Pas assuré que la solution trouvée est la meilleure, mais juste une approximation de la solution optimale [7].

III.3.11. Domaines d'applications des AGs:

Les domaines d'applications des algorithmes génétiques sont multiples comme:

- Optimisation des fonctions numériques difficiles (Discontinues, multimodales,...);
- Traitement d'image (Alignement de photos satellites, reconnaissance de suspects);
- Optimisation d'emplois du temps;
- Contrôle de systèmes industriels;
- Apprentissage des réseaux de neurones;
- Cryptographie [51].

III.4. Les réseaux de neurones:

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire (neurone artificiel) calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit [52].

Les réseaux de neurones n'ont pas eu la diffusion attendue dans l'industrie. Ils ont été souvent confinés à des domaines informatiques et économiques. Cependant les réseaux de neurones appartiennent à l'intelligence artificielle; et comme tels, ils sont théoriquement capables de s'adapter et d'apprendre à réaliser presque n'importe quelle tâche [53].

III.4.1. Historique:

On situe le début des réseaux de neurones artificiels en 1943, avec les travaux de Mc. Culloch et W. Pitts qui montrent qu'un réseau de neurones discret, sans contrainte de topologie, peut représenter n'importe quelle fonction booléenne et donc émuler un ordinateur. En 1958, Rosenblatt propose le premier algorithme d'apprentissage, qui permet d'ajuster les paramètres d'un neurone. En 1969, Minsky et Papert publient le livre « Perceptrons », dans lequel ils utilisent une solide argumentation mathématique pour démontrer les limitations des réseaux de neurones à une seule couche. Ce livre aura une influence négative telle que la plupart des chercheurs quitteront le champ de recherche sur les réseaux de neurones. En 1982, Hopfield propose des réseaux de neurones associatifs et l'intérêt pour les réseaux de neurones renaît chez les scientifiques. En 1986, Rumelhart, Hinton et Williams publient l'algorithme de la rétropropagation de l'erreur qui permet d'optimiser les paramètres d'un réseau de neurones à plusieurs couches. À partir de ce moment, la recherche sur les réseaux de neurones connaît

un essor fulgurant; et au cours des années 90, les applications commerciales de ce succès académique suivent.

Aujourd'hui, on retrouve les réseaux de neurones solidement implantés dans diverses industries entre autres:

- Dans les milieux financiers pour la prédiction des fluctuations de marché;
- En pharmaceutique pour analyser le QSAR (Quantitative Structure-Activity Relationship) de diverses molécules organiques;
- Dans le domaine bancaire pour la détection de fraudes sur les cartes de crédit et le calcul de cotes de crédit;
- Dans les départements de marketing de compagnies de diverses industries pour prévoir le comportement des consommateurs;
- En aéronautique pour la programmation de pilotes automatiques.

Les applications sont nombreuses et partagent toutes un point commun essentiel à l'utilité des réseaux de neurones: les processus pour lesquels on désire émettre des prédictions comportent de nombreuses variables explicatives et surtout, il existe éventuellement des dépendances non linéaires de haut niveau entre ces variables qui, si elles sont découvertes et exploitées, peuvent servir à l'amélioration de la prédiction du processus. L'avantage fondamental des réseaux de neurones par rapport aux modèles statistiques traditionnels, réside dans le fait qu'ils permettent d'automatiser la découverte des dépendances les plus importantes du point de vue de la prédiction du processus [47].

III.4.2. Pourquoi on utilise les réseaux de neurones?

- **Motivations des ingénieurs:** S'inspirer de la neurobiologie pour construire des machines capables d'apprentissage et aptes à remplir des tâches spécifiques: classification, prédiction, contrôle,...etc.
- **Motivations des biologistes:** Utiliser des outils issus des mathématiques et de la physique en vue de construire des modèles plausibles du fonctionnement du système nerveux.

III.4.3. Définitions:

A. Neurone:

Le neurone est l'unité élémentaire de traitement. Il est doté d'entrées (dendrites) pouvant recevoir des signaux et une sortie (axone) distribuant le résultat du traitement.

Les échanges de signaux se font au niveau des synapses reliant les axones aux dendrites des autres cellules (neurones) [54].

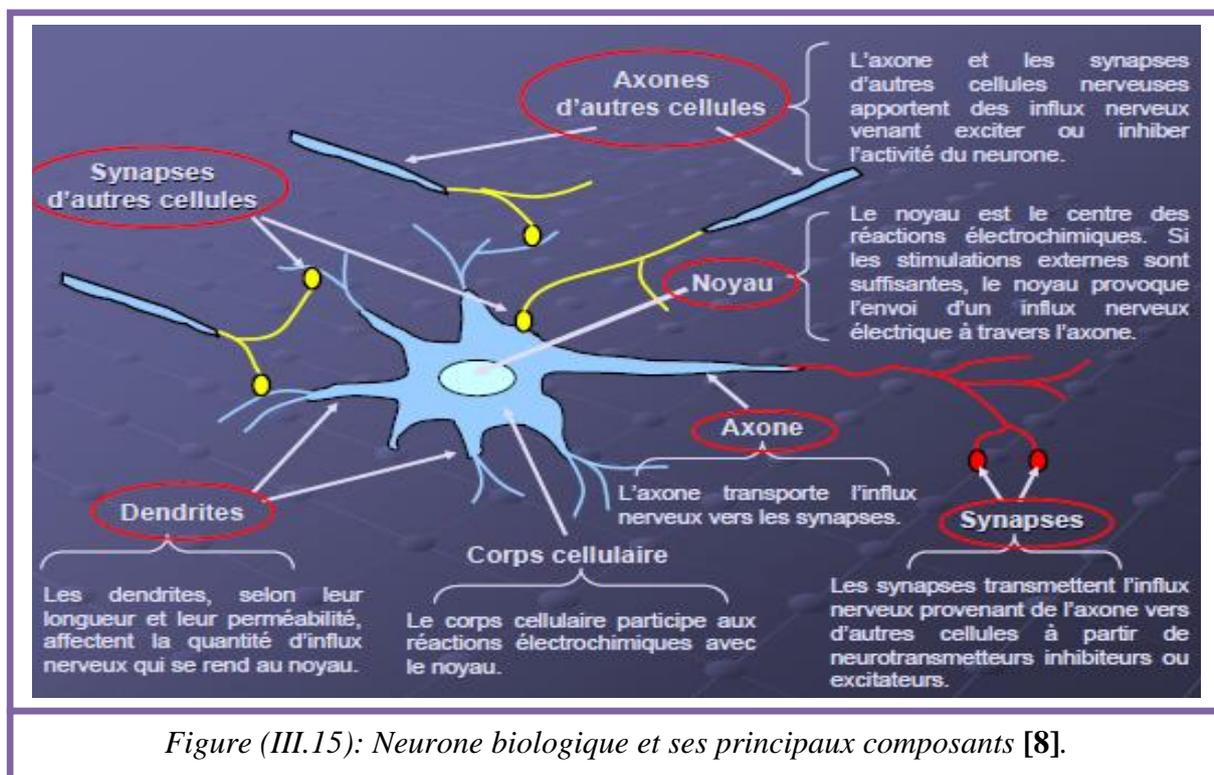
B. Neurone biologique:

Le cerveau humain contient environ 100 milliards de neurones biologiques. Les neurones biologiques est une cellule vivante spécialisée dans le traitement des signaux électriques. Un neurone typique a plusieurs composants, on peut citer:

- Les dendrites (récepteurs principaux du neurone);
- Le corps cellulaire (noyau du neurone);
- L'axone (fibre nerveuse de transport pour les signaux émis par le neurone);
- La synapse (connexion entre la dendrite et l'axone de deux neurones) [37].

Donc, le neurone biologique est l'unité fondamentale, fonctionnelle et anatomique du tissu nerveux [54].

La figure suivante représente un neurone biologique et ses principaux composants.



C. Réseaux de neurones artificiels:

Les réseaux de neurones ou neuronaux artificiels ou réseaux neurominétiques consistent en des modèles plus ou moins inspirés du fonctionnement cérébral de l'être humain (cerveau), en se basant sur le concept de neurone.

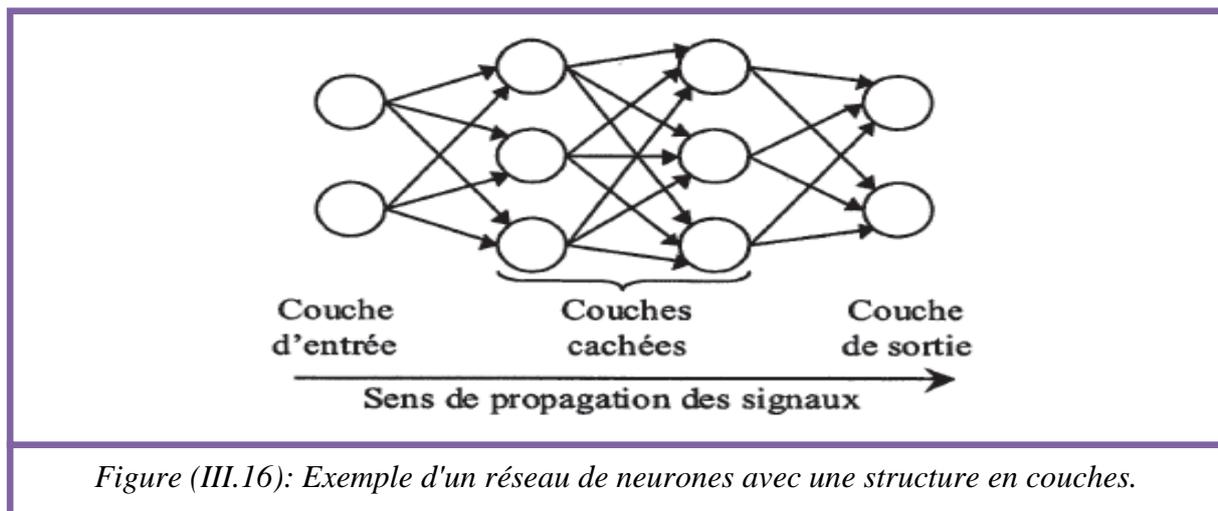
Un réseau de neurones ou neuronal est un processeur massivement parallèle et distribué, constitué d'unités de traitement simples (neurones) qui ont la propriété naturelle de stocker l'information (connaissances) et de la mettre disponible pour l'utilisation [54].

III.4.4. Types de réseaux de neurones:

Les neurones trouvent leur utilité quand ils sont associés entre eux pour obtenir un réseau. Les réseaux de neurones se divisent du point de vue architecture de fonctionnement en deux classes majeures:

A. Les réseaux à couches (non bouclés):

Les neurones sont groupés en couches, il n'y a pas d'interconnexion entre les neurones d'une même couche (voir la figure suivante) [53].

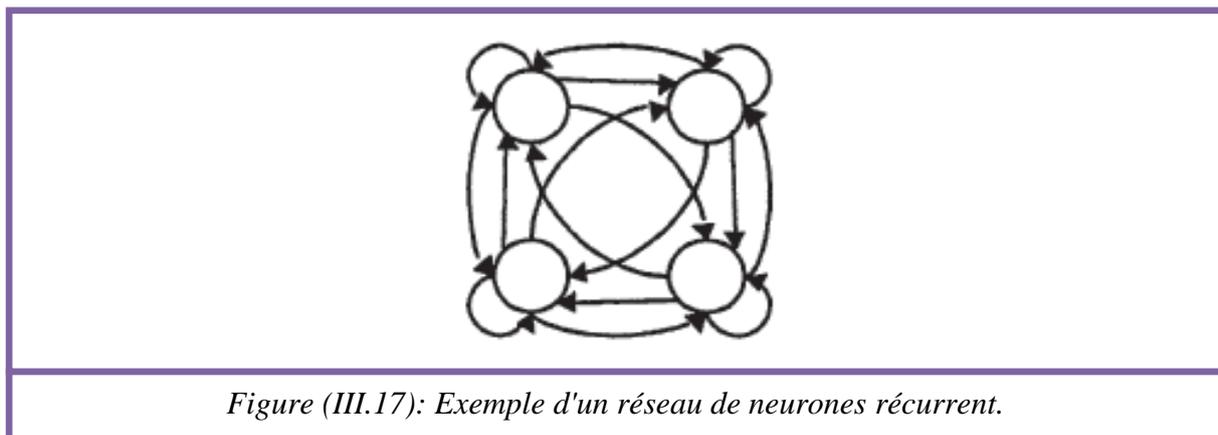


Un réseau de neurones (RN) non bouclé sans neurone caché, avec un neurone de sortie linéaire, réalise simplement une fonction linéaire de ses entrées. On peut donc considérer tout système linéaire comme un réseau de neurones. Cela ne présente cependant aucun intérêt, ni théorique ni pratique [53].

Alors, les réseaux de neurones non bouclés sont statiques [55].

B. Les réseaux récurrents (bouclés):

Des boucles fermées de connexion et de transmission d'information entre tous les neurones sont permises (voir la figure suivante).



Nous pouvons aussi trouver des réseaux récurrents à couches, avec des boucles entre les couches (combinaison des deux architectures précédentes, voir la figure ci-dessous) [53].

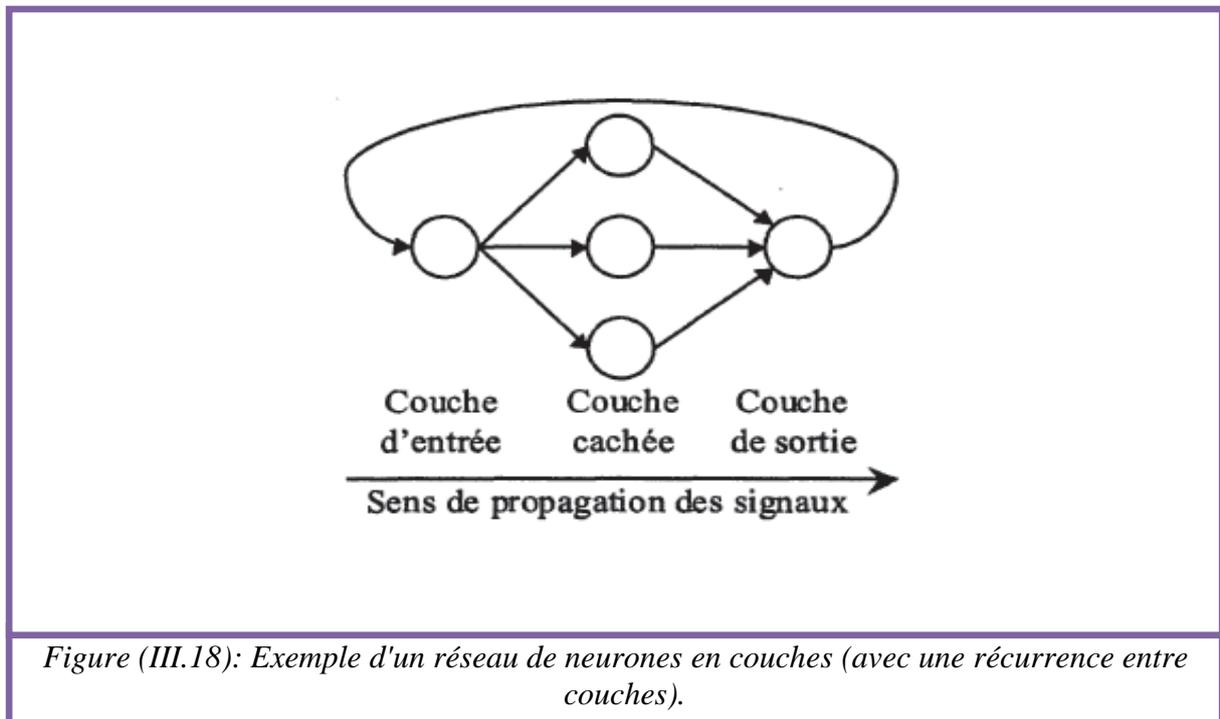


Figure (III.18): Exemple d'un réseau de neurones en couches (avec une récurrence entre couches).

Donc, les réseaux de neurones bouclés sont dynamiques [55].

III.4.5. Nombre de neurones cachés:

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de résultat théorique permettant de prévoir le nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une performance spécifiée du modèle, compte tenu des données disponibles.

Il faut donc nécessairement mettre en œuvre une procédure numérique de conception de modèle.

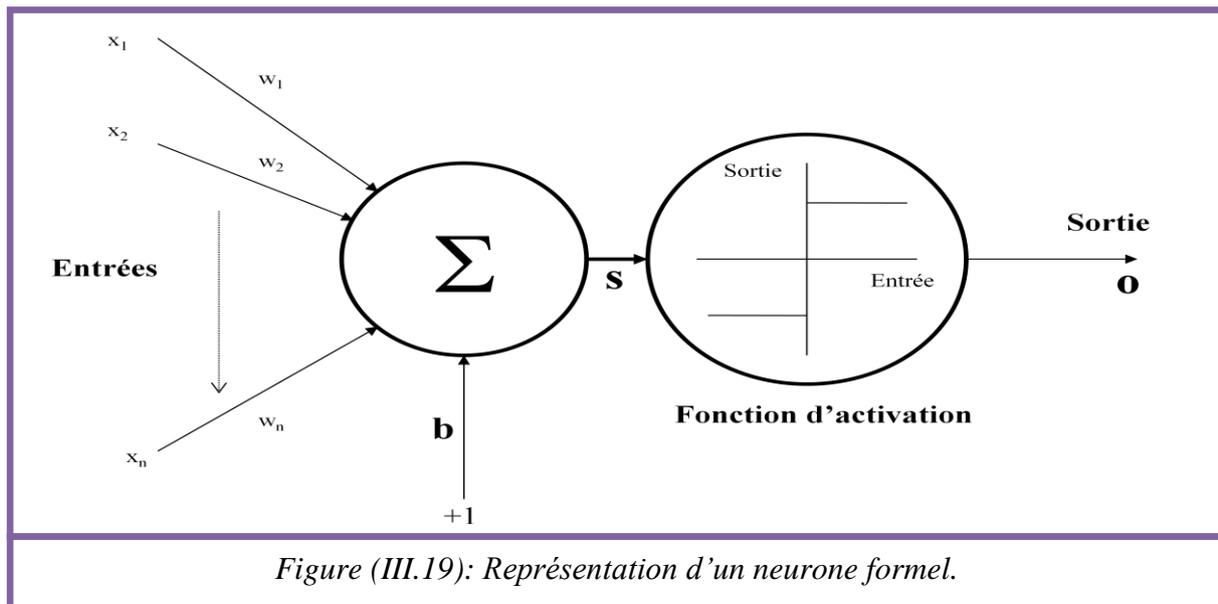
L'idée la plus naturelle consisterait à choisir le nombre de neurones cachés le plus grand possible, puisque c'est ce qui assure la plus grande précision à l'approximation uniforme d'une fonction.

III.4.6. Neurone formel:

Un neurone formel est un automate très simple imitant grossièrement la structure et le fonctionnement d'un neurone biologique.

La première version de ce dernier est celle de Mc. Culloch et W. Pitts en 1943, ils ont proposé le modèle du neurone formel qui se voit comme un opérateur effectuant une somme pondérée de ses entrées suivie d'une fonction d'activation (ou de transfert) [5].

Le schéma suivant présente un neurone formel [54]:



Les entrées du neurone sont désignées par x_i ($i = 1, \dots, n$). Les paramètres w_i reliant les entrées aux neurones sont appelés poids synaptiques. b est appelé le biais. La sortie du neurone est donnée par:

$$O = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right) \quad (III.5)$$

En fonction de la forme et de la fonction d'activation, Il existe plusieurs modèles de neurone formel, on distingue les deux types de neurone formel suivants:

- Le perceptron de F. Rosenblatt en 1958:

Adopte une fonction d'activation de la forme:

$$f(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x \leq 0 \\ +1 & \text{si } x > 0 \end{cases} \quad (III.6)$$

- L'Adaline (ADAPtative LINear Element) de B. Windrow et T. Hoff en 1960:

Pour sa part, adopte une fonction d'activation identité [56], [57]:

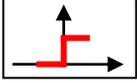
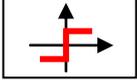
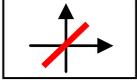
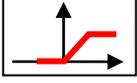
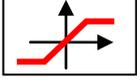
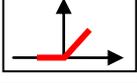
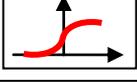
$$f(x) = x \quad (III.7)$$

III.4.7. Fonctions d'activation:

La fonction d'activation de chaque neurone détermine ses propres caractéristiques. Par conséquent, le type du neurone est caractérisé par sa fonction d'activation. Conformément au modèle biologique, les fonctions d'activation sont généralement croissantes et continues. Les fonctions les plus connues sont: la fonction seuil, la fonction linéaire saturée et la fonction sigmoïde. Leur choix revêt une importance capitale et dépend souvent du type de l'application et du domaine de variation des variables d'entrée/sortie [5].

Le tableau suivant illustre les fonctions d'activation (transfert) les plus utilisées [58]:

Tableau (III.4): Fonctions d'activation les plus utilisées.

Nom de la fonction	Relation entrée-sortie	Forme
Seuil (unipolaire)	$y = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Seuil symétrique (bipolaire)	$y = \begin{cases} -1 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Linéaire	$y = x$	
Linéaire saturée (unipolaire)	$y = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ x & \text{si } 0 \leq x \leq 1 \\ 1 & \text{si } x > 1 \end{cases}$	
Linéaire saturée symétrique (bipolaire)	$y = \begin{cases} -1 & \text{si } x < -1 \\ x & \text{si } -1 \leq x \leq 1 \\ 1 & \text{si } x > 1 \end{cases}$	
Linéaire positive	$y = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ x & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Sigmoïde (unipolaire)	$y = \frac{1}{1 + e^{-ax}}$	
Tangente hyperbolique (bipolaire)	$y = \frac{1 - e^{-ax}}{1 + e^{-ax}}$	

III.4.8. Comment choisir les poids?

Malgré cette limitation, les perceptrons à seuil ont une propriété intéressante qui est celle que nous allons aborder dans la section suivante: il existe un (en fait plusieurs) algorithme(s) qui permet(tent) à un perceptron d'adapter ses poids à un ensemble d'exemples de sorte à obtenir pour cet ensemble la classification attendue. Ainsi, si l'ensemble d'exemples est assez vaste (les exemples sont assez variés), on pourra obtenir un perceptron qui donnera des résultats convenables pour des exemples non rencontrés [59].

III.4.9. Apprentissage:

Apprentissage = procédures cognitives de généralisation qui permettent de faire des prédictions [8].

L'apprentissage dans le contexte des réseaux de neurones est le processus de modification des poids de connexions ou plus rarement du nombre de couches et de neurones afin d'adapter le traitement effectué par le réseau à une tâche particulière [5].

Des procédures d'apprentissage sont utilisées pour déterminer les paramètres du réseau pour qu'il se comporte correctement face à des entrées données. Selon le degré de supervision utilisé à l'apprentissage, les RN se classent en trois catégories:

A. Apprentissage non supervisé:

L'ajustement des paramètres repose sur des critères internes au réseau, aucune information de référence n'est disponible.

L'apprentissage non supervisé est généralement utilisé pour la classification automatique des entrées, où le réseau apprend les caractéristiques des données d'entrée.

B. Apprentissage semi-supervisé (apprentissage par renforcement):

L'utilisateur ne possède que des indications imprécises sur le comportement final désiré (correct/incorrect).

L'apprentissage semi-supervisé est généralement utilisé dans les systèmes de navigation autonome, où un robot doit choisir un chemin selon un critère de type «bon/mauvais chemin».

C. Apprentissage supervisé:

Les paramètres du réseau sont ajustés via un comportement de référence précis. Le réseau de neurones est entraîné de façon à reproduire le plus fidèlement possible les réponses désirées à un certain nombre de vecteurs d'entrée d'apprentissage.

Les réseaux à apprentissage supervisé sont les plus utilisés. Les domaines d'application de ces réseaux peuvent être classés essentiellement en deux catégories: la reconnaissance et la généralisation.

- Dans les problèmes de reconnaissance, le réseau va apprendre à reproduire les sorties d'un ensemble de vecteurs d'apprentissage dont les entrées sont bruitées. Le réseau est censé générer les sorties adéquates bien que les entrées soient entachées d'erreur. Les applications de ces réseaux sont la reconnaissance de formes, de l'écriture, l'analyse des signaux, etc. Le réseau va reproduire une des sorties qu'il a déjà vues lors de l'apprentissage. Pour mémoriser toutes les entrées et les sorties, le réseau va construire une hyper surface dans l'espace des vecteurs d'apprentissage et passant par tous les points d'apprentissage. En général, il réclame un nombre important de neurones et par conséquent de paramètres;

- Pour les tâches d'approximation et d'interpolation, le réseau va apprendre à reproduire le plus précisément possible les sorties d'un ensemble de vecteurs d'apprentissage. Il doit généraliser l'information acquise à des vecteurs qui n'ont pas été présentés lors de l'apprentissage. Le fait de faire apprendre au réseau à reproduire ou mémoriser exactement les informations données par les vecteurs d'apprentissage n'est pas désiré, parce que cela fait perdre sa performance de généralisation. Cette perte de généralisation est due au phénomène de sur-apprentissage. Les applications typiques de ces réseaux apparaissent surtout dans la robotique;

Il s'ensuit qu'un réseau de neurone se distingue par trois caractéristiques principales:

- L'architecture du réseau qui caractérise un chemin particulier par lequel les éléments du réseau sont connectés et qui définit la direction de propagation des informations;
- La fonction d'activation des neurones qui dicte leur comportement;
- L'algorithme d'apprentissage du réseau [53].

III.4.10. Apprentissage du perceptron:

Il en existe deux types: Le perceptron monocouche et le perceptron multicouche.

A. Perceptron monocouche:

Un réseau de neurones monocouche (perceptron) est caractérisé de la manière suivante:

- Il possède n informations en entrée;
- Il est composé de P neurones, que l'on représente généralement alignés verticalement. Chacun peut en théorie avoir une fonction d'activation différente;
- Chacun des P neurones est connecté aux n informations d'entrée [59].

Le réseau de neurones possède ainsi n informations en entrée et P sorties, chaque neurone renvoyant sa sortie.

Le perceptron monocouche résout seulement les problèmes linéairement séparables [54].

A.1. Loi de Hebb:



Règle de D. Hebb

Il y a renforcement d'une connexion lorsque les deux neurones qu'elle relie sont simultanément excités [60].

Cette règle est très simple, émet l'hypothèse que lorsqu'un neurone « A » est excité par un neurone « B » de façon répétitive ou persistante, l'efficacité (ou le poids) de l'axone reliant ces deux neurones devrait alors être augmentée.

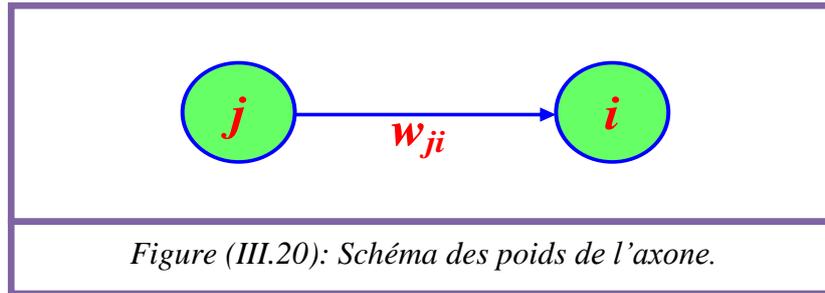


Figure (III.20): Schéma des poids de l'axone.

Si deux unités connectées sont actives simultanément, le poids de leur connexion est augmenté ou diminué. La loi de Hebb s'écrit comme suit [8]:

$$\Delta w_{ji} = r \times a_j \times a_i \quad (III.8)$$

Où: Δw_{ji} est un coefficient synaptique; r est une constante positive qui représente la force d'apprentissage; a_j et a_i sont les valeurs d'activation des neurones N_j et N_i respectivement.

A.2. Règle du perceptron:

Le perceptron est un type de réseau de neurones artificiels considéré comme le type de réseaux neuronal le plus simple. Il vise à associer des réponses à des patterns présentés en entrée. Il se compose de deux couches de neurones, la première couche est composée de cellules binaires perceptives (0 ou 1), la deuxième couche fournit la réponse [61].

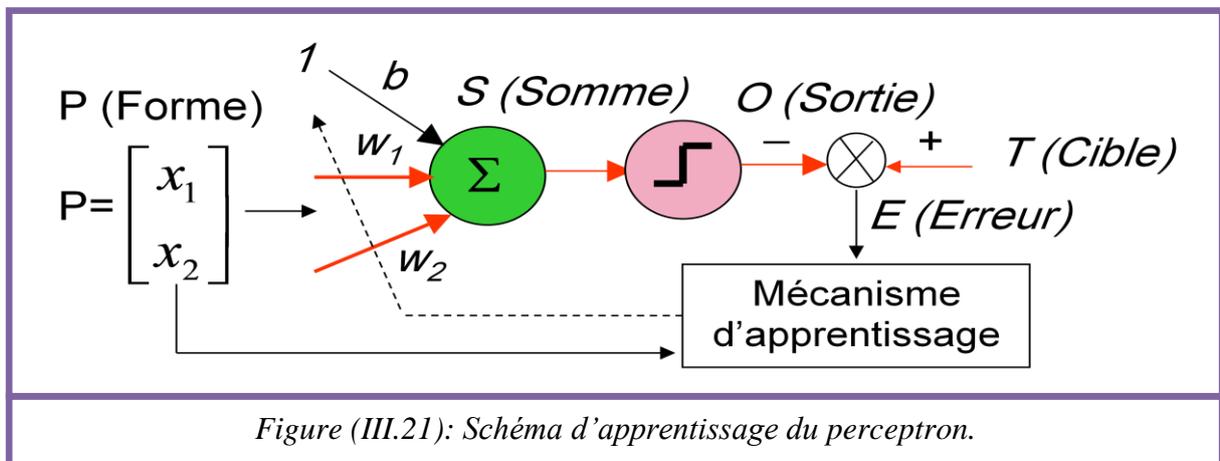


Figure (III.21): Schéma d'apprentissage du perceptron.

Dans cette règle, on considère le réseau monocouche. Supposons qu'on a un ensemble de données d'apprentissage qui sont des paires $(x, d(x))$. x est le vecteur d'entrée, $d(x)$ est la valeur désirée correspondante, $y(x)$ est la valeur calculée par le réseau avec l'entrée x . Pour la tâche de classification, $d(x)$ est souvent +1 ou -1.

Lors de l'erreur [$d(x) \neq y(x)$], le réseau va modifier tous ses poids par la formule suivante:

$$w_i(t + 1) = w_i(t) + \Delta w_i \quad (III.9)$$

Où:

$$\Delta w_i = d(x) x_i = \eta \times (T - O) \times x_i$$

$w_i(t+1)$ est le poids au temps " $t+1$ ", $w_i(t)$ est le poids au temps " t ", x_i est la sortie (0 ou 1) de la cellule i de la rétine, O est la réponse de la sortie, T est la réponse théorique (souhaitée) de la sortie et η est le coefficient d'apprentissage (entre 0.0 et 1.0).

La bonne valeur de η est 0.75, mais il est préférable de faire évoluer η au cours du temps (d'abord grande 0.9 puis décroissante au cours de l'apprentissage).

Cette règle est similaire avec la règle de Hebb. La différence principale entre les deux règles pour les réseaux monocouche c'est, de modifier la valeur de seuil b lors d'une erreur: $\Delta b = d(x)$ [54], [62].

A.3. Règle du Widrow-Hoff:

La loi de Widrow-Hoff est la règle d'apprentissage du perceptron la plus connue. Chaque cellule de sortie apprend indépendamment des autres. Elle peut s'écrire:

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \eta \times (T - S) \times x_i \quad (III.10)$$

Où: S est la sortie calculée par l'erreur du perceptron.

Les poids et les biais sont initialisés à des valeurs aléatoires faibles [54].

A.4. Algorithme d'apprentissage:

Il existe plusieurs algorithmes d'apprentissage des réseaux de neurones.

L'algorithme de l'apprentissage se déroule de la façon suivante:

- ❶ On présente au perceptron (dans un ordre arbitraire) les couples (image sur la rétine, réponse).
- ❷ S'il y a des erreurs alors les poids sont corrigés selon la règle du Widrow-Hoff et on retourne en 1, sinon le perceptron a appris.

Il n'y a aucune preuve scientifique tangible prouvant une analogie entre le neurone biologique et le perceptron. Cependant, Mc. Culloch & Pitts ont pu en 1943, avancer dans leurs recherches sur le neurone artificiel grâce à la recherche d'une analogie entre le neurone biologique et le neurone formel [54], [61].

On note D la base d'apprentissage. D est composée de couples (x, T) .

Où: x est le vecteur associé à l'entrée (x_0, x_1, \dots, x_n) , T est la sortie correspondante souhaitée.

On cherche à déterminer les coefficients (w_0, w_1, \dots, w_n) :

Initialiser aléatoirement les coefficients w_i

Répéter:

Prendre un exemple (x, T) dans D

Calculer la sortie O du réseau pour l'entrée x

Mettre à jour les poids:

Pour i de 0 à n :

$$w_i = w_i + \eta \times (T - O) \times x_i$$

Fin Pour

Fin Répéter

On peut tirer les remarques suivantes:

- η bien choisi, suffisamment petit;
- Si η trop grand: risque d'oscillation autour du minimum;
- Si η trop petit: nombre élevé d'itérations;
- En pratique, on diminue graduellement η au fur et à mesure des itérations [63].

B. Perceptron multicouche:

Les réseaux de neurones multicouches sont habituellement bâtis selon le modèle « normalisé » et comprennent 3 ou 4 couches en tout (donc 1 ou 2 couches cachées). S'il est théoriquement possible de construire des réseaux avec un très grand nombre de couches cachées, les réseaux comprenant plus de couches cachées sont très rares, étant donné que chaque nouvelle couche augmente la quantité de calculs d'une manière exponentielle. La plupart des réseaux de neurones multicouches sont dans la pratique des perceptrons multicouches [64].

Le perceptron multicouche est un type de réseau de neurones parmi les plus utilisés. Son fonctionnement est le suivant: l'information se propage de couche en couche, suivant le modèle décrit plus haut, toujours dans le même sens jusqu'à la sortie. On donne au réseau l'information sous forme d'un vecteur de R^1 et on récupère l'information traitée sous forme d'un vecteur de R^n [65].

Avec plus de couches, il est possible de résoudre n'importe quel problème de classification.

Avec une seule couche cachée, on peut approcher n'importe quelle fonction continue définie sur un compact, à condition de mettre assez d'unités sur la couche cachée [60].

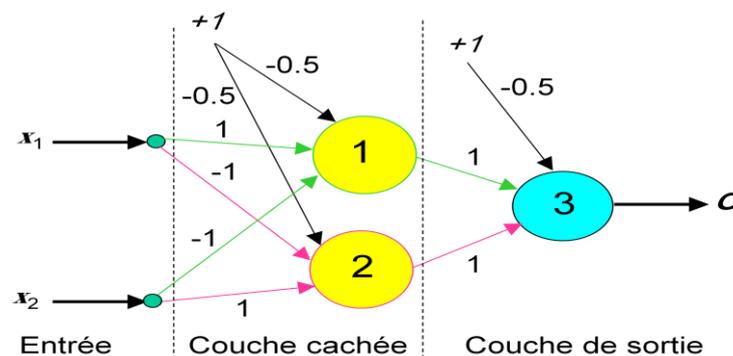


Figure (III.22): Perceptron multicouche [54].

B.1. Dimensionnement d'un perceptron multicouches:

Le dimensionnement signifie la détermination du nombre de neurones de chacune des deux couches. Pour la couche de sortie, cela dépend de la nature du résultat que vous attendez. Si vous avez besoin de n nombres en sortie, il vous faudra n neurones sur la couche de sortie, comme pour le perceptron monocouche. Pour la couche cachée, les choses sont beaucoup moins simples. Il n'existe aucune loi, aucune règle, aucun théorème qui permettrait de déterminer le nombre de neurones à placer dans la couche cachée pour avoir un réseau de neurones optimal.

La méthode pour s'en rapprocher est d'essayer au hasard plusieurs nombres de neurones en couche cachée jusqu'à avoir des résultats les plus probants possibles après l'apprentissage. Il existe toutefois des résultats concernant certains types de fonctions que l'on souhaite approcher. Malheureusement, aucun de ces résultats n'est pour le moment assez générique pour être exploité dans les cas courants.

Nous n'attardons pas sur la présentation et l'explication du fonctionnement du perceptron multicouches étant donné qu'il fonctionne de manière analogue au perceptron monocouche. C'est pourquoi nous allons maintenant nous pencher sur l'apprentissage du perceptron multicouches [59].

B.2. Apprentissage par descente de gradient:

B.2.1. Qu'est-ce qu'un gradient?

Le gradient pour un neurone est l'erreur relative à ce neurone. Il peut en quelque sorte être vu comme la contribution du neurone à l'erreur globale suivante:

$$\frac{\partial E}{\partial w_i}$$

A chaque passe arrière, on calcule le gradient de chaque neurone, en commençant par ceux de la couche de sortie (car les gradients des couches inférieures se calculent à partir des gradients des couches supérieures) [8].

B.2.2. Méthode d'apprentissage:

Pour comprendre la méthode d'apprentissage, il faut définir l'erreur quadratique " E ". Si l'on est en présence de N exemples, alors pour $1 \leq k \leq N$, notons (X_k, T_k) le couple exemple-sortie attendue, où $X_k = (x_i)_{1 \leq i \leq n}$ est le vecteur dont les coordonnées sont les n informations d'entrée de l'exemple et où T_k est la sortie attendue pour cet exemple-là de la part de notre neurone. Enfin, on note O_k la sortie obtenue pour le k -ème exemple avec les poids actuels. Alors, l'erreur quadratique est définie comme suit:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (T_k - O_k)^2 \quad (III.11)$$

On voit donc que l'erreur est nulle si le réseau de neurones ne se trompe sur aucun des exemples, c'est à dire s'il parvient à calculer la bonne sortie (par exemple classifier) pour chacun des exemples correctement; c'est rarement le cas, car souvent on démarre avec des poids tirés aléatoirement. Il s'agit donc de minimiser, pour un ensemble de N exemples donné. Donc, l'erreur quadratique sur la base d'apprentissage, consiste à minimiser la somme des carrés des erreurs entre la sortie du réseau et la valeur réelle de la sortie.

On va noter η un nombre réel auquel on donne le nom de taux d'apprentissage. C'est nous qui devons lui donner une valeur lors de la mise en pratique de l'apprentissage. Comme nous ne considérons qu'un neurone à la fois, on va noter w_i le poids reliant la i -ème information à notre neurone.

La méthode de descente du gradient consiste en fait à effectuer les actions suivantes:

Les étapes de la méthode de descente du gradient sont:

- ❶ Créer n variables Δw_i , pour $1 \leq i \leq n$, égales à 0
- ❷ Prendre un exemple e_k , pour $1 \leq k \leq N$
- ❸ Calculer la sortie obtenue avec les poids actuels, notée O_k
- ❹ Rajouter à Δw_i , pour tout $1 \leq i \leq n$, le nombre $\eta (T_k - O_k) x_i$
- ❺ Répéter (3) et (4) sur chacun des exemples
- ❻ Pour $1 \leq i \leq n$, remplacer w_i par $w_i + \Delta w_i$

Afin d'obtenir de bons résultats, il faudra passer plusieurs fois les exemples à chaque neurone, de sorte que les poids convergent vers des poids idéaux. Le problème avec cette méthode est que l'on corrige sur la globalité des exemples, ce qui fait que le réseau ne s'adaptera aux exemples qu'après un certain moment.

Il y a une autre méthode qui permet de corriger sur chacun des exemples, et qui se nomme méthode d'apprentissage de Delta [16].

B.3. Règle Delta généralisée:

La différence principale de la règle Delta par rapport à la règle perceptron est la manière de calculer la valeur de sortie. Pour la règle perceptron, la fonction d'activation utilisée est la fonction de seuil (+1 ou -1); mais pour la règle Delta, la fonction d'activation est linéaire.

La loi de Delta est une version modifiée de la loi de Hebb. Les poids des liens entre les neurones sont continuellement modifiés de façon à réduire la différence entre la sortie désirée et la valeur calculée de la sortie du neurone. Les poids sont modifiés de façon à minimiser

l'erreur quadratique à la sortie du RNA. L'erreur est alors propagée des neurones de sortie vers les neurones des couches inférieures [8].

Bien que la règle Delta ne surmonte pas toutes les limitations des réseaux à une seule couche, elle est centrale pour le fonctionnement de l'algorithme de propagation-arrière qui implémente l'apprentissage dans des réseaux de plusieurs couches [66].

Un perceptron linéaire à fonction d'activation continue prend en entrée un vecteur \vec{x} de n valeurs et calcule la sortie O à l'aide d'un vecteur \vec{w} de constantes comme suit [67]:

$$O(\vec{x}) = \vec{w} \times \vec{x} = \sum_{i=1}^n w_i \times x_i \quad (III.12)$$

Où: O est la sortie calculée par le perceptron P sur l'entrée \vec{x} .

L'erreur d'un perceptron P défini par les coefficients \vec{w} sur un échantillon D d'exemples est donnée par:

$$E(\vec{w}) = \frac{1}{2} \sum_{k \in D} (T_k - O_k)^2 \quad (III.13)$$

Où: k est un indice pattern.

Si: $E(\vec{w}) = 0$, alors P classe correctement tout l'ensemble D .

Pour déterminer \vec{w} qui minimise $E(\vec{w})$, on utilise la méthode du gradient.

On calcule la dérivée partielle de E par rapport à w_i :

$$\nabla E(\vec{w}) = \left[\frac{\partial E}{\partial w_0}, \frac{\partial E}{\partial w_1}, \dots, \frac{\partial E}{\partial w_n} \right] \quad (III.14)$$

Le vecteur dérivé $\nabla E(\vec{w})$ est appelé gradient de E par rapport à w .

Il spécifie la direction que produit la diminution de E indiquée par le signe négatif. Alors, la règle d'apprentissage s'écrit:

$$w_i = w_i + \Delta w_i \quad (III.15)$$

Où:

$$\Delta w_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_i}$$

On calcule la dérivée partielle de E par rapport à w_i :

$$\frac{\partial E}{\partial w_i} = \frac{\partial E}{\partial O} \times \frac{\partial O}{\partial S} \times \frac{\partial S}{\partial w_i} \quad (III.16)$$

On définit:

$$\frac{\partial E}{\partial O} = -(T - O) ; \quad \frac{\partial O}{\partial S} = f'(S) ; \quad \frac{\partial S}{\partial w_i} = x_i$$

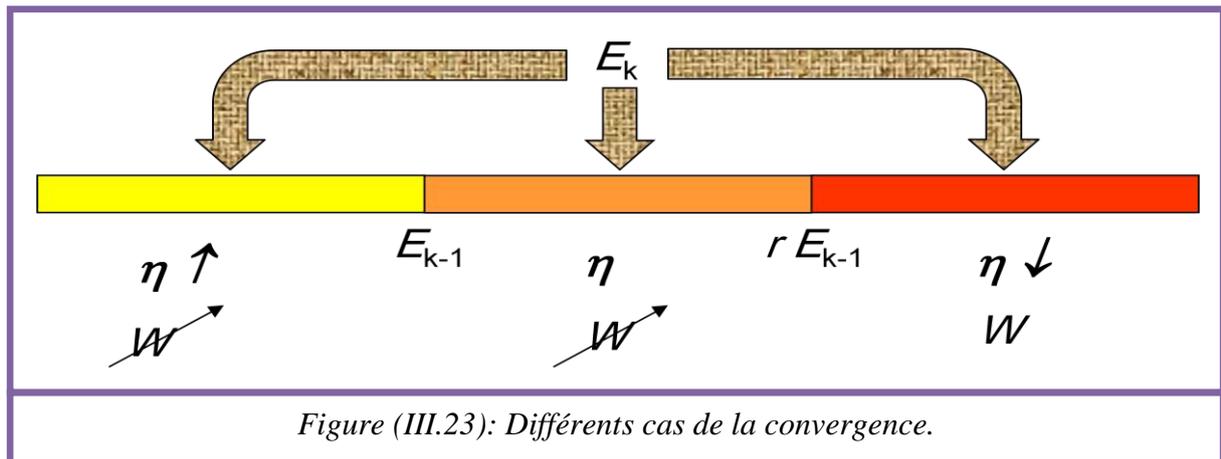
Finalement, on trouve l'équation suivante:

$$\Delta w_i = \eta (T - O) x_i f'(S) \quad (III.17)$$

L'équation (III.17) dite la règle Delta généralisée.

Pour améliorer la convergence, on adapte le coefficient d'apprentissage η :

- Si $E_k > r E_{k-1}$ alors réduire η et ne pas modifier poids ($r > 1$);
- Si $E_k < E_{k-1}$ alors augmenter η et modifier poids;
- Sinon η reste inchangé et modifier poids [54], [67].



Voilà quelques remarques sur les règles « Delta » et « Delta généralisée »:

- Pour les règles « Delta » et « Delta généralisée »: les algorithmes convergent vers la solution des moindres carrés.
- La règle « Delta généralisée », par la non-linéarité de la fonction de transfert, permet de minimiser l'importance d'un élément étranger (erreur de mesure, bruit trop important,...) [63].

B.4. Rétropropagation de l'erreur:

La rétropropagation de l'erreur dans un réseau multicouche est un apprentissage supervisé [56]. Il s'agit d'atteindre des valeurs de poids optimales qui minimisent la fonction objectif, pour ce faire on utilise l'algorithme de rétropropagation qui exige une architecture ayant au moins une couche cachée, de plus la fonction de transfert qui transforme l'activation en réponse au niveau d'une couche cachée doit être non-linéaire [68].

Minsky et Papert a montré en 1969, que un réseau à deux couches peut remplacer un réseau multicouche quelconque, mais ils ne donnent pas la solution pour adapter les poids de connexions entre les entrées et la couche cachée. La réponse pour cette solution a été présentée par Rumelhart, Hinton et Williams en 1986. L'idée principale pour cette solution est que les erreurs d'unités des couches cachées sont déterminées par la rétropropagation des erreurs d'unités des couches de sortie.

La rétropropagation est considérée comme une généralisation de la règle Delta mais on utilise la fonction d'activation non-linéaire [62].

Alors, on peut écrire la fonction d'erreur comme suit:

$$E(\vec{w}) = \frac{1}{2} \sum_{q \in D} \sum_{k \in C} (T_{kq} - O_{kq})^2 \quad (III.18)$$

Où: C est un ensemble des sorties du RNA.

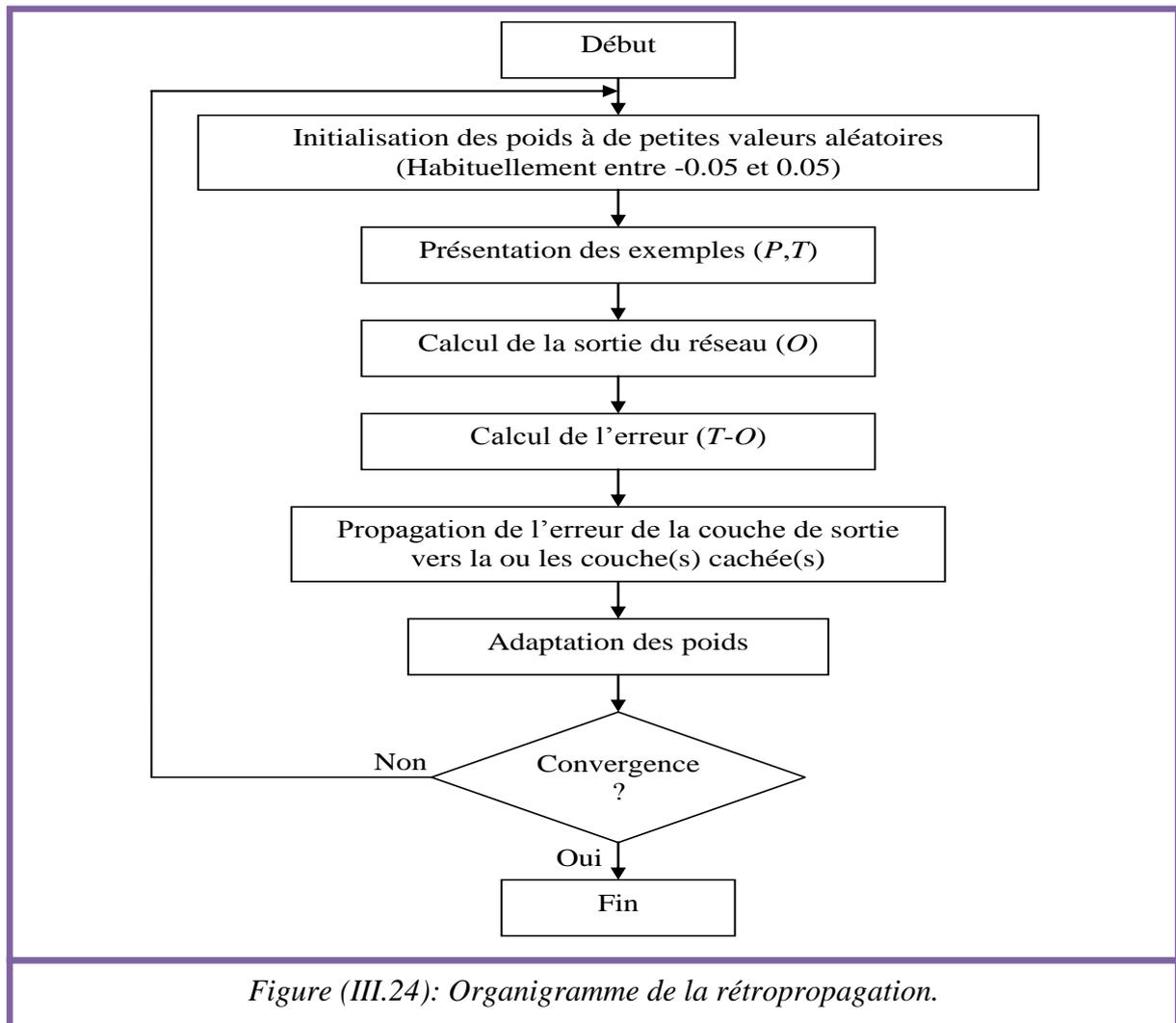
T_{kq} est une cible associée à la $k^{\text{ième}}$ sortie.

O_{kq} est une $k^{\text{ième}}$ sortie associée à l'exemple q [54].

B.4.1. Algorithme de rétropropagation du gradient:

De la même manière que le perceptron monocouche, le perceptron multicouche est lui aussi capable d'apprentissage. En effet, il existe également un algorithme permettant de corriger les poids vis à vis d'un ensemble d'exemples donnés. Cet algorithme est appelé algorithme de rétropropagation du gradient [59].

L'algorithme de rétropropagation peut être résumé par les étapes suivantes [54]:



Cet algorithme utilise la règle de modification des poids (Delta). L'algorithme va être donné dans sa version la plus générale, c'est à dire avec plusieurs couches cachées.

Voici quelques remarques sur cet algorithme:

- Dans l'algorithme de rétropropagation du gradient, les poids sont mis à jour à chaque présentation d'exemple et donc on tend à minimiser l'erreur calculée pour chaque exemple et pas l'erreur globale;
- La méthode donne de bons résultats pratiques. Dans la plupart des cas, on rencontre peu de problèmes dû aux minima locaux. Toutefois, il est moins performant que d'autres algorithmes de propagation d'erreur (il tend moins rapidement vers des poids plus ou moins optimaux);
- Le choix de l'architecture initiale du réseau reste un problème difficile. Ce choix peut être fait par l'expérience. Des méthodes dites "auto-constructives" existent: il s'agit d'ajouter des neurones au cours de l'apprentissage pour que l'apprentissage se fasse bien. Mais ces méthodes rencontrent souvent le problème de "sur-apprentissage". L'architecture peut aussi être choisie à l'aide de méthodes basées sur les algorithmes génétiques [59].

B.4.2. Architecture du réseau:

Le réseau de notre étude est constitué de l entrées et n sorties, pour cette exemple on prend ($q = 1$), comme le montre sur la figure suivante [54]:

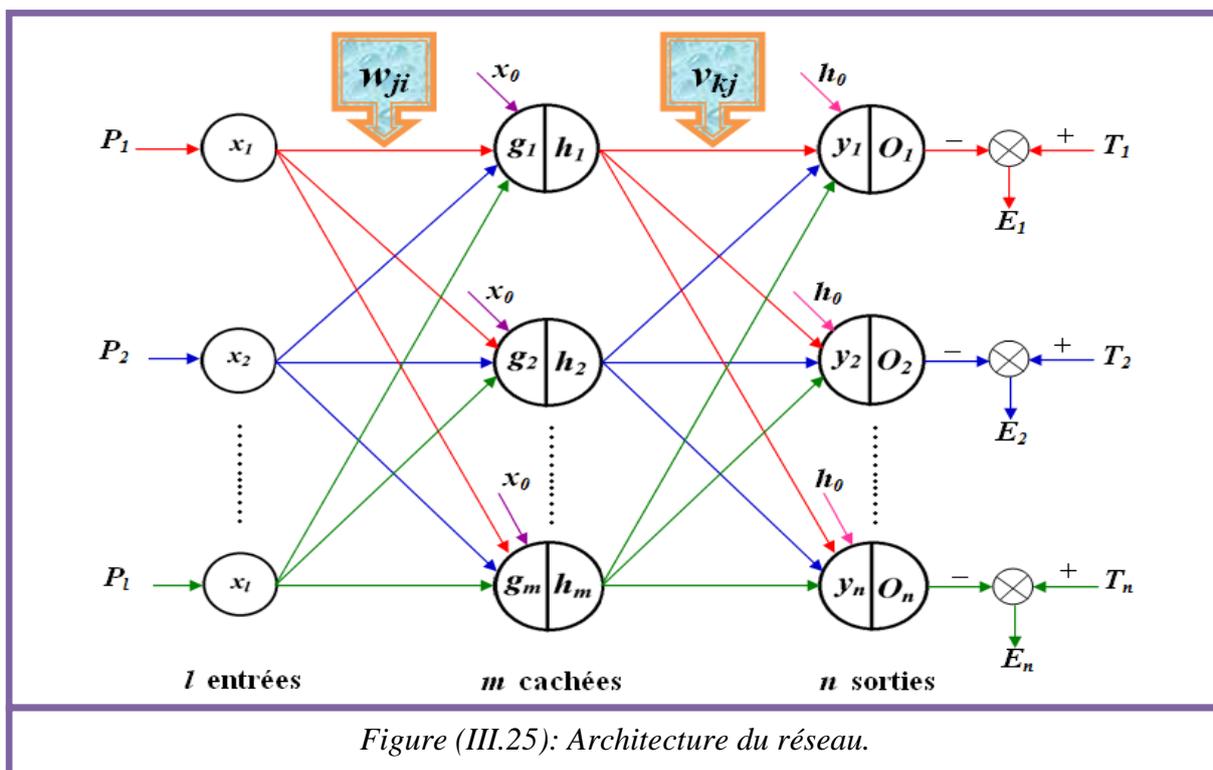


Figure (III.25): Architecture du réseau.

B.4.3. Calcul des fonctions d'apprentissage:

On calcule pour les deux couches (cachée et sortie) les fonctions nécessaires pour l'apprentissage du réseau [54]:

- **Phase de présentation:**

On utilise la fonction d'activations sigmoïde unipolaire.

- **Couche de sortie:**

A partir du réseau, on trouve l'équation de y_k comme suit:

$$y_k = \sum_{j=0}^m v_{kj} \times h_j \quad (III. 19)$$

Où: $1 \leq k \leq n$. Donc, la fonction de sortie O_k s'écrit:

$$O_k = \frac{1}{1 + e^{-y_k}} \quad (III. 20)$$

- **Couche cachée:**

Toujours à partir du réseau, on trouve l'équation de g_j comme suit:

$$g_j = \sum_{i=0}^l w_{ji} \times x_i \quad (III. 21)$$

Où: $1 \leq j \leq m$. Alors, la fonction de la couche cachée h_j s'écrit:

$$h_j = \frac{1}{1 + e^{-g_j}} \quad (III. 22)$$

- **Adaptation des poids:**

Pour adapter les poids, il faut calculer les deux nouveaux poids v_{kj} et w_{ji} .

- **Couche de sortie:**

$$v_{kj}^{\text{nouveau}} = v_{kj}^{\text{ancien}} + \eta \times \delta O_k \times h_j \quad (III. 23)$$

Où: $0 \leq j \leq m$; $1 \leq k \leq n$

Avec:

$$\delta O_k = (T_k - O_k) \times O_k \times (1 - O_k) \quad (III. 24)$$

- **Couche cachée:**

$$w_{ji}^{\text{nouveau}} = w_{ji}^{\text{ancien}} + \eta \times \delta h_j \times x_i \quad (III. 25)$$

Où: $0 \leq i \leq l$; $1 \leq j \leq m$

Avec:

$$\delta h_j = h_j \times (1 - h_j) \sum_{k=1}^n v_{kj} \times \delta O_k \quad (III. 26)$$

B.4.4. Choix des paramètres du réseau:

- **Initialisation des poids:** Aléatoire entre $(-1/M$ et $+1/M)$ où M est le nombre de connexions du neurone.
- **Nombre de couches et de cellules:** Déterminé par recherche exhaustive mais:
 - La plupart du temps, deux couches suffisent;
 - Il faut moins de poids que le produit du nombre d'exemples par le nombre de sorties.
- **Arrêt de l'apprentissage:** Le meilleur test utilise une base de validation croisée distincte de la base d'apprentissage [69].

III.4.11. Comparaison entre la mémoire humaine-ordinateur:

Le tableau suivant résume une comparaison entre la mémoire humaine et la mémoire d'ordinateur [60]:

Tableau (III.5): Comparaison entre la mémoire humaine et la mémoire d'ordinateur.

Mémoire humaine	Mémoire d'ordinateur
Reconstitution à partir d'une information partielle.	Ne reconnaît qu'un mot écrit exactement.
Pas de localisation, pas de neurone « grand-mère ».	L'information est localisée à une certaine adresse.
Pas de déroulement, pas de circuit électrique pour comparer.	Recherche par déroulement, reconnaissance par comparaison.

III.4.12. Avantages et inconvénients des RNA:

A. Les avantages:

- Aucune connaissance basée sur les règles;
- Plusieurs algorithmes d'apprentissage sont disponibles;
- Le modèle mathématique non requis.

B. Les inconvénients:

- Aucune garantie sur la convergence de l'apprentissage;
- La connaissance antérieure ne peut pas être employée (apprentissage à partir de zéro);
- L'adaptation aux environnements différents est difficile et le réapprentissage est obligatoire [70].

III.4.13. Domaines d'applications des RNA:

Aujourd'hui, Les réseaux de neurones ont de nombreuses applications dans plusieurs secteurs, nous citons:

- **Traitement d'images:** Reconnaissance de caractères et de signatures, compression d'images, reconnaissance de formes, cryptages,...[56].
- **Optimisation de trajectoires:** On peut par exemple, déterminer quelle est la meilleure trajectoire pour un avion, une fusée...etc.
- **Approximation de fonctions:** Les fonctions trop compliquées peuvent être approximées, grâce au réseau, par une somme de fonctions plus simples comme des polynômes ou des sigmoïdes [8].
- **La classification d'objets:** Supposons que l'on désire classer des formes en deux catégories (A ou B), en fonction de certaines caractéristiques de ces formes; on peut définir une fonction ϕ qui vaut (+1) pour toutes les formes de la classe A et (-1) pour toutes les formes de la classe B . Les réseaux de neurones sont de bons candidats pour réaliser une approximation de cette fonction ϕ et on peut démontrer que cette approximation constitue une estimation de la probabilité d'appartenance de la forme inconnue à la classe A [47], [54].
- **La modélisation de processus dynamiques non linéaires:** Modéliser un processus, c'est trouver un ensemble d'équations mathématiques qui décrivent le comportement dynamique du processus, c'est-à-dire l'évolution de ses sorties en fonction de celle de ses entrées; c'est donc typiquement un problème qui peut être avantageusement résolu par un réseau de neurones, si le phénomène qu'on veut modéliser est non-linéaire.
- **La régression non linéaire, ou modélisation de données statiques:** Il existe une immense variété de phénomènes statiques qui peuvent être caractérisés par une relation déterministe entre des causes et des effets; les réseaux de neurones sont de bons candidats pour modéliser de telles relations à partir d'observations expérimentales, sous réserve que celles-ci soient suffisamment nombreuses et représentatives [47].

Le choix d'utiliser tel ou tel type de réseau de neurones dépend de l'application mais aussi des capacités de traitement du processeur sur lequel ils s'exécutent [29].

III.5. Conclusion:

Un contrôleur flou suit un processus qui se présente dans trois étapes successives:

- Fuzzification des entrées: Transforme les valeurs d'entrées en quantités floues;

- Inférence (avec la base des règles): Applique les règles aux entrées fuzzifiées afin de prendre les décisions;
- Défuzzification: Transforme les décisions floues en valeurs de sorties numériques déterminées [33].

Les algorithmes génétiques seuls ne sont pas très efficaces dans la résolution d'un problème. Ils apportent cependant assez rapidement une solution acceptable. Néanmoins, il est possible de l'améliorer assez efficacement en le combinant avec un algorithme déterministe [71].

Les points fondamentaux qu'il convient de toujours garder à l'esprit lorsque l'on cherche à mettre en œuvre des réseaux de neurones:

- Les réseaux de neurones sont des outils « statistiques », qui permettent d'ajuster des fonctions non linéaires très générales à des ensembles de points, comme toute méthode statistique, l'utilisation de réseaux de neurones nécessite que l'on dispose de données suffisamment nombreuses et représentatives;
- Les réseaux de neurones sont des approximateurs universels parcimonieux, qui permettent de modéliser des phénomènes statiques (réseaux non bouclés) et dynamiques (réseaux bouclés) [72];
- Les réseaux de neurones à apprentissage supervisé peuvent constituer d'excellents classifieurs, dont les performances peuvent approcher celles du classifieur bayésien théorique; néanmoins, pour la classification en vue de la reconnaissance de formes, la « représentation » choisie pour les formes à reconnaître détermine souvent, d'une manière décisive, la performance globale du système dans ce contexte, les réseaux de neurones à apprentissage non supervisé peuvent apporter des éléments précieux pour la détermination d'une bonne représentation des formes [55].

Chapitre IV

Emplacements et valeurs optimaux des FACTS pour augmenter la capacité de charge du système

Chapitre IV

Emplacements et valeurs optimaux des FACTS pour augmenter la capacité de charge du système

IV.1. Introduction:

La tension sur les réseaux électriques est sujette à des évolutions dépendantes des heures de fonctionnement de la journée, des enclenchements et des déclenchements de charges et donc de l'équilibre entre la production et la consommation. Or, sur un réseau de distribution, la tension ne peut pas fluctuer librement, celle-ci doit rester comprise dans une fenêtre définie par les limites normalisées [73].

Le but du réseau de transmission est de mettre en commun les centrales électriques et les centres de charge pour alimenter la charge à une fiabilité requise et une efficacité maximale à un coût minimal. Comme le transfert de puissance croît, le système d'alimentation peut devenir de plus en plus difficile à exploiter et le système devient plus non-sécurisé avec les flux d'énergie imprévue et les plus hautes pertes. Dans ce contexte, un concept appelé un système de transmission en courant alternatif flexible a été introduit dans le champ du système d'alimentation.

Les quatre exigences communes pour l'installation pratique des FACTS dans le système d'alimentation, sont [74]:

- Que peuvent apporter les FACTS dans la conduite d'un réseau électrique?
- Où faut-il les placer dans le système?
- Combien de dispositifs sont-ils nécessaires?
- Quelles doivent être leurs caractéristiques (types de dispositifs, leurs valeurs,...etc.)?

IV.2. Choix des emplacements optimaux des FACTS:

La fonction primordiale des FACTS dans les réseaux électriques est le contrôle des échanges de puissance, cela n'est assuré que s'ils sont installés d'une manière optimale. Ces dispositifs peuvent être utilisés pour atteindre un fonctionnement autour du point d'écoulement de puissance optimal sans violation des contraintes et donc assurer un fonctionnement économique à un faible coût de production.

Donc, le choix du type de FACTS à utiliser et son emplacement peut se faire tout en respectant l'objectif d'une génération à des coûts minimums ainsi que l'aspect dispatching, ce critère de choix est dit critère économique.

Les coûts considérés sont les coûts de production et les coûts d'investissement des FACTS.

Pour la minimisation des coûts de production, la fonction coût de production est connue. Nous lui ajouterons la fonction coût d'investissement des FACTS.

La fonction coût de production est une fonction quadratique et polynomiale de la forme:

$$c_2(P_G) = \alpha_0 + \alpha_1 P_G + \alpha_2 P_G^2 \quad (IV.1)$$

Où: P_G est la puissance générée en MW.

α_0 , α_1 et α_2 sont des constantes.

Les fonctions coût d'investissement des dispositifs SVC, TCSC et UPFC sont:

- La fonction coût d'un SVC en \$/kVar est:

$$c_{SVC} = 0.0003 s_{FACTS}^2 - 0.3051 s_{FACTS} + 127.38 \quad (IV.2)$$

- La fonction coût d'un TCSC en \$/kVar est:

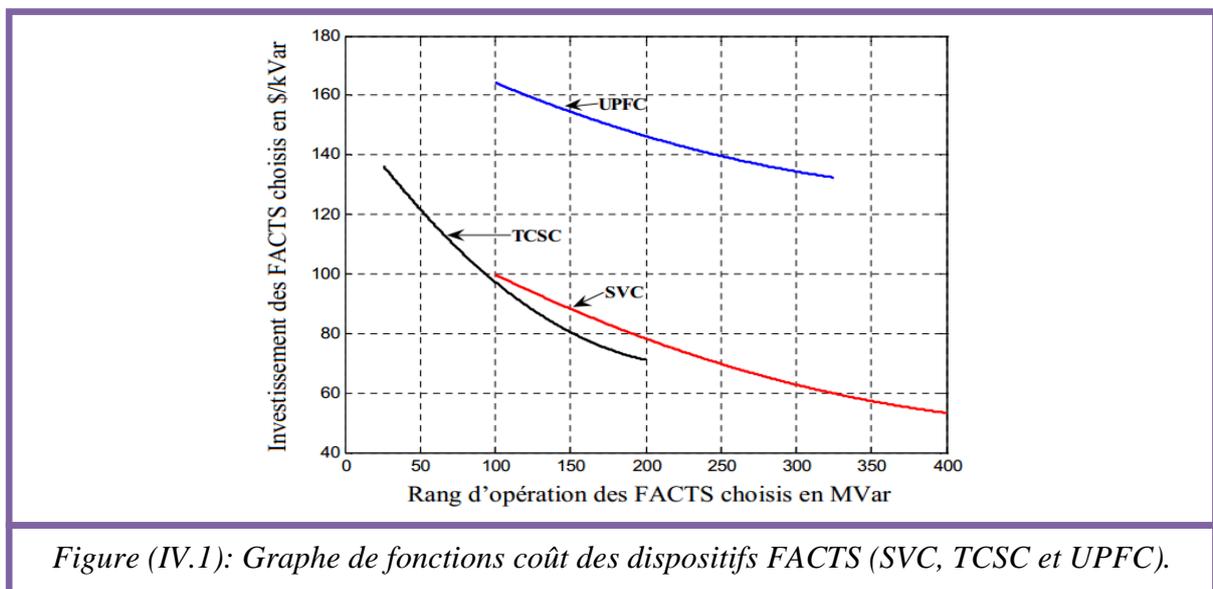
$$c_{TCSC} = 0.0015 s_{FACTS}^2 - 0.7130 s_{FACTS} + 153.75 \quad (IV.3)$$

- La fonction coût d'un UPFC en \$/kVar est:

$$c_{UPFC} = 0.0003 s_{FACTS}^2 - 0.2691 s_{FACTS} + 188.22 \quad (IV.4)$$

Où: s_{FACTS} est le rang d'opération des FACTS en MVar.

Les fonctions coût pour le SVC, TCSC et UPFC sont présentées dans la figure ci-dessous:



La formulation du problème de choix optimal des emplacements des FACTS peut être exprimée comme suit:

$$\min c_{Total} = c_1(f) + c_2(P_G) \text{ si } E_1(f, g) = 0, B_1(f) > 0 \text{ et } B_2(g) > 0 \quad (IV.5)$$

Où:

c_{Total} : la fonction objectif totale comprenant le coût de l'investissement et le coût de la production.

$c_1(f)$: la moyenne des coûts d'investissement des FACTS.

$c_2(P_G)$: les offres demandées par les participants du marché.

$E_1(f, g)$: représente les équations de l'écoulement de puissance.

$B_1(f), B_2(g)$: sont respectivement les contraintes d'inégalité pour les FACTS et l'écoulement de puissance conventionnel.

f, P_G : sont des variables représentant les paramètres des FACTS et les puissances débitées par les alternateurs, respectivement.

g : représente l'état de fonctionnement du système d'alimentation (paramètres prévus pour écoulement de puissance optimale).

Le coût d'une unité de production est exprimé en \$/Heure, alors que les coûts d'investissement des FACTS sont exprimés en \$. Ces derniers doivent être exprimés en \$/Heure. Normalement les FACTS sont conçus pour être en service durant plusieurs années. Cependant, ils sont employés que durant une partie de leurs durées de vie pour le contrôle de l'écoulement de puissance. Dans cette recherche, trois ans sont utilisés pour l'évaluation du coût moyen des FACTS, i.e. l'amortissement (d'un point de vu financier) d'un FACTS est estimé à trois ans. Donc,

$$c_1(f) = \frac{c(f)}{38760 \times 3} \quad (IV.6)$$

Où: $c(f)$ est le coût total d'investissement du FACTS.

Les paramètres du réseau peuvent être régulés par l'action des FACTS. Différents paramètres des FACTS engendrent différentes valeurs de la fonction objectif de l'équation (IV.5). Aussi, la variation de l'emplacement des ces derniers et leurs types influent énormément dans ce sens. Ainsi, par l'utilisation d'outils conventionnels d'optimisation, ce n'est pas facile de retrouver les emplacements, les types et les paramètres des FACTS simultanément [24].

IV.3. Optimisation des réseaux de transport par les FACTS:

L'objectif principal d'optimisation est de mesurer l'impact des FACTS dans un réseau électrique donné, ceci est réalisé en déterminant la configuration optimale de dispositifs FACTS dans le système en fonction de critères et de contraintes spécifiés.

Le problème du placement optimal de dispositifs FACTS est donc un problème de nature combinatoire dont la taille dépend de deux types de paramètres:

- Les grandeurs liées à la topologie du réseau et plus particulièrement le nombre de nœuds " n " et de branches " b ";
- Les grandeurs concernant les dispositifs eux-mêmes, à savoir le nombre de dispositifs et l'ensemble des caractéristiques différentes pouvant leur être attribuées.

Le problème d'optimisation consiste alors à déterminer où doivent être disposés les FACTS dans le réseau parmi les $n+b$ emplacements possibles, de quels types doivent être les dispositifs et quelle doivent être leurs puissances respectives.

De manière générale, un problème d'optimisation combinatoire est caractérisé par un ensemble fini de solutions ou configurations S , un sous-ensemble X de S représentant les solutions admissibles et une fonction objectif " f " qui attribue à chaque solution $s \in X$ une valeur $f: S \rightarrow E$ (E : ensemble de solutions).

Le problème consiste à déterminer la solution s^* minimisant (ou maximisant) la fonction f . Pour un problème de minimisation, il s'agit de trouver $s^* \in X \subseteq S$ tel que $f(s^*) \leq f(s)$ pour chaque élément de $s \in X$, où X est l'ensemble des solutions admissibles. Dans le cas d'un problème de maximisation, l'expression $f(s^*) \leq f(s)$ est remplacée par $f(s^*) \geq f(s)$. Une solution peut être décrite explicitement par une affectation de valeurs à l'ensemble $V = \{v_1, \dots, v_l\}$ des variables du problème parmi l'ensemble $D = \{d_1, \dots, d_l\}$ de domaines finis leur étant associés. Une solution s du problème consiste à choisir pour chaque variable v_i une valeur dans son domaine d_i . L'ensemble des solutions potentielles est donc représenté par le produit cartésien $d_1 \times \dots \times d_l$ des domaines. Le sous-ensemble des solutions admissibles X est défini par un certain nombre de contraintes $C = \{c_1, \dots, c_m\}$ appliquées à l'espace des solutions S , où chaque contrainte c_j est une relation sur un sous-ensemble V_j de V qui spécifie quelles combinaisons de valeurs sont possibles.

IV.3.1. Variables d'optimisation:

L'optimisation du placement de dispositifs FACTS est réalisée sur la base des résultats d'un calcul de la répartition des puissances (load flow). Les dispositifs FACTS tels qu'ils sont modélisés modifient les paramètres de la matrice d'admittance nodale \underline{Y} . C'est donc à partir de cette matrice d'admittance modifiée \underline{Y}' que le calcul de répartition des puissances est effectué. Dans ce contexte, plusieurs classes de variables peuvent être définies. Elles se distinguent principalement par leurs fonctions. Ces différentes grandeurs sont introduites et discutées dans les paragraphes qui suivent.

A. Variables de contrôle:

Les variables de contrôle, également appelées variables de décision, correspondent aux paramètres dont la valeur peut être modifiée ou contrôlée lors de l'optimisation. Dans le cas du placement de FACTS, ces variables peuvent être divisées en deux catégories:

- ❶ La première regroupe est les variables liées aux producteurs et aux consommateurs connectés au réseau, soit:

- Les puissances actives P_{Li} et réactives Q_{Li} injectées aux nœuds des charges;
- Les puissances actives P_{Gi} et les modules de la tension U_i aux nœuds des générateurs;
- Le module U_l et la phase δ_l de la tension au nœud bilan.

Ces grandeurs sont généralement des données qui définissent un état de charge du système. Elles sont prises comme constantes dans le cadre de la recherche d'une configuration optimale, mais peuvent être modifiées d'une optimisation à l'autre afin de déterminer leur influence sur les résultats.

② Le second groupe contient l'ensemble des variables nécessaires à la définition d'une configuration de FACTS, à savoir:

- Le nombre de dispositifs FACTS insérés dans le réseau;
- Leurs emplacements, précisant dans quels nœuds ou branches du réseau les FACTS sont positionnés;
- Leurs types, sélectionnés parmi les différents dispositifs modélisés;
- Les valeurs de consigne des FACTS, liées à la taille ou à la puissance des installations.

Les valeurs prises par chacune des variables de contrôle se situent à l'intérieur de domaines définissant l'ensemble des affectations possibles.

B. Variables d'état:

Les variables d'état sont celles dont la connaissance va permettre d'en déduire toutes les autres. Ce sont celles d'un calcul de répartition des puissances, à savoir toutes les tensions complexes aux nœuds:

$$\underline{U}_i = U_i e^{j\delta_i} \quad (IV.7)$$

Où: U_i et δ_i représentent respectivement le module et la phase de la tension au nœud i .

Les variables d'état sont déterminées en fonction des valeurs prises par les variables de contrôle.

C. Variables de sortie:

Ce sont les grandeurs calculées à partir des résultats obtenus pour la répartition des puissances.

Dans cette classe de variables figurent plus particulièrement:

- Les puissances actives P_{ik} et réactives Q_{ik} injectées dans les branches;
- Les puissances actives P_{Gi} et réactives Q_{Gi} produites par les générateurs;
- Les puissances actives P_l et réactives Q_l produites par le nœud bilan.

D'autres grandeurs peuvent également être déduites des variables de sortie énumérées ci-dessus. C'est entre autre, le cas des pertes actives dans le réseau, de l'état de charge des lignes,... etc. Elles définissent ainsi l'ensemble des valeurs admissibles pouvant être prises par les variables de contrôle relatives à la description des configurations de FACTS.

IV.3. 2. Formulation mathématique du problème d'optimisation:

Pour résoudre un problème de placement optimal de dispositifs FACTS à partir des éléments présentés ci-dessus, deux approches peuvent être envisagées.

- La première consiste à prendre le nombre de dispositifs comme un des paramètres de l'optimisation. Dans ce cas, il convient impérativement de donner un coût à chaque dispositif afin que l'algorithme puisse retourner la configuration optimale. La difficulté réside dans la détermination du gain économique associé à une amélioration technique sur le réseau;
- Dans le cas de la seconde technique, celle développée dans le cadre de ce travail, le nombre de dispositifs n_F est fixé. Les paramètres de la configuration optimale recherchée sont les emplacements, les types et la taille des dispositifs. L'optimisation est répétée pour différents nombres de dispositifs à placer.

L'ensemble des variables à optimiser V est formé de l'union de trois sous-ensembles de n_F variables, correspondant respectivement aux variables associées aux positions, aux types et aux valeurs des dispositifs FACTS:

$$V = \{e_1, \dots, e_{n_F}, t_1, \dots, t_{n_F}, v_1, \dots, v_{n_F}\} \quad (IV. 8)$$

Avec:

e_i : emplacement du dispositif i dans le réseau .

t_i : type du dispositif i positionné en e_i .

v_i : valeur de consigne du FACTS placé en e_i .

Pour un réseau de transport représenté par sa matrice d'admittance \underline{Y} et par le vecteur des injections aux nœuds \underline{S} , on peut définir un ensemble U et un ensemble V tels que: U est l'ensemble des variables d'état représentant les amplitudes et les phases des tensions nodales; V est l'ensemble des variables de contrôle représentant les positions, les types et les consignes des n_F dispositifs, auxquelles sont associés des domaines de valeurs respectifs.

Le problème d'optimisation consiste à déterminer les composantes de U et V de manière à minimiser ou maximiser $f(U, V)$ fonction objectif sous les contraintes:

- $g(U, V) = 0$ équations de Kirchhoff;
- $h(U, V) \leq 0$ contraintes de sécurité.

IV.3. 3. Valeurs de consigne des FACTS:

A. Compensateur statique de puissance réactive (SVC):

Les SVCs sont connectés aux nœuds (ou aux branches) du réseau, ils sont généralement placés aux endroits où se trouvent des charges importantes ou variant fortement. Ils peuvent également être positionnés à des nœuds où le générateur n'arrive pas à fournir ou absorber suffisamment de puissance réactive pour maintenir le niveau de tension désiré.

Les valeurs du compensateur de puissance réactive sont exprimées sous forme de puissances réactives injectées à une tension de 1 p.u. Une valeur positive indique que le dispositif fournit de la puissance réactive au système alors qu'il en absorbe lorsque Q_{SVC} est négative. Un SVC peut prendre n_v valeurs discrètes comprises dans l'intervalle:

$$-Q_{SVC\ max} \leq Q_{SVC} \leq Q_{SVC\ max}$$

Avec une valeur typique de $Q_{SVC\ max} = 300$ MVar.

À l'heure actuelle, il existe des dispositifs shunt dont la puissance réactive maximale peut atteindre 500 MVar. Pour l'optimisation, les valeurs limites des SVC ne sont pas fixées, mais sont adaptées en fonction du réseau dans lequel les FACTS sont à placer.

B. Compensateur série contrôlé par thyristors (TCSC):

Lorsqu'un TCSC est placé dans une ligne reliant les nœuds i et k , il est directement intégré dans le schéma en π de la ligne.

Les valeurs du compensateur série à thyristors sont exprimées par le degré de compensation de la ligne. Bien que cette façon de faire ne tienne pas compte de la puissance nominale du dispositif, elle a pour avantage d'adapter la taille du dispositif à la ligne sur laquelle il est placé. Les degrés de compensation possibles sont des valeurs discrètes comprises dans l'intervalle:

$$k_{TCSC\ min} \leq k_{TCSC} \leq k_{TCSC\ max}$$

Les valeurs de compensation maximales sont fixées à:

$$k_{TCSC\ min} = -80\% \text{ en mode capacitif;}$$

$$k_{TCSC\ max} = 20\% \text{ en mode inductif [75].}$$

Le coefficient k_{TCSC} de TCSC va modifier la réactance de la ligne x_{ik} , comme indiqué ci-dessous:

$$x_{TCSC} = k_{TCSC} x_{ik}$$

$$-0.8 x_{ik} \leq x_{TCSC} \leq 0.2 x_{ik}$$

$$x_{ik}' = x_{TCSC} + x_{ik} \Rightarrow x_{ik}' = (1 + k_{TCSC}) x_{ik}$$

Avec: x_{TCSC} est la réactance du dispositif TCSC, x_{ik} est la réactance de ligne entre les nœuds i

et k , x_{ik}' est la valeur actualisée pour x_{ik} en présence d'un TCSC.

C. Régulateur de tension commandé par thyristor (TCVR):

Le TCVR (Thyristor Controlled Voltage Regulators) est utilisée pour changer la grandeur de la tension de nœud. Nous pouvons représenter ce dispositif par un transformateur changeur de prises idéal sans impédance série comme suit:

$$V_{TCVR} = k_{TCVR} V_i$$

$$-k_{TCVR\ max} \leq k_{TCVR} \leq k_{TCVR\ max}$$

$$V_i' = (1 + k_{TCVR}) V_i$$

$$0.85 V_i \leq V_i' \leq 1.15 V_i$$

Avec une valeur typique de $k_{TCVR\ max} = 0.15$, la grandeur V_{TCVR} est la tension équivalent de la TCVR, V_i est la tension de nœud i et V_i' est la valeur actualisée de nœud i . La valeur zéro pour le coefficient k_{TCVR} signifie que pas de transformation à la tension.

D. Régulateur de phase du transformateur commandé par thyristor (TCPST):

Le TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer), qui est modélisée par un déphaseur idéal, est utilisé pour réguler l'angle de tension entre l'extrémité de fourniture et d'absorption d'une ligne de transmission. Les gammes pour les angles de TCPST sont:

$$-\delta_{TCPST\ max} \leq \delta_{TCPST} \leq \delta_{TCPST\ max}$$

Avec une valeur typique de $\delta_{TCPST\ max} = 20^\circ$. La grandeur δ_{TCPST} est la phase du TCPST, utilisée pour augmenter ou diminuer l'angle entre les deux nœuds i et k [76].

E. Contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC):

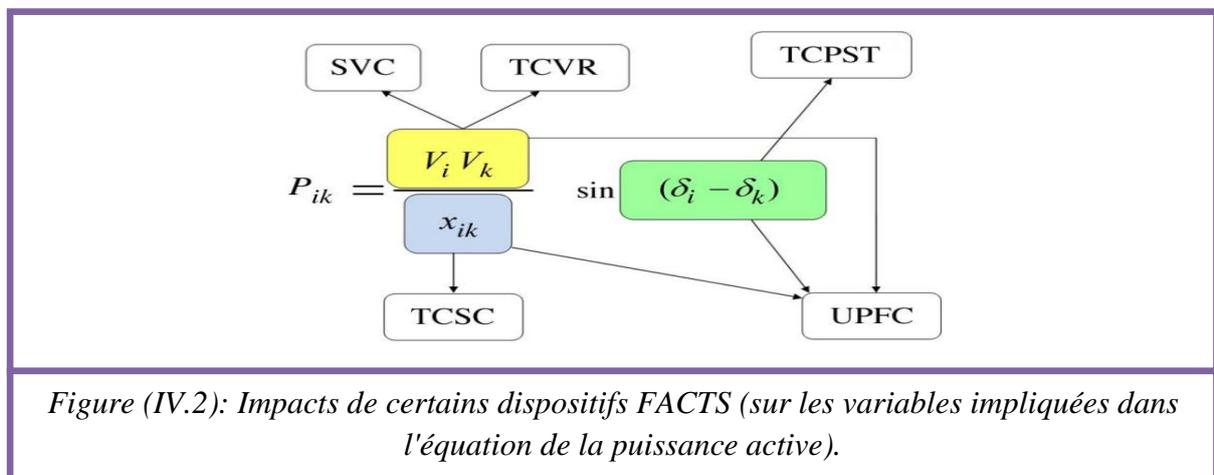
L'UPFC permet de contrôler simultanément la tension au nœud ainsi que le transit de puissance active. En régime permanent, il peut être représenté par une source de courant en parallèle et une source de tension en série avec la ligne.

Les trois paramètres contrôlables de l'UPFC sont V_{se} , θ_{se} et I_{sh} . Où V_{se} désigne l'amplitude de la tension injectée en série avec la ligne de transmission aux intervalles [$V_{se\ min} = 0$, $V_{se\ max} = 0.3$], θ_{se} est l'angle de phase de cette tension aux intervalles [$\theta_{se\ min} = 0^\circ$, $\theta_{se\ max} = 360^\circ$] et I_{sh} est le courant shunt d'une source réactive de l'UPFC dans les intervalles [$I_{sh\ min} = -0.15$, $I_{sh\ max} = 0.15$].

La puissance réactive peut prendre un nombre discret de valeurs comprises dans l'intervalle:

– $Q_{max} \leq Q \leq Q_{max}$; où: $Q_{max} = 200$ MVar et correspond la puissance réactive maximale pouvant être absorbée ou fournie [75].

La figure ci-dessous représente l'impact de certains dispositifs FACTS sur les variables impliquées dans l'équation de la puissance active [76].



IV.4. Placement optimal des FACTS dans les réseaux:

La décision où placer un dispositif des FACTS est largement, tributaire de l'effet recherché et des caractéristiques du système particulier. Les SVCs sont principalement convenables lorsque le flux d'énergie réactive ou le soutien de tension est nécessaire. Les dispositifs TCSCs ne sont pas appropriés dans les lignes à débit élevé de la puissance réactive. Mais aussi les coûts des dispositifs jouent un rôle important pour le choix d'un FACTS.

Après avoir pris la décision d'installer un dispositif FACTS dans le système, il ya trois questions principales qui doivent être pris en compte: le type de dispositif, la capacité et l'emplacement.

Il y a deux moyens distincts de placer un dispositif FACTS dans le système pour le but d'augmenter la capacité de transmettre la puissance du système, permettant ainsi l'utilisation la plus économique des unités génératrices. C'est pourquoi les FACTS sont placés dans les plus grandes lignes chargées pour limiter le flux de puissance dans ces lignes, cela entraîne de plus en plus de puissance à envoyer à travers les portions restantes du système tandis que la protection de la ligne avec le dispositif de surcharge. Si le flux de puissance réactive est une partie importante du flux total sur la limitation de la ligne de transmission, soit un dispositif TCSC dans la ligne ou un dispositif SVC situé à l'extrémité de la ligne qui reçoit de la puissance réactive, peut être utilisé pour réduire le flux de puissance réactive, ce qui augmente la capacité de flux de la puissance active. Là encore, l'UPFC est le plus puissant et flexible des FACTS, il est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le contrôle de: l'impédance de la ligne, la tension et la grandeur de l'angle de phase [77].

Les emplacements optimaux des FACTS sont déterminés à l'aide de plusieurs méta-heuristiques; notre étude concentre essentiellement sur les algorithmes génétiques pour trouver ces emplacements optimaux.

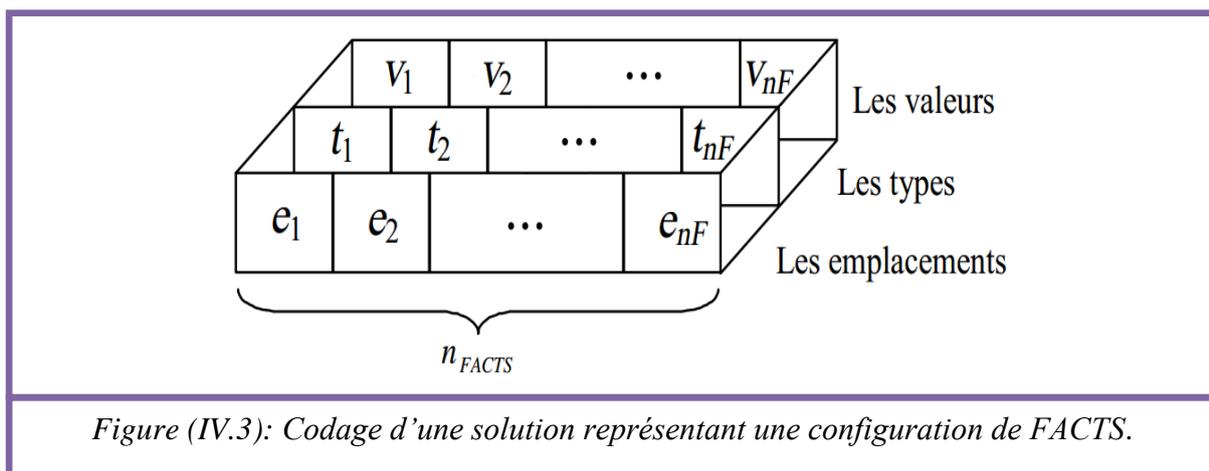
La méthodologie adoptée consiste à chercher la configuration optimale à partir d'une ou de plusieurs solutions initiales et à essayer de les améliorer au cours des itérations successives. L'évaluation de la qualité d'une solution se fait au moyen d'un calcul de répartition des puissances. Conformément à la modélisation des FACTS, les dispositifs modifient la matrice d'admittance nodale Y du réseau. C'est à partir des éléments modifiés que la répartition des puissances (load flow) est calculé.

La méthode d'optimisation utilisée nécessite que les solutions soient codées sous forme de chaînes de caractères dont les éléments sont modifiés aux cours des itérations.

IV.4.1. Codage des solutions:

La recherche du placement optimal des dispositifs FACTS dans le réseau est réalisée pour un nombre de FACTS donné. Un dispositif i est caractérisé par trois variables relatives respectivement à son emplacement e_i , son type t_i et sa valeur v_i . Ainsi, une configuration de n_F FACTS peut être représentée par trois vecteurs, ayant chacun une longueur n_F [Voir la figure (IV.3)]. Les informations contenues dans ces vecteurs sont respectivement:

- Les emplacements des dispositifs qui peuvent être soit des nœuds, soit des branches;
- Leur type respectif;
- Les valeurs de consigne ou tailles des dispositifs.



Les variables ayant le même indice se rapportent au même dispositif.

A. Emplacements des FACTS:

Les dispositifs peuvent être connectés aux n nœuds du réseau ou alors insérés dans les b branches de ce dernier. Chaque élément du réseau (branche ou nœud) sur lequel il est possible

de placer un FACTS est repéré par un entier distinct. Les nœuds sont numérotés de 1 à n en fonction de l'ordre dans lequel ils apparaissent dans le fichier de description du réseau utilisé pour le calcul de répartition des puissances. Selon la même procédure, les branches sont numérotées de $n+1$ à $n+b$. Le domaine des valeurs possibles pour l'emplacement e_i du FACTS i est défini par : $1 < e_i < n+b$.

L'alphabet utilisé pour définir les emplacements des dispositifs FACTS peut donc être représenté selon le schéma du tableau (IV.1).

Tableau (IV.1): Codage de la position des dispositifs FACTS.

Caractère	Interprétation
1	nœud 1
⋮	⋮
n	nœud n
$n + 1$	branche 1
⋮	⋮
$n + b$	branche b

Plusieurs FACTS de types différents peuvent être positionnés sur la même ligne. Dans ce cas, leurs effets combinés sont assimilés à celui d'un UPFC. Cette méthodologie se justifie par le fait qu'un UPFC est formé de deux convertisseurs et que pour une même puissance son coût est plus élevé que celui des autres dispositifs.

B. Type de dispositif:

Chaque type de dispositif est caractérisé par une valeur entière le caractérisant. Le code utilisé est donné dans le tableau (IV.2). Comme on l'a déjà mentionné, l'UPFC est modélisé par la combinaison de plusieurs dispositifs placés sur une même ligne. De ce fait, il n'apparaît pas de manière explicite dans la liste d'identification des dispositifs.

Tableau (IV.2): Codage du type des dispositifs FACTS.

Valeur	Type de dispositif
1	Compensateur statique de puissance réactive (SVC)
2	Condensateur série commandé par thyristors (TCSC)
3	Régulateur de tension commandé par thyristor (TCVR)
4	Thyristor contrôlé par déplacement de phase du transformateur (TCPST)
5	Contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC)

Parmi les dispositifs modélisés, le SVC est le seul pouvant être connecté aux nœuds. Lorsque la valeur affectée à la variable définissant la position du dispositif correspond à un bus, le SVC est la seule solution admissible pour le type du dispositif. Dans ce cas, il y a une certaine redondance dans la description du dispositif.

C. Taille des dispositifs:

La valeur normalisé v_i des dispositifs est exprimée sous forme relative comprise entre 0 et 1 , correspondant respectivement aux valeurs extrêmes pouvant être prises par le dispositif. Le nombre de valeurs distinctes pouvant être prises par un FACTS est identique pour tous les types de dispositifs. La conversion pour obtenir la valeur réelle (effective) $v_{i \text{ réel}}$ du dispositif i est réalisée à l'aide de la relation:

$$v_{i \text{ réel}} = v_{i \text{ min}} + (v_{i \text{ max}} - v_{i \text{ min}})v_i \quad (IV. 9)$$

Où: $v_{i \text{ min}}$ et $v_{i \text{ max}}$ sont respectivement les valeurs de consigne minimale et maximale pouvant être prises par le dispositif i . Par exemple, pour un SVC de puissances réactives maximales absorbée et fournie égales à 200 MVar à un tension de 1 p.u. , la puissance réactive injectée par un dispositif de valeur relative $v_{SVC} = 0.7$ vaut:

$$Q_{SVC} = -Q_{L \text{ max}} + (Q_{C \text{ max}} - Q_{L \text{ max}}) v_{SVC} \quad (IV. 10)$$

Après la compensation, on trouve:

$$Q_{SVC} = -200 + [200 - (-200)] 0.7 = 80 \text{ MVar}$$

IV.4.2. Objectif d'optimisation des réseaux:

Le but de notre processus d'optimisation est de maximiser la capacité de charge du système (system loadability) sur le réseau sans aucune violation de la tension de jeu de barre ou de la branche de chargement.

Pour atteindre cet objectif, le facteur de charge " λ " du réseau sera augmenté dans un processus d'optimisation itératif. A l'état initial, λ est égal à 1. Le facteur de charge est exprimé en valeur relative par rapport à la puissance maximale pouvant être desservie sans placer de FACTS dans le réseau.

Tout d'abord, les puissances de production dans les jeux de barres de génération (P_G -buses) sont modifiées de la manière suivante:

$$P_{Gi} = \lambda P_{G0i} \quad (IV. 11)$$

Où: P_{G0i} est la puissance initiale de génération au jeu de barre i et P_{Gi} est la puissance modifié de génération.

Ensuite, pour les jeux de barres de charge (P_Q -buses) les puissances actives et réactives

demandées (P_L et Q_L) sont modifiées aussi, comme suit:

$$P_{Li} = \lambda P_{L0i} \quad \text{et} \quad Q_{Li} = \lambda Q_{L0i} \quad (IV.12)$$

Où: P_{L0i} et Q_{L0i} sont les puissance active et réactive de base produites par le générateur i , P_{Li} et Q_{Li} sont les valeurs de puissances produites par le générateur i pour un facteur de charge λ .

A chaque itération, selon les équations (IV.11) et (IV.12), le facteur de charge est augmenté et les contraintes d'optimisation qui sont la violation de la tension du jeu de barre et de la branche de chargement sont vérifiées. Quand il n'est plus possible de satisfaire les contraintes, il est conclu que la capacité de charge maximale a été atteinte. Un algorithme multi-étape qui suit l'heuristique de la résolution de faire le choix d'emplacement optimale à chaque étape dans l'espoir de trouver une solution optimale. Sur certains problèmes, une stratégie séquentielle ne doit pas produire une solution optimale, mais néanmoins une heuristique peut donner localement des solutions optimales qui se rapprochent d'une solution optimale globale.

La fonction objectif correspondante qui maximise la capacité de charge du système d'alimentation λ peut être formalisé de la façon suivante:

$$F = \max \{\lambda\} \quad (IV.13)$$

L'objectif est réserver les contraintes de sécurité suivants:

- Pour toutes les branches du réseau:

$$S_l \leq S_{l \max} \quad (IV.14)$$

- Pour tous les jeux de barres du réseau:

$$|\Delta V_i| \leq 0.05 \quad (IV.15)$$

- Pour tous les jeux de barres de génération:

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (IV.16)$$

Où: $S_{l \max}$ est la valeur maximale de la puissance apparente admissible dans la ligne l , S_l est la puissance apparente circulant dans la ligne l et ΔV_i est l'écart de tension au nœud i , où l'écart de tension maximum admissible est fixé à $\Delta V_{i \max} = 5\%$ de la tension nominale. P_{Gi} est la puissance active produite par le générateur au nœud i , P_{Gi}^{\min} et P_{Gi}^{\max} sont les limites des bornes minimales et maximales de P_{Gi} respectivement.

Afin de simplifier l'application des contraintes du procédé tout en plaçant les FACTS à des endroits aléatoires, nous définissons la fonction fitness " F_{it} " de manière à inclure les deux termes de ciblage séparément, le premier terme est la surcharge de la ligne " Sur_L " et le deuxième terme est lié à des violations de la tension du jeu de barre " Vio_U ":

$$Fit = 2 - \left(\prod_{Ligne} Sur_L + \prod_{Nœud} Vio_U \right) \quad (IV.17)$$

Avec:

$$Sur_L = \begin{cases} 1 & \text{si } S_l \leq S_{l\max} \\ \exp \left(\mu_l \left| 1 - \frac{S_l}{S_{l\max}} \right| \right) & \text{si } S_l > S_{l\max} \end{cases} \quad (IV.18)$$

$$Vio_U = \begin{cases} 1 & \text{si } |\Delta V_i| \leq 0.05 \\ \exp (\mu_i |\Delta V_{i\max} - \Delta V_i|) & \text{si } |\Delta V_i| > 0.05 \end{cases} \quad (IV.19)$$

Où:

μ_l est le facteur de pénalisation de la surcharge dans la ligne l . Les μ_l sont calculés pour qu'une surcharge de 20% dans la ligne réduise la Sur_L de moitié.

μ_i est le facteur de pénalisation de la violation de tension pour le nœud i . Les μ_i sont déterminés de manière à ce qu'un écart de tension au nœud de 10% réduise la valeur de la fonction objectif de moitié. Donc, les paramètres μ_l et μ_i sont des coefficients constants.

Cela signifie que, si les contraintes sont satisfaites, chaque terme de la fonction fitness dans les équations (IV.18) et (IV.19), Sur_L et Vio_U sera égal à 1, et la valeur de la fonction fitness "Fit" dans l'équation (IV.17) est égal à zéro. D'autre part, si les contraintes ne sont pas respectées, la fonction objectif définie ci-dessus pénalise les branches surchargées et les nœuds sur- ou sous-tension [76].

IV.4.3. Méthode d'emplacement des FACTS (algorithmes génétiques):

De par le codage utilisé, l'algorithme évolutif développé s'apparente plus à une combinaison d'algorithmes génétiques et de programmation évolutive qu'à un algorithme génétique à proprement parler.

A. Population initiale et voisinage:

La population initiale est générée à partir des paramètres suivants:

n_{FACTS} : nombre de dispositifs FACTS à simuler.

n_{type} : types de FACTS.

n_{ind} : nombre des individus de la population.

Le nombre des individus dans une population est calculée à partir de l'équation suivante [78]:

$$n_{ind} = 3 \times n_{FACTS} \times n_{emplacement} \quad (IV.20)$$

Où: $n_{emplacement}$ est le nombre d'emplacements des dispositifs FACTS. La population initiale est générée de manière aléatoire. Chaque individu est obtenu en procédant. L'emplacement du

premier dispositif est d'abord tiré au hasard parmi l'ensemble des positions possible. Un type de FACTS est ensuite associé à la position, en fonction de la valeur tirée. Lorsque plusieurs valeurs sont admissibles, le type du dispositif est tiré aléatoirement. Finalement, la valeur normalisée du dispositif est elle aussi tirée de manière aléatoire. L'opération est répétée pour les n_F dispositifs FACTS à placer dans le réseau en veillant que deux FACTS de même type ne soient pas placés sur le même élément du réseau.

Le voisinage d'une solution est formé de l'ensemble des configurations pouvant être obtenues par le changement d'une caractéristique d'un des dispositifs FACTS. Ce changement aléatoire peut avoir lieu tant sur la position que sur le type ou la valeur du dispositif. La figure (IV.4) illustre quelques solutions voisines.

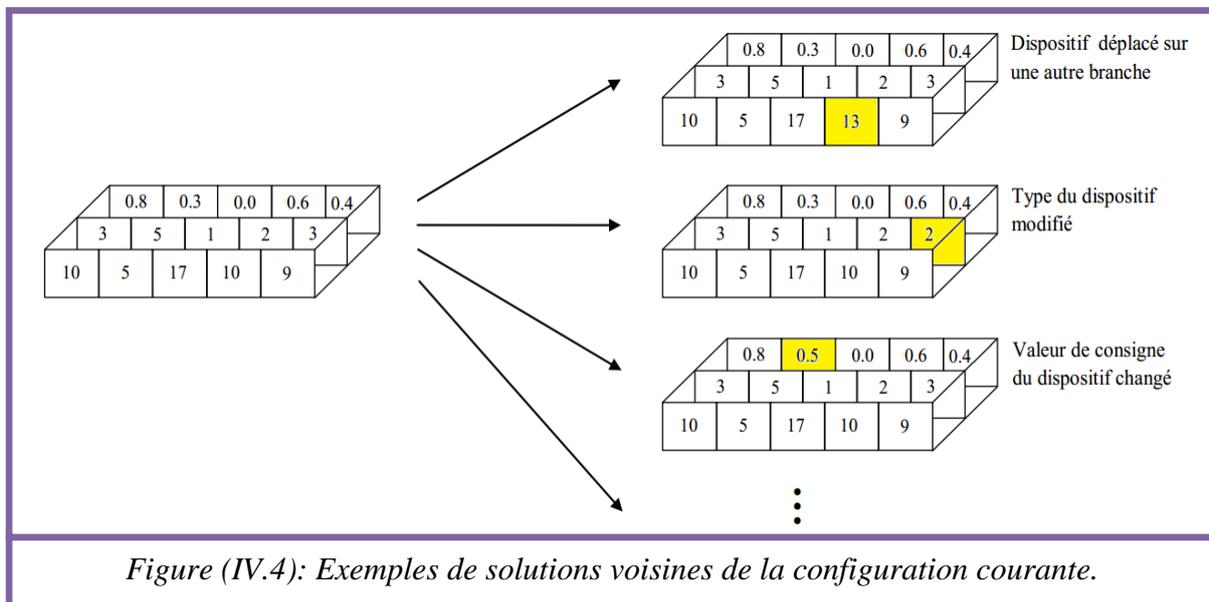


Figure (IV.4): Exemples de solutions voisines de la configuration courante.

Pour un réseau de n nœuds et b branches, selon cette définition du voisinage, le nombre de configurations voisines de la solution courante est:

$$\text{Nombre solutions voisines} = n_F[(n + b - 1) + n_t + n_v] \quad (IV.21)$$

Avec:

n_F : nombre de dispositifs FACTS à placer.

n_t : nombre de types de dispositifs différents.

n_v : nombre de valeurs distinctes pouvant être prises par un dispositif.

Le passage à une nouvelle solution se fait en sélectionnant la meilleure solution voisine de la solution courante. Lorsque la taille du voisinage est trop importante, seule une partie de ses solutions sont testées. Elles sont tirées aléatoirement parmi l'ensemble des configurations voisines admissibles.

B. Sélection et reproduction:

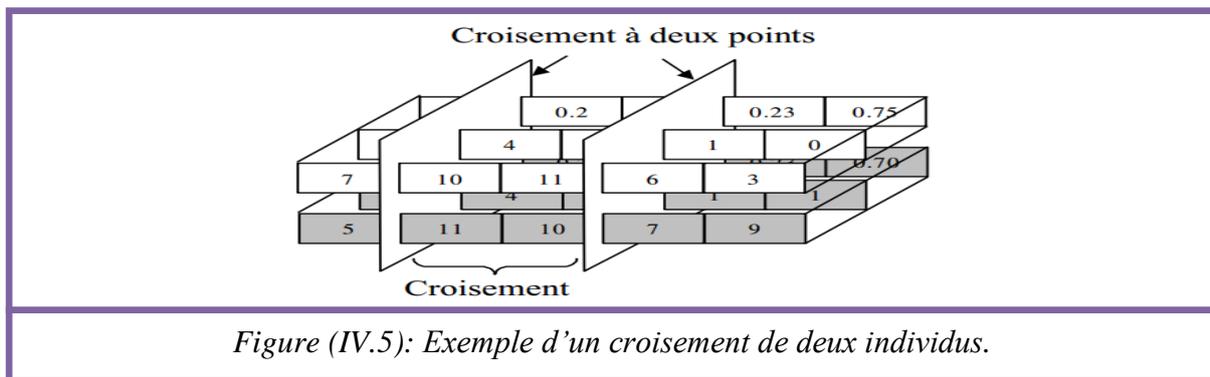
La sélection des individus se fait par tirage sur une roulette biaisée sur laquelle chaque individu a une part proportionnelle à sa fonction fitness. La probabilité de reproduction d'un individu est proportionnelle à sa part sur la roue de roulette biaisée.

C. Croisement:

Le croisement de deux individus peut se produire avec une probabilité p_c généralement comprise entre 0.6 et 1 . Un double croisement est appliqué. Pour cela, deux positions sont tirées aléatoirement et entre ces deux points, les éléments des deux solutions sont échangés. Comme on l'a déjà mentionné, deux dispositifs FACTS de même type ne peuvent pas être présents dans le même élément du réseau (branche ou nœud).

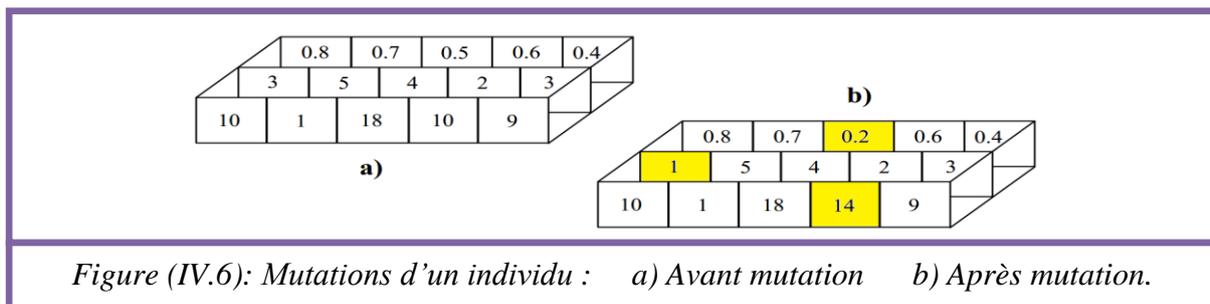
Or, l'opérateur de croisement peut donner lieu à une telle situation. Le dispositif déjà présent dans la configuration est remplacé par le FACTS occupant la même position dans la chaîne correspondant à l'autre parent. La procédure est répétée jusqu'à ce qu'un élément ne faisant pas encore partie de la configuration soit atteint.

Un exemple de croisement de deux individus à deux points est illustré à la figure suivante:



D. Mutation:

Les mutations peuvent avoir lieu sur les caractères des trois chaînes représentant une solution. L'effet de la mutation se traduit par un changement de valeur de l'élément sélectionné. La nouvelle valeur est tirée aléatoirement parmi l'ensemble des valeurs possibles. L'effet de la mutation sur un élément de chacune des trois chaînes est illustré à la figure ci-dessous.



Une probabilité de mutation spécifique est appliquée à chaque paramètre: p_{me} pour les emplacements des dispositifs, p_{mt} pour leurs types et p_{mv} pour les valeurs de consigne. Ces probabilités varient au cours des générations. Elles augmentent pour favoriser la diversification lorsque la population tend à n'être représentée que par quelques individus dominants [75].

E. Critères d'arrêt:

L'algorithme se déplace de génération à la sélection et reproduction des parents jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait. Dans ces exemples, l'algorithme s'arrête lorsque l'un des critères d'arrêt tels que le nombre de générations, délai, et la limite de fitness est vérifié.

La stratégie d'optimisation est résumée à la figure ci-dessous. Afin de garantir qu'il n'y a qu'un seul dispositif de FACTS sur chaque ligne de transmission, le processus de « arrangement de emplacements des FACTS » est nécessaire [79].

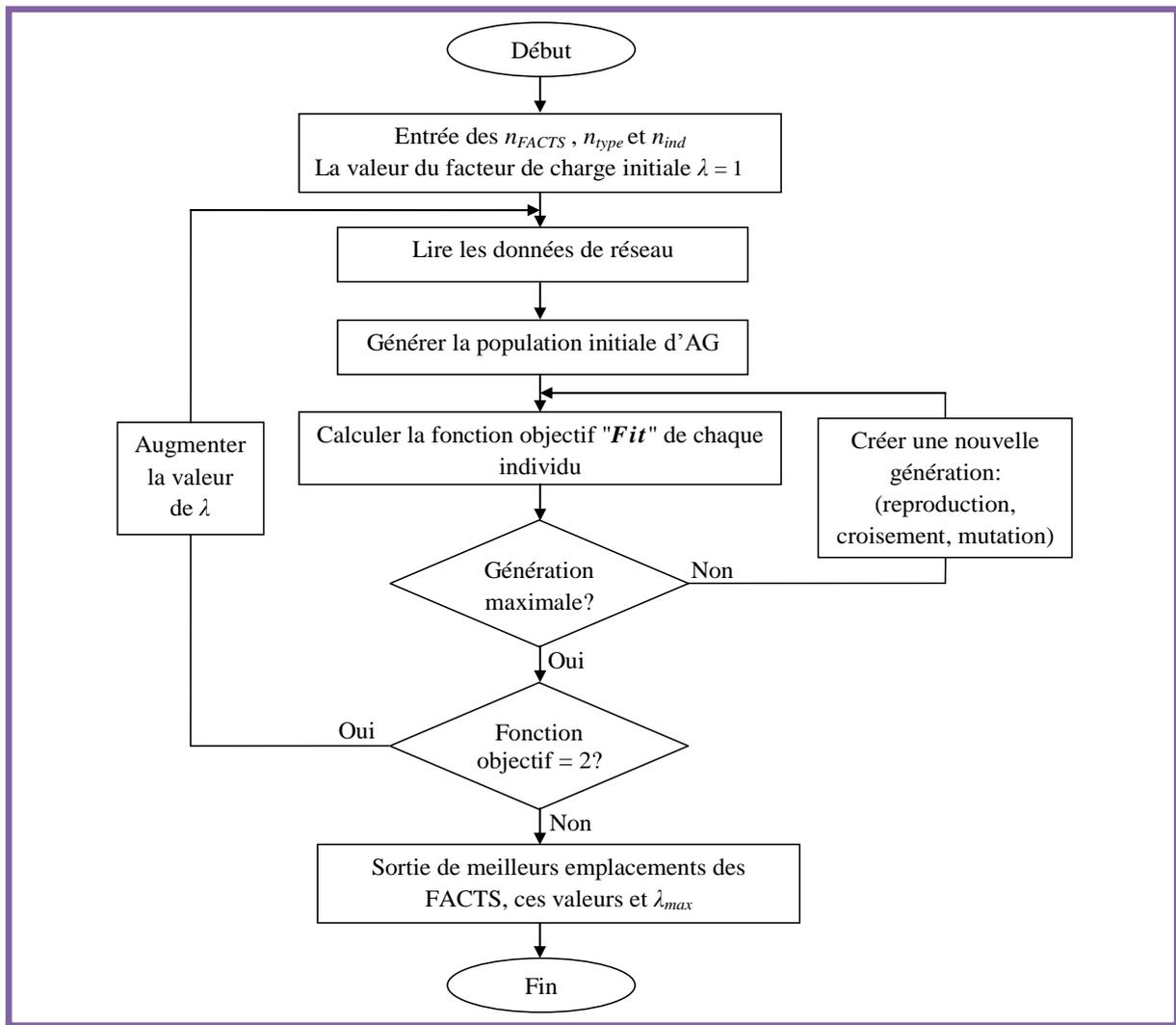


Figure (IV.7): Organigramme d'optimisation par l'AG.

L'approche basée sur un algorithme génétique est proposé pour déterminer le type approprié de contrôleurs FACTS, son emplacement optimal et évaluation des dispositifs dans les systèmes d'alimentation et aussi de déterminer simultanément la génération de puissance active pour différentes conditions de chargement.

L'algorithme proposé est un moyen efficace et une méthode pratique pour l'allocation des contrôleurs FACTS dans les réseaux électriques. Le coût global du système, qui comprend les coûts de production des centrales électriques et le coût d'investissement de contrôleurs FACTS sont utilisés pour évaluer les performances du système [80].

IV.4.4. Exemples de configuration:

L'approche proposée a été testé sur les systèmes tests standards IEEE « Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens » (14, 30 et 57 Nœuds). Afin de montrer l'efficacité de la méthode proposée, un programme développé dans un environnement MATLAB est utilisé.

A. Paramètres de réglage utilisés pour l'algorithme génétique:

Pour plus d'explication, une définition et une meilleure compréhension des paramètres de réglage de l'algorithme génétique, vous pouvez référer à la documentation d'aide Matlab, la section de boîte à outils d'optimisation (Optimization Toolbox): options algorithme génétiques (Genetic Algorithm Options).

On cite quelques notes liée aux paramètres de réglage de l'AG, comme suit:

A.1. Générations:

Spécifie le nombre maximum d'itérations pour l'algorithme génétique à effectuer.

Le nombre d'itérations utilisées pour ces exemples est 120 itérations.

A.2. Taille de la population:

Indique combien de individus il ya dans chaque génération. Avec une grande taille de la population, l'algorithme génétique recherches l'espace de solution de manière plus approfondie, réduisant ainsi la possibilité que l'algorithme soit de retour un minimum local qui n'est pas un minimum global. Cependant, une grande taille de la population provoque également l'algorithme de fonctionner plus lentement.

La taille de la population utilisée est 15 .

A.3. Nombre des individus d'élite:

Certains des individus de la population qui ont la meilleure valeur de fitness sont choisis comme des enfants d'élite. Ces individus d'élite sont transmis à la prochaine population.

Définissez le nombre des enfants d'élite qui doit être un entier positif inférieur ou égal à la

taille de la population.

Le nombre des individus d'élite utilisé est 5 .

A.4. Croisement:

Précise la fraction de la prochaine génération, autres que les enfants d'individu, qui sont produites par croisement. Le croisement n'est pas forcément appliqué pour chaque paire d'individus. Il a lieu avec une certaine probabilité qui est en général proche de 1. Réglez la probabilité de croisement qui doit être entre 0 et 1.

La probabilité du croisement utilisée est 0.8 .

A.5. Mutation:

L'effet de cet opérateur est de troubler la tendance à la concentration induite par la sélection et le croisement, de façon à laisser à la population la possibilité de visiter d'autres régions de l'espace de recherche. L'opérateur de mutation est appliqué avec une très faible probabilité, typiquement de l'ordre de 1%. Toutefois, comme la diversité des individus diminue au fil des générations, il est possible de faire augmenter la probabilité de mutation au cours de l'algorithme.

La probabilité de la mutation est fixée à 0.1 .

A.6. Limite de la fonction fitness:

L'algorithme s'arrête si la meilleure valeur de fitness est inférieure ou égale à la valeur de la limite de fitness spécifiée.

La limite de fitness utilisée est 10^{-6} .

A.7. Limite de temps (délai):

Spécifie le délai maximum, en secondes, l'algorithme génétique fonctionne avant de s'arrêter.

La limite de temps utilisée est infinie "inf".

Le tableau (IV.3) indique les valeurs typiques des paramètres de réglage de l'AG.

Tableau (IV.3): Valeurs typiques des paramètres de réglage de l'AG.

Paramètres de réglage de l'AG	Valeurs typiques
Génération	100 - 200
Taille de la population	10 - 20
Nombre des individus d'élite	2 - 6
Croisement	0.6 - 1
Limite de la fonction fitness	10^{-9} - 10^{-2}
Limite de temps	inf

B. Quelques notes liés à λ :

Après avoir trouvé les meilleurs emplacements de FACTS, pour comparer le réseau sans FACTS avec le réseau avec FACTS, l'utilisation de cette possibilité doit être choisie à laquelle λ la comparaison doit être effectuée. Ainsi, les influences des FACTS sur le réseau pourraient être clairement indiquées. Les bornes typiques sélectionnées pour λ ont la plage suivante: $1 \leq \lambda \text{ typique} \leq 2$. Le facteur de charge maximale " λ_{max} " sera déterminée lorsque les contraintes de sécurité sont satisfaites.

C. Résultats de simulation:

Plusieurs combinaisons de dispositifs FACTS ont été implantées de manière optimale sur les différents réseaux de test IEEE. Les différentes conditions de chargement sont considérées et les résultats de l'allocation d'un sous-ensemble sélectionné des nombreux scénarios étudiés sont présentés dans le tableau (IV.4).

Tableau (IV.4): Résultats d'emplacements des FACTS dans les réseaux choisis.

Système test	No. de dispositif	Type de dispositif	Emplacement de dispositif	Valeur de dispositif	λ_{max}	Pertes totales	
						Sans FACTS	Avec FACTS
14 Nœuds	2	TCVR	2 Branche	1.071 Rapport	1.09	64 MW	61 MW
		TCVR	8 Branche	1.056 Rapport			
30 Nœuds	6	SVC	6 Nœud	-44.320 MVar	1.23	10 MW	8 MW
		SVC	33 Branche	224.720 MVar			
		TCSC	40 Branche	-j0.565 Réactance			
		TCSC	36 Branche	-j0.494 Réactance			
		TCSC	7 Branche	-j0.637 Réactance			
		TCSC	4 Branche	-j0.220 Réactance			
57 Nœuds	8	SVC	40 Branche	101.379 MVar	1.20	391 MW	166 MW
		SVC	35 Nœud	-74.782 MVar			
		TCSC	46 Branche	-j0.700 Réactance			
		TCSC	41 Branche	-j0.777 Réactance			
		TCSC	73 Branche	-j0.588 Réactance			
		TCVR	65 Branche	1.052 Rapport			
		TCPST	13 Branche	5.974 Degré			
		UPFC	55 Branche	$V_{se} = 0.186 \text{ p.u.}$ $I_{sh} = -0.078 \text{ p.u.}$ $\theta_{se} = 259.473 \text{ Degré}$			

On trouve les figures qui montrent les variations de:

- L'amplitude de tension en fonction de nombre de nœuds;
- Les pertes totales en fonction de facteur de charge.

C.1. Pour le système test 14 nœuds:

Le nombre de branches est: 20 branches.

Le nombre total des emplacements est: 20 emplacements.

Le taux d'amélioration de la capacité de charge du système est: 9%.

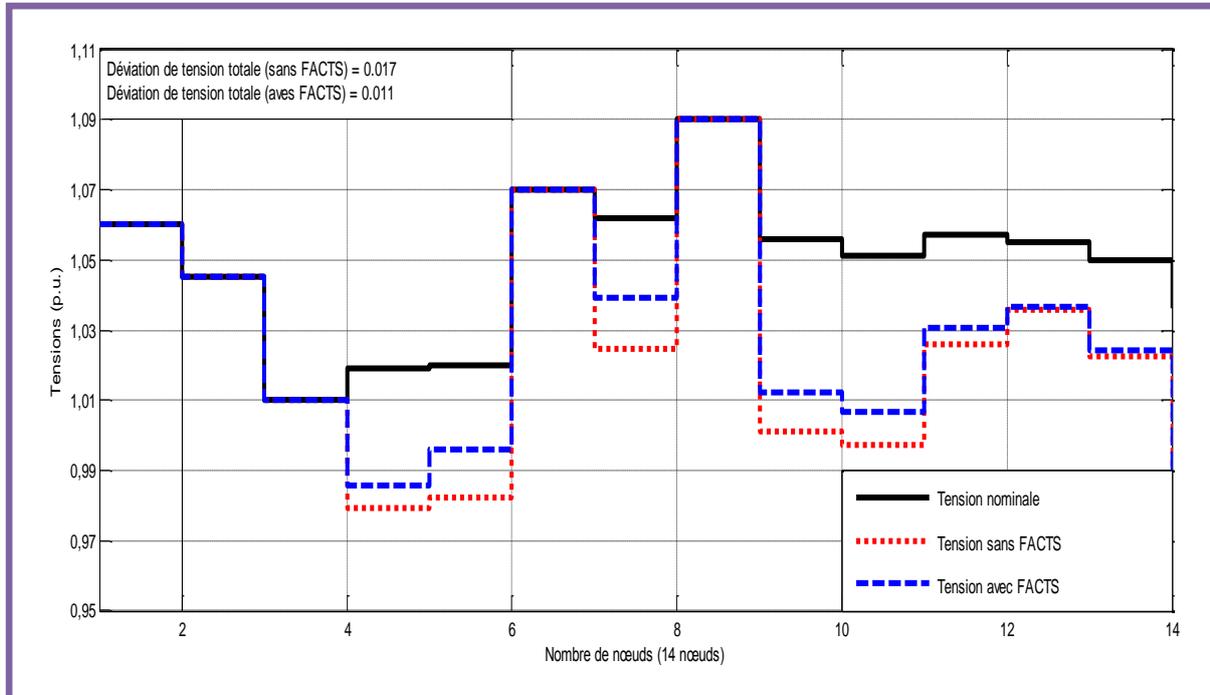


Figure (IV.8): Influence des dispositifs TCVRs sur les tensions de nœuds (14 nœuds).

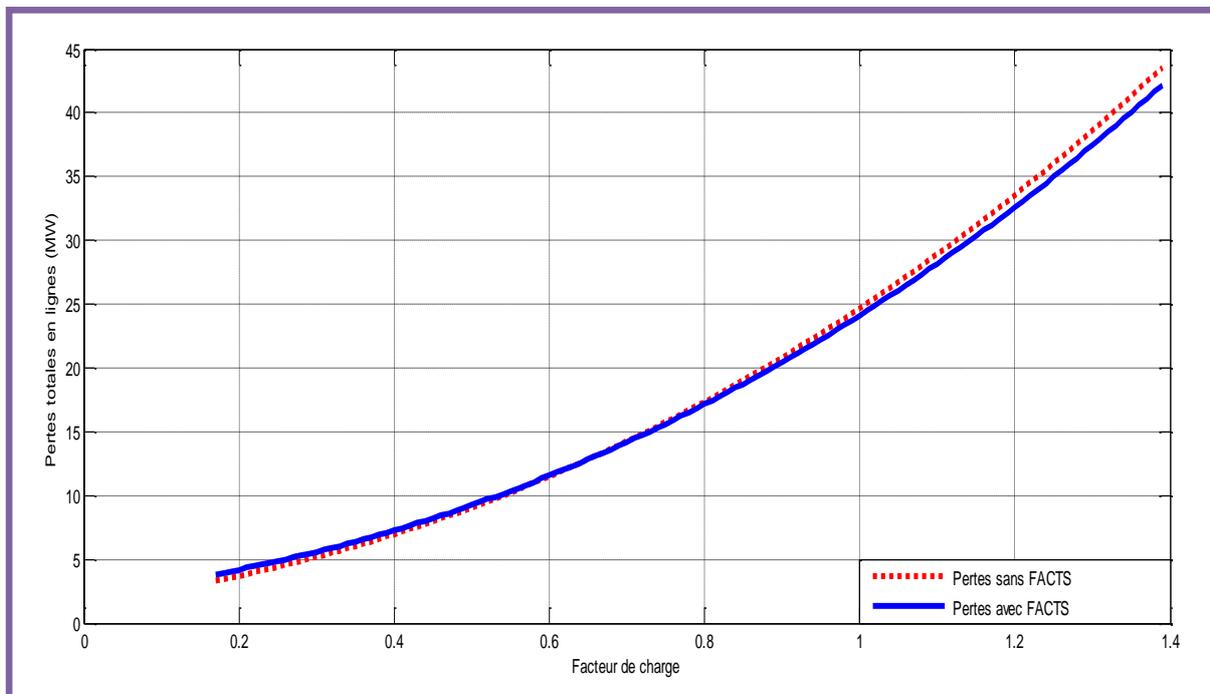


Figure (IV.9): Pertes totales en lignes de système d'alimentation dans les différentes capacités de charge, en utilisant seulement les TCVRs (14 nœuds).

C.2. Pour le système test 30 nœuds:

Le nombre de branches est: 41 branches.

Le nombre total des emplacements est: 71 emplacements.

Le taux d'amélioration de la capacité de charge du système est: 23%.

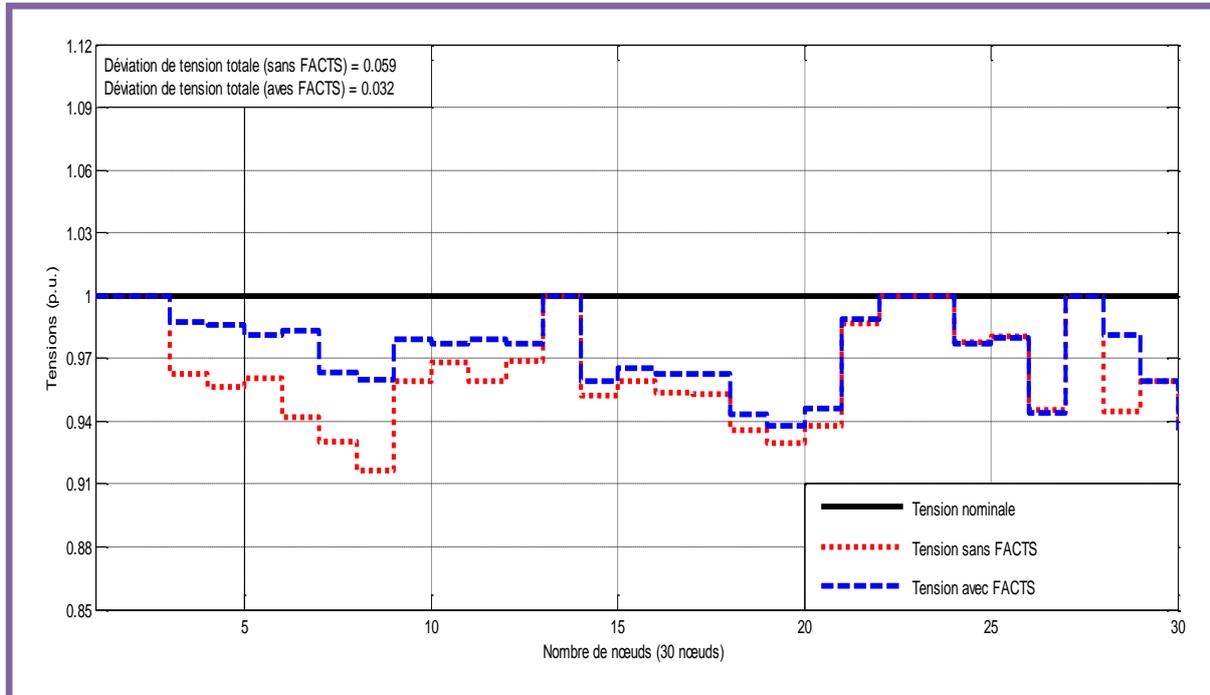


Figure (IV.10): Influence des dispositifs FACTS sur les tensions de nœuds (30 nœuds).

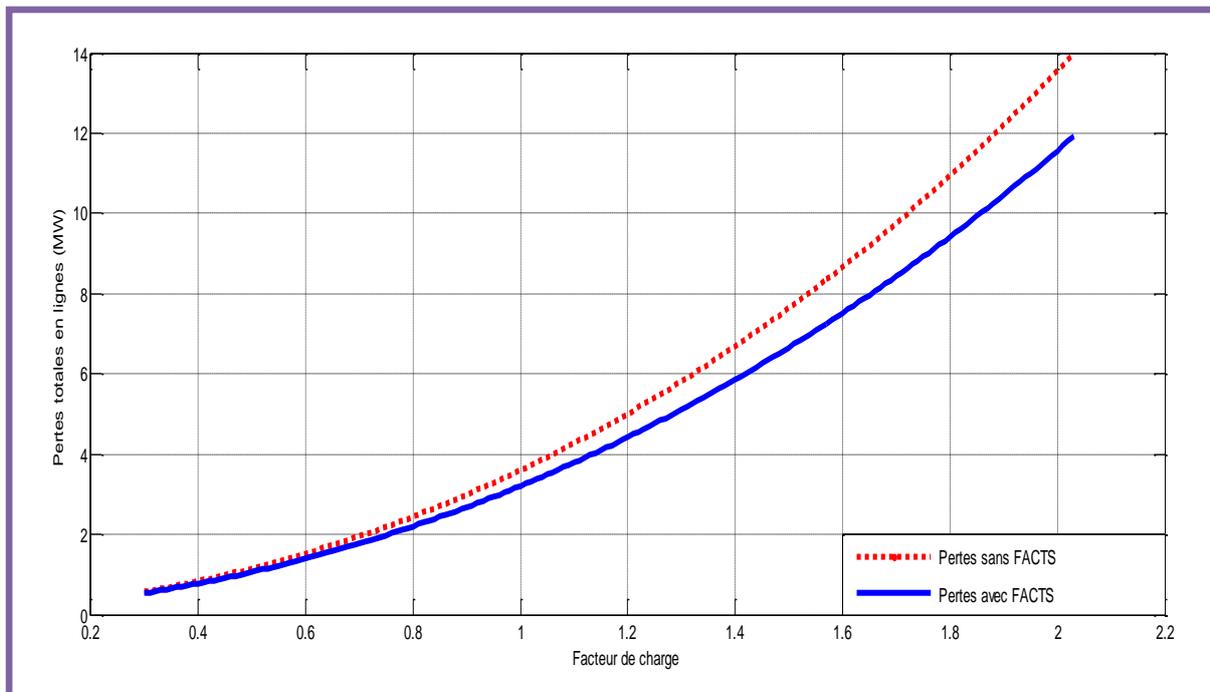


Figure (IV.11): Pertes totales en lignes de système d'alimentation dans les différentes capacités de charge, en utilisant deux types de FACTS (30 nœuds).

C.3. Pour le système test 57 nœuds:

Le nombre de branches est: 80 branches.

Le nombre total des emplacements est: 137 emplacements.

Le taux d'amélioration de la capacité de charge du système est: 20%.

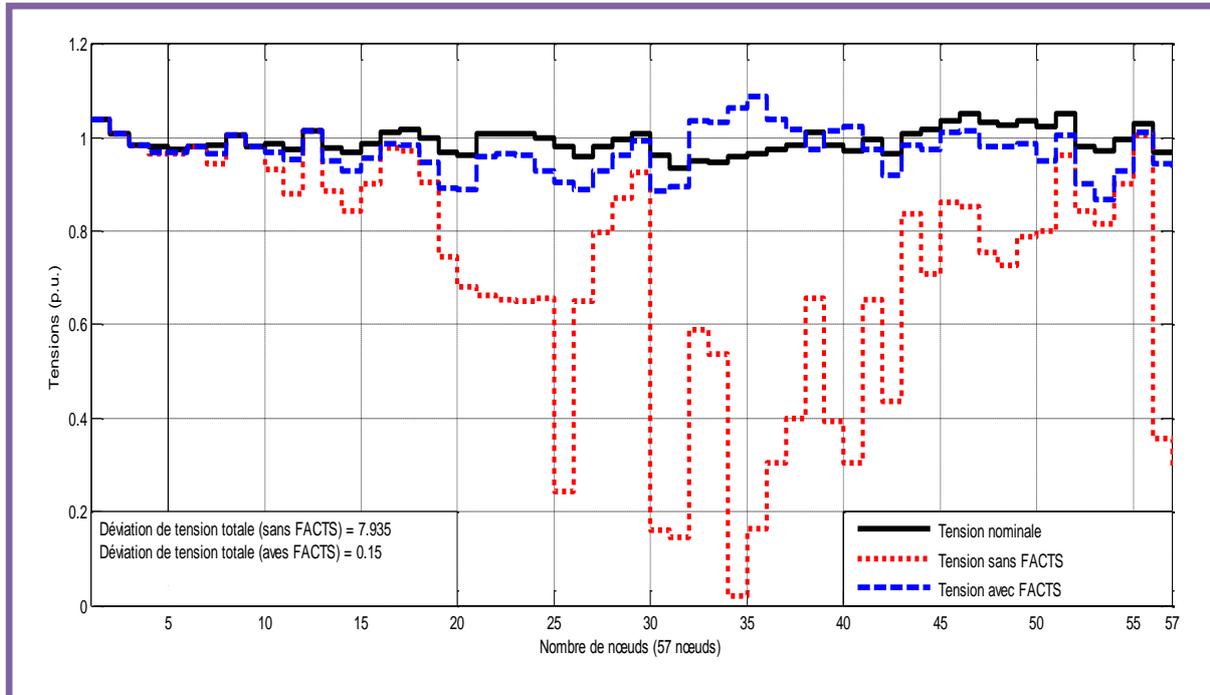


Figure (IV.12): Influence des dispositifs FACTS sur les tensions de nœuds (57 nœuds).

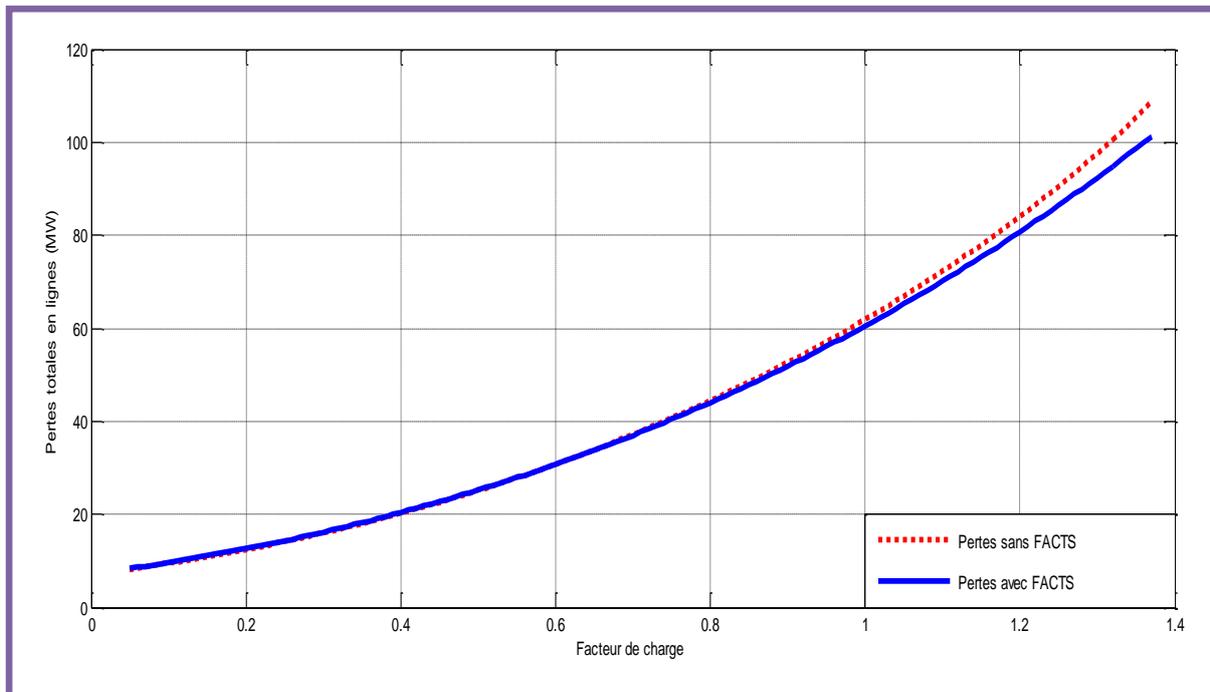


Figure (IV.13): Pertes totales en lignes de système d'alimentation dans les différentes capacités de charge, en utilisant les différents FACTS (57 nœuds).

D. Interprétation des résultats:

Les résultats d'optimisation montrent que dans tous les cas, un accroissement de la puissance pouvant être desservie aux consommateurs est obtenu. L'utilisation simultanée de plusieurs types de FACTS s'avère encore plus efficace. Dans ce cas, les dispositifs sont placés dans le réseau de manière à répondre à un besoin bien précis (maximiser la capacité de charge du système). Jusqu'à cinq dispositifs, la différence d'efficacité n'est pas très significative entre tous les types de dispositifs considérés simultanément. L'écart augmente avec le nombre de FACTS.

En outre, le facteur de charge maximale pour deux types de FACTS dans le système test de 30 nœuds a été déterminée comme $\lambda_{max} = 1.23$, ce qui signifie que par l'installation de l'ensemble des dispositifs à ces emplacements optimaux avec des valeurs nominales, nous aurons une amélioration de 23% dans la capacité de charge du système.

Pour l'étude de cas du système 57 nœuds, les allures de tensions présentées dans la figure (IV.12) montrent que dans les mêmes conditions de la capacité de charge, le réseau sans FACTS a une chute de tension plus grande dans les nœuds. Cela confirme l'influence notable de FACTS pour garder le maintien de la tension de nœud en gammes acceptables.

Les figures qui illustrent la variation des pertes totales dans les lignes en fonction du facteur de charge mettent en évidence qu'un contrôle approprié des dispositifs permet de diminuer les pertes dans le système. La stratégie d'optimisation consiste à déterminer les valeurs de consigne permettant de minimiser les pertes, tout en gardant le réseau dans un état sain.

Les dispositifs FACTS permettent une utilisation plus efficace des actifs du système d'alimentation. Les TCSCs et les TCPSTs servent à contrôler la puissance active dans les lignes alors que les SVCs et les TCVRs sont utilisés pour le contrôle de la puissance réactive. Les UPFCs sont capables de remplir toutes les fonctions des autres dispositifs FACTS.

E. Remarques:

E.1. Dispositifs choisis:

Le but d'optimisation est de trouver le maximum de puissance pendant que le système d'alimentation est capable de fournir sans ligne surchargé et avec un niveau de tension acceptable. Nous attendons pour localiser un certain nombre de dispositifs FACTS pour augmenter autant que possible la capacité du réseau.

Pour plusieurs nombre de FACTS, nous cherchons le meilleur emplacement avec les meilleures valeurs des contrôleurs les plus appropriées. Lorsque le nombre de dispositifs est augmenté, les résultats obtenus ne sont pas prises en compte. En d'autres termes, les FACTS

peuvent disparaître de lignes spécifiques pour réapparaître sur les autres lorsque leur nombre augmente.

Dans ces exemples, nous avons présenté plusieurs placements des dispositifs FACTS pour assurer la stabilité de la tension dans le réseau en utilisant les algorithmes génétiques. Les FACTS peuvent être allouées de manière optimale pour réduire les coûts d'investissement et de maximiser les avantages de coût de sécurité prévu.

Les contrôleurs TCSCs et SVCs sont choisis en raison de leur réponse de contrôle rapide, son coût d'investissement faible et sa capacité d'augmenter efficacement la capacité de charge.

Le SVC est le seul dispositif qui peut être alloué (placé) dans les deux cas (les jeux de barres et les branches); alors que nous avons le SVC dans notre sélection, par exemple dans le réseau test 30 nœuds, les emplacements au total seraient 71 (30 nœuds plus 41 branches).

E.2. Nombre de dispositifs FACTS:

La détermination du nombre de dispositifs FACTS est un choix facultatif pour l'utilisateur. Mais en réalité pour chaque réseau, il existe un nombre maximum optimisé pour la sélection des FACTS. Cela signifie que, si dans un réseau sélectionné comme dans le tableau ci-dessous, vous choisissez plus de ce nombre maximal optimisé, il pourrait y avoir pas plus d'amélioration dans les résultats.

Tableau (IV.5): Nombre optimisé de FACTS selon le réseau sélectionné.

Réseau sélectionné	Nombre optimisé de FACTS
Système de test (4-6-7-9-14 nœuds)	1-5
Système de test (24-57 nœuds)	5-10
Système de test (118 nœuds)	10-15
Système de test (300 nœuds)	15-30

E.3. Cas spécial pour le dispositif UPFC:

L'UPFC est le seul dispositif qui peut être placé dans un élément du réseau deux fois (2 UPFCs en même ligne). En revanche, les autres FACTS de mêmes types peuvent être placés dans une seule ligne.

Cette méthodologie se justifie par le fait qu'un UPFC est formé de deux convertisseurs et qu'il peut de ce fait être considéré comme deux dispositifs différents comme SVC et TCSC. Cela signifie que lorsque vous insérez le dispositif UPFC dans votre simulation, vous pouvez compter comme deux dispositifs FACTS.

IV.5. Conclusion:

Ce chapitre est consacré à la recherche sur les emplacements et les valeurs optimaux d'un ensemble donné de FACTS basée sur les AGs, pour une utilisation plus efficace des systèmes d'alimentation. Cinq dispositifs FACTS différents sont utilisés dans cette simulation sous MATLAB: SVC, TCSC, TCVR, TCPST et UPFC pour maximiser la capacité de charge du système sous des contraintes de sécurité.

Les dispositifs UPFCs sont utilisés pour le maintien des tensions ainsi que le contrôle des transits de puissance dans les lignes. Les dispositifs déphaseurs "TCPSTs" et les TCSCs permettent de contrôler la puissance active en la forçant à circuler dans des chemins parallèles. Les TCVRs et les SVCs sont généralement positionnés dans le réseau pour le maintien de la tension.

Plusieurs critères de choix des emplacements peuvent être appliqués. Pratiquement, le critère le plus important est le critère économique, qui consiste à augmenter les capacités de transfert et réduire les coûts de production [24].

Chapitre V

Site optimal de l'UPFC et sa valeur appropriée dans les réseaux

Chapitre V

Site optimal de l'UPFC et sa valeur appropriée dans les réseaux

V.1. Introduction:

Le contrôleur UPFC est l'un des plus utiles des FACTS utilisé pour augmenter la capacité de charge du système d'alimentation, en minimisant les lignes surchargées et les violations de la tension des jeux de barres. Cependant, dans quelle mesure l'acte de l'UPFC peut être mis en évidence, il dépend fortement sur le site et le réglage des paramètres de ce dispositif dans le système. Dans ce chapitre aussi, le placement optimal et le réglage des paramètres optimaux de l'UPFC sont déterminés au moyen de la méthode des algorithmes génétiques "AGs".

Les algorithmes génétiques qui sont des techniques d'optimisation globale probabilistes inspirés par le processus de la sélection naturelle et la théorie de la génétique des populations, fournissent une architecture générale pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. En fait, elles ont été largement appliquées dans presque tous les domaines. Elles ne ont besoin que de la fonction fitness pour guider la direction de recherche des AGs et ne ont pas besoin d'informations gradient.

Afin de valider l'utilité de l'approche proposée, une étude des cas est présentée et discutée en utilisant les systèmes tests IEEE 14, 30 et 57 nœuds comme le chapitre précédent, pour comparer les résultats entre les deux chapitres.

V.2. Optimal placement de l'UPFC:

Les avantages de l'emplacement optimal des dispositifs UPFCs dans les enjeux dynamiques pourraient être exprimés comme suit: Normalement, la décision d'installer un dispositif UPFC est souvent prise à des étapes de planification lorsque le planificateur de système doit accueillir à la croissance de la charge et l'intégration de l'installation des centrales électriques. Par conséquent, la question naturelle sera la suivante: Avons-nous besoin de construire une ligne ou peut-on faire avec un UPFC? C'est pourquoi nous avons focalisé sur des UPFCs comme un outil de capacité de charge.

Afin de trouver l'emplacement optimal de l'UPFC, il faut le placer sur le nœud qui est le plus affecté lors de défauts doit être identifié. Avec le chargement accru des lignes de transport et de distribution, l'instabilité de la tension est devenue une préoccupation et un grave problème pour les planificateurs et les gestionnaires du réseau de puissance. Le principal défi de ce problème est d'affiner les endroits où l'instabilité de tension pourrait être initiée et de comprendre l'origine du problème. Une méthode efficace utilisée "AG" pour affiner l'espace

de travail est identifier les nœuds (les branches) faibles dans les systèmes, qui sont les plus susceptibles pour faire face à l'écroulement de tension.

V.3. Technique d'optimisation de l'UPFC:

Dans cet élément, le but de l'optimisation consiste à effectuer une utilisation optimale des lignes de transmission existante. A cet égard, le dispositif UPFC est situé afin de maximiser la capacité de charge du système, tout en respectant les contraintes thermiques de puissances apparentes et la tension nominale.

Le problème de l'identification simultanément le nombre et la mise en place de dispositif UPFC est formulée en supposant le système en état normal et en utilisant une fonction objectif destiné à la maximisation de la sécurité sociale, la minimisation de branches surchargés. L'AG est un processus de recherche qui peut être utilisée pour la sélection des emplacements optimaux des dispositifs UPFCs et ces valeurs être installés sur un système électrique afin de minimiser la fonction objectif.

Le nombre total des UPFCs insérées dans le système d'alimentation est limitée, en raison de l'influence sur les caractéristiques de fonctionnement du système d'alimentation.

Dans l'algorithme d'optimisation, les questions qui doivent être notés sont les suivantes:

- Lieu de l'UPFC: Pas plus d'un UPFC peut être installé dans les calculs de flux de la puissance dans une seule branche;
- Paramètres de contrôle: La performance de l'AG dépend de paramètres de contrôle, telles que la taille de la population et la probabilité de croisement.

Donc la sélection de la valeur appropriée de paramètres d'AG a effet élevé pour obtenir la solution optimale [81].

Le temps de réponse total de la simulation pour un ensemble donné des UPFCs dans un réseau de puissance spécifique dépend du facteur de charge initiale et de la combinaison totale de toutes les itérations. En outre, l'exécution du temps des simulations à chaque itération est liée à différents paramètres tels que la taille du réseau, le nombre de générations d'algorithme génétique et sa population initiale.

La taille du pas de facteur de charge à chaque itération du processus d'optimisation est égale à 0.01; cela signifie que, après avoir trouvé une configuration réussie à un facteur de charge spécifique avec la valeur zéro pour la fonction fitness "*Fit*", l'algorithme augmente le facteur de charge existant (actuel) par la valeur de 0.01 .

La taille du réseau (le nombre de nœuds ainsi que le nombre de branches) à une grande influence sur le temps de simulation depuis le processus d'optimisation qui doit calculer la

fonction fitness pour chaque individu à chaque génération, cela montre que la taille de la matrice de fonction "Fit" est en relation avec le nombre de nœuds et de branches. A chaque itération d'allocation du processus, la valeur de *Fit* doit être calculée pour tous les individus des générations actuelles.

V.4. Systèmes étudiés et résultats de simulation:

Les systèmes tests choisies sont IEEE 14, 30 et 57 nœuds et les résultats de simulation sont montrés dans le tableau (V.1).

On laisse les mêmes paramètres de réglage de l'AG pour faire une comparaison entre les résultats trouvés.

V.4.1. Résultats de simulation:

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau (V.1): Résultats d'emplacements des UPFCs dans les réseaux choisis.

Système test	No. de dispositif	Type de dispositif	Emplacement de dispositif	Valeur de dispositif	λ_{max}	Pertes totales	
						Sans UPFCs	Avec UPFCs
14 Nœuds	2	UPFC	1 Branche	$V_{se} = 0.134$ p.u. $I_{sh} = -0.013$ p.u. $\theta_{se} = 103.401$ Degré	1.05	64 MW	62 MW
		UPFC	8 Branche	$V_{se} = 0.064$ p.u. $I_{sh} = 0.033$ p.u. $\theta_{se} = 15.311$ Degré			
30 Nœuds	6	UPFC	10 Branche	$V_{se} = 0.163$ p.u. $I_{sh} = -0.065$ p.u. $\theta_{se} = 228.997$ Degré	1.35	10 MW	8 MW
		UPFC	37 Branche	$V_{se} = 0.034$ p.u. $I_{sh} = 0.083$ p.u. $\theta_{se} = 47.043$ Degré			
		UPFC	15 Branche	$V_{se} = 0.082$ p.u. $I_{sh} = -0.065$ p.u. $\theta_{se} = 101.531$ Degré			
		UPFC	7 Branche	$V_{se} = 0.049$ p.u. $I_{sh} = 0.045$ p.u. $\theta_{se} = 70.794$ Degré			
		UPFC	11 Branche	$V_{se} = 0.180$ p.u. $I_{sh} = -0.009$ p.u. $\theta_{se} = 231.668$ Degré			
		UPFC	19 Branche	$V_{se} = 0.109$ p.u. $I_{sh} = 0.044$ p.u. $\theta_{se} = 122.244$ Degré			

Système test	No. de dispositif	Type de dispositif	Emplacement de dispositif	Valeur de dispositif	λ_{max}	Pertes totales	
						Sans UPFCs	Avec UPFCs
57 Nœuds	8	UPFC	43 Branche	$V_{se} = 0.111$ p.u. $I_{sh} = 0.011$ p.u. $\theta_{se} = 206.544$ Degré	1.07	391 MW	148 MW
		UPFC	40 Branche	$V_{se} = 0.128$ p.u. $I_{sh} = 0.008$ p.u. $\theta_{se} = 199.855$ Degré			
		UPFC	37 Branche	$V_{se} = 0.125$ p.u. $I_{sh} = -0.021$ p.u. $\theta_{se} = 104.264$ Degré			
		UPFC	53 Branche	$V_{se} = 0.088$ p.u. $I_{sh} = -0.049$ p.u. $\theta_{se} = 217.506$ Degré			
		UPFC	45 Branche	$V_{se} = 0.119$ p.u. $I_{sh} = 0.050$ p.u. $\theta_{se} = 173.838$ Degré			
		UPFC	60 Branche	$V_{se} = 0.111$ p.u. $I_{sh} = 0.005$ p.u. $\theta_{se} = 128.849$ Degré			
		UPFC	52 Branche	$V_{se} = 0.086$ p.u. $I_{sh} = -0.018$ p.u. $\theta_{se} = 135.202$ Degré			
		UPFC	47 Branche	$V_{se} = 0.102$ p.u. $I_{sh} = -0.010$ p.u. $\theta_{se} = 165.577$ Degré			

Les résultats ont mis en évidence le potentiel des UPFCs dans l'amélioration de l'efficacité du réseau ainsi que pour une gestion plus sûre de ce dernier. Un nombre maximum de dispositifs UPFCs, au-delà duquel il n'est plus possible d'accroître de manière significative la puissance transmissible, a été mis en évidence.

Les dispositifs UPFCs sont placés dans le système de manière à maximiser la puissance desservie aux consommateurs, par l'amélioration de la sécurité du système (les niveaux de tensions aux nœuds qui ne doivent pas s'écarter de plus 10% de leur valeur nominale et les puissances apparentes circulant dans les lignes dont la valeur doit rester inférieure à leur limite thermique).

Tous les résultats de simulation avant et après d'utiliser les UPFCs sont démontrés dans les figures ci-dessous.

A. Pour le système test 14 nœuds:

Le nombre de branches est: 20 branches.

Le nombre total des emplacements est: 20 emplacements.

Le taux d'amélioration de la capacité de charge du système est: 5%.

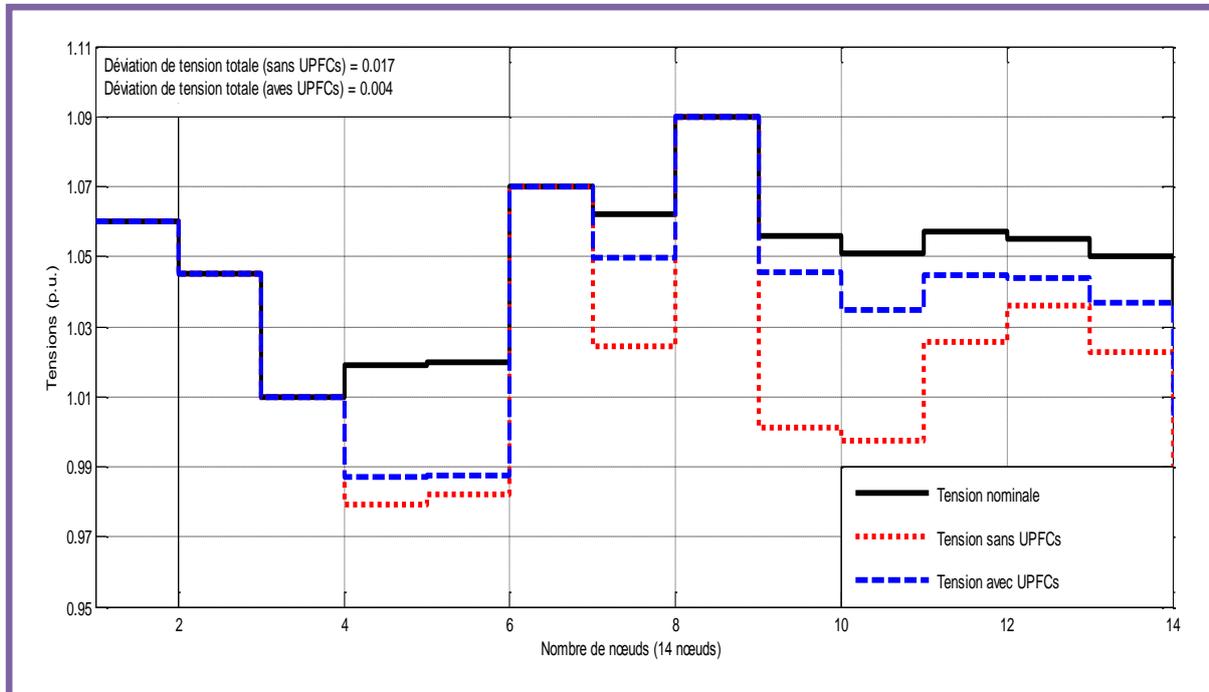


Figure (V.1): Influence des dispositifs UPFCs sur les tensions de nœuds (14 nœuds).

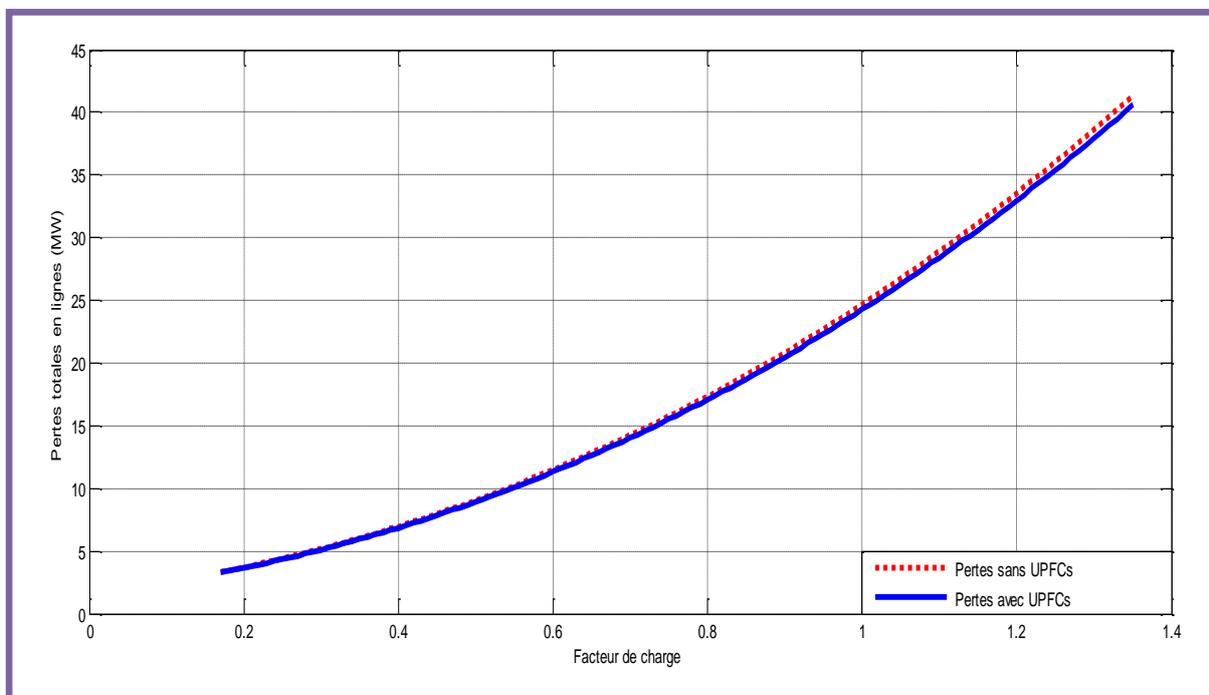


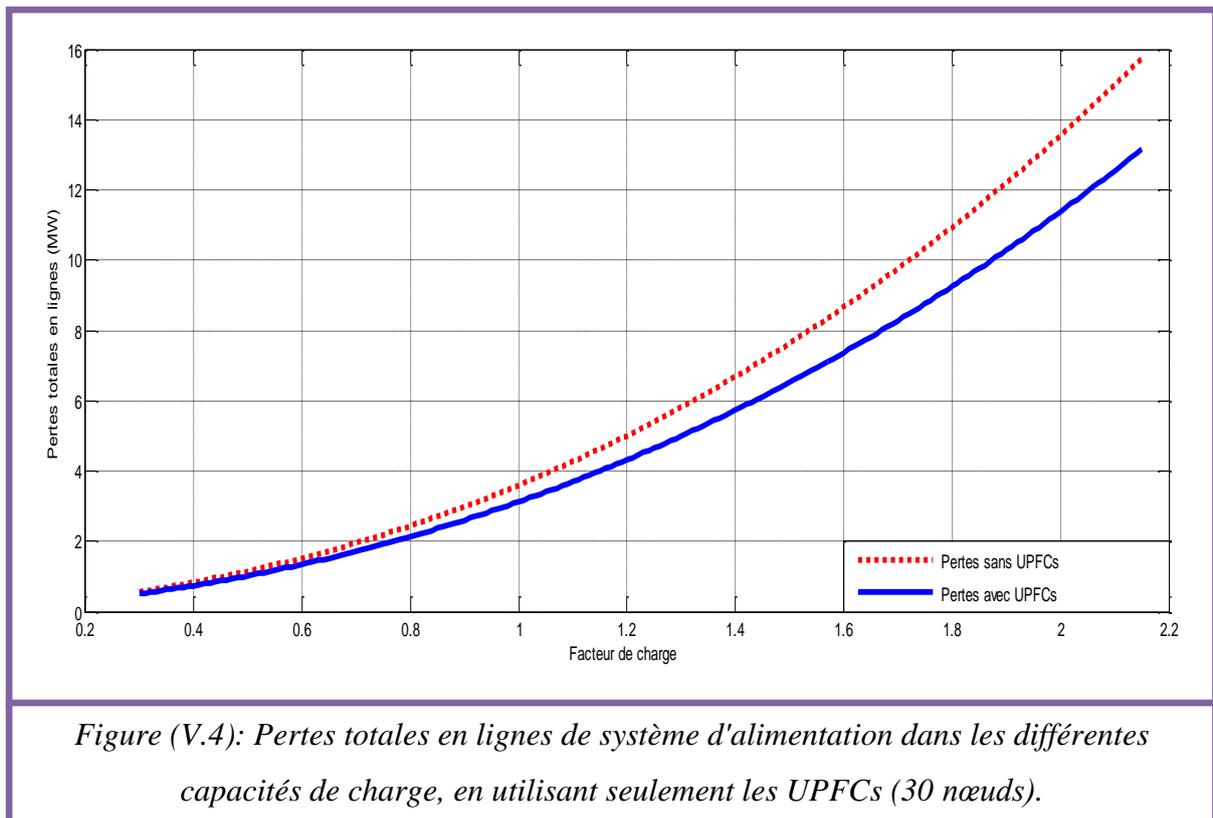
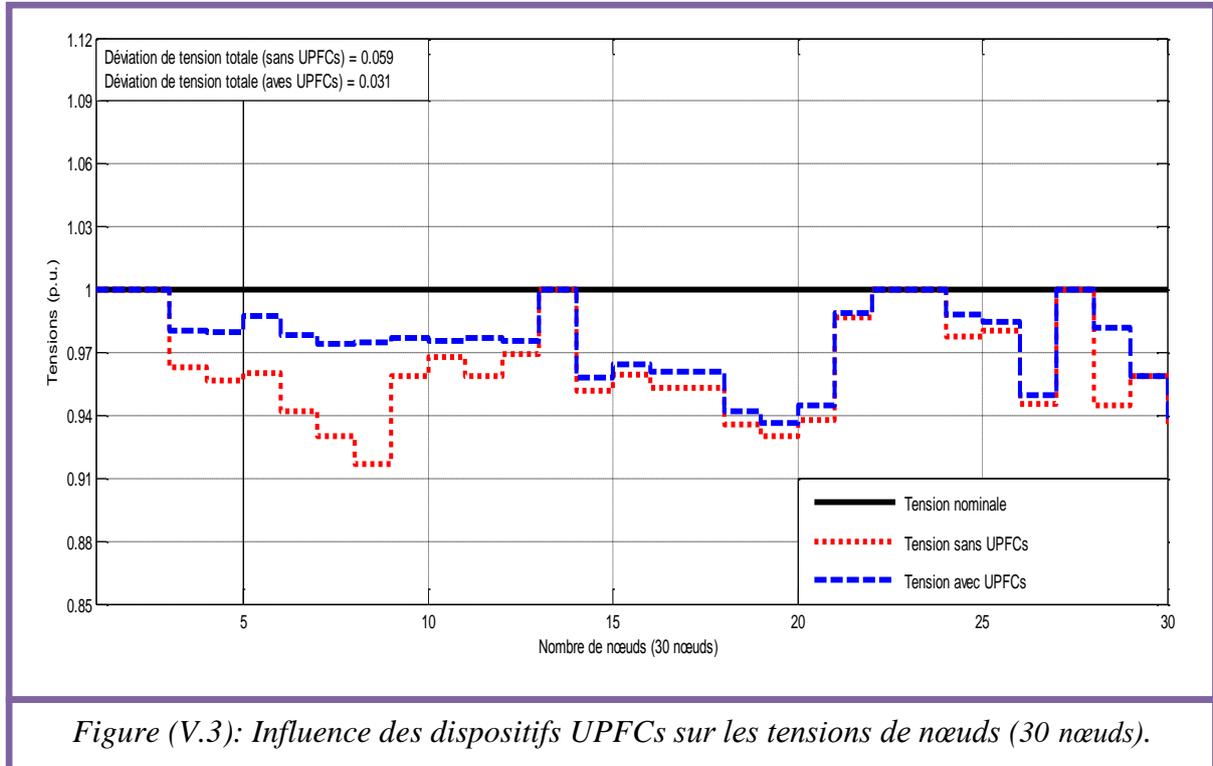
Figure (V.2): Pertes totales en lignes de système d'alimentation dans les différentes capacités de charge, en utilisant seulement les UPFCs (14 nœuds).

B. Pour le système test 30 nœuds:

Le nombre de branches est: 41 branches.

Le nombre total des emplacements est: 41 emplacements.

Le taux d'amélioration de la capacité de charge du système est: 35%.



C. Pour le système test 57 nœuds:

Le nombre de branches est: 80 branches.

Le nombre total des emplacements est: 80 emplacements.

Le taux d'amélioration de la capacité de charge du système est: 07%.

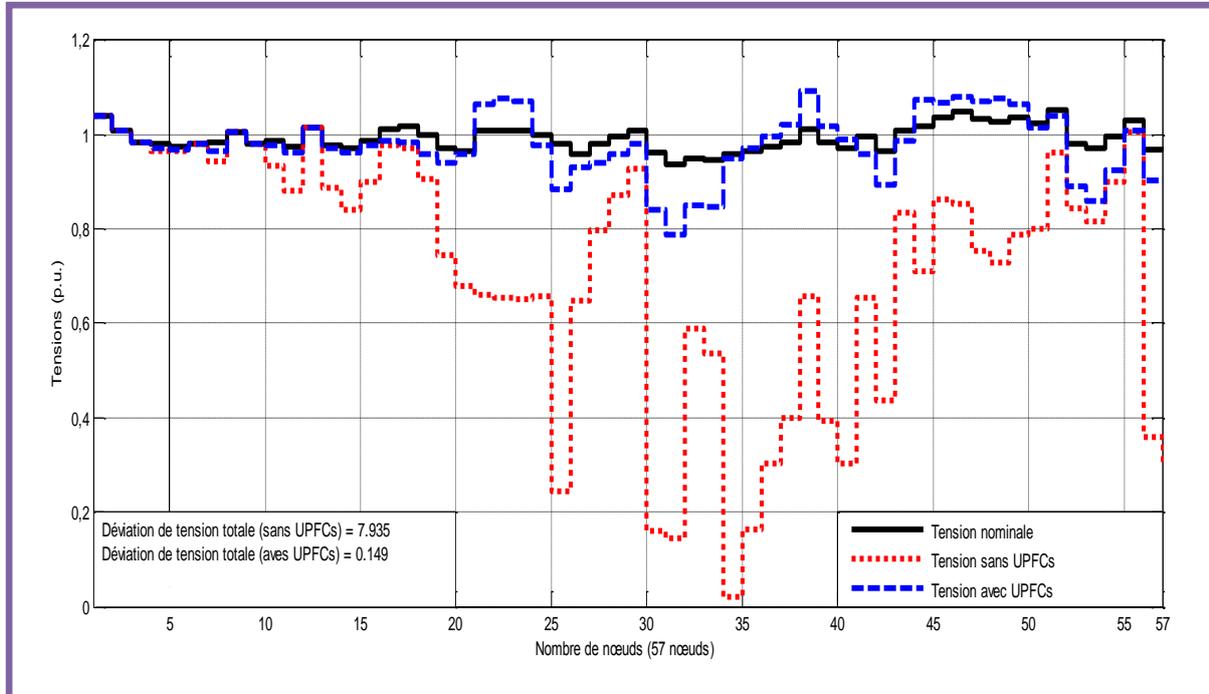


Figure (V.5): Influence des dispositifs UPFCs sur les tensions de nœuds (57 nœuds).

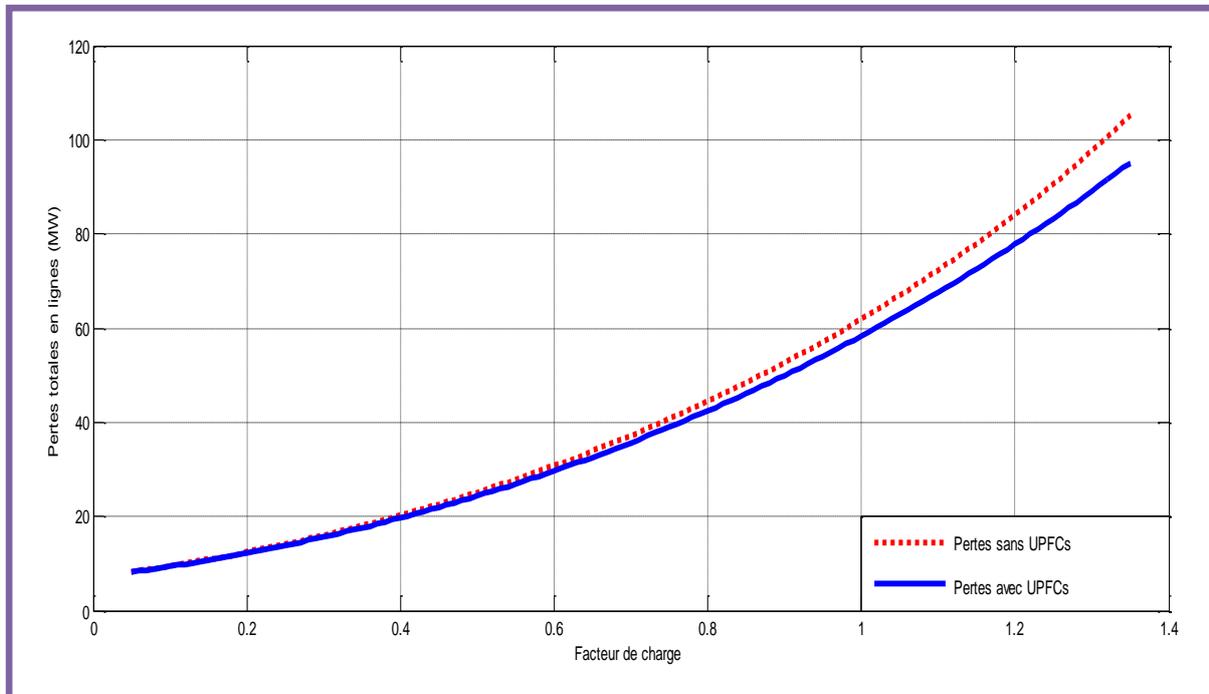


Figure (V.6): Pertes totales en lignes de système d'alimentation dans les différentes capacités de charge, en utilisant seulement les UPFCs (57 nœuds).

V.4.2. Discussions:

Selon le tableau (V.1), les placements des UPFCs sur le réseau standard IEEE 14 nœuds avec un facteur de charge maximal égal à 1.05 constatent que les jeux de barres les plus sensibles sont 1 et 8 (les tensions de ces jeux de barres ont dépassé leurs limites inférieures). Pour éviter ce problème on a choisie les jeux de barres 1 et 8 comme des lieux de renforcement en installant dans ces points deux UPFCs.

D'après les résultats obtenus de ce chapitre et le chapitre précédent, on constate que l'efficacité de l'UPFC apparaît clairement sur les réseaux longs. Le facteur de charge maximale dans le système test de 30 nœuds a été déterminée comme $\lambda_{max} = 1.35$, ce qui signifie que par l'installation de six UPFCs à ces emplacements optimaux avec leurs valeurs nominales, nous aurons une amélioration de 35% dans la capacité de charge du système.

A partir de tableau aussi, on constate qu'une diminution notable des pertes de transmission surtout dans le système test 57 nœuds (148 MW) et cela après l'optimisation par les UPFCs par rapport à celle sans optimisation (391 MW) et (166 MW) à celle du chapitre précédent. Pour les déviations de tensions, les résultats restent presque les mêmes.

Les figures (V.2), (V.4) et (V.6) montrent que les pertes totales de transport après l'insertion des dispositifs UPFCs sont réduites au moment où les capacités de charge augmentent. La diminution des pertes dans les réseaux permet d'assurer une qualité d'énergie aux consommateurs.

V.4.3. Remarques:

- La fonction des pertes est artificiellement augmentée en fonction des surcharges dans les lignes et des sous- et surtensions aux nœuds.
- On peut noter que le nombre limite de FACTS est inférieur a la moitié du nombre de mailles indépendantes du réseau, soit le réseau 57 nœuds (nombre de branches " b " – nombre de nœuds " n " + 1 = $80 - 57 + 1 = 24$).
- Les opérateurs de croisement et de mutation sont adaptés en fonction du nombre de dispositifs à placer dans le réseau. Plus le nombre des UPFCs est petit, plus la probabilité de mutation est grande et l'opérateur en question prend le dessus sur l'opérateur de croisement [75].

V.5. Conclusion:

Dans ce chapitre, la contribution de l'UPFC pour améliorer la capacité de charge des systèmes d'alimentation et réduire les coûts de production a été analysée sans compromettre la fiabilité de transmission. La technique d'optimisation évolutive (algorithme génétique) a été

appliquée avec succès pour le problème de l'emplacement optimal de l'UPFC dans les systèmes de puissance IEEE 14, 30 et 57 nœuds.

Les résultats de simulation indiquent que: avec une bonne estimation des variables de contrôle des UPFCs, une bonne détermination des placements optimaux des contrôleurs UPFCs et un bon calcul de la capacité de charge maximale et la charge critique des tensions de nœuds; on trouve un bon effet des dispositifs UPFCs sur la surcharge de certaines lignes dans les réseaux maillés, surtout interconnectés, la puissance maximale transmissible et les pertes totales de puissance réelle de système.

On conclut que l'UPFC est le plus dispositif efficace des FACTS, surtout si nous voulons augmenter la capacité de charge tout en réduisant les pertes en même temps.

Conclusion générale

Conclusion générale:

Les dispositifs FACTS sont capables de changer les paramètres de réseau d'une manière rapide et efficace afin de réaliser une meilleure performance du système. Ces contrôleurs sont employés pour augmenter la perfection de la performance dynamique des systèmes d'énergie en termes de stabilité de tension/angle tout en améliorant le profil de la capacité de transit de puissance et la tension [82].

Les FACTS sont des solutions pour aider les systèmes de puissance électrique, mais:

- Pas une solution universelle;
- Pas une alternative aux nouveaux composants du réseau.

Beaucoup d'aspects à investiguer:

- Choix du type de dispositif FACTS;
- Choix du modèle de FACTS;
- Choix de la localisation des FACTS;
- Protection pour les FACTS et pour le réseau;
- Interaction entre les FACTS et les autres éléments.

Dans cette thèse, les résultats ont été démontrés que tous les cas de charge croissante peuvent être le résultat de l'instabilité sur le système, et le placement optimal des FACTS par la technique d'algorithme génétique peut restaurer le système à un état stable.

L'avantage de l'algorithme génétique comme une méthode de placement optimal est la capacité de résolution de problèmes multi-objectifs. Par ailleurs, elle peut également être appliquée au problème de contrainte dont les contraintes peuvent être incluses dans la fonction fitness comme termes de pénalité ajoutée et lorsque les solutions sont des variables multiples.

Pour les réseaux tests IEEE choisis, les simulations ont montré que le placement optimal des FACTS en général et de l'UPFC en particulier permettait d'accroître la puissance desservie aux consommateurs. Des optimisations réalisées avec un seul type de FACTS à la fois ont mis en évidence que tous les dispositifs modélisés permettaient une meilleure utilisation du réseau, avec des avantages différents.

Le recours à des configurations multi-FACTS dans lesquelles tous les dispositifs étaient disponibles simultanément a permis d'obtenir les meilleurs résultats, chaque type de dispositifs étant utilisé de façon appropriée.

Perspectives

Perspectives:

Nos travaux ouvrent plusieurs axes de recherche pour l'avenir, on peut envisager les trois sujets de recherche suivants:

- Application de la méthode d'optimisation (AG) sur les réseaux électriques plus longs (jusqu'à 300 nœuds);
- Utilisation des méthodes intelligentes hybrides; par exemple (Algorithmes génétiques en plus de PSO) pour trouver les placements optimaux des FACTS, leurs types et les valeurs convenables dans les systèmes de grande puissance électrique, et éviter les inconvénients d'une seule méthode;
- Les résultats illustrent que l'installation d'un dispositif dans le réseau ne pouvait pas conduire à une meilleure sécurité du système de puissance et réduction des pertes du système d'alimentation en même temps, et que multi-type de FACTS doivent être placés dans des sites optimaux pour améliorer les marges de sécurité et réduire les pertes dans le réseau. Cette situation devrait être une étude économique et une combinaison de l'UPFC et des autres FACTS, par exemple: IPFC pour faire la coordination entre les différents types de ces dispositifs.

Annexe

A.2. Emplacement des branches sur les nœuds du réseau:

Ces emplacements sont indiqués au tableau ci-dessous.

No. de branche	du nœud No. au nœud No.
1	1-2
2	1-5
3	2-3
4	2-4
5	2-5
6	3-4
7	4-5
8	4-7
9	4-9
10	5-6
11	6-11
12	6-12
13	6-13
14	7-8
15	7-9
16	9-10
17	9-14
18	10-11
19	12-13
20	13-14

B.2. Emplacement des branches sur les nœuds du réseau:

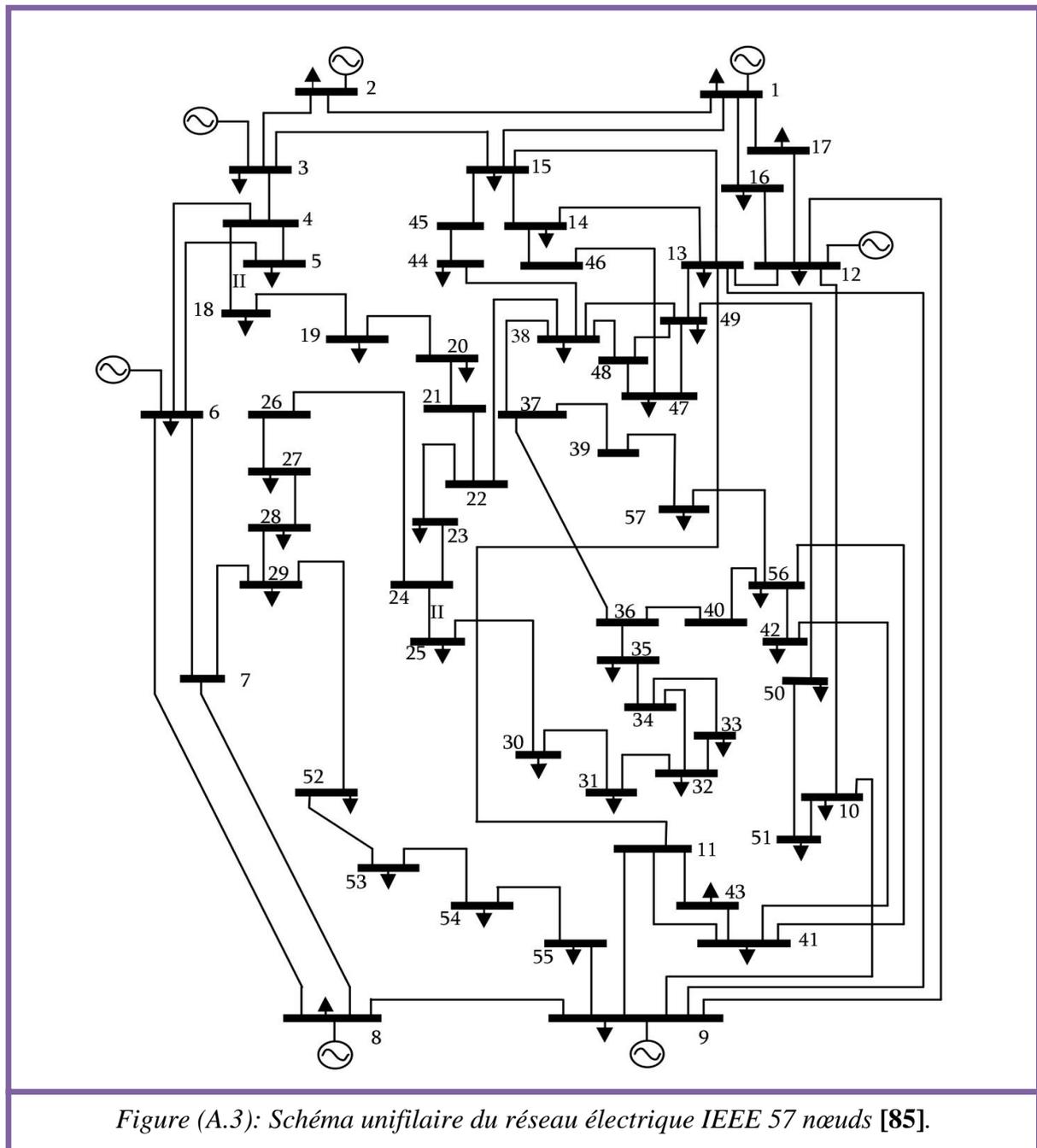
Ces emplacements sont indiqués au tableau ci-dessous.

No. de branche	du nœud No. au nœud No.	No. de branche	du nœud No. au nœud No.
1	1-2	22	15-18
2	1-3	23	18-19
3	2-4	24	19-20
4	3-4	25	10-20
5	2-5	26	10-17
6	2-6	27	10-21
7	4-6	28	10-22
8	5-7	29	21-22
9	6-7	30	15-23
10	6-8	31	22-24
11	6-9	32	23-24
12	6-10	33	24-25
13	9-11	34	25-26
14	9-10	35	25-27
15	4-12	36	28-27
16	12-13	37	27-29
17	12-14	38	27-30
18	12-15	39	29-30
19	12-16	40	8-28
20	14-15	41	6-28
21	16-17		

C. Réseau test IEEE 57 nœuds:

C.1. Schéma du réseau:

Ce réseau contient 80 branches.



Les données de système test IEEE 57 nœuds, « S.V.P. Visiter le site ci-dessous »

(Data, IEEE 57-bus test system, [Online],)

http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf57/pg_tca57bus.htm

Ou

<http://al-roomi.org/power-flow/57-bus-system>

C.2. Emplacement des branches sur les nœuds du réseau:

Ces emplacements sont indiqués au tableau ci-dessous.

No. de branche	du nœud No. au nœud No.	No. de branche	du nœud No. au nœud No.	No. de branche	du nœud No. au nœud No.	No. de branche	du nœud No. au nœud No.
1	1-2	21	5-6	41	7-29	61	47-48
2	2-3	22	7-8	42	25-30	62	48-49
3	3-4	23	10-12	43	30-31	63	49-50
4	4-5	24	11-13	44	31-32	64	50-51
5	4-6	25	12-13	45	32-33	65	10-51
6	6-7	26	12-16	46	34-42	66	13-49
7	6-8	27	12-17	47	34-35	67	29-52
8	8-9	28	14-15	48	35-36	68	52-53
9	9-10	29	18-19	49	36-37	69	53-54
10	9-11	30	19-20	50	37-38	70	54-55
11	9-12	31	21-20	51	37-39	71	11-43
12	9-13	32	21-22	52	36-40	72	44-45
13	13-14	33	22-23	53	22-38	73	40-56
14	13-15	34	23-24	54	11-41	74	56-41
15	1-15	35	24-25	55	41-42	75	56-42
16	1-16	36	24-25	56	41-43	76	39-57
17	1-17	37	24-26	57	38-44	77	57-56
18	3-15	38	26-27	58	15-45	78	38-49
19	4-18	39	27-28	59	14-46	79	38-48
20	4-18	40	28-29	60	46-47	80	9-55

Références bibliographiques

Références bibliographiques:

- [1] ENACHEANU Octavian, "Modélisation fractale des réseaux électriques", *Thèse de Doctorat*, Université Joseph Fourier, France, 15 Octobre 2008.
- [2] BENABID Rabah, "Optimisation multiobjectif de la synthèse des FACTS par les particules en essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques", *Mémoire de Magister en Electrotechnique*, Spécialité Analyse Conduite et Commande des Réseaux Electriques, Université de Laghouat, Algérie, 04 Septembre 2007.
- [3] ALIBI Abdelaïli, "Contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)", *Mémoire de Magister en Electrotechnique*, Spécialité Electricité Industrielle, Université de Batna, Algérie, 13 Juin 2009.
- [4] B. Larouci, L. Bensala, A. Tahri et M. Rahli, "Amélioration de l'Influence des Variations Paramétriques sur les Performances de l'UPFC", *Mediamira Science Publisher*, vol. 5, no. 1, pp. 187-191, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie, 29 Avril 2012.
- [5] TOUAFEK Mohamed Yaakoub, "Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par un contrôle neuro-flou des systèmes FACTS", *Mémoire de Magistère en Electrotechnique*, Spécialité Réseaux Electriques, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, Algérie, 11 Janvier 2012.
- [6] CHEVRIE François et GUÉLY François, "La logique floue", *Cahier technique Schneider n° 191*, vol. 28, no. 4, Grenoble, France, Edition Mars 1998.
- [7] Nadia, "Les algorithmes génétiques".
En ligne: (rfia2012.files.wordpress.com/2011/.../nadia_les_algoritmes-genetiques.p...?).
- [8] DONCESCU Andrei, "Les réseaux de neurones artificiels".
Disponible en ligne: (conf.laas.fr/ignotus/archives/Doncescu_reseaux_neuronnes.pdf?).
- [9] CHARIER Bertrand, "Qualité de l'énergie électrique et enseignement de l'électrotechnique".
Disponible en ligne: (bcharier.free.fr/setup/qualite_livret.pdf?).
- [10] Site internet: http://fr.wikipedia.org/wiki/Fréquences_des_courants_industriels
- [11] IGNATOVA Vanya, "Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique: Application aux creux de tension et à la pollution harmonique", *Thèse de Doctorat en Génie Electrique*, Université Joseph Fourier, France, 20 Octobre 2006.
En ligne: (hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/17/.../PDF/memoire_these_Ignatova-v2.pd...).

[12] FERRACCI Philippe, "La qualité de l'énergie électrique", *Cahier technique Schneider Electric n° 199*, vol. 32, no. 31, Grenoble, France, Edition Octobre 2001.

[13] MANESSE Georges, "Transformateurs Statiques: Principes et Fonctionnement", *Techniques de l'Ingénieur*, traité Génie Electrique, Conservatoire National des Arts et Métiers, France, 2008.

En ligne: (wcours.gel.ulaval.ca/2008/h/22230/.../transfo_desequilibre_groupement.pdf...).

[14] ALAIN Robert, "Qualité de l'Electricité dans le Marché Libéralisé", *Séminaire sur la Qualité de l'Electricité*, Université de Liège, Belgique, 8 Décembre 2010.

En ligne: (http://sitelec.org/download_page.php?filename=cours/qualite_electricite.pdf).

[15] EURELECTRIC, "Application guide to the European Standard EN 50160 on voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", *Electricity Product Characteristics and Electromagnetic Compatibility*, Union of the Electricity Industry EURELECTRIC, July 1995.

Disponible en ligne: (www.eurelectric.org/Download/Download.aspx?...?).

[16] BESANGER Yvon, "Vers l'amélioration de la sécurité des réseaux électriques de puissance", *Habilitation à diriger des recherches de l'institut national polytechnique de Grenoble*, Laboratoire d'électrotechnique de Grenoble, France, 04 Décembre 2006.

Disponible en ligne: (hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/17/29/45/PDF/HDR_Besanger.pdf).

[17] ALKHATIB Hasan, "Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques: optimisation de la régulation par une méthode metaheuristique", *Thèse de Doctorat en Génie Electrique*, Université Paul Cézanne d'Aix - Marseille III, France, 5 Décembre 2008.

Disponible en ligne: (tel.archives-ouvertes.fr/.../These_version_finale_Hasan_ALKHATIB...).

[18] LU Wei, "Le délestage optimal pour la prévention des grandes pannes d'électricité", *Thèse de Doctorat*, Spécialité Génie Electrique, Institut Polytechnique de Grenoble, France, 6 Juillet 2009.

[19] HAMADOU Zakaria, "Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique", *Mémoire de Magistère en Electrotechnique*, Spécialité Réseaux Electriques, Université de Sétif 1, Algérie, 20 Juin 2012.

[20] NAIMI Djemai, "Optimisation de l'intégration des ressources énergétiques décentralisées (RED) aux réseaux de distribution dans un marché de l'électricité dérégulé", *Thèse de Doctorat en Electrotechnique*, Université de Biskra, Algérie, 2013.

- [21] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, "Understanding FACTS: Concept and Technology of Flexible AC Transmission Systems", *IEEE Press*, New-York, 2000.
- [22] H. Perzor, "Evolution des Grands Systèmes Electriques et Utilisation des FACTS", *Journées d'étude SRBE-SEE*, Belgique, Novembre 1994.
- [23] B. Larouci, L. Benasla et M.Rahli, "Amélioration de l'Influence des Variations Paramétriques sur les Performances de l'UPFC par un Régulateur à Base de Logique Floue", *7^{ème} Conférence Internationale en Génie Electrique (CEE)*, pp. 90-94, Université de Batna, Algérie, 8- 10 Octobre 2012.
- [24] SEBAA Karim, "Commande intelligente pour l'amélioration de la stabilité dynamique des réseaux d'énergie électrique", *Thèse de Doctorat en Electrotechnique*, Spécialité Systèmes Electroénergétiques, Université des Sciences & des Technologies Houari Boumediene - Alger, Algérie, 15 Septembre 2008.
- [25] MANCER Nabil, "Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)", *Mémoire de Magister en Electrotechnique*, Spécialité Réseaux Electriques, Université Mohamed Khider - Biskra, Algérie, 28 Janvier 2012.
- En ligne: (www.univ-biskra.dz/.../contribution_optimisation_de_la_puissance_reactive.pdf?).
- [26] D. Stéphanie, "L'électronique de Puissance dans les Réseaux de Transport, les Systèmes Flexibles de Transport d'Energie en Courant Alternatif, FACTS", *Journée d'Etude du Groupe de Contact FNRS-GREPES*, Faculté Polytechnique de Mons, Belgique, 22 Mars 2006.
- [27] PASCUAL CAMACHO Juan José, "Contribution à la modélisation et à la commande d'un UPFC dans le cadre du développement des réseaux intelligents (SmartGrids)", *Mémoire d'Ingénieur CNAM*, Conservatoire National des Arts et Métiers - Paris, France, 8 juillet 2010.
- Disponible en ligne: (dumas.ccsd.cnrs.fr/docs/00/.../2010.TH_17988.Pascual.Juan.pdf?).
- [28] ZRIDA Jalel, "Réseaux de neurones, logique floue et algorithmes génétiques", *Leçon No.1 sur la logique floue*, Ecole Supérieure des Sciences et Techniques de Tunis, et Unité Signaux et Système-ENIT, Tunisie.
- [29] BAGHLI Lotfi, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques", *Thèse de Doctorat en Génie Electrique*, Université Henri Poincaré Nancy I, France, 14 Janvier 1999.
- Disponible en ligne: (tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/35/68/91/PDF/these_baghli_np.pdf).
- [30] ZOUAOUI Zouhir, "Commande des convertisseurs statiques DC/DC par la logique floue", *Mémoire de Magister en Electronique*, Spécialité Contrôle, Université de Batna, Algérie, 2007.

En ligne: (projets.developpez.com/attachments/download/667/lecture_LF_1_.pdf).

[31] ZIDANI Fatiha, "Introduction à la logique floue / Conception d'un contrôleur flou", *Cours de Première Année Magister en Electrotechnique*, Université de Batna, Algérie, Année Universitaire 2008/2009.

[32] SOUKKOU Ammar, "Modélisation & commande des systèmes industriels complexes par les techniques intelligentes", *Thèse de Doctorat en Electronique*, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, Algérie, 07 Octobre 2008.

[33] BOUISFI Achraf et BELRHALI Yasser, "Etude en simulation d'une régulation thermique par logique floue", *Projet de fin d'étude en Génie des Procédés*, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah - Fès, Maroc, 2010.

Disponible en ligne: (www.est-usmba.ac.ma/Rabi/PFE/PFE0910.pdf).

[34] DERNONCOURT Franck, "Introduction à la logique floue appliquée aux systèmes décisionnels", Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), France, 29 Décembre 2011.

En ligne: (ai-faq.com/.../NFE211-Presentation%20-%20Introduction%20à%20la%2...?).

[35] "Logique floue", 15 Février 2010.

Disponible en ligne: (math.unice.fr/~ah/ens/II/Fuzzy.pdf).

[36] SCHULZ Pierre, "Asservissement par logique floue", 19 Février 2002.

Disponible en ligne: (tom.poub.free.fr/blog/XUFO/Docs/.../SATH123.PDF).

[37] OUMAYA Mohamed et LIMAM Mohammed Lakhdar, "Commande par réseaux d'ondelette-floue", *Mémoire de Master en Automatique*, Université Kasdi Merbah - Ouargla, Algérie, Juin 2012.

[38] TOUAL Belkacem, "Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable", *Mémoire de Magister en Electrotechnique*, Spécialité Machines Electriques, Université de Batna, Algérie, 17 Octobre 2010.

[39] CORMIER Gabriel, "Systèmes intelligents", *Chapitre 4: Logique floue*, Université de Moncton, Canada.

En ligne: (www8.umoncton.ca/umcm-cormier_gabriel/.../GIND5439_Chapitre4.pd...?).

[40] CHEVALLIER Sylvain, "Logique floue", Université de Cergy-Pontoise, France, 15 Octobre 2009.

En ligne: (projets.developpez.com/attachments/.../M1IA-Cours3-fuzzylogic_1_.pdf).

[41] KARTOBI Lamia, "Optimisation de la synthèse des FACTS par les algorithmes génétiques et les essais particuliers pour le contrôle des réseaux électriques", *Mémoire de*

Magister en Electrotechnique, Spécialité Réseaux Electriques et Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique - Alger, Algérie, 04 Décembre 2006.

En ligne: (<http://www.mediafire.com/download.php?iz2wmzm0wzz>).

[42] Site internet: http://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_g%C3%A9n%C3%A9tique

[43] Site internet: <http://tpelvc-genetic-algorithm.hostzi.com/domaines.php>

[44] LASSOUAOUI Nadia, HAMAMI Latifa et NOUALI Nadia, "Les algorithmes génétiques: application à la segmentation des images", *RIST Vol.14 N°02*, Centre de Recherche sur l'Information Scientifique et Technique CERIST, Alger, Algérie, 2004.

Disponible en ligne: (www.webreview.dz/IMG/pdf/lasouaoui.pdf?).

[45] ABDELHADI Bachir, "Algorithmes génétiques", *Cours de Première Année Magister en Electrotechnique*, Université de Batna, Algérie, Année Universitaire 2008/2009.

[46] DRIDI Leïla, "Les algorithmes génétiques", *Thèse de doctorat*, INRS-ETE, Canada, 2005.

Disponible en ligne: (wcours.gel.ulaval.ca/2008/h/19968/default/5notes/Intro-AG-dridi.pdf?)

[47] TAOUCHE Rabah, "Prévision du comportement mécanique d'alliages biphasés par algorithmes génétiques et réseaux de neurones. Application aux systèmes WC-Co", *Thèse de Doctorat en Sciences, Spécialité Physique du Solide, Option Métallurgie*, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 19 Janvier 2010.

[48] SID Belkacem, "Optimisation topologique de structures par algorithmes génétiques", *Thèse de Doctorat*, Spécialité Sciences pour l'Ingénieur, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et l'Université de Franche-Comté, France, 05 Décembre 2006.

Disponible en ligne: (artur.univ-fcomte.fr/ST/GENIMECA/these/sid.pdf?).

[49] CHAPTAL Thomas et ESPIEUX Pierre, "Algorithmes génétiques", *Rapport de projet*, Institut Supérieur d'Informatique de Modélisation et de leurs Applications (ISIMA), France, 25 Juin 2012.

En ligne: (fc.isima.fr/~espieux/partage/projet/projet_zz1/.../rapportDeProjet.docx?).

[50] TERKI Amel, "Analyse des performances des algorithmes génétiques utilisant différentes techniques d'évolution de la population", *Mémoire de Magister en Electronique, Spécialité contrôle*, Université Mentouri - Constantine, Algérie.

Disponible en ligne: (www.umc.edu.dz/buc/theses/electronique/TER4682.pdf?).

[51] SEHAILIA Lamia, "Réseau bayésien à la détection de fraude", Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf (USTO) - Oran, Algérie.

Disponible en ligne: (reussirlem2info.files.wordpress.com/2013/02/ag.ppsm?).

[52] Réseaux de Neurones Artificiels.

En ligne: (www-lisic.univ-littoral.fr/~verel/TEACHING/08-09/sac.../cRdNV9.pdf?).

[53] MUXIKA-OLASAGASTI Efiout, "Application des réseaux de neurones à l'identification d'un axe de machine-outil", *Thèse de Doctorat*, Spécialité Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 22 Novembre 2002.

[54] NAÏT-SAÏD Nasreddine, "Les réseaux de neurones artificiels", *Cours de Première Année Magister en Electrotechnique*, Université de Batna, Algérie, Année Universitaire 2008/2009.

[55] G. Dreyfus, J.M. Martinez, M. Samuelides, M. B. Gordon, F. Badran, S. Thiria et L. Héroult, "Réseaux de neurones: méthodologie et applications", *Livre de 2^{ème} Edition*, Groupe Eyrolles, France, 2004.

[56] WIRA Patrice, "Réseaux de neurones artificiels: architectures et applications", *Cours sur les Réseaux de Neurones Artificiels*, Laboratoire MIPS - Université de Haute Alsace en France, Avril 2009.

Disponible en ligne: (www.trop.uha.fr/pdf/cours-wira.pdf?).

[57] "Les réseaux de neurones", *Chapitre trois*.

En ligne: (www.classification-society.org/csna/mda-sw/inform/these.../chap3.pdf?).

[58] BEZZINI Abdallah, "Commande prédictive non linéaire en utilisant les systèmes neuro-flous et les algorithmes génétiques", *Mémoire de Magister en Automatique*, Spécialité Commande et Identification des Systèmes Dynamiques, Université Mohamed Khider - Biskra, Algérie, 06 Juin 2013.

[59] Site internet: <http://alp.developpez.com/tutoriels/intelligence-artificielle/reseaux-de-neurones/>

[60] COTTRELL Marie, "Les réseaux de neurones: historique, méthodes et applications", Université Paris 1- Sorbonne, France.

Disponible en ligne: (<https://samos.univ-paris1.fr/archives/ftp/preprints/samos174.pdf>).

[61] Site internet: [tpebrodinsertise.wordpress.com/perceptron/?](http://tpebrodinsertise.wordpress.com/perceptron/)

[62] PHAM Quang Dung, "Réseaux de neurones pour la reconnaissance des formes", *Travail d'Intérêt Personnel Encadré*, Hanoi, Vietnam, 15 juillet 2005.

Disponible en ligne: (www.ifi.auf.org/site_data/rapports/tpe.../tipe-pham_quang_dung.pdf?).

[63] PETITJEAN Gérald, "Introduction aux réseaux de neurones".

Disponible en ligne: (https://www.lrde.epita.fr/~sigoure/cours_ReseauxNeurones.pdf).

[64] LABARRE Marc-Olivier, "Résumé: Réseaux de neurones", Mai 2002.

Disponible en ligne: (www.uqtr.quebec.ca/~biskri/Personnel/mol/RRN.doc?).

[65] VERGÉ Adrien, "Réseaux de neurones artificiels", 2009.

Disponible en ligne: (www.k-netweb.net/projects/tipe/reseauxdeneuronesartificiels.pdf?).

- [66] Site internet: <http://www.iro.umontreal.ca/labs/lbit/HTML/IFT3330/MethodesA-HTML/node9.html>
- [67] P. Habermehl et D. Kesner, "Réseaux de neurones".
Disponible en ligne: (www.pps.univ-paris-diderot.fr/~kesner/enseignement/iup/cours81.pdf?).
- [68] EL AYECH Hafedh et TRABELSI Abdelwahed, "Les réseaux de neurones artificiels pour la prévision du trafic aérien de passagers", Institut Supérieur de Gestion de Tunis, Tunisie, 11 mars 2003.
Disponible en ligne: (www.isg.rnu.tn/bestmod/FILES/hafedh.pdf?).
- [69] PREVOST Lionel, " Modèles connexionnistes, apprentissage, fusion d'informations", Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique, Groupe Perception Artificielle.
En ligne: (www.isir.upmc.fr/UserFiles/File/LPrevost/connex%201%20&%202.pdf?).
- [70] OULD ABDESLAM Djaffar, "Logique floue et réseaux de neurones pour la commande dans les systèmes électriques: filtrage actif parallèle", *Cours Ecole Doctorale*, Université de Haute Alsace, France, 22 Avril 2009.
Disponible en ligne: (<http://www.trop.mips.uha.fr/cours-ed/>).
- [71] SOUQUET Amédée, RADET Francois-Gérard, "Algorithmes génétiques", *TE de fin d'année*, France, 21 Juin 2004.
Disponible en ligne: (deptinfo.unice.fr/twiki/pub/Linfo/.../Radet-Souquet.pdf?).
- [72] G. DREYFUS, "Les réseaux de neurones", *Mécanique Industrielle et Matériaux n°51*, École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI), France, Septembre 1998.
Disponible en ligne: (www.neurones.espci.fr/Articles_PS/GAMI.pdf?).
- [73] GUILLAUME Rami, "Contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution", *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 09 Novembre 2006.
- [74] MAHDAD Belkacem, "Optimisation de l'écoulement de puissance en présence des éléments de transmission flexible (FACTS) en utilisant les algorithmes génétiques: application sur le réseau Algérien", *Thèse de Doctorat en Electrotechnique*, Spécialité Réseaux Electriques, Université de Biskra, Algérie.
- [75] GERBEX Stéphane, " Métaheuristiques appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique", *Thèse de Doctorat*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2003.

- [76] E. Ghahremani and I. Kamwa, "Optimal Placement of Multiple-Type FACTS Devices to Maximize Power System Loadability Using a Generic Graphical User Interface", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp.764-778, May 2013.
- [77] B. Bhattacharyya and S.K. Goswami, "Optimal Planning for the Placement of FACTS Devices by Differential Evolution Technique for the Increased Loadability of a Power System", *IEEE Conference Publications, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Asia-Pacific, China, 2012.
- [78] R. Mohamad Idris, A. Kharuddin, M.W. Mustafa, "Optimal Choice of FACTS Devices for ATC Enhancement Using Bees Algorithm", *Australian Power Engineering Conference (AUPEC)*, IEEE Conference Publications, Australia University, 2009.
- [79] L.J. Cai, I. Erlich and G. Stamtsis, "Optimal Choice and Allocation of FACTS Devices in Deregulated Electricity Market Using Genetic Algorithms ", *Power Systems Conference and Exposition (PES)*, IEEE Conference Publications, vol.1, pp. 201-207, 2004.
- [80] P.K. Tiwari and Y.R. Sood, "Optimal Location of FACTS Devices in Power System Using Genetic Algorithm", *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, IEEE Conference Publications, pp. 1034-1040, 2009.
- [81] MINOOIE Behzad and SEDIGHIZADEH Mostafa, "Optimal Site and Parameters Setting of UPFC Based on Hybrid Genetic Algorithm for Enhancing Loadability", *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences (TJEAS)*, pp. 1062-1070, 2013.
Disponible en ligne: (tjeas.com/wp-content/uploads/2013/.../1062-1070.pdf).
- [82] H. Guentri, F. Lakdja, et M. Laouar, "Utilisation d'un Outil de Simulation pour l'Etude de Transit de Puissance avec et sans Dispositifs FACTS", *2^{ème} Conférence Internationale en Electroniques et Pétrole*, Université d'Ouargla, Algérie, 5-6 Mars 2013.
- [83] K. Sameh, K. Mena and A.C. Claudio, " Modeling and simulation of IEEE 14 Bus system with FACTS controllers", Technical Report #2003 – 3.
Disponible en ligne: ([https://ece.uwaterloo.ca/.../IEEEBenchmarkTFreport....](https://ece.uwaterloo.ca/.../IEEEBenchmarkTFreport...)).
- [84] Site internet: http://fglongatt.org/OLD/Test_Case_IEEE_30.html
- [85] Site internet: <http://al-roomi.org/power-flow/57-bus-system>

Abstract: With the increasing electric power demand, the operation of power system becomes more complex to operate within the indices power quality, and therefore will become less secure. The advent of Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) technology has coincided with the major restructuring of the electrical power industry; it can provide significant benefits in increasing system transmission capacity and power flow control flexibility and rapidity. Several types of FACTS exist and choosing the appropriate device depends on the objectives to reach. Unified Power Flow Controller (UPFC) is one of the most effective FACTS devices for enhancing power system security; however, to what extent the performance of UPFC can be brought out, it highly depends upon the location and parameter setting of this device in the system. A lot of research has been done on determining the optimal locations of FACTS devices in power systems. There are several methods permitting to find the optimal locations of FACTS devices according to specified criteria and constraints. Among these methods are found the Genetic Algorithm (GA) method. The latter is a global search and optimization technique which is based on the mechanisms of natural selection and genetics; it can search several possible solutions simultaneously and do not require any prior knowledge of the objective function. In this thesis, genetic algorithms technique is used to solve the problem of choosing the location and rating of FACTS to install. Five types of FACTS devices have been used in this study namely: SVC, TCSC, TCVR, TCPST and UPFC. These FACTS devices are used to maximize the system loadability in the network. Their position and size are determined using coefficients calculated when the load increases. To validate the efficacy of the technique used, has been applied on many IEEE standard electrical network test (14, 30 and 57 bus) using the MATLAB program.

Key words: Indices power quality, FACTS, UPFC, GA, global optimization, objective function, SVC, TCSC, TCVR, TCPST, loadability, MATLAB program.

ملخص: مع تزايد الطلب على الطاقة الكهربائية، يصبح تشغيل نظام الطاقة أكثر تعقيدا في العمل ضمن المعايير القاعدية المعمول بها، وبالتالي يصبح أقل أمنا. وقد تزامن ظهور تكنولوجيا أنظمة التعويض الدينامية المطواعة (FACTS) مع إعادة هيكلة كبرى لإنتاج الطاقة الكهربائية؛ هذه الأجهزة بإمكانها أن توفر فوائد هامة عن طريق زيادة قدرة استغلال الطاقة المنتجة للنظام والتحكم المرن في تدفق القدرة والسرعة في الاستجابة. هناك عدة أنواع من عناصر التعويض ويعتمد اختيار الجهاز المناسب على الأهداف المرجوة. يعتبر مغير تدفق الطاقة الشامل (UPFC) أحد أنظمة التعويض المرنة الأكثر فعالية في تعزيز أمن نظام الطاقة؛ لكن، إلى أي مدى يمكن أن يكون أداءه ناجعا، إنه يعتمد بشكل كبير على تحديد الموقع المناسب والمقادير المميزة لهذا الجهاز في النظام. ولقد أجريت الكثير من الأبحاث على تحديد المواقع المثلى لأجهزة التعويض في أنظمة الطاقة. يوجد العديد من الطرق لتحديد الأماكن المثلى لأجهزة التعويض المرنة وفقا لمعايير وقيود محددة. ومن بين هذه الطرق توجد طريقة خوارزمية الهندسة الوراثية (AG). هذه الأخيرة هي تقنية للبحث والحساب الشامل، تقوم على آليات الانتقاء الطبيعي وعلم الوراثة؛ بحيث يمكنها البحث عن مختلف الحلول الممكنة في وقت واحد ولا يتطلب أي معرفة مسبقة من دالة الغاية. في هذه الأطروحة، استخدمنا تقنية الخوارزميات الوراثية لإيجاد حل لمشكلة اختيار الموقع الأمثل وكذا المقادير المميزة لعناصر التعويض المرنة المراد تثبيتها. وقد استعملنا خمسة أنواع من أجهزة التعويض الدينامية في هذه الدراسة وهي: SVC، TCSC، TCVR، TCPST و UPFC. واخترنا هذه العناصر لزيادة قدرة الشحن للنظام في الشبكة، ويتم تحديد مكان وضعها وحجمها باستخدام معاملات يتم حسابها عند زيادة الحمولة. وليبيان مدى فعالية التقنية المستخدمة فقد تم تطبيقها على جملة من شبكات الاختبار القياسية و بمقاييس مختلفة وهي 14، 30 و 57 قضيب تجميع، وذلك بواسطة برنامج المحاكاة (MATLAB).

كلمات مفتاحية: المعايير القاعدية، FACTS، UPFC، خوارزمية الهندسة الوراثية، الحساب الشامل، دالة الغاية، SVC، TCSC، TCVR، TCPST، قدرة الشحن، برنامج MATLAB.