



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمار تلجدج بالأغواط

UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUCAT

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : Génie électrique

Mémoire de MASTER

Domain : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Option : Réseaux Electriques

Par: **Attia Haithem**
Hadjadj Rabeh

THEME

Amortissement des Modes Interrégionaux par des Stabilisateurs de Puissance Intelligents

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mr.Arif Salem

Mr.Mekhanet Mohammed

Mme.Chettih Saliha

Professeur.

M.CB.

Professeur.

Président

Rapporteur

Examinatrice

Année Universitaire 2019/2020

ملخص:

يؤثر نظام الإثارة للمولدات التي تشكل خصائص الأحمال على أنماط اهتزازات بين المناطق. وبالتالي، فإن هذه الأنماط لها خصائص أكثر تعقيداً من تلك الخاصة بالأنماط المحلية. نظرًا لأن الأوضاع بين المناطق تتضمن مولدات متعددة، فإن التخميد الجيد لهذه الأنماط يتطلب استخدام مثبتات الطاقة التي توضع في دوائر إثارة المولد. تتميز مثبتات الطاقة بمعاملاتها، ويجب تكيف هذه المعاملات مع نقطة التشغيل. أحد الحلول هو استخدام الذكاء الاصطناعي لتصميم أنظمة مثبتات استطاعة قابلة للتكيف.

الكلمات المفتاحية: مثبت استطاعة، متكيف، ذكاء اصطناعي، أنماط بين المناطق، تحسين.

Résumé :

Le système d'excitation des générateurs constituant les caractéristiques des charges affecte les oscillations des modes interrégionaux. Ainsi, ces modes présentent des caractéristiques plus complexes que ceux des modes locaux. Étant donné que les modes interrégionaux impliquent plusieurs générateurs, un bon amortissement de tels modes, exigent l'utilisation des stabilisateurs de puissance placée au niveau des circuits d'excitation des générateurs. Les stabilisateurs de puissance sont caractérisés par leurs paramètres, ces paramètres doivent être adaptés au point de fonctionnement. Parmi les solutions, c'est d'utiliser l'intelligence artificielle pour la conception des PSSs adaptatives.

Mots clés : *Stabilisateur de Puissance ; Adaptative ; Intelligence Artificielle ; modes Interrégionaux ; Optimisation.*

Abstract :

The excitation system of the generators constituting the loads characteristics affect the interregional modes oscillations. Thus, these modes have more complex characteristics than those of the local modes. Since interregional modes involve multiple generators, good damping of such modes requires the use of power stabilizers placed at the generator excitation circuits. Power stabilizers are characterized by their parameters, these parameters must be adapted to the operating point. One of the solutions is to use artificial intelligence to design adaptive PSSs.

Key words: *Power System Stabilizers PSS; Adaptive, Artificial Intelligence; Interregional modes; Optimization*

Remerciements

Nous tenons à remercier notre encadreur de mémoire Monsieur Mekhanet Mohammed pour sa disponibilité le long de la réalisation de ce travail, et pour tous les conseils et les orientations qu'il n'a pas cessé de nous prodiguer. À tous les membres du jury qui méritent nos remerciements les plus sincères pour avoir accepté de juger ce présent travail. Nous remercions également tous ceux qui ont de près ou de loin aidé à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Nous dédions ce travail à la mémoire de nos grandes
mères et grands-pères

À nos très chers parents.

À nos frères et sœurs,

À tous les membres de nos familles,

À nos très chers amis,

À tous les enseignants du département Electrotechnique.

Liste des figures

Figure I.1. Structure générale d'un système de puissance.....	04
Figure I.2. Modèle de générateur.	05
Figure I.3. (a)-Représentation du circuit électrique d'une machine synchrone (b)-Enroulements équivalents biphasés dans le repère de Park	05
Figure I.4. Diagramme des phases relatives à la $i^{\text{ème}}$ machine d'un système multi machine	06
Figure I.5. Couples mécanique et électrique agissant sur l'arbre d'un générateur.....	07
Figure I.6. Différentes actions des régulateurs sur une unité de production	08
Figure I.7. Régulateur de vitesse de la turbine.....	09
Figure I.8. Modèle simplifié de l'excitation	10
Figure I.9. Modélisation de charge.....	10
Figure I.10 Modèle de compensateur	11
Figure I.11. Modèle de ligne.....	11
Figure I.12. Modèle de transformateur.....	12
Figure I.13. Modèle simplifié de transformateur	12
Figure I.14. Classification des différents types de la stabilité de système de puissance	13
Figure I.15. Classification de la stabilité de l'angle du rotor	14
Figure I.16. Etapes de l'analyse de stabilité aux petites perturbations.....	15
Figure I.17. Représentation par fonctions de transfert d'un système multi-machine.....	19
Figure I.18. Modèle générale du stabilisateur de puissance	21
Figure I.19. Différents blocks de PSS du $i^{\text{ème}}$ machine	21
Figure II.1. Classification des métaheuristiques	26
Figure II.2. Organigramme général de l'algorithmes génétiques	28
Figure II.3. Concept de modification d'un point de recherche par PSO.....	30
Figure II.4. Recherche du concept avec des agents dans un espace de solution par PSO.....	31
Figure II.5: Organigramme général du PSO.....	32
Figure II.6. Organigramme général de la méthode de la recherche Taboue.....	36
Figure II.7. a) Photo de quelques cellules nerveuses b) Schéma représentatif de la structure du neurone.....	37

Figure II.8. Structure d'un neurone formel.....	37
Figure II.9. Réseau de neurones à i entrées, j sorties et deux couches cachées.....	39
Figure II.10. Forme canonique des réseaux de neurones bouclés.....	39
Figure III.1 Déviations de vitesse du générateur 1(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN).....	45
Figure III.2. Déviations de vitesse du générateur 2(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN).....	46
Figure III.3. Déviations de vitesse du générateur 11(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN).....	46
Figure III.4. Déviations de vitesse du générateur 12(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN).....	47
Figure III.5. Déviations d'angle du générateur 1(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN).....	47
Figure III.6. Déviations d'angle du générateur 2(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN).....	48
Figure III.7. Déviations d'angle du générateur 11(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN).....	48
Figure III.8. Déviations d'angle du générateur 12(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN).....	49

Liste des tableaux

Tableau II.1. Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel.....	42
Tableau III.1. Paramètres structurels des réseaux de neurones	43
Tableau III.2. Les erreurs quadratiques des réseaux de neurones	44
Tableau III.3. Résultats obtenus par le RN.....	44
Tableau III.4. Comparaison des résultats d'apprentissage RN avec les résultats GA.....	44
Tableau III.5. Comparaison des déviation de vitesse	49
Tableau III.6. Comparaison des déviation des angles.....	50

E_{fd}	: Tension d'excitation
E'_q	: Force électromotrice transitoire d'axe en quadrature
G_{PSS}	: Fonction de transfert du PSS
I_d	: Courant d'armature directe
I_q	: Courant d'armature quadrature
$K_1 \dots K_6$	: Matrices de linéarisation
K_A	: Gain de l'AVR
K_c	: Gain du PSS
P_e	: Puissance électrique active
P_m	: Puissance mécanique
Q_e	: Puissance électrique
\bar{S}	: Puissance apparente complexe
T'_0	: Constante de temps transitoire d'axe directe
T_e	: Couple électrique
T_m	: Couple mécanique
T_ω	: Constante de temps du filtre du PSS
\underline{U}	: Vecteur de commande
V_d, V_q	: Composante directe et composante quadrature de tension terminale
X_d, X_q	: Réactances synchrones d'axe directe et en quadrature
X'_d	: Réactance transitoire d'axe directe
Y_r	: Matrice admittance réduite
y_t	: Admittance série du transformateur
ω_0	: Vitesse angulaire de synchronisme
$\angle G_{PSS}$	: Angle de phase du PSS
AVR	: Régulateur de tension (en anglais : Automatic Voltage Regulator)
PSS	: Stabilisateur de puissance (en anglais : Power System Stabilizer)
Ω	: Vitesse angulaire
Γ	: Matrice de perturbation
A	: Matrice d'état du système
B	: Matrice de commande
D	: Constante d'amortissement
H	: Constante d'inertie

I	: Courant d'armature du générateur
A	: Matrice d'identité
S	: Opérateur de Laplace
V	: Tension terminale du générateur
f	: Fréquence
t	: Temps
α	: Partie réelle de la valeur propre
β	: Partie imaginaire de la valeur propre
δ	: Angle de rotor
ξ	: Facteur d'amortissement
λ	: Valeur propre

Table des matières

Résumé.....	I
Remerciements.....	II
Dédicace.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VI
Liste des symboles.....	VII
Table de matière.....	VIII
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Modélisation et stabilité du système de puissance	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Modélisation des éléments du réseau	5
I.2.1 Modélisation d'un générateur.....	5
I.2.2 Modélisation des alternateurs :.....	5
I.2.2.a Equations électriques :.....	6
I.2.2.b Equations mécaniques :.....	7
I.2.3 Modélisation des systèmes de régulation :.....	8
I.2.3.1 Régulation de vitesse :.....	9
I.2.3.2 Régulation de tension :.....	10
I.2.4 Modélisation de la charge	10
I.2.5 Modélisation d'une compensation shunt.....	11
I.2.6 Modélisation de la ligne.....	11
I.2.7 Modélisation des transformateurs.....	12
I.3. Classification des différents types de la stabilité de système de puissance	13
I.3.1. Stabilité de l'angle du rotor.....	14
I.3. 2. Modes rotorique du générateur synchrone.....	15
I.4. Analyse de stabilité	16
I.4.1. Linéarisation.	17
I.4.2. Valeurs propres	19
I.4.3. Stabilisateurs de puissance (PSS)	20

I.5. Analyse de la stabilité d'un système multimachine	22
I.6. Conclusion.....	23
CHAPITRE II : Métaheuristiques et réseaux de neurones	
II.1. Introduction.....	24
II.2. Définitions.....	24
II.3. Métaheuristiques.....	24
II.3.1. Caractéristiques des métaheuristiques	25
II.3.2. Classification des métaheuristiques.....	26
II.4. Méthodes à base de population.....	26
II.5. Optimisation par les algorithmes génétiques	27
II.5.1. Les opérateurs génétiques	27
II.5.1.1 La sélection.....	27
II.5.1.2 Le croisement	27
II.5.1.5 La mutation... ..	27
II.5.1.4 Les stratégies d'évolution	28
II.6. Optimisation par Essaim de Particules	29
II.7. Méthodes de recherche locale	32
II.8. Méthode de Recherche Taboue	33
II.9 Principe et définition des réseaux de neurones.....	36
III.9.1 Neurone biologique	36
III.9.2 Neurone formel ou artificiel	37
III.10 réseaux de neurones	38
III.10.1 Réseaux de neurones non bouclés	38
III.10.2 Réseaux de neurones bouclés (ou récurrents).....	39
II.11. Conclusion	40
CHAPITRE III : Applications et résultats	
III.1 Introduction.....	41
III.2 Formulation de problème.....	41
III.3 Amélioration de la stabilité.....	42
III.3.1 Amélioration de la stabilité par les PSS.....	42

III.4 Optimisation des PSSs d'un système multi-machines.....	42
III.4.1 Paramètres PSSGA.....	42
III.4.2 Résultats des PSSs optimisés	43
III.5 Application RN au réseau électrique multi-machine	43
III.6 Interprétation des résultats	50
III.7 Conclusion	51
Conclusion générale.....	52
References bibliographiques.....	53
Annexe I : Données du réseau 2 régions 4 -machines	56
Annexe II : Paramètres des PSSs optimisés par l'algorithme génétique	58

Introduction générale

Depuis une vingtaine d'années, les grands réseaux électriques se trouvent obligés de fonctionner à pleine puissance et souvent aux limites de la stabilité. L'amélioration de la stabilité aux petites perturbations, en particulier l'amortissement des oscillations interrégionales, est donc devenue un objectif prioritaire. Les interactions entre les générateurs de différentes régions et les régulateurs utilisés nécessitent une optimisation globale de leurs performances : c'est le meilleur moyen pour assurer le comportement optimal de l'ensemble. L'objectif de notre travail est d'assurer un amortissement maximum, aussi bien des modes interrégionaux que des modes locaux, à l'aide des stabilisateurs de puissance (PSS) généralement utilisés pour l'amortissement des modes électromécaniques locaux. Pour ce faire, nous avons développé une méthode d'optimisation globale basée sur les algorithmes génétiques et une fonction multi objectif utilisant les paramètres de stabilité relative et de stabilité absolue déterminés à partir de l'analyse des valeurs propres du système. Nous avons analysé l'influence de l'augmentation progressive du nombre de variables à optimiser simultanément (paramètres des PSSs, emplacement et nombre de ces derniers). La méthode que nous proposons permet un réglage optimal des PSSs avec la meilleure localisation possible et un nombre réduit de PSSs. Nous avons proposé en outre une nouvelle méthode d'optimisation utilisant des contraintes dynamiques adaptatives de l'espace de recherche afin d'améliorer les performances et la rapidité de convergence de cet algorithme. Les performances de ces méthodes d'optimisation ont été évaluées sur le réseau multi-machine interconnecté New England/New York par analyse des valeurs propres du système et simulations temporelles tant sur le modèle linéarisé que sur le modèle non linéaire original [1].

Ces oscillations électromécaniques de faibles fréquences sont associées à l'angle de rotor des machines synchrones fonctionnant dans un système les reliant ensemble par des lignes de transmission longues avec d'autres groupes des machines. Celles-ci limitent la capacité de transfert des systèmes de puissance et continuent à se développer entraînant la perte de synchronisme et la séparation du système si aucune réponse adéquate n'est rapidement prise. Pour surmonter le problème des oscillations électromécaniques et améliorer l'amortissement du système, des signaux supplémentaires stabilisateurs sont ajoutés dans le système d'excitation via le régulateur de tension. L'ajout d'un stabilisateur de puissance (PSS : Power System Stabilizer) au niveau du circuit d'excitation des générateurs est le moyen le plus efficace et le plus couramment utilisé pour amortir les oscillations électromécaniques et assurer la stabilité

de système, a suscité une attention permanente de la communauté scientifique, fournisseurs et chercheurs, concernée par l'énergie électrique.

Compte tenu de la variété des conditions de fonctionnement et de la sévérité des incidents, les équipements de commande installés actuellement sur les réseaux peuvent s'avérer trop limités ou insuffisants pour répondre efficacement aux diverses perturbations. En conséquence, les opérateurs de réseaux cherchent à en optimiser leur fonctionnement tout en maintenant un niveau de sécurité satisfaisant [1].

Un système de puissance est un système hautement non linéaire qui fonctionne dans un environnement en évolution continue : charges, puissance de génération, topologie du réseau, ... etc

Le système peut aussi être soumis à des perturbations ; ces perturbations peuvent être faibles ou importantes. De petites perturbations, sous forme de variations de charge, se produisent continuellement. Le système doit être capable de "répondre" de façon acceptable aux besoins de la charge. Le système doit également être capable de résister à de nombreuses perturbations d'une nature sévère comme la foudre, la perte d'une unité de génération, un court-circuit sur une ligne de transmission [1].

Les perturbations qui surviennent sur un réseau entraînent divers modes d'oscillations électromécaniques sur les alternateurs, couvrent une plage de fréquences typiquement comprise entre 0,04 et 4,0 Hz [2].

On distingue les oscillations en trois catégories : locales (intergroupes, inter centrales), interrégionales et globales qui influent considérablement sur la stabilité du réseau et les limites de transit. Dans une perspective d'optimisation des réseaux exploités au maximum de leur potentiel, et en vue d'assurer la fiabilité et la continuité du service de transport, il importe de pouvoir compter sur un outil permettant de bien contrôler ce phénomène. Ces oscillations peuvent être considérablement amorties en utilisant des systèmes en boucle fermée avec des systèmes de contrôle adaptés. Au fil des années, un effort de recherche important était effectué pour une meilleure conception des contrôleurs tels PSSs (power system stabilizer).

Le PSS est conçu pour présenter un couple électrique proportionnel aux variations de la vitesse du rotor, ceci est réalisé par une stabilisation supplémentaire ΔU_{PSS} appliqué au régulateur automatique de tension (AVR) du générateur [3].

Ce mémoire s'articule autour de l'amélioration de la stabilité dynamique d'un système de puissance multimachine, en utilisant pour cela des stabilisateurs type MB-PSSs et MB-PSS-TS. Les paramètres de ces derniers sont déterminés par le biais d'une technique

d'optimisation. Pour atteindre ces objectifs de recherche, la rédaction de ce mémoire est comme suit :

Le premier chapitre concerne la modélisation et la stabilité du système de puissance.

Par contre, le second chapitre est conçu pour donner un aperçu sur les méthodes Métaheuristiques et présenter les dispositifs de stabilisation PSSs.

Le dernier chapitre est destiné aux applications et aux résultats de l'étude effectuée sur un réseau modèle de 2 régions, 4 machines. L'apprentissage du RN est faite à travers une base de données, générée par l'algorithme génétique.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une discussion sur l'ensemble des résultats et une conclusion pour clôturer ce travail et quelques perspectives sont dévouées.

CHAPITRE I

Modélisation et Stabilité du Système de Puissance

I.1 Introduction

Les réseaux électriques sont des systèmes dynamiques, complexes qui travaillent 24 heures sur 24 heures pendant toute l'année. Ainsi, ils doivent assurer les fonctionnalités en permanence. Le bon fonctionnement du réseau permet d'avoir un équilibre permanent entre la production et la consommation. Le maintien de cet équilibre est difficile, vu que les réseaux sont le siège de différents types de perturbations.

Un système de puissance est constitué de trois parties essentielles aux fonctions différentes :

- La production : cette partie concerne la génération de l'électricité, elle est représentée par les centrales électriques selon les différents types de production : thermique, hydraulique, solaire, nucléaire ... etc.
- Le réseau de transport et d'interconnexion : c'est la partie qui sert à transférer l'électricité produite par les centrales vers les charges. Elle assure le transport de l'énergie électrique sur de vastes superficies par le biais de tout un réseau de lignes de haute et très haute tension.
- Le réseau de distribution : ce réseau (en moyenne et basse tension) permet la répartition puis la distribution de l'électricité aux consommateurs industriels et domestiques.

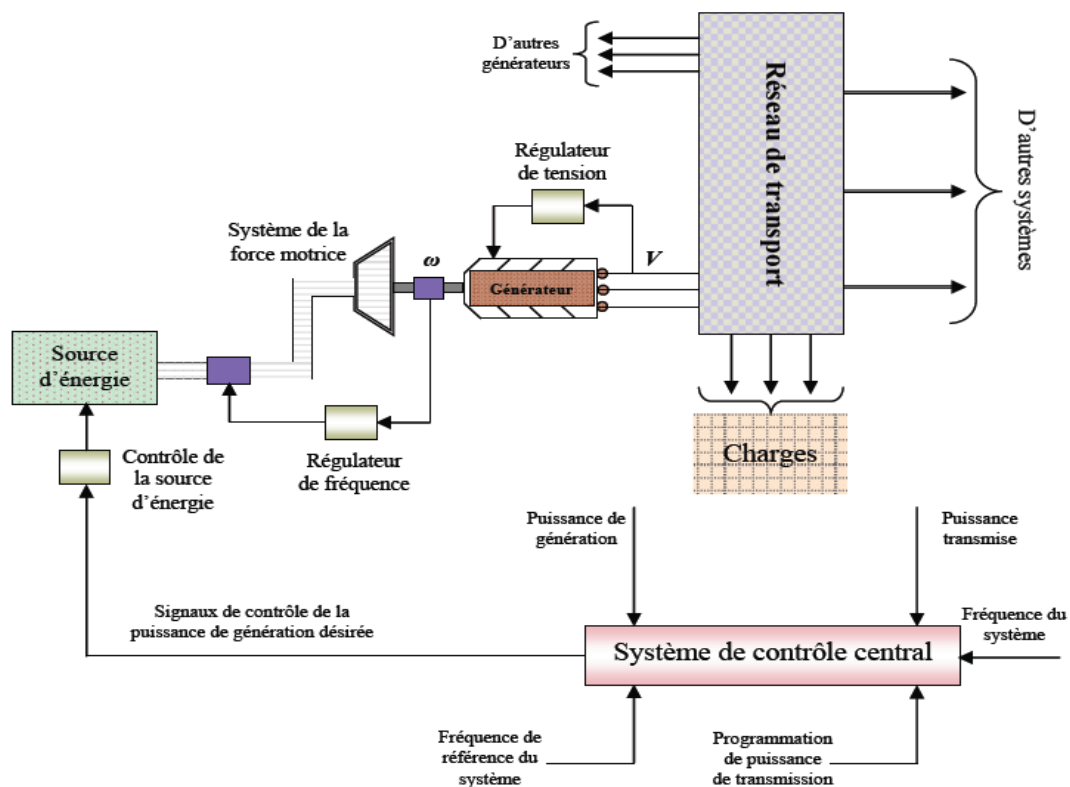


Figure. I.1 Structure générale d'un système de puissance [04]

I.2 Modélisation des éléments du réseau

I.2.1 Modélisation d'un générateur

Dans le calcul des réseaux électriques, un générateur est représenté par une source de tension constante comme le montre la figure suivante [05] :

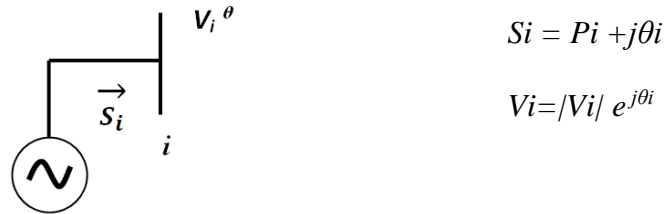


Figure I.2 Modèle de générateur.

V_i : tension entre phase et neutre du générateur.

-Ces générateurs sont supposés être équipés de régulateurs assez rapides pour assurer une tension constante à ces bornes.

I.2.2 Modélisation des Alternateurs

Du point de vue réseaux électriques l'alternateur est un convertisseur électromécanique qui à partir de l'énergie mécanique fournie par une turbine, renvoie dans le réseau de l'énergie électrique sous forme triphasé. il joue un rôle prédominant dans les phénomènes de stabilité des réseaux.

Le modèle électrique du générateur est basé sur la transformation de Park appelée aussi transformation à deux axes (dq) ; elle consiste à transformer les trois phases du stator en un système biphasé lié au rotor, ce qui est mieux adapté à l'analyse de la machine synchrone [01].

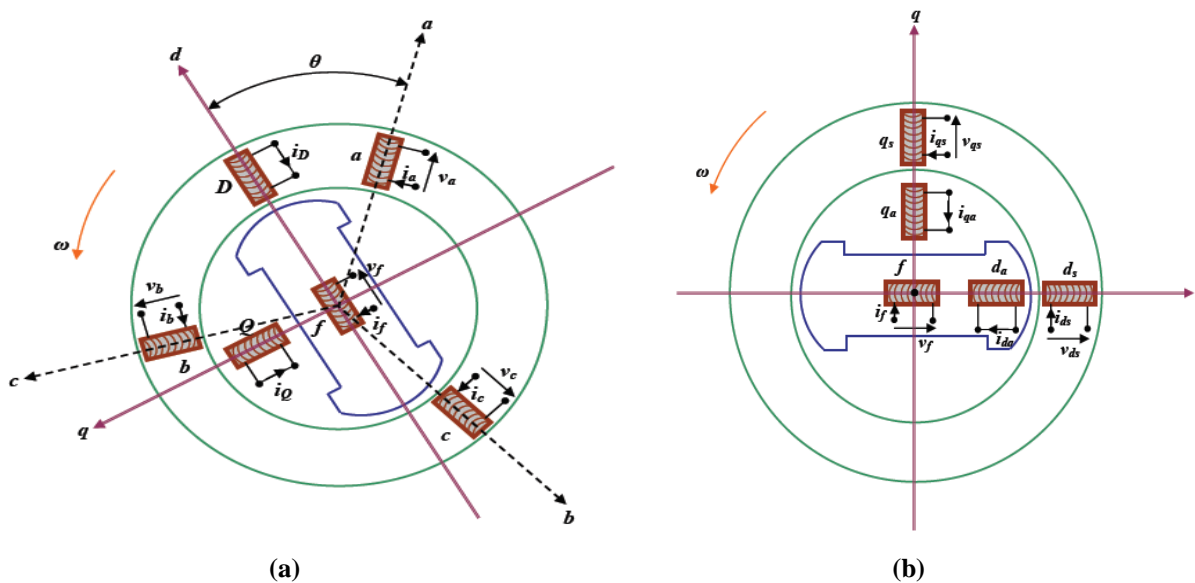


Figure. I.3. (a)-Représentation du circuit électrique d'une machine synchrone
 (b)-Enroulements équivalents biphasés dans le repère de Park [07]

I.2.2.a Equations électriques

Considérons une $i^{\text{ème}}$ machine d'un réseau multi-machine, nous allons déterminer dans ce paragraphe les équations algébriques du stator de cette machine : à savoir les équations concernant les tensions suivant les axes d et q et les puissances électriques.

- le repère (d_i, q_i) concerne la $i^{\text{ème}}$ machine seule, alors que le repère (D, Q) est commun à toutes les machines du système.

- l'angle de couple Δi

D'après la **figure I.4**, nous avons :

$$\bar{V}_i = \bar{E}_{qi} - jX_{di}\bar{I}_{di} - jX_{qi}\bar{I}_{qi} \tag{I. 1}$$

Par rapport au repère (DQ) on peut écrire :

$$V_i e^{j\alpha_i} = E_{qi} e^{j\delta_i} - X_{di} I_{di} e^{j\delta_i} - X_{qi} I_{qi} e^{j(\delta_i+90^\circ)} \tag{I. 2}$$

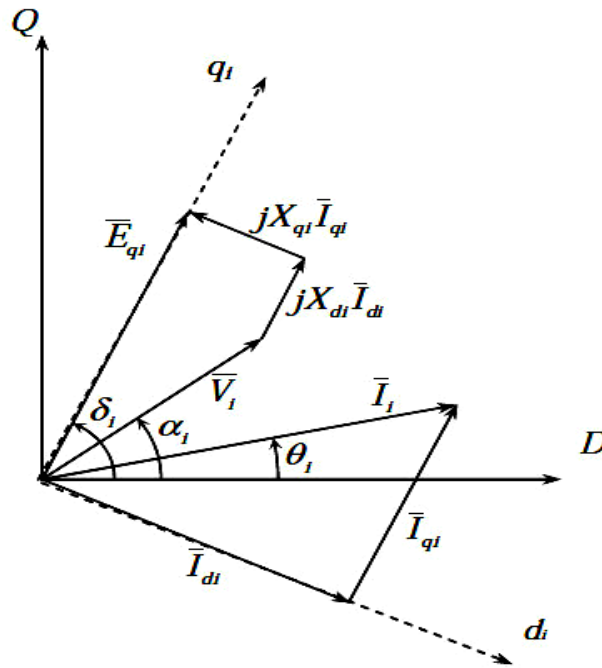


Figure. I.4.Diagramme des phases relatives à la $i^{\text{ème}}$ machine d'un système multi machine [08]

Qui devient après arrangement :

$$V_i e^{-j(\delta_i - \alpha_i)} = E_{qi} - X_{di} I_{di} - jX_{qi} I_{qi} \tag{I. 3}$$

Si nous dissocions la partie réelle et la partie imaginaire nous obtenons l'expression de V_d et

V_q :

$$\begin{cases} V_i \sin(\delta_i - \alpha_i) = V_{di} = X_{qi} I_{qi} \\ V_i \cos(\delta_i - \alpha_i) = V_{qi} = E_{qi} - X_{di} I_{di} \end{cases} \tag{I. 4}$$

Lors d'une perturbation, le système d'équations n'est plus valable, car il faut prendre en compte la réactance et la f.é.m. transitoires. Supposons que la machine est à l'état stable avant qu'elle ne subît une perturbation causant des oscillations au niveau du rotor. Les courants et tensions deviennent alors (l'exposant 0 indique l'état stable) :

$$\begin{aligned} I_{di} &= I_{di}^0 + \Delta I_{di} \\ I_{qi} &= I_{qi}^0 + \Delta I_{qi} \end{aligned} \quad (\text{I. 5})$$

Et

$$\begin{cases} V_{di} = V_{di}^0 + \Delta V_{di} = X_{qi} I_{qi} \\ V_{qi} = V_{qi}^0 + \Delta V_{qi} = E_{qi} - X_{di} I_{di}^0 - X'_{di} \Delta I_{di} \\ V_{qi} = E_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) I_{di}^0 - X'_{di} I_{di} = E'_{qi} - X'_{di} I_{di} \end{cases} \quad (\text{I. 6})$$

On en déduit que :

$$E'_{qi} = E_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) I_{di}^0 \quad (\text{I. 7})$$

Les puissances électriques sont données par :

$$\begin{cases} \bar{S}_i = P_{ei} + jQ_{ei} = \bar{V}_i \bar{I}_i^* = (V_{di} + jV_{qi})(I_{di} - jI_{qi}) \\ \quad = (V_{di}I_{di} + V_{qi}I_{qi}) + j(V_{qi}I_{di} - V_{di}I_{qi}) \\ P_{ei} = V_{di}I_{di} + V_{qi}I_{qi} \\ Q_{ei} = V_{qi}I_{di} - V_{di}I_{qi} \end{cases} \quad (\text{I. 8})$$

Ainsi, la puissance électrique active s'écrit :

$$P_{ei} = E'_{qi} I_{qi} + (X_{qi} - X'_{di}) I_{di} I_{qi} \quad (\text{I. 9})$$

I.2.2.b Equations mécaniques

Le fonctionnement de la machine synchrone en générateur implique la conversion d'une énergie mécanique en une énergie électrique. L'énergie mécanique provient d'une turbine qui, solidaire de l'arbre de la machine, entraîne la rotation de celle-ci [08].

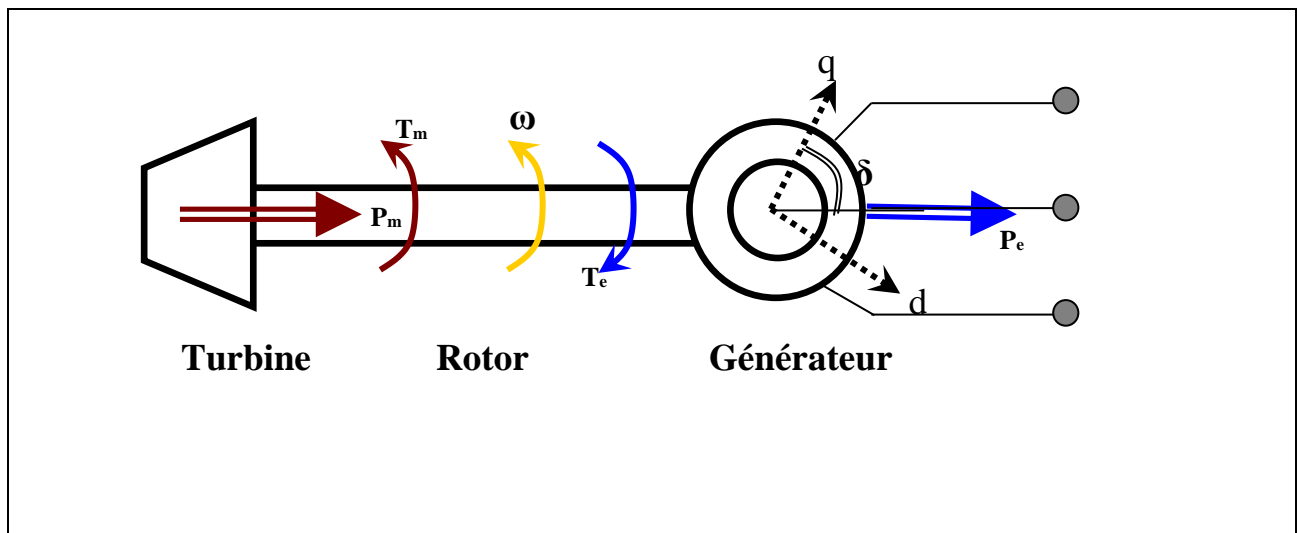


Figure. I.5 Couples mécanique et électrique agissant sur l'arbre d'un générateur [11]

L'équation régissant le mouvement mécanique du rotor apparaît sous plusieurs formes dans la littérature, selon le système d'unité utilisé. Pour de faibles oscillations autour de la vitesse de synchronisme ($\omega_i \approx \omega_0$), en considérant l'amortissement au rotor et en unité relative (per unit)

$$\text{elle s'écrit : } \dot{\omega}_i = \frac{1}{2H_i} (T_{mi} - T_{ei} - D_i (\omega_i - 1)) \quad (\text{I } 10)$$

$$\text{L'angle rotorique est donné par : } \dot{\delta}_i = \omega_0 (\omega_i - 1) \quad (\text{I. } 11)$$

I.2.3 Modélisation des systèmes de régulation

Les machines synchrones du système doivent être capable de maintenir l'équilibre des puissances actives et des puissances réactives dans des conditions de fonctionnement diverses.

Ainsi, des tensions sinusoïdales équilibrées sont garanties avec des amplitudes et des fréquences constantes.

Si l'équilibre des puissances actives n'est plus assuré, la fréquence de synchronisme dans le système sera changée, alors qu'un déséquilibre des puissances réactives entraînera une variation des tensions du système par rapport à leurs valeurs de référence.

Pour assurer une génération satisfaisante d'énergie électrique, pour un grand nombre de points de fonctionnement, le couple mécanique T_m appliqué au rotor et la tension d'excitation E_{fd} doivent être réglés systématiquement pour s'accommoder de toute variation du système.

Le système responsable de la génération du couple mécanique et ainsi de l'entraînement du rotor du générateur est appelé "système de force motrice". Le contrôle de la fréquence associé à ce système maintient la vitesse nominale des générateurs en assurant de ce fait une fréquence constante [07].

Nous présentons par la suite successivement les principes généraux :

- ✓ De la génération de la puissance mécanique avec la régulation de fréquence

- ✓ Du système d'excitation avec la régulation de tension et leurs modèles mathématiques.

Le régulateur de la vitesse angulaire (donc de la fréquence) et le régulateur de la tension terminale du générateur voire Figure. I.6.

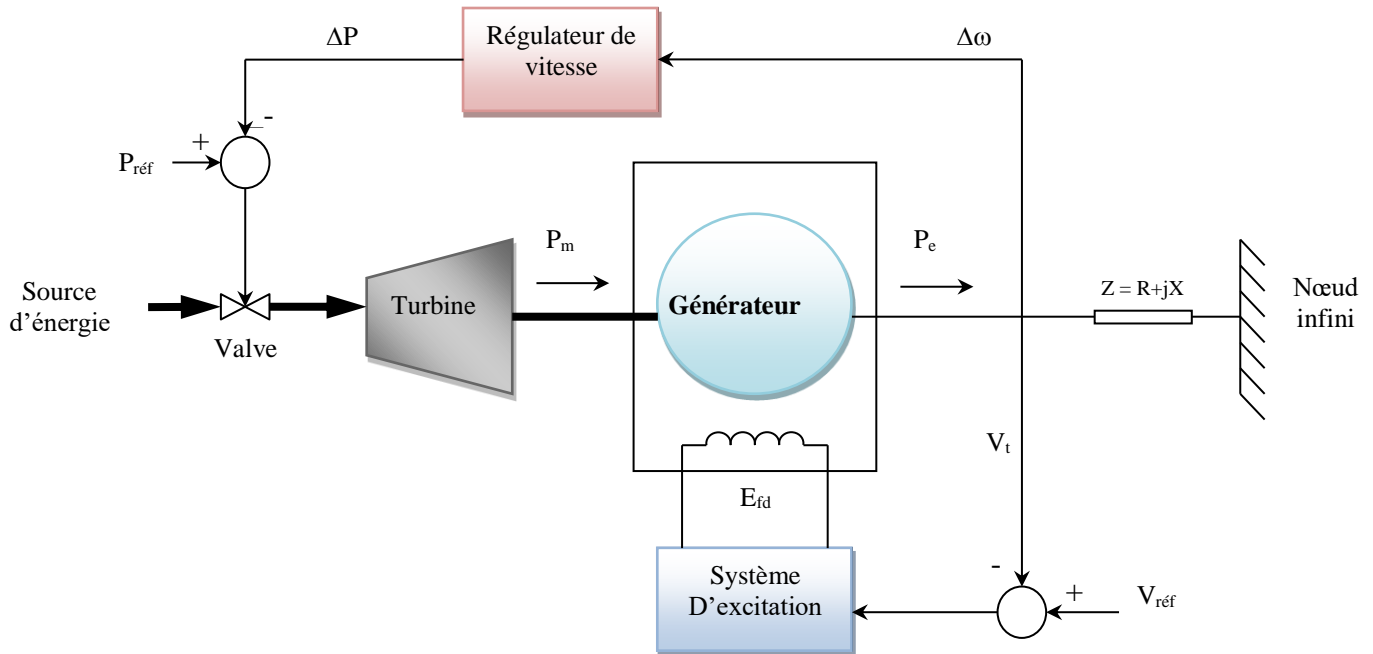


Figure. I.6 Différentes actions des régulateurs sur une unité de production [11]

I.2.3.1 Régulation de vitesse

Le rôle du régulateur de vitesse (RV) est de mesurer la vitesse de rotation de la turbine et d'ajuster en conséquence l'admission de vapeur (pour le cas d'une turbine à vapeur par exemple), en agissant sur les vannes et les soupapes. Lors d'une perturbation sévère, la vitesse de la turbine peut augmenter ou diminuer rapidement. Le rôle du régulateur est aussi la limitation de la vitesse à ne pas dépasser 110% et ne pas diminuer au-dessous de 90% de la valeur nominale. Le modèle

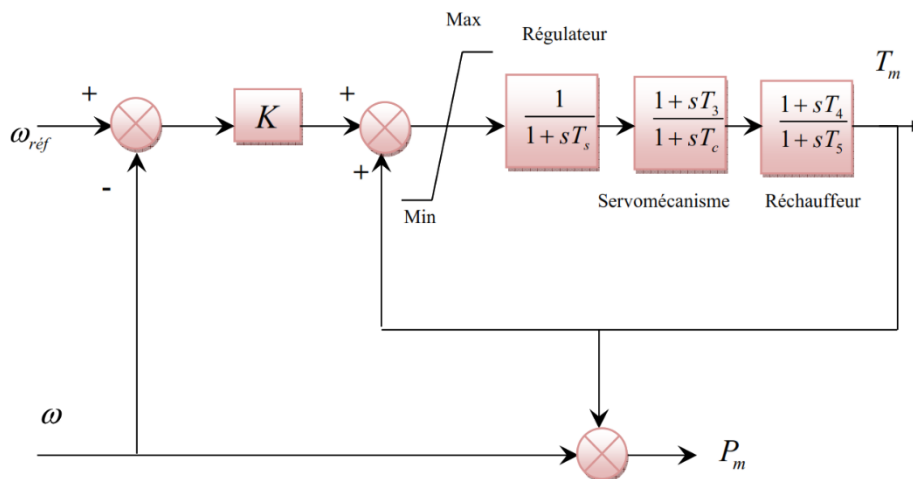


Figure. I.7 Régulateur de vitesse de la turbine

I.2.3.2 Régulation de tension

Le réglage de la tension en un point du réseau est réalisé par la modulation de la puissance réactive produite ou consommée en ce point. Le composant le plus facile à activer est la machine synchrone conventionnelle connectée en ce nœud. Ce dernier produit de la puissance réactive.

Nous considérerons, dans cette étude, un modèle très simple du régulateur de tension. Celui-ci est donné sur la Figure.I.8 L'entrée U est une entrée de commande issue de certains dispositifs supplémentaires de commande comme les stabilisateurs de puissance (PSS). L'absence de ces dispositifs implique tout simplement que U est nulle [01].

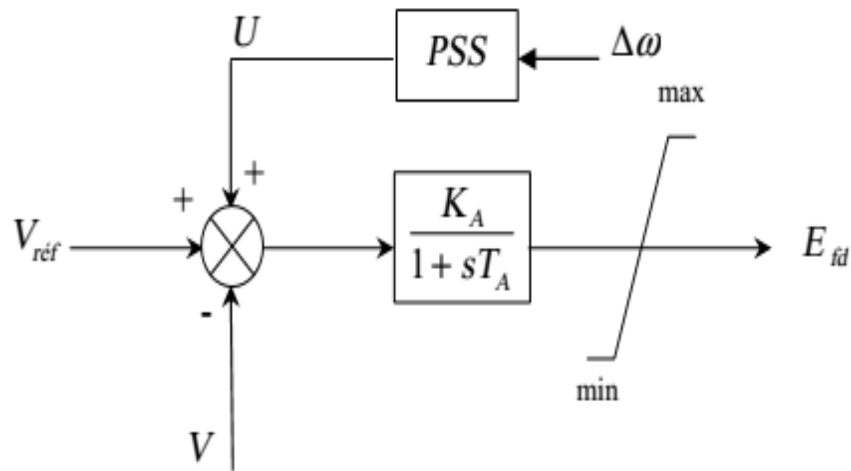


Figure.I.8 Modèle simplifié de l'excitation

Le fonctionnement de l'excitation est décrit par deux équations :

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_a} (K_a (V_{réf} - V + U) - E_{fd}) \quad (\text{I. 12})$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (E_{fd} - (X_d - X'_d)I_d - E'_q) \quad (\text{I. 13})$$

La première équation correspond au modèle du régulateur de tension. La deuxième équation décrit la relation entre la tension d'excitation et la tension interne du générateur qui, elle-même, est liée à la tension terminale (système d'équations (I. 13)).

I.2.4 Modélisation de la charge

Une charge peut être représentée sous la forme dans la **Figure I.9** :

- D'un courant.
- D'une admittance (impédance).
- D'une puissance constante.

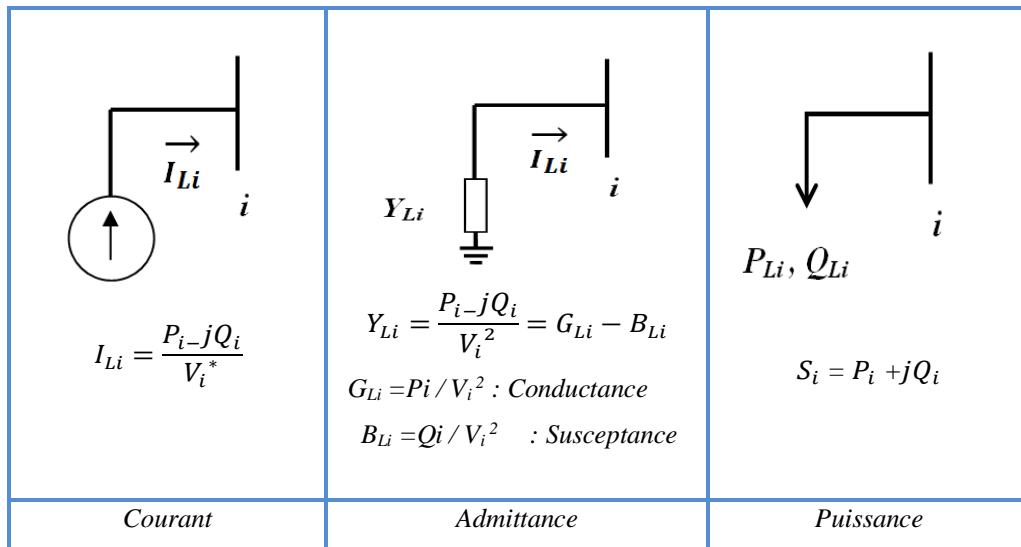


Figure I.9 Modélisation de la charge.

I.2.5 Modélisation d'une compensation shunt

Un compensateur (admittance) shunt qui est une capacité, un banc de condensateur ou une inductance qui peut être fixe ou variable sur la **Figure I.10** .

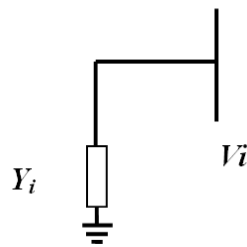


Figure I.10 Modèle d'un compensateur shunt

I.2.6 Modélisation de la ligne

Une ligne peut être considérée comme une série de circuits à constante répartie uniformément sur toute sa longueur. Ces circuits sont composés d'une infinité d'éléments identiques constitués d'une inductance linéique, d'une résistance linéique dans le sens longitudinal donnant naissance à des chutes de tension et d'une conductance, d'une capacité linéique dans le sens transversal.

Le schéma équivalent le plus utilisé est le schéma en π représenté par la **Figure I.11** :

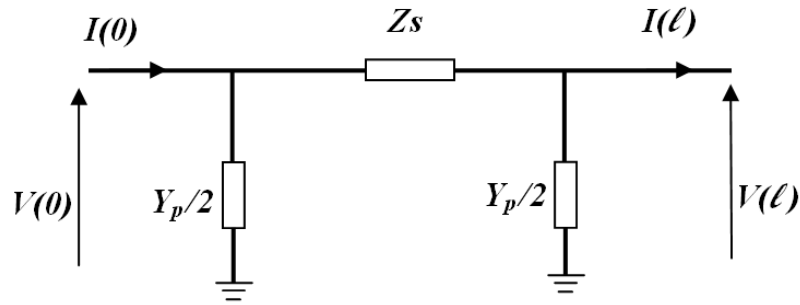


Figure I.11 Modèle d'une ligne.

I.2.7 Modélisation des transformateurs

Dans un réseau d'énergie électrique, on trouve différents types des transformateurs. On peut citer :

- Les transformateurs fonctionnant en régime nominal c'est à dire avec un rapport de transformation nominal.
- Les transformateurs à pas variable c'est à dire le rapport de transformation est réglable.
- Les transformateurs déphaseurs dont le rapport de transformation peut être représenté par un nombre complexe.

Le schéma équivalent en π d'un transformateur à pas fixe ou variable est donné par la figure suivante **Figure I.12** :

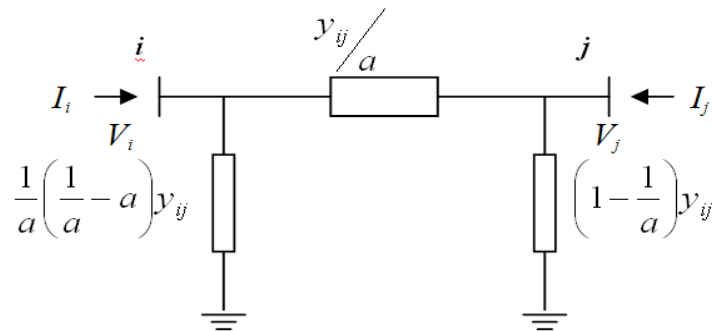


Figure I.12 Modèle d'un transformateur

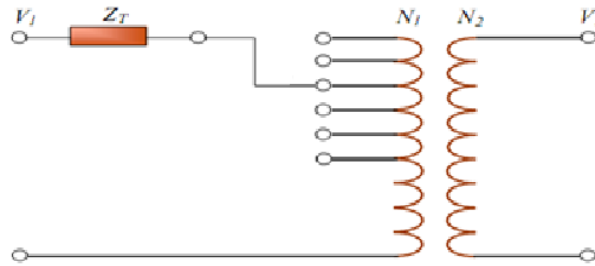


Figure I.13 Modèle simplifié d'un transformateur régulateur en charge [07]

Les courants injectés aux nœuds i et j liés aux tensions V_i et V_j par la matrice admittance suivante :

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{ij}}{a^2} & \frac{-y_{ij}}{a} \\ \frac{-y_{ij}}{a} & y_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (\text{I.12})$$

Le transformateur déphaseur fait varier l'angle de phase entre les tensions de deux nœuds différents, il est représenté par une admittance en série avec un autotransformateur idéal dont la transformation est un nombre complexe a .

La matrice admittance $[Y]$ est donné par :

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{ij}}{|a|^2} & \frac{-y_{ij}}{\bar{a}^*} \\ \frac{-y_{ij}}{\bar{a}} & y_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (\text{I.13})$$

I.3. Classification de la stabilité de système de puissance.

La stabilité d'un système de puissance électrique représente la propriété du mouvement du système autour d'un état d'équilibre (c.-à-d. les conditions de fonctionnement initial).

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

Ainsi, la stabilité d'un système de puissance dépend non seulement des conditions de fonctionnement initiales elle dépend également de la nature physique et de l'amplitude de la perturbation. La figure I.14 présente ces principales catégories de stabilité d'un système de puissance et leurs sous-catégories.

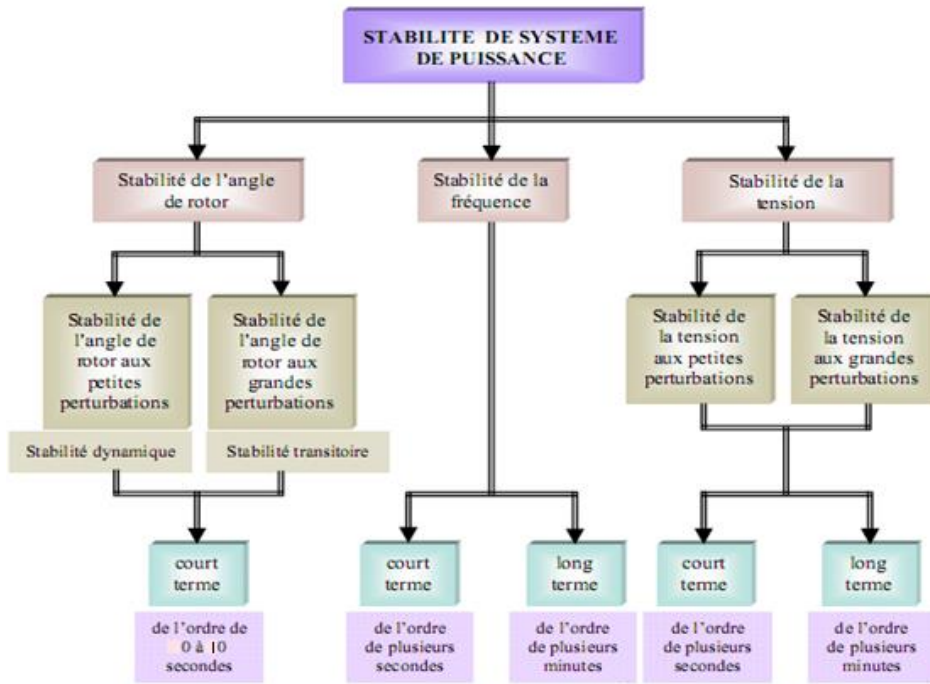


Figure I.14 Classification des différents types de la stabilité de système de puissance [11].

I.3.1. Stabilité de l'angle de rotor

Dans un réseau électrique à courant alternatif, la stabilité de l'angle du rotor est définie comme la capacité que possède un générateur de rester en synchronisme après une perturbation. Autrement dit, un système est instable si la différence d'angle entre deux générateurs interconnectés augmente indéfiniment ou si l'oscillation transitoire, provoquée par une perturbation, n'est pas suffisamment amortie dans le temps d'évaluation [9], [10].

La stabilité de l'angle du rotor peut être traitée selon deux approches différentes. La première approche est connue sous le nom de **ST** (**S**tabilité **T**ransitoire) ; elle analyse la stabilité quand la perturbation est grande ou sévère, comme un défaut triphasé sur une ligne. Dans ce cas, le système d'équations qui décrit le comportement dynamique est traité par des méthodes numériques dans le domaine du temps.

La deuxième approche analyse de la stabilité quand la perturbation est petite. Dans ce cas, l'ensemble des équations qui décrivent le comportement du réseau est linéarisé autour d'un point de fonctionnement et la solution est obtenue par des méthodes de valeurs propres. Normalement, les temps d'évaluation pour ce type d'analyse vont de 10 à 20 secondes.

La stabilité angulaire est caractérisée par deux catégories, tel que décrit à la figure I.15 :

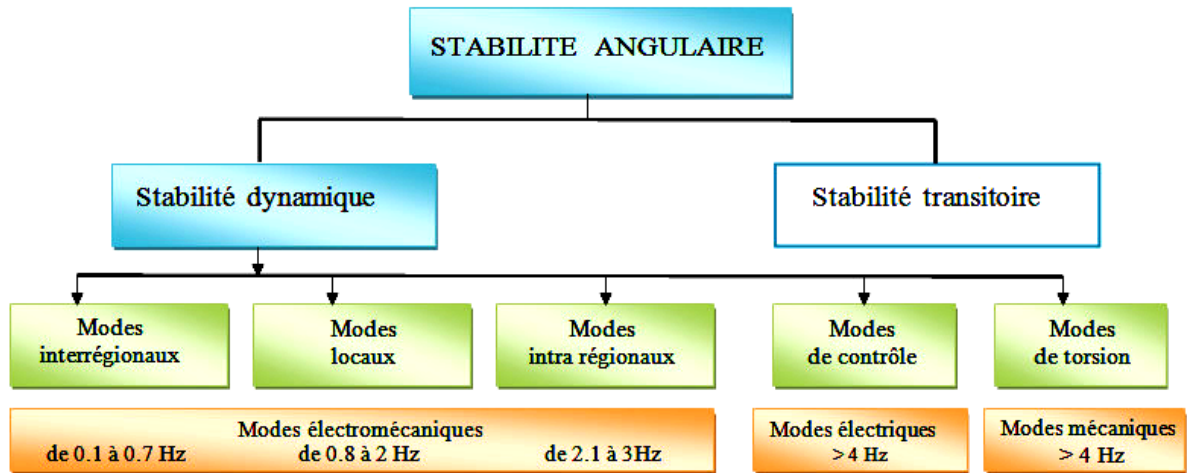


Figure I.15 Classification de la stabilité de l'angle du rotor [11]

Dans ce travail, on s'intéresse à l'étude de la stabilité angulaire aux petites perturbations (dynamique).

I.3.2. Modes rotoriques du générateur synchrone

Dans les études portées sur la stabilité des systèmes de puissance, les modes oscillatoires les plus importants sont ceux correspondant aux basses fréquences (**Small Signal Stability Analysis**). L'intervalle de ces fréquences est compris entre 0.1 et 3 Hz. Ce sont des modes électromécaniques relatifs aux machines ou modes rotoriques (voir figure I.15) [7], [5], [10].

On distingue trois types de modes oscillatoires :

- ✓ Modes résultants d'oscillations de groupes de machines oscillants d'une manière cohérente. Ils sont appelés *modes interzonaux*. Ces modes exposent des fréquences allant de 0.1 à 0.7 Hz.

- ✓ Modes résultants des oscillations de générateurs avec des fréquences allant de 0.8 à 2.0 Hz. Ces modes sont appelés *modes locaux*.

- ✓ Modes se produisant lorsque des générateurs faisant partie d'une même région de génération oscillent l'un contre l'autre dans un intervalle de fréquence de 2.1 à 3 Hz. Ces modes sont appelés *Modes intrarégionaux*.

Sachant que les oscillations électromécaniques limitent la capacité de transmission de puissance dans les réseaux électriques, elles peuvent parfois entraîner une perte de synchronisme ou même un black-out dans le système entier. Par conséquent, des sources spécifiques d'amortissement sont indispensables pour assurer un fonctionnement fiable du système.

La stabilité peut être considérablement améliorée en utilisant des systèmes en boucle fermée avec des systèmes de contrôle adaptés. Au fil des années, un effort de recherche important était effectué pour une meilleure conception de tels contrôleurs. Il y a principalement deux moyens rapides permettant d'améliorer la stabilité [5] :

- ✓ L'utilisation d'un contrôleur côté générateur : signal de contrôle supplémentaire dans le système d'excitation du générateur.
- ✓ L'utilisation d'un contrôleur côté lignes de transmission : signal de contrôle supplémentaire dans les systèmes *FACTS* (Flexible AC Transmission System).

Chaque unité de génération génère un mode local et/ou un mode interzonal. Un bon emplacement de stabilisateurs *PSS* au niveau des unités de génération et du système *FACTS* au niveau des lignes pourra amortir directement ces modes oscillatoires.

D'un autre côté, le réglage des procédures de contrôle et de régulation des *PSSs* et des *FACTS* s'avère avoir une influence significative dans l'efficacité pour l'amélioration du fonctionnement des réseaux électriques.

Mais avant d'étudier et d'analyser la stabilité d'un système de puissance, la première étape consiste à trouver le bon modèle mathématique convenant à cette étude.

I.4. Analyse de stabilité

Une fois l'équation d'état du système électrique écrite sous forme de modèle d'état, la stabilité du système peut être étudiée. L'analyse de la stabilité est basée sur les valeurs propres et les vecteurs propres du système [5].

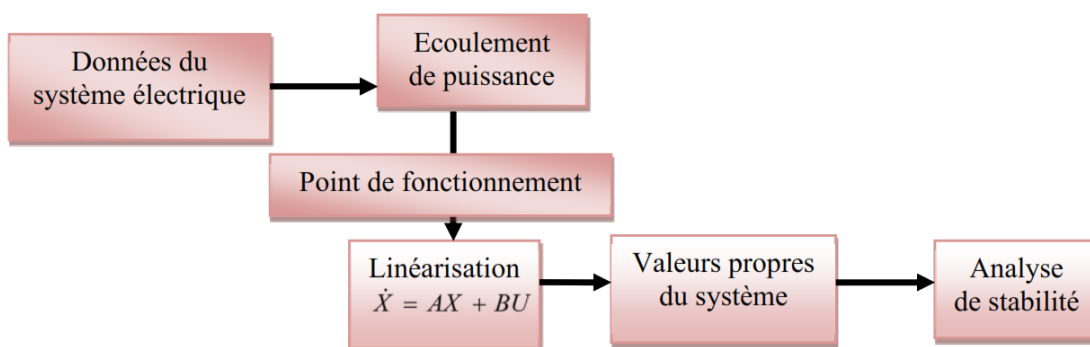


Figure I.16 Etapes de l'analyse de stabilité aux petites perturbations

I.4.1. Linéarisation

Un système électrique est décrit par des équations différentielles . Ces équations montrent la non linéarité du système dont nous voulons étudier la stabilité. Etant donné que nous nous intéressons à la stabilité du système lorsqu'il subit des perturbations rapides et qui ne l'éloigne pas trop de son point de fonctionnement, nous pouvons alors linéariser ces équations autour de ce point de fonctionnement. Nous rappelons ici les principales équations devant être linéarisées[8] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\omega}_i = \frac{1}{2H_i} (P_{mi} - P_{el} - D_i(\omega - 1)) \\ \dot{\delta}_i = \omega_0(\omega_i - 1) \\ \dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T_{d0i}} (E_{fdi} - (X_{di} - X'_{di})I_{di} - E'_{qi}) \\ \dot{E}_{fdi} = \frac{1}{T_{ai}} (-K_{ai}(V_{refi} - V_i + U_i) - E_{fdi}) \end{array} \right. \quad (I.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i = E'_{qi}I_{qi} + (X_{qi} - X'_{di})I_{di} - E'_{qi} \\ I_{di} = \text{Re}(\bar{I}_{dqi}) = \sum_{g=1}^n Y_{mij} (-S_{ij}E'_{qj} + (X_{qj} - X'_{dj})C_{ij}I_{qj}) \\ I_{qi} = \text{Im}(\bar{I}_{dqi}) = \sum_{g=1}^n Y_{mij} (C_{ij}E'_{qj} + (X_{qi} - X'_{dj})S_{ij}I_{qj}) \\ V_{di} = X_{qi}I_{qi} \\ V_{qi} = E'_{qi} - X'_{di}I_{di} \\ V_i = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \end{array} \right. \quad (I.15)$$

La linéarisation des équations du système (I.14) donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \dot{\omega}_i = \frac{1}{2H_i} (\Delta P_{mi} - \Delta P_{el} - D_i \Delta \omega_i) \\ \Delta \dot{\delta}_i = \omega_0 \Delta \omega_i \\ \Delta \dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T_{d0i}} (\Delta E_{fdi} - (X_{di} - X'_{di}) \Delta I_{di} - \Delta E'_{qi}) \\ \Delta \dot{E}_{fdi} = \frac{1}{T_{ai}} (-K_{ai} \Delta V_i + K_{ai} \Delta U_i - \Delta E_{fdi}) \end{array} \right. \quad (I.16)$$

Afin de former l'équation d'état du système, les équations du système (I.16) doivent s'exprimer uniquement en fonction des variables d'état.

A : est la matrice d'état de dimension $4n \times 4n$, B : la matrice de commande de dimension $4n \times n$ et

Γ : la matrice de perturbation de dimension $4n \times n$.

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline \frac{K_{a1}}{T_{a1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{K_{a2}}{T_{a2}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{K_{an}}{T_{an}} \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \frac{1}{2H_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{2H_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{2H_n} \\ \hline 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-D_1}{2H_1} & 0 & 0 & \dots & \frac{-K_{11n}}{2H_1} & \dots & \frac{-K_{11n}}{2H_1} & \dots & \frac{-K_{21n}}{2H_1} & \dots & \frac{-K_{21n}}{2H_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \dots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \frac{-D_n}{2H_n} & \dots & \frac{-K_{1n1}}{2H_n} & \dots & \frac{-K_{1n1}}{2H_n} & \dots & \frac{-K_{2n1}}{2H_n} & \dots & \frac{-K_{2n1}}{2H_n} & 0 & \dots & 0 \\ \hline \omega_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \dots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \omega_0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline 0 & \dots & 0 & \dots & \frac{-K_{311}}{T'_{d01}} & \dots & \frac{-K_{31n}}{T'_{d01}} & \dots & \frac{-K_{411}}{T'_{d01}} & \dots & \frac{-K_{41n}}{T'_{d01}} & \frac{1}{T'_{d01}} & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \frac{-K_{3n1}}{T'_{d0n}} & \dots & \frac{-K_{3nn}}{T'_{d0n}} & \dots & \frac{-K_{4n1}}{T'_{d0n}} & \dots & \frac{-K_{4nn}}{T'_{d0n}} & 0 & 0 & \frac{1}{T'_{d0n}} \\ \hline 0 & \dots & 0 & \dots & \frac{-K_{a1}K_{511}}{T_{a1}} & \dots & \frac{-K_{a1}K_{51n}}{T_{a1}} & \dots & \frac{-K_{a1}K_{611}}{T_{a1}} & \dots & \frac{-K_{a1}K_{61n}}{T_{a1}} & \frac{-1}{T_{a1}} & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \frac{-K_{an}K_{5n1}}{T_{an}} & \dots & \frac{-K_{an}K_{5nn}}{T_{an}} & \dots & \frac{-K_{an}K_{6n1}}{T_{an}} & \dots & \frac{-K_{an}K_{6nn}}{T_{an}} & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{an}} \end{bmatrix}$$

La représentation du système sous la forme de fonction de transfert. Elle met en évidence l'interaction qui existe entre les différentes machines du réseau à travers les matrices K ces

matrices sont des matrices carrées d'ordre n , les éléments diagonaux de $K_1 \dots K_6$ déterminent les dynamiques de la machine alors que les éléments hors-diagonaux expriment l'interaction entre les machines.

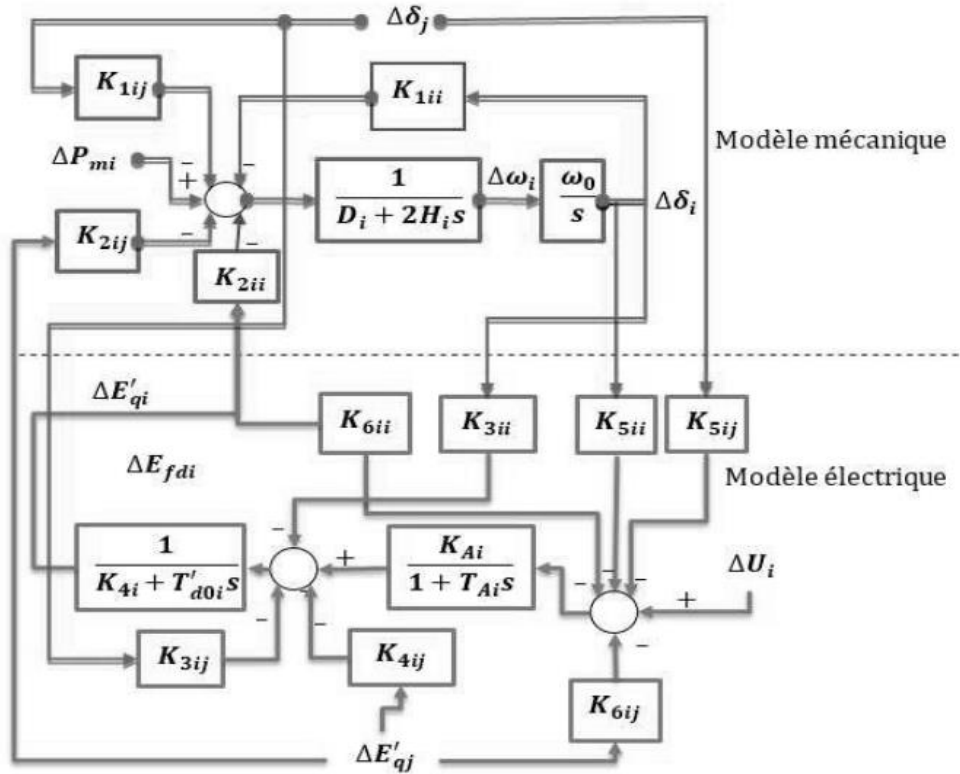


Figure I.17 Représentation par fonctions de transfert d'un système multi-machine [20]

I.4.2. Valeurs propres

Une valeur propre $\lambda = \alpha \pm j\beta$ (ou pôle du système) est un nombre complexe qui vérifie l'égalité (I.17) appelée équation caractéristique de la matrice d'état A . Le nombre de valeurs propres d'un système est toujours égal à la dimension de sa matrice d'état.

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (I = \text{matrice identité}) \quad (I.17)$$

Chaque valeur propre λ_i , contribue à la réponse transitoire du système à travers des fonctions élémentaires du temps:

- Chaque valeur propre réelle λ_i , de multiplicité m_i , donne une réponse transitoire:

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{m_i} c_j t^{j-1} e^{\lambda_i t} \quad (I.18)$$

- Chaque paire de valeurs propres complexes conjuguées (λ_i, λ_i^*) de multiplicité m_i , donne une réponse transitoire:

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{m_i} t^{j-1} e^{\lambda_i t} (c_{1j} \cos(\beta_i t) + c_{2j} \sin(\beta_i t)) \quad (\text{I.19})$$

Où C_j , C_{1j} et C_{2j} sont des coefficients.

La réponse transitoire globale du système est constituée par la combinaison linéaire de ces fonctions élémentaires. Dans cette combinaison linéaire, chaque fonction élémentaire du temps est appelée mode du système.

On constate que les modes sont fonctions d'exponentielles, la convergence de la réponse peut être déterminée en étudiant les exposants des exponentielles qui ne sont rien d'autre que les valeurs propres du système. On distingue alors deux types de modes

- Les valeurs propres réelles correspondent à des modes apériodiques.
- Les valeurs propres complexes conjuguées correspondent à des modes oscillants.

La caractéristique temporelle d'un mode correspondant à λ étant donnée par $e^{\lambda t}$ λ est la valeur propre complexe, donc la stabilité du système est liée à l'emplacement des valeurs propres dans le plan complexe :

1 - Si toutes les valeurs propres ont une partie réelle négative, tous les modes décroissent dans le temps et le système est dit globalement stable.

2- Si une des valeurs propres est à partie réelle positive, le mode correspondant croît exponentiellement dans le temps et éventuellement domine le comportement du système. Un tel système est dit instable.

3- Si une des valeurs propres est à partie réelle nulle, le mode correspondant aura une réponse non amortie.

Les modes oscillatoires sont caractérisées par la fréquence oscillatoire en Hertz donnée par :

$$f = \frac{\beta}{2\pi} \quad (\text{I.20})$$

et le facteur d'amortissement donné par:

$$\zeta = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (\text{I.21})$$

I.4.3. Stabilisateurs de puissance (PSS)

Le dernier bloc, la Phase Compensation, fournit les désiré caractéristique du phase rôle principal compenser pour le retard de phase entre l'entrée AVR et le générateur électrique (air intervalle) moment de rotation. Dans entraînement, deux ou plus de premier ordre les blocks peuvent être utilisés pour accomplir la compensation de la phase désirée.

La performance des systèmes d'excitation et des régulateurs de tension joue un rôle déterminant dans le maintien de la stabilité et l'amortissement des oscillations électromécaniques

observées sur le rotor des générateurs. L'ajout d'un stabilisateur de puissance comme auxiliaire du système d'excitation aide à amortir ces oscillations ainsi qu'améliorer la stabilité de l'ensemble du système.

La structure du stabilisateur de puissance donnée sur la figure I.18 est une structure classique largement utilisée dans la littérature. Elle consiste en un gain, un filtre passe-haut et un ou plusieurs blocs de compensation de phase. La sortie du stabilisateur est une tension qui s'additionne à la tension d'entrée du système d'excitation. Une telle structure utilise souvent la déviation de la vitesse synchrone $\Delta\omega$, comme entrée, mais dans certains cas, d'autres signaux comme la puissance ou une combinaison vitesse/puissance sont utilisés voir la **Figure I.18** [5].

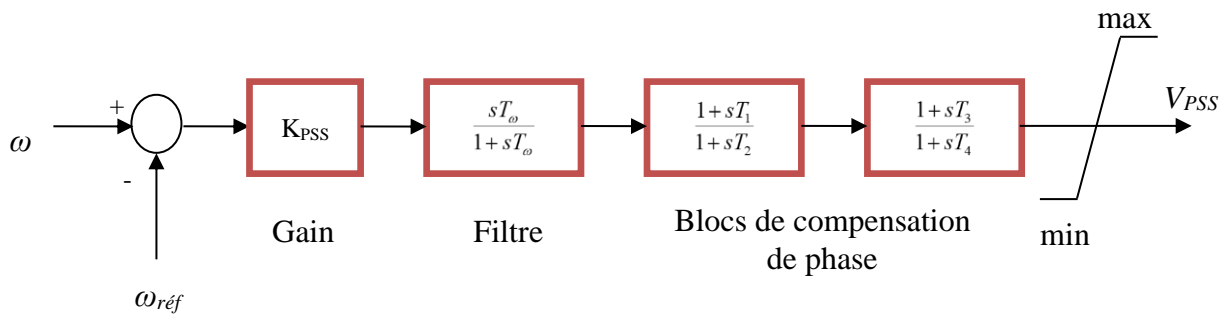


Figure I.18 Modèle générale du stabilisateur de puissance.

$$G_{PSS}(s) = \frac{\Delta u_i(s)}{\Delta \omega_i(s)} = K_{PSS} \left[\frac{sT_{wi}}{1 + sT_{wi}} \right] \left[\frac{1 + sT_{1i}}{1 + sT_{2i}} \right] \left[\frac{1 + sT_{3i}}{1 + sT_{4i}} \right] \quad (I.22)$$

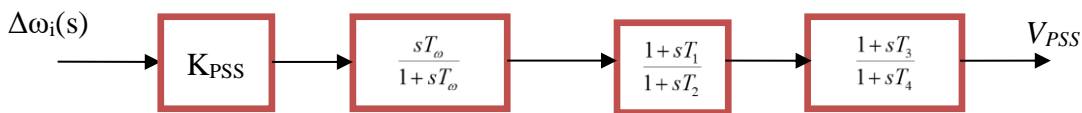


Figure I.19 Différents blocs de PSS du i^{eme} machine

L'angle de phase de PSS pour la machine est :

$$\angle G_{PSS} = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(\omega T_w) + 2 \left[\tan^{-1}(\omega T_w) - \tan^{-1}(\omega T_2) \right] \quad (I.23)$$

Où : $T_1 = T_3$ et $T_2 = T_4$.

Pour apporter l'amortissement nécessaire, le stabilisateur doit produire une composante de couple électrique en phase avec la variation de la vitesse. Par conséquent, sa fonction de transfert doit avoir des caractéristiques d'avance de phase adéquates afin de compenser le retard de phase

entre l'entrée de l'excitation et le couple électrique du générateur. L'étude effectuée pour montrer qu'un seul bloc de compensation de phase était insuffisant pour garantir la stabilité du système. Généralement, deux à trois blocs suffissent pour que le stabilisateur puisse jouer son rôle.

Le rôle du filtre est d'atténuer les fréquences indésirables (inférieures à 0.1 Hz) du signal d'entrée. Ainsi, le stabilisateur n'affectera que le signal utile correspondant aux oscillations rotorique.

Du point de vue de la stabilité en petit mouvement la valeur de la constante de temps T_ω du filtre n'est pas critique et est généralement prise entre 1s et 20s. Les PSSs ont souvent des effets indésirables sur la stabilité transitoire. Lors des grandes perturbations, le stabilisateur risquerait de saturer le système d'excitation et par conséquent d'affecter la régulation de la tension. Il est alors indispensable de limiter la sortie du PSS afin de réduire son influence durant les phases transitoires.

I.5. Analyse de la stabilité d'un système multi-machine

La représentation du système multi-machine sans PSS a été discutée plus tôt, et un modèle de système d'état a été développé. Dans cette section, le modèle de l'état espace pour le même système vu que tous les générateurs sont équipés avec un type de phase de décalage que PSS est développé. Par égard pour clarté, le modèle de système d'état du système sans PSS est redéclaré dessous [7] :

$$\frac{\partial}{\partial t} \underline{X}(t) = A \cdot \underline{X}(t) + B \cdot \underline{U}(t) + \Gamma \cdot \underline{P}(t) \quad (I.24)$$

L'état, le contrôle et la matrices de la perturbation et a été décrit dans la Section I.4.1 les vecteurs d'état, contrôle et perturbation sont donnés dessous :

$$\underline{U}(t) = [\Delta u_1(t) \ \Delta u_2(t) \ \Delta u_3(t)] \text{ et } \underline{P}(t) = [\Delta T_{m1} \ \Delta T_{m2} \ \Delta T_{m3}]$$

Le vecteur du contrôle $\underline{U}(t)$ est un vecteur de signaux stabilisateurs qui représentent le PSS sortie a machines différentes.

Les équations dynamiques du PSS dans la formule de système d'état, est donné dessous :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Delta N_{1i}(t)) = K_{PSS} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\Delta \omega_i) - \frac{\Delta N_{1i}(t)}{T_{wi}} \quad (I.25)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Delta N_{2i}(t)) = \left[\Delta N_{1i}(t) - \Delta N_{2i}(t) + T_{1i} \frac{\partial}{\partial t} (\Delta N_{1i}(t)) \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Delta u_i(t)) = \left[\Delta N_{2i}(t) + T_{3i} \frac{\partial}{\partial t} (\Delta N_{2i}(t)) - \Delta u_i(t) \right] \quad (I.26)$$

D, C et Γ_1 sont les matrices associées à propos avec le modèle PSS avec dimensions des vecteurs d'état augmenté en suivant :

$$\underline{X}c(t) = [\underline{X}(t) \ XPSS(t)] \quad (I.27)$$

Donc le système d'état est finalement décrit en suivant :

$$\dot{\underline{X}}c(t) = A_c \cdot \underline{X}c(t) + \Gamma c \cdot \underline{P} \quad (I.28)$$

Où :

$$A_c = \begin{bmatrix} A & B_1 \\ C & D \end{bmatrix} \quad \Gamma c = \begin{bmatrix} \Gamma \\ \Gamma_1 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \underline{0} & \underline{0} & \underline{b}_1 & \underline{0} & \underline{0} & \underline{b}_2 & \underline{0} & \underline{0} & \underline{b}_3 \end{bmatrix}$$

B_1 dans A_c est une matrice du contrôle redéfinie, avec b_1 , b_2 et b_3 les vecteurs de la colonne de B. Pour déterminer les matrices C et D avec Γ_1 .

I.6. Conclusion

Dans cette partie, nous avons modélisé les éléments du système de puissance et présenté les définitions et les caractéristiques des différents types de la stabilité d'un système de puissance (Modélisation d'un générateur, modèle des alternateurs, modélisation des systèmes de régulation, modèle de la charge, modèle d'une compensation shunt, modèle de la ligne et modèle des transformateurs ...). Le concept général de la stabilité peut se synthétiser en trois groupes (stabilité de l'angle de rotor, la tension et la fréquence).

Cette classification est nécessaire pour mieux comprendre les mécanismes :

- des phénomènes de l'instabilité du système.
- des dispositifs nécessaires pour assurer la stabilité du système.

CHAPITRE II

Métaheuristiques et Réseaux de neurones

II.1. Introduction

Les Métaheuristiques, sont un modèle très important des méthodes approchées destinées à la résolution des problèmes combinatoires. Grâce à elles, on peut proposer aujourd'hui des bonnes solutions pour des problèmes de plus grande taille, et pour de très nombreuses applications qu'il était impossible de traiter auparavant. Ces métaheuristiques, largement utilisées dans tous les domaines, figurent parmi les plus performantes à l'heure actuelle [11].

Dans ce chapitre, trois métaheuristiques sont présentées, l'optimisation par algorithmes génétiques et essaim des particules, et recherche tabou et on va présenter un aperçu sur les réseaux de neurones, et leur application à la conception d'un PSS adaptatif permettant la génération de ses paramètres optimums afin de bien amortir les oscillations électromécaniques d'un système de puissance multi machine étudié

II.2. Définitions

Heuristique : Le recours à une méthode **heuristique** (du verbe grec heuriskein, qui signifie « trouver ») permet de guider le processus dans sa recherche des solutions optimales.

Feigne Baum et Feldman (1963) définissent une **heuristique** comme une règle d'estimation, une stratégie, une astuce, une simplification, ou tout autre sorte de système qui limite drastiquement la recherche des solutions dans l'espace des configurations possibles [11].

Newell, Shaw et Simon (1957) précisent qu'un processus heuristique peut résoudre un problème donné, mais n'offre pas la garantie de le faire [11].

II.3. Métaheuristique

Le mot « métaheuristique » est composé d'un suffixe « méta » qui signifie niveau supérieur est du mot heuristique. Donc le terme métaheuristique signifie trouver un niveau supérieur ou un niveau meilleur de recherche [12].

Pour résumer ces définitions, on peut dire que les propriétés fondamentales des métaheuristiques sont les suivantes :

- ✓ Les métaheuristiques sont des stratégies qui permettent de guider la recherche d'une solution optimale.

- ✓ Le but visé par les métaheuristiques est d'explorer l'espace de recherche efficacement afin de déterminer des solutions (presque) optimales.
- ✓ Les techniques qui constituent des algorithmes de type métaheuristique vont de la simple procédure de recherche locale à des processus d'apprentissage complexes.
- ✓ Les métaheuristiques sont en général non-déterministes et ne donnent aucune garantie d'optimalité.
- ✓ Les métaheuristiques peuvent contenir des mécanismes qui permettent d'éviter d'être bloqués dans des régions de l'espace de recherche.
- ✓ Les concepts de base des métaheuristiques peuvent être décrits de manière abstraite, sans faire appel à un problème spécifique.
- ✓ Les métaheuristiques peuvent faire appel à des heuristiques qui tiennent compte de la spécificité du problème traité, mais ces heuristiques sont contrôlées par une stratégie de niveau supérieur.
- ✓ Les métaheuristiques peuvent faire usage de l'expérience accumulée durant la recherche de l'optimum, pour mieux guider la suite du processus de recherche.

II.3.1. Caractéristiques des métaheuristiques

Les métaheuristiques sont généralement caractérisées par leurs [12] :

- ✓ Optimum non garanti.
- ✓ Généralisation et application possible à une large classe de problèmes.
- ✓ Difficulté de prévoir la performance.
- ✓ Existence de preuves de convergence asymptotique pour certaines méthodes.
- ✓ Nécessité de réglage des paramètres.
- ✓ Nécessité d'adaptation de la méthode au problème traité.
- ✓ Le calcul du gradient de la fonction objectif n'est pas nécessaire à ces méthodes.
- ✓ Elles sont inspirées par des analogies avec la nature.
- ✓ Un réglage long de leurs paramètres est souvent nécessaire pour obtenir des résultats performants.
- ✓ Elles sont coûteuses en temps de calcul.

II.3.2. Classification des Métaheuristiques

Généralement, on distingue deux grands groupes de Métaheuristiques : Les méthodes à base de population ou méthodes évolutives, et les méthodes à point de recherche unique. Cette classification est basée sur le nombre de solutions manipulées à chaque itération.

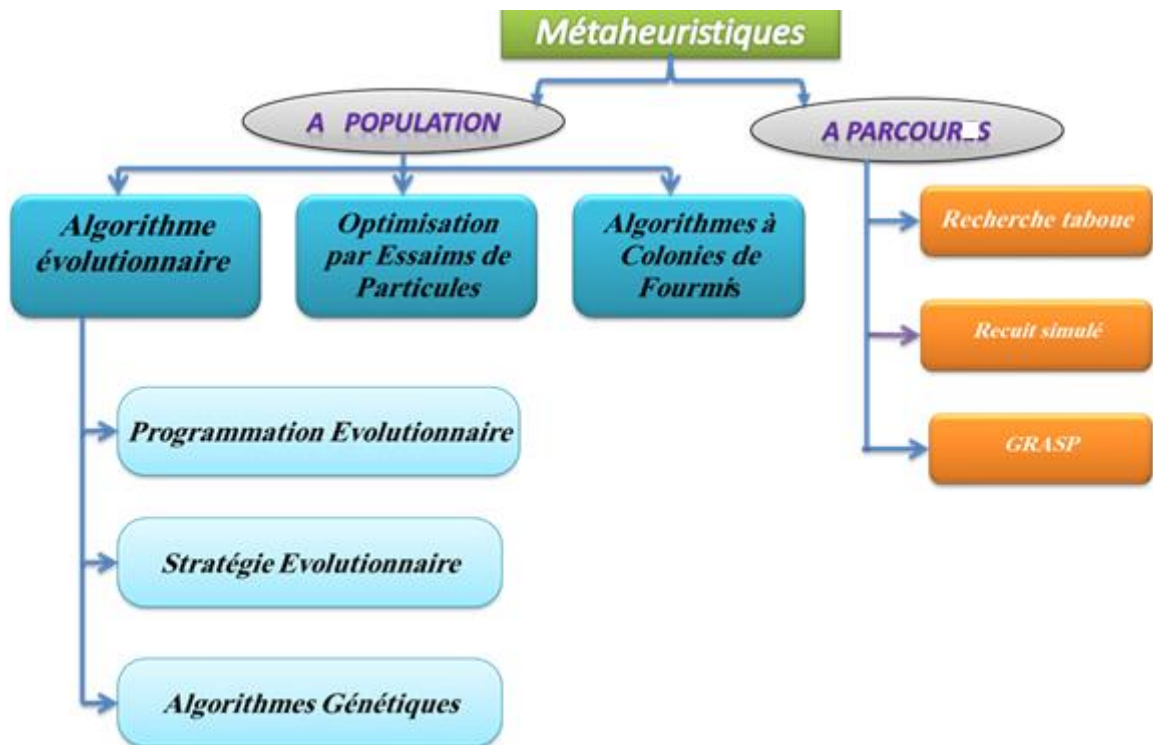


Figure II.1. Classification des métaheuristiques [11]

II.4. Méthodes à base de population

Ces méthodes, comme leur nom l'indique, travaillent sur une population de solutions à la fois. Leur principe général consiste à combiner des solutions entre elles pour en former de nouvelles, en essayant d'hériter les bonnes caractéristiques des solutions parents. Un tel processus est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait. Parmi les métaheuristiques à base de population, on trouve deux grandes classes :

- Algorithmes Génétiques
- Colonies de Fourmis
- Essaims de Particules.

II.5. Optimisation par les Algorithmes génétiques

➤ Principe

Par similitude à la théorie de l'évolution de Darwin, les AG font évoluer les individus d'une population, choisie initialement au hasard, par le biais des opérateurs génétiques : sélection, croisement et mutation [21].

Une stratégie d'évolution est généralement associée à ces opérateurs pour permettre le passage d'une génération à une autre. Ce processus itératif est arrêté en cas de stagnation de l'évolution ou lorsque le nombre maximum de générations est atteint [22].

II.5.1 Opérateurs génétiques

II.5.1.1 Sélection

À chaque génération, des individus se reproduisent, survivent ou disparaissent de la population sous l'action de deux opérateurs de sélection : la sélection pour la reproduction, et la sélection pour le remplacement [22].

De nombreuses techniques de sélection peuvent être citées : la sélection proportionnelle, essentiellement celle par roulette de casino conçue à l'origine par J. Holland pour les algorithmes génétiques, la sélection selon le rang de l'individu et la sélection par tournoi. Ces techniques engendrent des pressions de sélection très différentes. Une pression de sélection élevée conduit l'algorithme à converger prématurément vers un optimum local. Une faible pression empêche l'algorithme de converger [21].

II.5.1.2 Croisement

Les techniques de croisement citées dans la littérature diffèrent par le nombre de points de croisement entre les parents et le mode d'échange du matériel génétique. Le nombre de parents et le nombre d'individus produits constituent des variantes de chaque technique. Le mécanisme de croisement est généralement appliqué selon une probabilité qui varie entre 0,5 et 0,8 [22].

II.5.1.3 Mutation

Ce mécanisme introduit dans la population une variabilité aléatoire, selon une probabilité entre 0,01 et 0,1. La mutation aléatoire déterministe, la mutation « bit-flip » et la mutation gaussienne auto-adaptative sont les plus citées dans la littérature [22].

II.5.1.4 Stratégies d'évolution

Une stratégie d'évolution définit les mécanismes qui permettent de passer d'une génération d'individus à une autre. Le nombre maximal de générations est un paramètre de la stratégie d'évolution qui arrête le processus itératif en cas de non-convergence de l'algorithme [22].

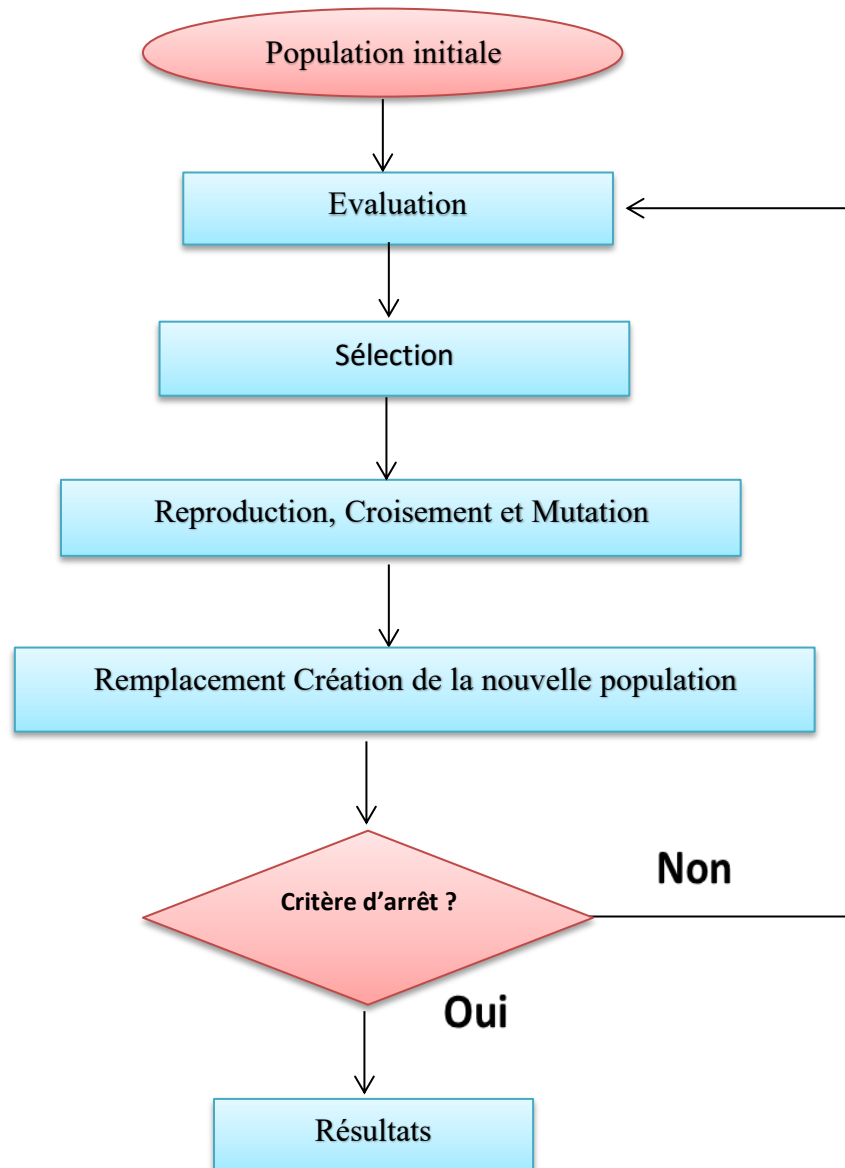


Figure II.2 Organigramme général de l'algorithme génétique

II.6. Optimisation par Essaim de Particules

➤ Principe

Selon le principe de base de l'Optimisation par Essaims de Particules (*Particle Swarm Optimisation- PSO*) et la simulation des nuées d'oiseaux, [Kennedy et Eberhart] ont développé un concept propre à cette méthode [13].

La méthode en elle-même met en jeu des groupes de *particules* sous forme de vecteurs se déplaçant dans l'espace de recherche. Chaque particule est caractérisée par sa *position* et un vecteur de changement de position. À chaque itération, la particule se déplace.

On tient donc compte, dans la mise à jour de la position de chaque particule, de la direction de son mouvement, sa vitesse, sa meilleure position et la meilleure position de ses voisins. La position de chaque agent est représentée par ses coordonnées suivant les deux axes *XY* et également la vitesse exprimée par [v_x : vitesse suivant l'axe *X* et v_y vitesse suivant l'axe *Y*].

La position modifiée de chaque agent est réalisée par l'information de sa position et de sa vitesse. Chaque agent connaît sa meilleure valeur jusqu'ici (*pbest*) et sa position suivant les deux axes *XY*. Cette information est obtenue à partir des expériences personnelles de chaque agent. D'ailleurs, chaque agent connaît la meilleure valeur globale du groupe (*gbest*) parmi les *pbests*.

Chaque agent essaye de modifier sa place en se basant sur les informations suivantes [09] :

- ✓ Positions courantes (x, y).
- ✓ Vitesses courantes (v_x, v_y).
- ✓ Distance entre la position actuelle et *pbest*.
- ✓ Distance entre la position actuelle et *gbest*.

La vitesse de chaque agent s'écrit :

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 rand_1(pbest - s_i^k) + c_2 rand_2(gbest - s_i^k) \quad (II.1)$$

- ✓ v_i^k : vitesse d'agent i à l'itération k .
- ✓ w : poids de la fonction.
- ✓ C_1, C_2 : facteurs pesants.
- ✓ *Rand* : nombre aléatoire entre 0 et 1
- ✓ s_i^k : Position actuelle d'agent i à l'itération k .

✓ p_{best} : la meilleure position de l'agent qu'elle a rencontré dans le passé.

✓ g_{best} : la meilleure solution trouvée par l'essaim des particules.

Le poids de la fonction utilisée dans l'équation (II.1) est donné par :

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \cdot iter \quad (II.2)$$

✓ w_{min} Poids initial.

✓ w_{max} Poids final.

✓ $iter_{max}$ Nombre maximum d'itérations.

En manipulant l'équation (II.2), on peut calculer graduellement une vitesse près de p_{best} et de g_{best}

La position actuelle peut être modifiée par l'équation suivante :

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (II.3)$$

Chaque agent change sa position actuelle en utilisant l'intégration des vecteurs [14].

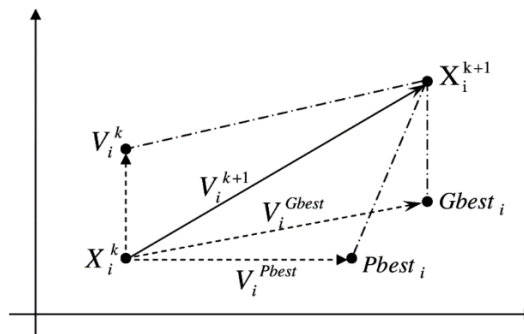


Figure II.3. Concept de modification d'un point de recherche par PSO [11].

✓ s^k Position actuelle.

✓ S^{k+1} Position modifiée.

✓ V^k Vitesse actuelle.

✓ V^{k+1} Vitesse modifiée.

✓ V_{pbest} Vitesse basée sur p_{best} . V_{gbest} Vitesse basée sur g_{best} .

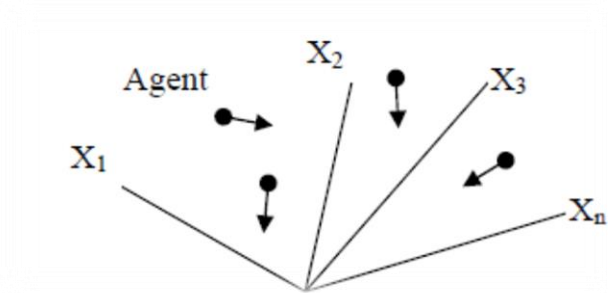


Figure II.4 Recherche du concept avec des agents dans un espace de solution par PSO [11].

➤ Algorithme de PSO

Les étapes suivantes décrivent l'organigramme général de la méthode d'Optimisation par Essaims de Particules :

Étape 1 : Génération d'état initial

Produire aléatoirement dans des limites permises les points de recherche initiaux de chaque agent (sa position (S_i^0) et sa vitesse (V_i^0)), le point de recherche courant de chaque agent est placé à p_{best} . La meilleure valeur évaluée de p_{best} est placée à g_{best} .

Étape 2 : Evaluation de la recherche de la position de chaque agent

La valeur de la fonction objective est calculée pour chaque agent. Si la valeur calculée est meilleure que le p_{best} de l'agent actuel, la valeur p_{best} est remplacée par la valeur calculée. Si la meilleure valeur de p_{best} est meilleure que g_{best} actuel, on remplace g_{best} par la meilleure valeur et l'agent qui correspond à cette meilleure valeur est ainsi stocké.

Étape 3 : Modification de chaque point de recherche

Le point de recherche actuel de chaque agent est changé en introduisant les équations (II.1), (II.2), (II.3).

Étape 4 : Vérification de l'état de sortie

Si le nombre d'itérations atteint le nombre d'itérations maximal donc fin. Si non, Retourner à l'étape 2.

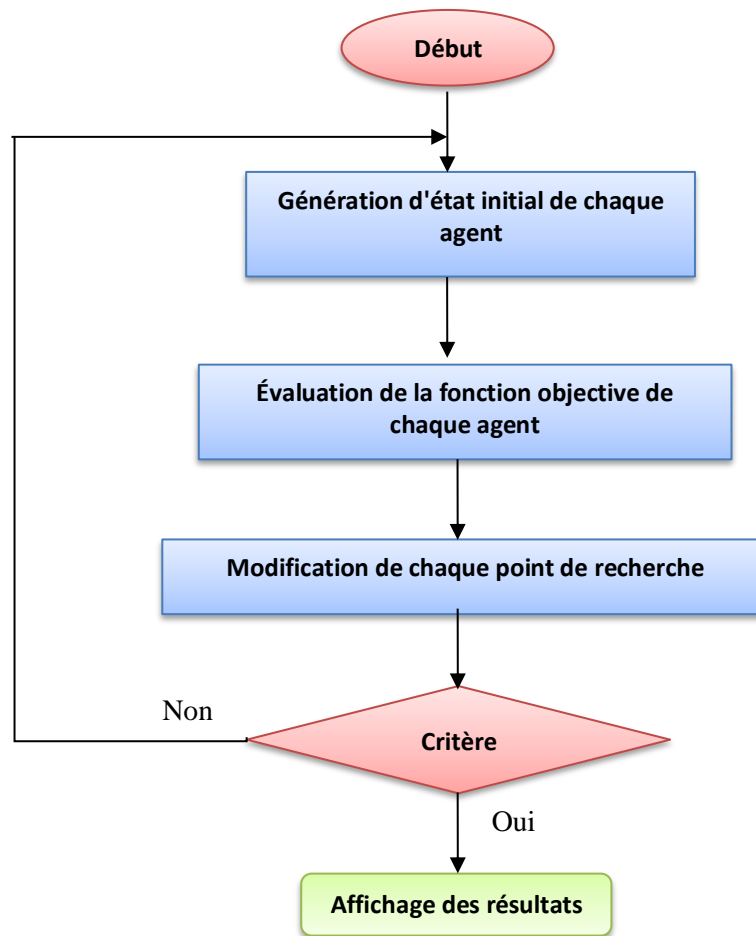


Figure II.5 Organigramme général du PSO

II.7 Méthodes de recherche locale

S'appellent encore Métaheuristiques à trajectoire ou de voisinage. Sont des méthodes dont le principe général est de démarrer par une solution unique x , et tentent de l'améliorer à chaque pas de leur progression. L'ensemble des solutions que l'on peut atteindre à partir d'une solution x est appelé *voisinage* $N(x)$ de cette solution. Déterminer une solution voisine de x dépend bien entendu du problème traité [15].

Cette classe regroupe plusieurs méthodes, les plus importantes sont : la méthode de Descente, le Recuit Simulé, la Recherche Taboue, (Recherche Locale Itérée), GRASP (Recherche Locale Guidée). Les méthodes de Recuit Simulé et Tabou sont plus anciennes et sans doute plus populaires [14].

II.8. Méthode de Recherche Taboue

L'idée de base de la recherche taboue a été initialement introduite par [Glover,1986] et indépendamment, une ébauche a été proposée dans [Hansen, 1986]. Une description de la méthode et de ses concepts est donnée dans [16].

➤ Principe

L'idée de la recherche taboue consiste, à partir d'une solution courante x_n à l'étape n à explorer le voisinage et à choisir la meilleure solution x^* qu'il contient.

Il est essentiel de noter que cette opération peut conduire à augmenter la valeur de la fonction : c'est le cas lorsque les évaluations de tous les points du voisinage ont une valeur plus élevée que l'évaluation du point courant. C'est à partir de ce mécanisme que l'on sort d'un minimum local. Le risque cependant est qu'à l'étape suivante, on retombe dans le minimum local auquel on vient d'échapper. Il faut donc mettre en place un mécanisme qui évite le cyclage ou en tous cas qui permette de faire un choix différent de (x_{n+1}) si la recherche nous ramenait à la solution x_n . La solution retenue consiste en l'introduction d'une mémoire dans l'algorithme. Les solutions déjà explorées sont conservées dans liste (appelée souvent liste taboue) d'une taille donnée, qui est un paramètre ajustable de l'heuristique. Cette liste doit conserver des solutions complètes, ce qui dans certains types de problèmes, peut nécessiter l'archivage d'une grande quantité d'informations. Cette difficulté peut être contournée en ne gardant en mémoire que les mouvements précédents, associés à la valeur de la fonction à minimiser. Dans ce dernier cas, il est tout à fait possible que les listes taboues écartent des solutions non rencontrées. On peut alors imaginer de mettre en place un système permettant de négliger le statut taboue de certaines solutions si un avantage suffisant en résulte. On implémente ceci à l'aide de critères d'aspiration tels que : accepter x^* tabou si x^* donne à la fonction objectif une valeur meilleure que toutes celles obtenues jusqu'à présent ou si la valeur de l'objectif est améliorée d'au moins 1% [17].

Les paramètres les plus critiques à définir dans la méthode de la recherche taboue sont, la mémoire, la longueur de la liste taboue (L), le taboue (le nombre de points autour de recherche autour de voisinage (M)), l'aspiration, l'intensification et la diversification [14]. La méthode de la recherche taboue est caractérisée par :

- ✓ A chaque itération, on examine complètement le voisinage de la solution actuelle, et on va vers la meilleure solution.

✓ On s'interdit de revenir sur une solution visitée dans un passé proche grâce à une liste taboue T (Tabou List) de longueur limitée, qui stocke de manière compacte les dernières solutions visitées.

✓ On conserve en cours de route la meilleure solution trouvée.

➤ **Mémoire**

Elle préserve un nombre d'états visités précédemment accompagné d'un nombre d'états qui pourraient être non acceptés [18].

➤ **Tabous et liste taboue**

Les tabous sont une manière de représenter la mémoire du cheminement effectué pour diriger l'exploration vers des régions non visitées.

La manière la plus simple de définir les tabous est de conserver une liste Taboue qui contient les dernières solutions rencontrées et on empêche à la procédure d'y retourner. On gère cette liste comme une liste circulaire : on élimine le plus vieux tabou et on insère la nouvelle solution (cette solution peut s'avérer coûteuse en termes de quantité d'information requise) [19].

Le rôle de la liste tabou est d'interdire les mouvements cycliques. La longueur de la liste doit être bien choisie. La valeur moyenne des solutions visitées se développe proportionnellement avec l'augmentation de la taille de liste taboue [19].

➤ **Critères d'aspiration**

Les critères d'aspiration permettent de révoquer les mouvements considérés comme taboue lorsqu'ils produisent une bonne solution. Les critères d'aspiration les plus connus sont les suivantes :

- **Meilleur global** : Soient s la meilleure solution connue jusqu'au présent et s'' une solution qui peut être obtenue à partir de la solution courante s' avec une transformation qui utilise des mouvements taboues. Si $f(s'') < f(s)$ on lève les interdictions taboues.

- **Meilleur régional** : quand la solution obtenue à partir des mouvements taboues produit la meilleure solution de la région courante.

- **Meilleur parmi les derniers** : quand la solution obtenue à partir des mouvements tabous donne la meilleure solution parmi les k dernières solutions.

➤ Intensification

L'intensification est une stratégie destinée à restreindre la trajectoire de recherche à une partie de l'espace des solutions jugée prometteuse. Cette approche est motivée par l'idée intuitive que, si l'on exhibe une solution particulièrement intéressante au cours d'une exploration rapide, alors il y a de fortes chances pour qu'un examen plus poussé dans sa proximité en fournisse de meilleures encore.

➤ Diversification

Afin d'éviter qu'une grande région de l'espace de recherche reste inconnue et inexplorée, il est important de diversifier la recherche en effectuant plusieurs lancements aléatoires. La manière la plus simple de le faire est d'effectuer plusieurs lancements aléatoires.

Un autre moyen, qui garantit l'exploration des régions non visitées est de pénaliser les mouvements ou les solutions fréquemment visitées. Cette pénalité est posée de telle sorte à assurer l'éloignement et l'évitement des régions courantes.

Il est également possible d'employer une pénalité sur les mouvements fréquemment effectués pendant toute la procédure de recherche. Pendant cette phase de diversification, les solutions visitées ne sont pas obligatoirement réalisables.

➤ Algorithme à la base de la recherche taboue (TS) [11]

Algorithme : *Tabu Search*

Début

Etape 1. Trouver une solution initiale s_0 . Et poser $s_i = s_0$, $i=0$ et $TL = \varnothing$ (TL : *liste tabou*)

Etape 2. Poser $i=i+1$.

Etape 3. Déterminer le sous-ensemble de voisinage $N^*(s_i) \subset N(s_i)$ telque :

$$\forall s_{i+1} \in N^*(s_i); (s_i, s_{i+1}) \notin TL:$$
 ((s_i, s_{i+1}): le mouvement de s_i à s_{i+1})

Etape 4. Remplacer s_i par s_{i+1} tel qu'est la meilleure solution de $N^*(s_i)$;

Etape 5. Mettre à jour TL ;

Etape 6. Si la condition d'arrêt n'est pas vérifiée, alors aller à 3

Fin.

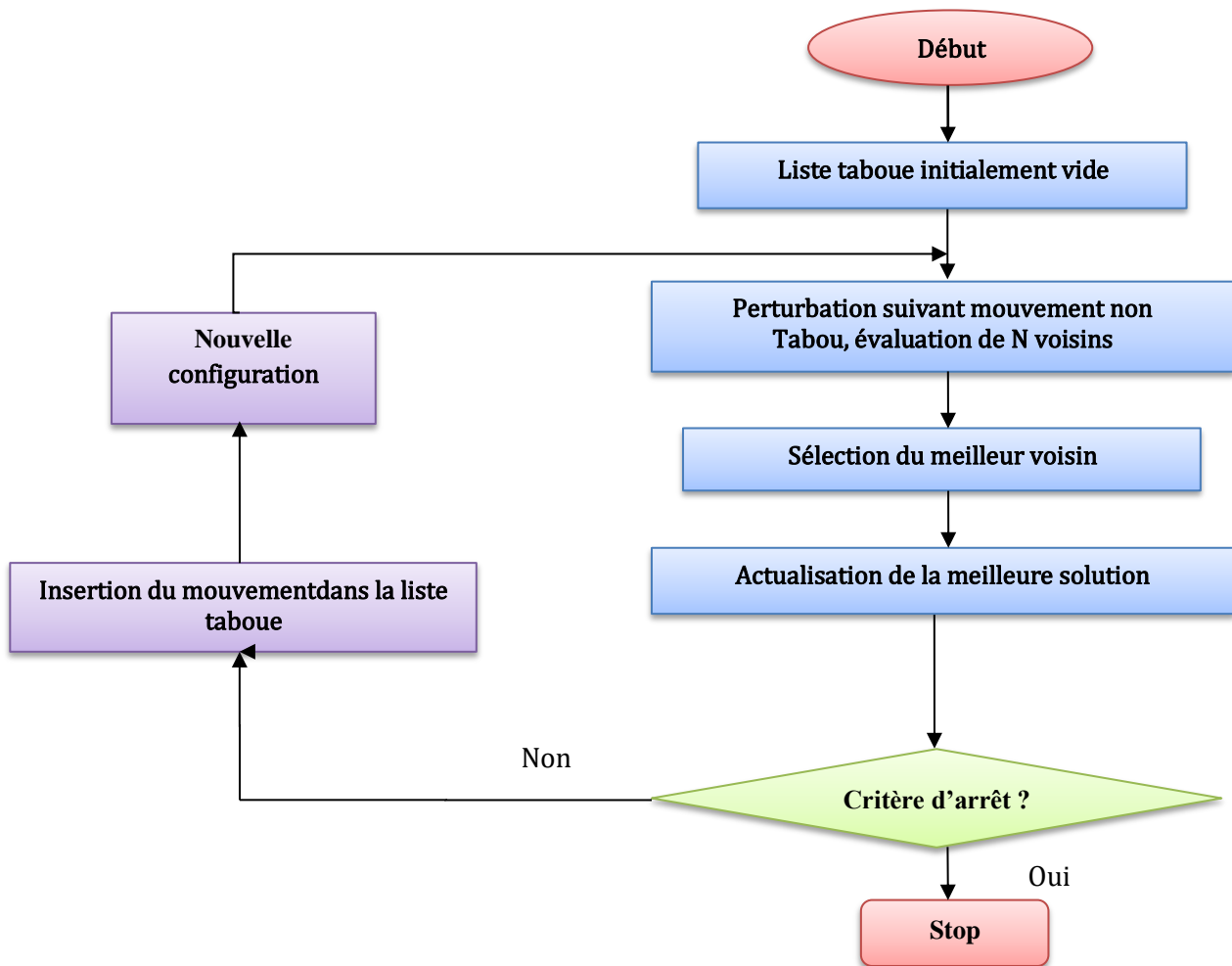


Figure II.6 Organigramme général de la méthode de la recherche Taboue

II.9. Principe et définition des réseaux de neurones

II.9.1 Neurone Biologique

Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former ce que l'on nomme les dendrites. Celles-ci sont parfois si nombreuses que l'on parle alors de chevelure dendritique ou d'arborisation dendritique.

C'est par les dendrites que l'information est acheminée de l'extérieur vers le soma, corps du neurone. Cette information traitée par le neurone chemine ensuite le long de l'axone (unique) pour être transmise aux autres neurones. La transmission entre deux neurones n'est pas directe. En effet, il existe un espace intercellulaire de quelques dizaines d'Angstrom ($1\text{Å}=10^{-9}\text{m}$) entre l'axone du neurone afférent et les dendrites du neurone efférent. La jonction entre deux neurones est appelée la synapse [24] [25].

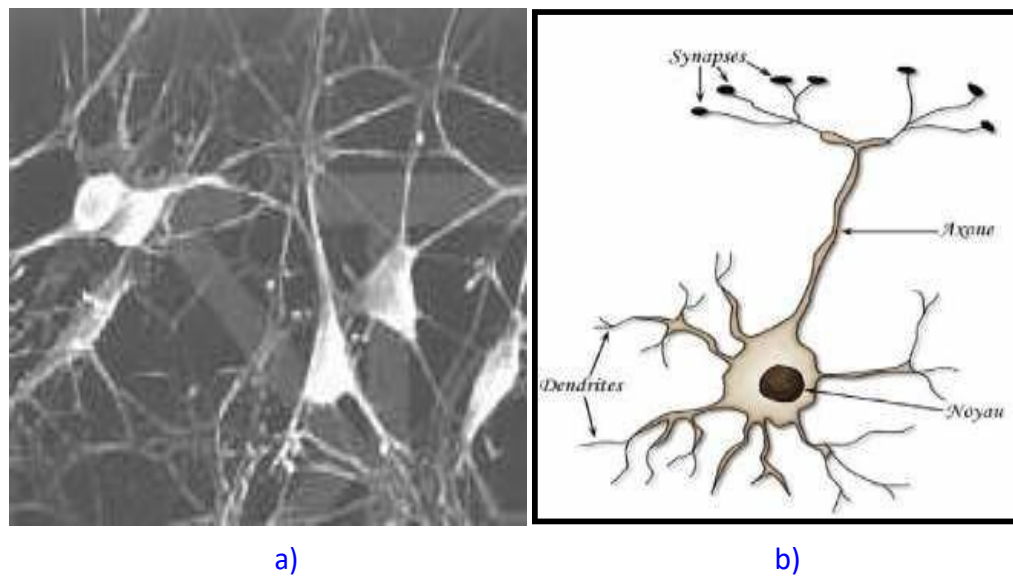


Figure II.7 a) Photo de quelques cellules nerveuses [26]

b) Schéma représentatif de la structure du neurone [27]

II.9.2 Neurone formel ou artificiel

Le neurone formel est défini essentiellement comme étant un processeur très simple qui calcule une somme pondérée et qui applique à cette somme une fonction de transfert non linéaire (échelon, sigmoïde, gaussienne, ...) [26].

La figure II.8 représente le modèle de Mc Culloch et W. Pitts proposé en 1943. Chaque neurone formel (artificiel) est un processus élémentaire qui reçoit un nombre de variables d'entrées X_i en provenance de neurones en amont. A chacune de ces entrées est associé un poids W_i représentatif de la force de la connexion [25].

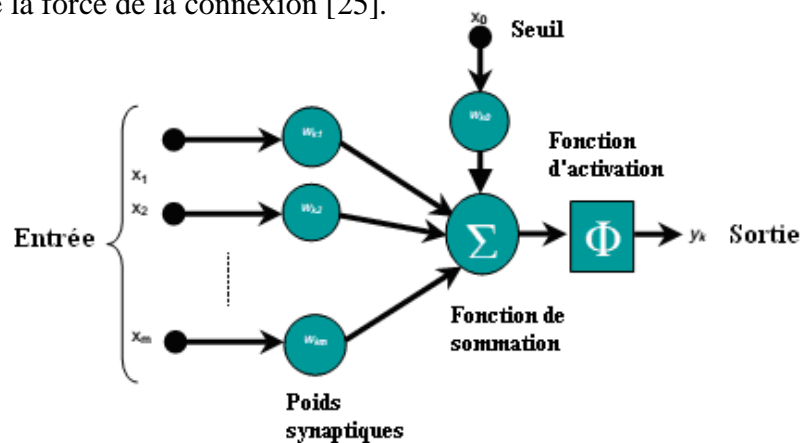


Figure II.8 Structure d'un neurone formel

Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable des neurones en aval. On constate que le modèle biologique du neurone fait intervenir une notion temporelle qui est difficile à intégrer dans un modèle simple. On remplace l'intégration temporelle par une simple sommation des entrées arrivant au neurone. Puis on compare la somme obtenue à un seuil et on déduit la sortie du neurone [25].

On pourra donner une analogie entre le neurone biologique et le neurone formel comme le représente le Tableau II.1 suivant [27] :

Tableau II. 1 Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel

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

II.10 Réseaux de neurones

Un neurone réalise simplement une fonction non linéaire et paramétrée, de ses variables d'entrée. L'intérêt des neurones réside dans les propriétés qui résultent de leur association en réseaux, c'est-à-dire de la composition des fonctions non linéaires réalisées par chacun des neurones [27]. Les habilités de traitement du réseau de neurones sont stockées principalement dans les poids des connexions inter unités qui sont obtenus par un processus d'adaptation ou d'apprentissage [25].

Les réseaux de neurones sont classés généralement en deux types, les réseaux non bouclés (non récurrents) et les réseaux bouclés (récurrents).

III.10.1 Réseaux de neurones non bouclés

Un réseau de neurones non bouclé réalise une (ou plusieurs) fonctions algébriques de ses entrées, par composition des fonctions réalisées par chacun des neurones.

Les réseaux non bouclés, sont utilisés principalement en classification, reconnaissance des formes (caractères, parole), en prédiction et en interpolation non linéaire. On les représente graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux, l'information circulant des entrées vers les sorties, d'une façon telle qu'il n'y ait aucune connexion 'vers l'arrière' d'où l'appellation suivante en anglais : ' feedforward neural network '. Le temps nécessaire pour le calcul de la fonction réalisée par chaque neurone est négligeable, et fonctionnellement on peut

considérer ce calcul comme instantané. Pour cette raison, ils sont souvent appelés réseaux statiques [28].

Les réseaux de neurones non bouclés à plusieurs couches dont les neurones cachés ont une fonction d'activation sigmoïde, sont souvent appelés perceptrons multicouches (ou MLP pour Multi Layer Perceptrons) voir la Figure II.9 [27] [28].

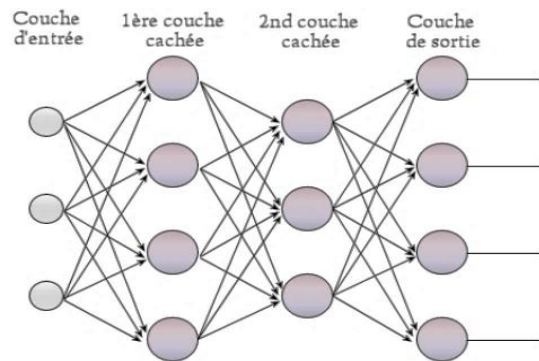


Figure II.9 Réseau de neurones à i entrées, j sorties et deux couches cachée

II. 10. 2 Réseaux de neurones bouclés (ou récurrents)

Un réseau de neurones bouclé à temps discret réalise une (ou plusieurs) équations aux différences non linéaires, par composition des fonctions réalisées par chacun des neurones et des retards associés à chacune des connexions. Dans ce type de réseaux, à chaque connexion est associé un délai, les sorties à l'instant t dépendent non seulement des entrées externes, mais aussi de toute la séquence des entrées externes précédentes. Remarquons que le temps intervient dans ce type de réseaux, pour cette raison on les appelle les réseaux dynamiques. Ces réseaux sont utilisés comme mémoire associative, ou pour des tâches de traitement du signal ou de commande [27] [28].

Tout réseau de neurones bouclé peut être mis sous une forme canonique, comprenant un réseau de neurones non bouclé dont les sorties d'état sont ramenées à ses entrées avec un retard unité. L'élément de base est donc le réseau de neurones non bouclé voir Figure II.10 [27].

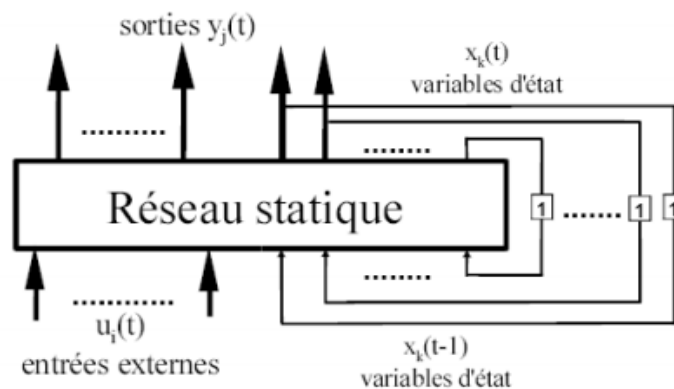


Figure II.10 Forme canonique des réseaux de neurones bouclés [20]

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes classifications des métaheuristiques en détaillant spécialement le principe de base d'une métaheuristique à population qui sont l'algorithme génétique et présenter un aperçu sur les réseaux de neurones, et leur application à la conception d'un PSS adaptatif.

CHAPITRE III

Applications *et* *Résultats*

Applications et Résultats

III.1 Introduction

Le réseau électrique est un système non linéaire, sa configuration et ses paramètres changent en fonction du temps. L'utilisation des stabilisateurs conventionnels a prouvé la non adaptabilité pour tout point de fonctionnement, puisqu'ils sont dimensionnés pour quelques points seulement et non pas pour toutes les situations [23]. C'est pour cette raison qu'il est réaliste de concevoir des PSSs adaptatifs.

On a vu que l'utilisation de l'algorithme génétique est l'une des solutions envisageables pour optimiser les paramètres du PSS pour un point de fonctionnement donné. Mais son inconvénient c'est le temps de calcul qui écarte toute éventualité d'implantation en temps réel (on-line).

Dans ce chapitre, on va présenter en premier lieu un aperçu sur les réseaux de neurones, et leur application à la conception d'un PSS adaptatif permettant la génération de ses paramètres optimums afin de bien amortir les oscillations électromécaniques d'un système de puissance multi machine étudié, et ceci pour n'importe quel point de fonctionnement. Pour réaliser l'opération d'apprentissage des PSSs, on utilise les bases de données présentées à l'annexe, construites par le biais de l'algorithme génétique.

Ainsi on peut tirer profit des caractéristiques d'interpolation des réseaux de neurones, qui peuvent adapter les paramètres des PSSs à n'importe quel point de fonctionnement, appartenant à l'espace d'apprentissage. En plus, leur temps de calcul réduit offre une possibilité d'implémentation en temps réel.

III.2 Formulation du problème

Pour arriver aux bons résultats des paramètres des PSSs optimisés il faut que les deux conditions suivantes soient réunies [07] :

Toutes les parties réelles des valeurs propres (de la matrice d'état du système) doivent être négatives.

Le facteur d'amortissement ζ doit être au maximum pour chaque point de fonctionnement.

La formulation de ce problème d'optimisation est sous la forme suivante :

Fonction objective :

$$\text{Maximiser } F(K_c, T_1, T_2, T_3, T_4) = \text{Min}(\xi_i) \text{ pour tout } (i=1,2,\dots,k)$$

k : est le nombre total des points de fonctionnement à optimiser.

Sujet à :

$$0.1 \leq K_c \leq 50$$

$$0.01s \leq T_1 = T_3 \leq 2s$$

$$0.01s \leq T_4 = T_2 \leq 2s$$

III.3 Amélioration de la stabilité

Pour améliorer la stabilité, il existe plusieurs méthodes dont l'utilisation des PSSs.

III.3.1 Amélioration de la stabilité par les PSSs

La structure du stabilisateur de puissance est une structure classique qui consiste en un gain, un filtre passe-haut et un ou plusieurs blocs de compensation de phase. Ces Stabilisateurs de puissance sont un moyen efficace et économique d'amélioration de la stabilité dynamique d'un système électrique.

Un choix adéquat des paramètres des PSSs engendre un bon amortissement des oscillations induites par les perturbations et améliore la stabilité de l'ensemble du système.

III.4 Optimisation des PSSs d'un système multi-machine

Le système monomachine est généralement utilisé pour l'étude de la stabilité, afin de valider la performance des stabilisateurs de puissance. Mais, il est rarement possible de modéliser les systèmes de puissance par un modèle mono-machine [20].

Donc l'étude d'un système multimachine s'avère plus réaliste et diffère de l'étude d'un système monomachine, vu le nombre de machines et les paramètres à manipuler.

Dans un premier lieu, on doit savoir le nombre et l'emplacement de PSS(s) à installer en se basant sur une étude des facteurs de participation.

III.4.1 Paramètres PSSGA

Voici l'ensemble des paramètres de PSSGA utilisé pour la recherche des Paramètres des deux PSSs à optimiser :

- Nombre de bits binaires pour coder les paramètres nBits = 8
- Nombre de paramètres à optimiser par PSS (K_c , $T_1=T_3$ et $T_2=T_4$) nPar = 3
- Nombre de PSSs nPSS = 2
- Nombre d'individus Nind = 128
- Probabilité de croisement Pc = 0.9
- Nombre de points de croisement cross points = 2
- Probabilité de mutation Pm = 0.09
- Nombre maximal de générations MAXGEN = 30

III.4.2 RESULTATS DES PSSs OPTIMISE

Pour tester les performances du PSS on a adopté les séquences suivantes :

0.1s: application d'un défaut triphasé proche du nœud 3.

0.19s : ouverture de la ligne 3-101.

0.20: fermeture de la ligne 3-101.

10 s : temps de fin de simulation.

Pour générer la base de données, on a varié les puissances générées et les puissances des charges avec le même coefficient d'une valeur égale 0.02 pour chaque pas.

III.5 Application RN au réseau électrique multi machine

Rappelons que l'apprentissage du RN se fait à travers une base de données, générée par l'algorithme génétique, dans le but d'interpoler les paramètres optimisés des PSSs ($K_c, T_{1= T_3}, T_{2= T_4}$). Ces paramètres sont donc les vecteurs de sortie désirés du réseau de neurones (cibles), par contre les entrées sont choisies selon le système étudié (P_{G2}, P_{G11} et P_{G12} des puissances de charges des nœuds 2, 11 et 12 respectivement).

Pour le système multi-machine étudié, la base de données utilisée est constituée de 82 enregistrements ($n=82$ échantillons). Le pas utilisé pour les puissances est de 0.02 pu.

La base de données générée par l'AG utilisée pour l'apprentissage est présentée en annexe.

Ensuite, nous avons conçu des réseaux de neurones par PSS permettant d'auto-ajuster respectivement les paramètres ($K_{C2}, T_{12= T_{32}}, T_{22= T_{42}}$) et ($K_{C11}, T_{111= T_{311}}, T_{211, = T_{411}}$) des deux PSSs. Les paramètres structurels de ces réseaux de neurones sont récapitulés dans le tableau III.1.

Tableau III.1. Paramètres structurels des réseaux de neurones

Entrées	$P_{G2}, P_{G11}, P_{G12}, Q_{G2}, Q_{G11}, Q_{G12}, P_{L4}, P_{L14}, Q_{L4}, Q_{L14}$
Sorties des 10 RN	$K_2, K_{11}, T_{i2}, T_{i11} (i=1, 2, 3, 4)$
Nombre de couches cachées	Une seule couche
Nombre de neurones par couche	10 neurones
Algorithme d'apprentissage	LM : Levenberg-Marquardt
Fonction d'activation ou de transfert	Tangente sigmoïde
Fonction de performance	MSE (Mean Squared Error)
Mode d'apprentissage	Rétropropagation

Tableau III.2. Les l'erreurs quadratiques des réseaux de neurones

Paramètre	Erreur absolue
K_2	$7.81 \cdot 10^{-4}$
$T_{12} = T_{32}$	$2.43 \cdot 10^{-4}$
$T_{22} = T_{42}$	$0.84 \cdot 10^{-4}$
K_{11}	$3.18 \cdot 10^{-4}$
$T_{111} = T_{311}$	$2.33 \cdot 10^{-3}$
$T_{211} = T_{411}$	$5.28 \cdot 10^{-4}$

Pour tester les performances du PSS généré par le RN avec celle du PSS cible généré par l'AG, on choisit un point aléatoirement appartenant à l'intervalle d'apprentissage, les résultats obtenus sont représentée dans le tableau III-3.

Voici quelques résultats générés par le RN :

Tableau III.3. Résultats obtenus par le RN

PG2	QG2	PG11	QG11	PG12	QG12	PL4	QL4	PL14	QL14	K2	T12	T22	K11	T111	T211
6.43	2.16	6.60	1.62	6.43	1.85	8.96	0.92	16.22	0.92	44.7260	0.2397	0.0536	31.7339	0.1430	0.5619
6.59	2.21	6.77	1.66	6.59	1.90	9.19	0.94	16.63	0.94	23.8297	0.3449	0.0604	30.6404	0.4638	0.4638
6.76	2.27	6.94	1.70	6.76	1.95	9.42	0.97	17.05	0.97	26.0258	0.4898	0.0780	28.6123	0.3911	0.0320
6.93	2.33	7.12	1.74	6.93	2.00	9.66	0.99	17.49	0.99	29.4760	0.6401	0.0783	27.1549	0.4915	0.0950
7.10	2.38	7.29	1.79	7.10	2.05	9.90	1.01	17.93	1.01	31.2835	0.6580	0.0985	32.6439	0.5211	0.0647
7.28	2.44	7.48	1.83	7.28	2.10	10.15	1.04	18.38	1.04	37.5683	0.5844	0.0884	37.1798	0.4529	0.0517
7.47	2.51	7.67	1.88	7.47	2.15	10.41	1.07	18.85	1.07	30.0688	0.4947	0.0497	34.1738	0.4553	0.0779
7.65	2.57	7.86	1.92	7.65	2.21	10.67	1.09	19.32	1.09	18.4624	0.4463	0.0725	32.3254	0.5882	0.1058

Pour faire la comparaison entre les PSSs obtenus, on a choisi le point de fonctionnement arbitraire suivant :

PG2=6.43pu, PG11=6.60pu, PG12=6.43pu, QG2 =2.16pu, QG11=1.62pu, QG12=1.85pu, PL4 =8.96pu, PL14=16.22pu, QL4 =0.92pu, QL14 =0.92pu.

Tableau III.4. Comparaison les résultats d'apprentissage RN avec les résultats GA

	K_2	$T_{12} = T_{32}$	$T_{22} = T_{42}$	K_{11}	$T_{111} = T_{311}$	$T_{211} = T_{411}$
GA	45.4902	0.3717	0.0378	35.2941	0.3079	0.0366
RN	44.7260	0.2397	0.0536	31.7339	0.1430	0.5619

Les déviations des vitesses pour les deux types de PSSs obtenus sont présentées par les figures suivantes (1,2,3 et 4) :

Testons et comparons maintenant la dynamique du système dans les trois cas suivants (système sans PSS, système avec PSSs optimises par le GA, système avec PSSs RN).

Les figures suivantes illustrent les déviations des vitesses et les déviations des angles des quatre générateurs du système dans ces trois cas et pour un point de fonctionnement test.

Nous pouvons voir clairement l'amélioration du temps de réponse, ainsi que l'atténuation des oscillations électromécaniques dans le cas d'un auto-ajustement neuronal des paramètres des PSSs en temps réel, tout comme dans le cas de l'algorithme génétique comparativement au système sans PSSs.

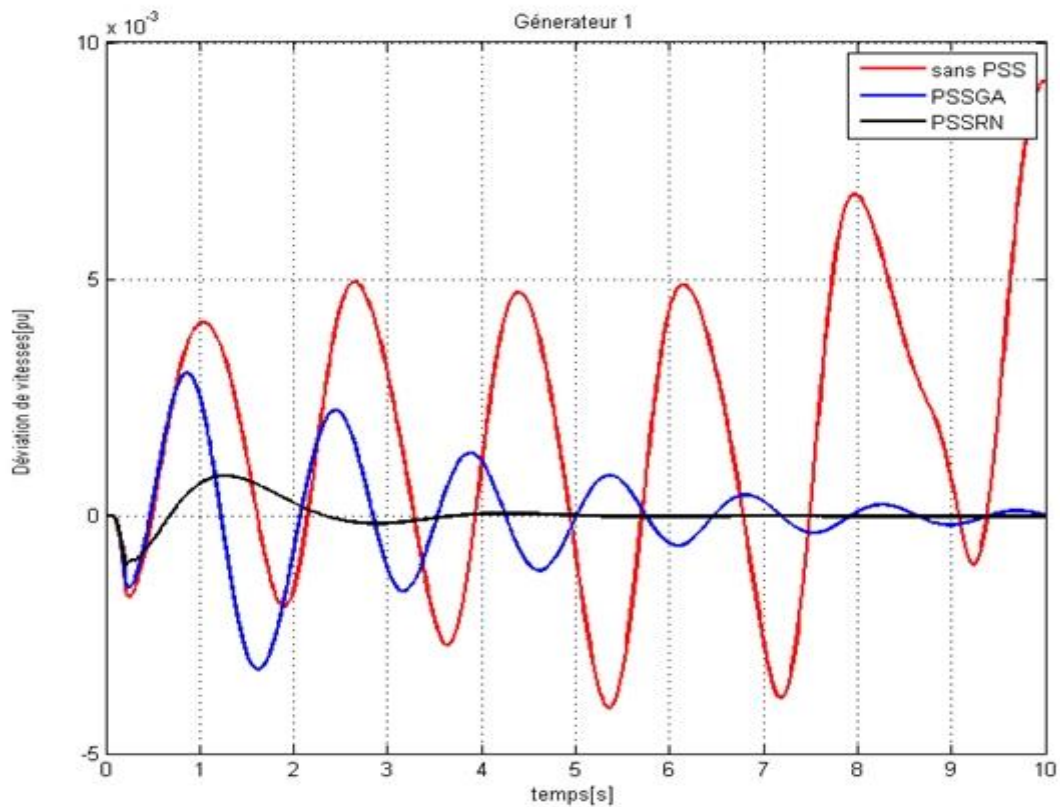


Figure III.1 Déviations de vitesse du générateur 1(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN)

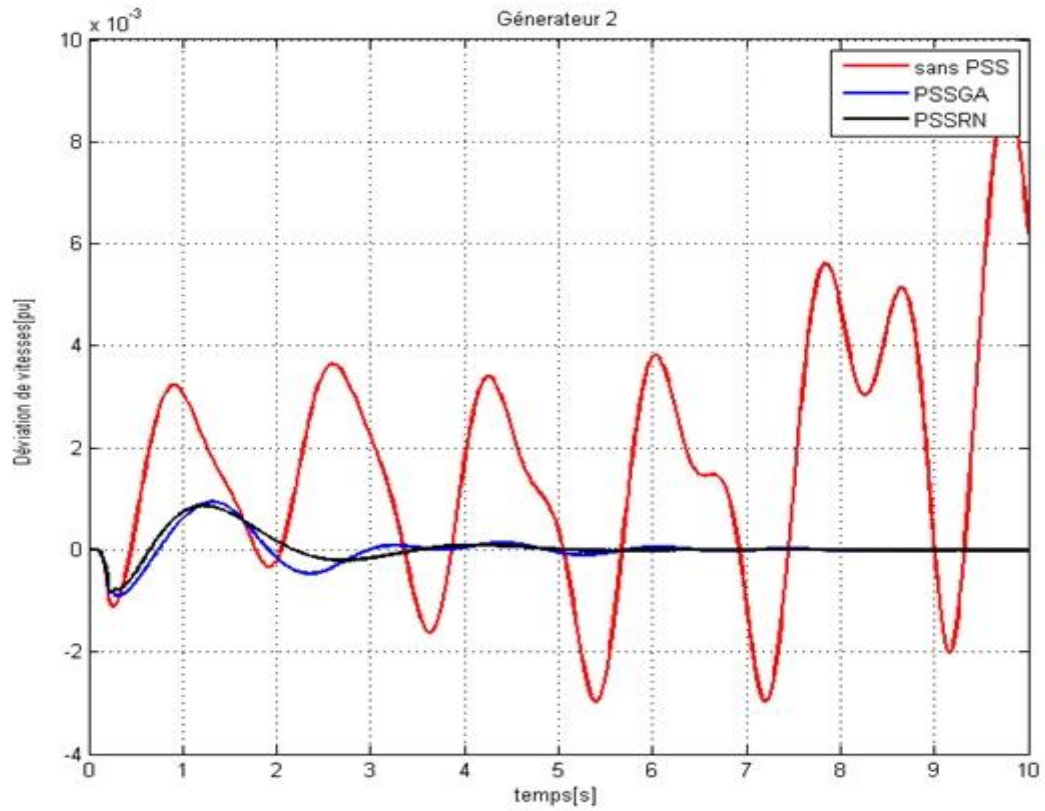


Figure III.2 Déviations de vitesse du générateur 2 (Sasn-PSS/PSSGA/PSSRN)

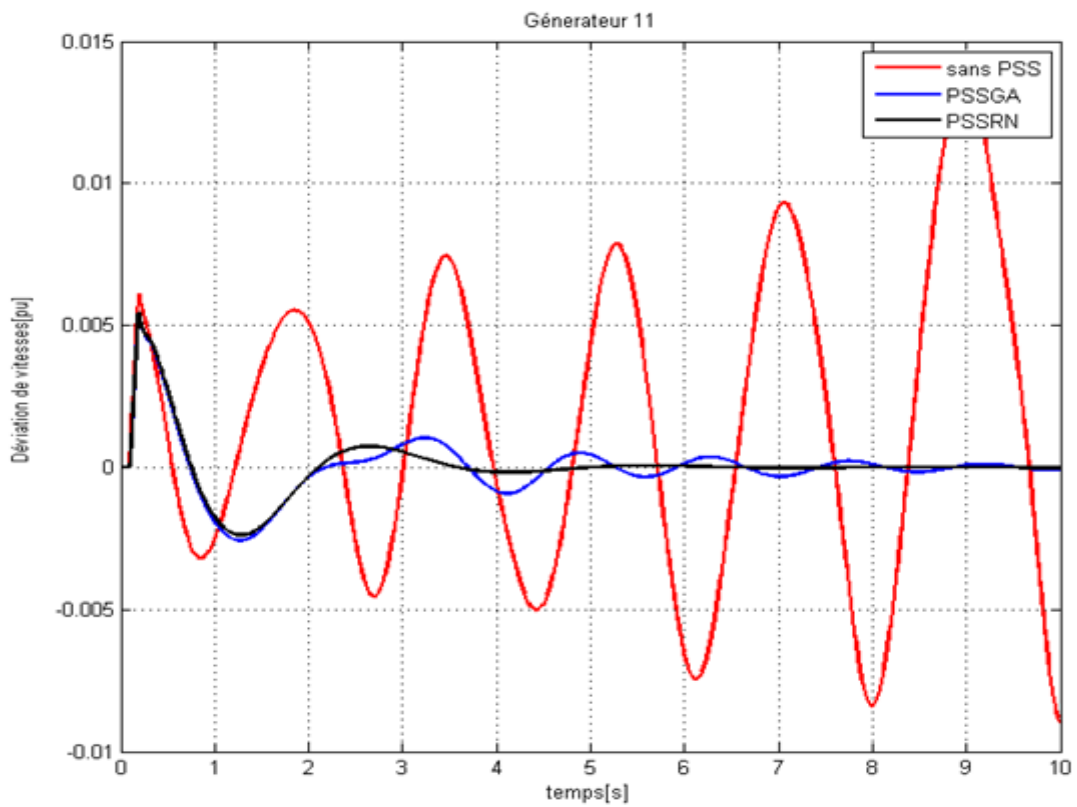


Figure III.3 Déviations de vitesse du générateur 11(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN)

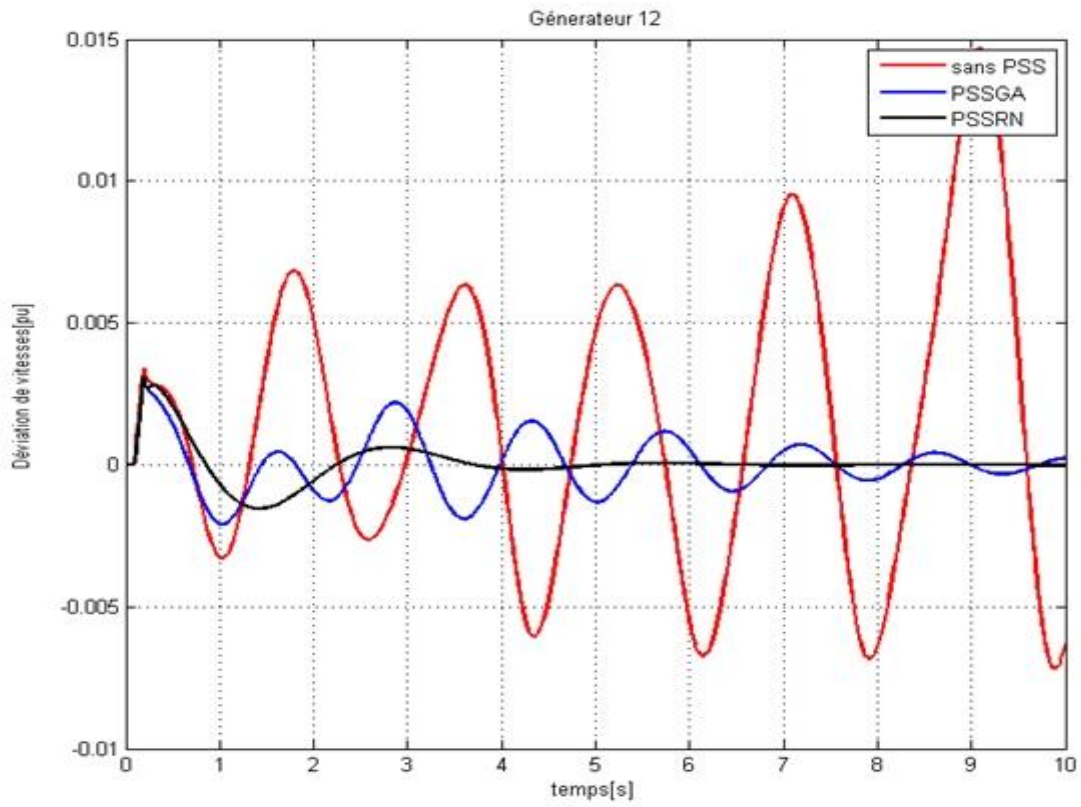


Figure III.4 Déviations de vitesse du générateur 12 (Sans-PSS/PSSGA/PSSRN)

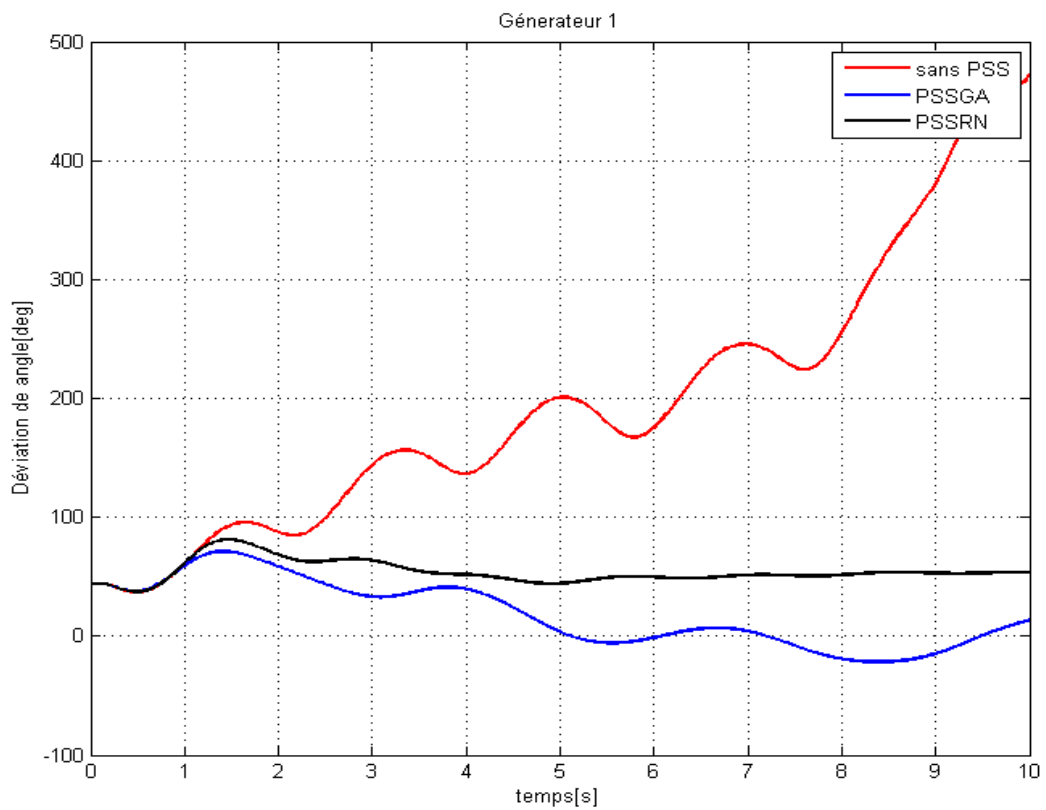


Figure III.5 Déviations d'angle du générateur 1 (Sans-PSS/PSSGA/PSSRN)

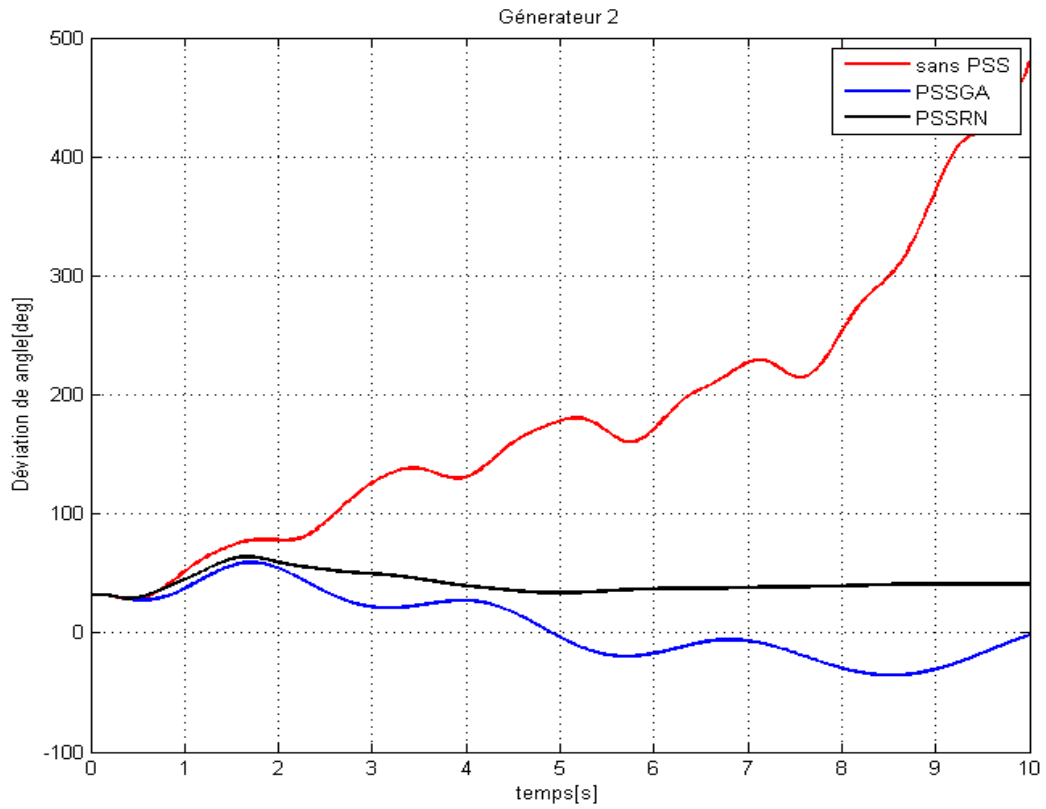


Figure III.6 Déviations d'angle du générateur 2(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN)

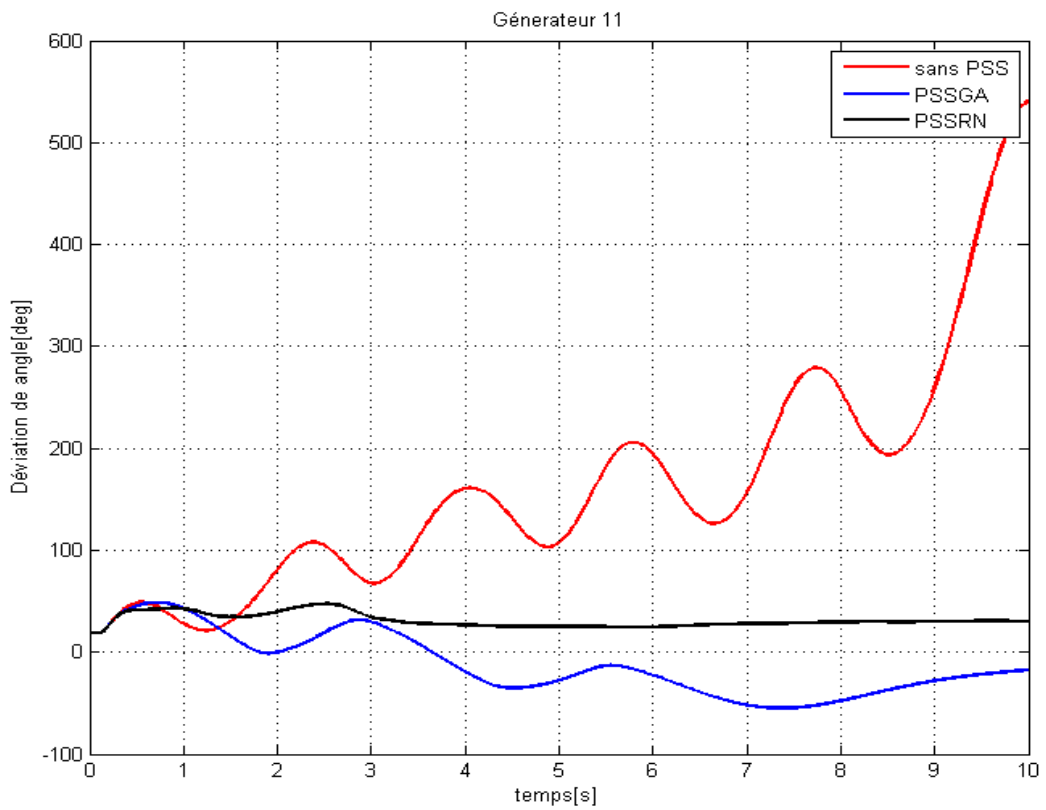


Figure III.7 Déviations d'angle du générateur 11(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN)

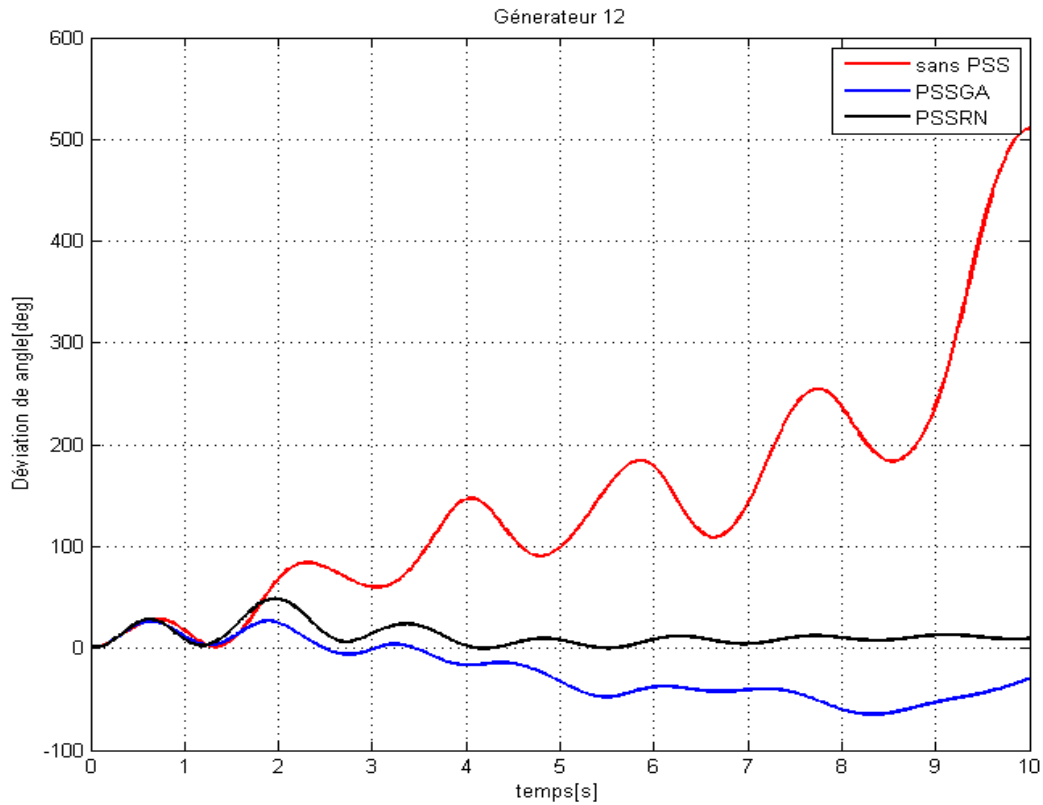


Figure III.8 Déviations d’angle du générateur 12(Sans-PSS/PSSGA/PSSRN)

Dans ce qui suit, on va faire une étude comparative entre nos résultats obtenus par (système sans PSS, système de PSSs optimisés par le GA, système de PSSs RN) dans les tableaux (Tableau. III. 5) et (Tableau. III. 6) :

Tableau III.5. : Comparaison des déviations des vitesses

DEVIATIONS DES VITESSES				
		1 ^{er} pic (pu) 10 ⁻³	2 ^{ème} pic (pu) 10 ⁻³	Temps d’atténuation (s)
Sans PSS	G1	-2.3	4	.....
	G2	-1.1	3	.....
	G11	6	-3	.....
	G12	3.5	3	.....
PSSGA	G1	-1.9	3	6
	G2	-0.09	1	4
	G11	5.5	-2.5	6
	G12	3	2	6
PSSRN	G1	-1	1	2.5
	G2	-0.8	1	3
	G11	5.5	-2.4	3.5
	G12	3	1.5	4

Nous remarquons que le temps d'atténuation des oscillations électromécanique (s) est rapide dans le cas de PSSRN.

Tableau III.6. : Comparaison des déviations des angles

DEVIATION DES ANGLE				
		1 ^{er} pic (degrés)	2 ^{eme} pic (degrés)	Temps d'atténuation des oscillations électromécanique (s)
Sans PSS	G1	40	99	.....
	G2	30	75	.....
	G11	45	15	.....
	G12	20	5	.....
AVEC PSSGA	G1	40	75	5
	G2	30	58	6
	G11	45	0	6
	G12	20	5	6
AVEC PSSRN	G1	40	60	2.5
	G2	30	60	3
	G11	40	35	3
	G12	20	5	4

Nous remarquons que le temps d'atténuation des oscillations électromécanique (s) est rapide dans le cas de PSSRN.

III.6 Interprétation des résultats

Ces résultats dynamiques montrent un bon amortissement des oscillations rotoriques et prouvent la bonne adaptabilité des paramètres des PSSs RN sur tous les cas de variation des charges du réseau, comparativement au système sans PSS et au système de PSSs GA. On remarque également qu'il n'y a pas de différence significative entre les performances du PSS génétique et du PSS RN. Ceci est le résultat d'une bonne interpolation des paramètres du PSS par le réseau de neurones.

En conclusion, nous avons pu concevoir des PSSs RN utilisant de l'intelligence artificielle permettant à leurs paramètres de mieux s'adapter pour n'importe quel point de fonctionnement appartenant à l'espace d'apprentissage. Une fois le réseau de neurones est conçu, le temps de calcul des paramètres des PSSs est très faible et ces PSSs RN peuvent être utilisés en temps réel. Et aussi l'adaptation des paramètres rend les PSSs plus performants et robustes.

Nous remarquons que l'algorithme génétique est très coûteux en temps de calcul et aussi laborieux au point de vue programmation et les paramètres comme la taille de la population et la fonction d'évaluation sont difficiles à établir. Par contre, l'inconvénient majeur du réseau neurones est le temps de construction de la base de données et le temps d'apprentissage de celle-ci qui sont

relativement longs et le choix du nombre de couches et le nombre de neurones, mais une fois réglé il nous élimine l'inconvénient du temps de calcul il devient très rapide.

III.7 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, l'application des PSSGA a été proposée pour assurer un amortissement efficace des oscillations des modes locaux et interrégionaux présentés par le réseau étudié. L'analyse des résultats obtenus montre que les PSS neurogénétique, dont les paramètres sont optimisés comparé à un PSS classique et économise le temps de calcul, permet d'assurer un bon amortissement des oscillations électromécaniques et d'assurer convenablement la stabilité globale du système dans un temps plus court. Finalement une analyse de la performance des PSS RN a été effectuée pour une grande perturbation, avec un défaut triphasé dans le système étudié.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne un problème très important dans l'état actuel lié à l'amélioration de la stabilité angulaire qui est appelé stabilité dynamique en petite perturbation. Nous avons modélisé les éléments du réseau ce qui nous a permis de faire l'étude dynamique du système et sa simulation.

D'autre part, nous avons effectué une linéarisation des équations du système autour d'un point de fonctionnement afin d'obtenir la représentation d'état du système. De plus, les techniques métaheuristiques qui ont prouvé leur efficacité pour la recherche des paramètres optimaux des PSSs, par contre elles prennent un temps de calcul relativement long, ce qui exclut leurs utilisations directement on line. On a utilisé la technique de l'intelligence artificielle (le réseau de neurones) vu sa capacité de prédiction, en partant de bases de données de paramètres optimisés des PSSGA utilisé pour l'opération apprentissage. Les résultats de simulation obtenus sont satisfaisants. En effet, les PSSs neurogénétiques, ont eux mêmes ajusté leurs gains de manière satisfaisante avec un temps de calcul relativement court. Cette solution peut être utilisée pour l'ajustement en temps réel des paramètres de ces PSSs.

Ce travail a été testé et validé sur un réseau de 4 machines 2 zones et l'analyse de la performance des PSSs a été effectué lors d'une grande perturbation avec un défaut triphasé appliqué durant un temps spécifique. Les résultats de comparaison obtenus montrent que le réseaux neurones génèrent les paramètres des PSS dans un temps très court par rapport à la méthode de l'algorithme génétique ce qui permet de reproduire et interpoler les paramètres des PSSs pour n'importe quel point de fonctionnement appartenant à l'intervalle d'apprentissage.

- [1] Alkhatib H. “ Étude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques : optimisation de la régulation par une méthode métaheuristique” Thèse de doctorat université Paul Cézanne d’aix-marseille, 2008.
- [2] Institut de recherche Hydro-Québec “MB-PSS Stabilisateur d’alternateur multibande”, Octobre 2010.
- [3] Cat Febres, P. A. “Damping of Low-Frequency Oscillations by Supplementary Control of Power System Stabilizers”. *UmaPublica, c~ao da Sociedade Brasileira de Matematica Aplicada e Computacional*, 2008-2
- [4] I. Kamwa R. Grondin, G. Trudel, L. G. Brin-Lajoie, J. Taborda “Modeling and closed-loop validation of a new PSS concept, the Multi-Band PSS” *Power Engineering Society General Meeting*, 2003, IEEE, Volume: 3
- [5] Institut de recherche Hydro-Québec “MB-PSS Stabilisateur d’alternateur multibande”, Octobre 2010.
- [6] Amin Khodabakhshian Reza Hemmati, Majid Moazzami “Multi-band power system stabilizer design by using CPCE algorithm” *Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran : Electric Power Systems Research* 101 (2013) 36– 48 Elsevier.
- [7] Doudi B. “ Modélisation et stabilité en petit mouvement d’un réseau électrique multi-machines”, *Mémoire de Magister, Université Amar Téliidji Laghouat*, 2009.
- [8] P. Kundur “Power system stability and control” New York, McGraw-Hill, USA, 1994.
- [9] R. Grondin, I. Kamwa, G. Trudel, J. Taborda, R. Lenstroem, L. G. Lajoie, et al., "The multi-band PSS : A flexible technology designed to meet opening markets," *Proc. CIGRE* 2000, pp. 39-201, 2000.
- [10] I. Kamwa, R. Grondin, and G. Trudel, "IEEE PSS2B versus PSS4B : the limits of performance of modern power system stabilizers," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 903-915, 2005.
- [11] Attia.y, -Cheknane.L, «optimization des paramètres de PSS D’un système de puissance par le méthode PSO », *PFE D’Ingénieur D’Etat en Electrotechnique Université Amar Thelidji-Laghouat*, 2010.
- [12] Lahdeb Mohamed , «théorie et application des méthodes d'hybridation métaheuristique dans les réseaux électriques » *Thèse de magister U.A.T Laghouat* septembre 2007.
- [13] Merigui Bensaoud, Mihoubi Abdelkader, « Analyse de la Stabilité : Réglage des PSSs par Algorithme Génétiques à Contraintes Dynamiques », *PFE D’Ingénieur D’Etat en Electrotechnique Université Amar Thelidji-Laghouat*, 2008.

- [14] Cours Post-Graduation « Analyse , conduite et commande des réseau électrique »2005 /2006
- [15] C. Blum and A. Roli. « Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. »ACM Computing Surveys, 35(3):268-308, 2003
- [16] El-Djillali TALBI « Sélection et réglage de paramètres pour l'optimisation de logiciels d'ordonnancement industriel » Thèse doctorat I.N. Polytechnique de Toulouse 2004.
- [17] Nicolas SIMONS « Optimisation des Architectures Numériques : Formulation du "Design Flow" sous forme d'un problème d'aide à la décision Multi-critères » ULB 2006
- [18] Johann Dréo — Patrick Siarry, « Métaheuristiques pour l'optimisation et auto organisation dans les systèmes biologiques », (LERISS,A 412), 2004.
- [19] Alain Hertz, Eric Taillard , Dominique De Werra, «A Tutorial On Tabu Search», EPFL Lausanne. : Université De Montréal, Canada, H3C3J7 .
- [20] Mekhanet Mohamed « Amortissement d'oscillation électromécanique d'un R E par de PSS » thèse de magister Université Amar Thelidji-Laghout, 2007.
- [21] Goldberg D. E., 1991. Genetic Algorithms. Addison-Wesley, USA,
- [22] Dreó J., Petrowski A., Siarry P et Taillard E.,2003. Métaheurestiques pour l'optimisation difficile :Recuit simulé, recherche avec tabous, algorithmes évolutionnaires et algorithmes génétiques, colonies de fourmis. Eyrolles, Paris.
- [23] Y. Chabane, Commande Hybride Logique Floue - Algorithmes Génétiques pour l'Amortissement de Perturbations dans les Réseaux Electriques, Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, ALGER, 2005.
- [24] C. Touzet, Les Rèseaux de Neurones Artificiels, Ouvrage scientifique, 1992.
- [25] K. Benlarbi, Optimisation Floue, Neuronale et Neuro-floue d'un Système de Pompage Photovoltaïque, Thèse de Magistère, Université de Batna, 2003.
- [26] J. Torres-Moreno, Apprentissage et Généralisation par des Réseaux de Neurones, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1997.
- [27] G. Dreyfus, J.-M. Martiner, M. Samuelides, M. B. Gordon, F.Bardan, S. Thiria, L. Héreal, Réseaux de Neurones Méthodologie et Applications, Edition Eyrolles, 2004.
- [28] Technique, Schneider CT 185, Edition 1997.

- [29] F. Moutarde, Introduction aux Réseaux de neurones et à leurs Applications en Automatique, Ecole des Mines de Paris, 2003.

Données du réseau 2 régions 4 machines

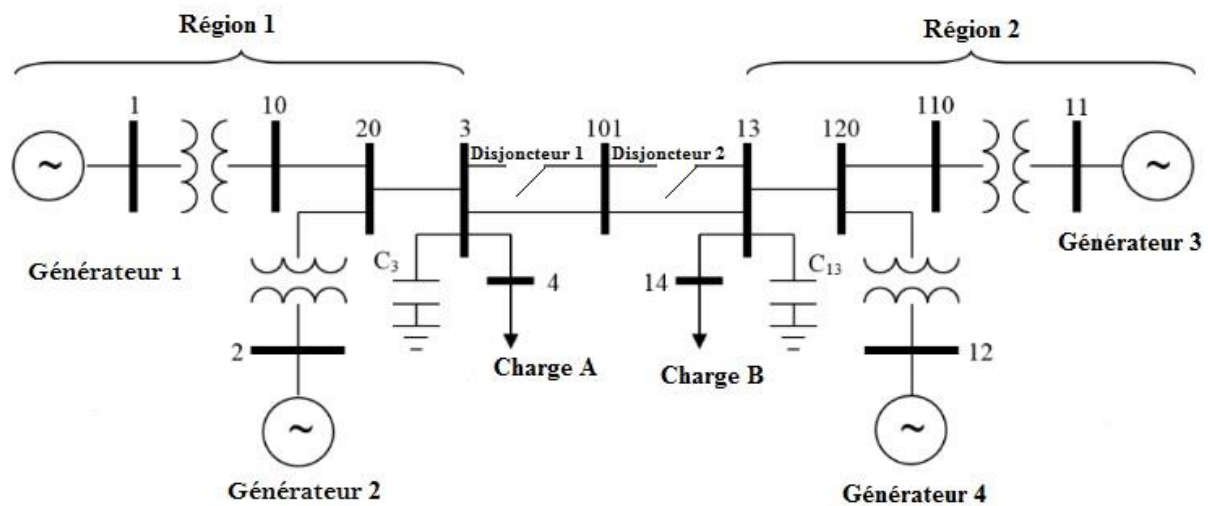
❖ Paramètres des générateurs

	Machine 1	Machine 2	Machine 3	Machine 4
SB(MVA)	900	900	900	900
VB(KV)	20	20	20	20
f(Hz)	60	60	60	60
R_s (Pu)	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
X_d (Pu)	1.8	1.8	1.8	1.8
X_d' (Pu)	0.3	0.3	0.3	0.3
X_q (Pu)	1.7	1.7	1.7	1.7
X_q' (Pu)	0.55	0.55	0.55	0.55
X_l (Pu)	0.2	0.2	0.2	0.2
T_{d0}' (s)	8	8	8	8
T_{d0}'' (s)	0.03	0.03	0.03	0.03
T_{q0}'' (s)	0.4	0.4	0.4	0.4
H(s)	6.5	6.5	6.5	6.5

❖ Paramètres des lignes

Nœud de départ	Nœud d'arrivée	Résistance R (pu)	Réactance X (pu)	Susceptance B (pu)
1	10	0.000	0.0167	0
2	20	0.000	0.0167	0
11	110	0.000	0.0167	0
12	120	0.000	0.0167	0
3	14	0.000	0.005	0
13	14	0.000	0.005	0
10	20	0.0025	0.025	0.0473
20	3	0.0010	0.010	0.0175
3	101	0.0110	0.0110	0.1925
3	101	0.0110	0.0110	0.1925
101	13	0.0110	0.0110	0.1925
101	13	0.0110	0.0110	0.1925
13	120	0.0010	0.010	0.0175
120	110	0.0025	0.025	0.0437

❖ Réseau étudié : Schéma unifilaire 2 régions 4 machines.



❖ Paramètres des PSSs optimisés par l'algorithme génétique

PG2	QG2	PG11	QG11	PG12	QG12	PL4	QL4	PL14	QL14	K2	T12	T22	T32	T42	K11	T111	T211	T311	T411
6.3	2.115	6.471	1.584	6.3	1.818	8.784	0.9	15.9	0.9	39.8039	0.2156	0.0413	0.2156	0.0413	30.5882	0.4682	0.0487	0.4682	0.0487
6.32	2.12	6.49	1.59	6.32	1.82	8.81	0.90	15.94	0.90	45.098	0.1037	0.073	0.1037	0.073	37.8431	1.3381	0.1645	1.3381	0.1645
6.33	2.13	6.50	1.59	6.33	1.83	8.83	0.90	15.98	0.90	5.8824	0.3404	0.0533	0.3404	0.0533	30.7843	0.2686	0.0272	0.2686	0.0272
6.35	2.13	6.52	1.60	6.35	1.83	8.85	0.91	16.02	0.91	39.6078	0.2788	0.0358	0.2788	0.0358	49.2157	0.7037	0.0757	0.7037	0.0757
6.36	2.14	6.54	1.60	6.36	1.84	8.87	0.91	16.06	0.91	31.5686	0.4879	0.0506	0.4879	0.0506	29.2157	0.0876	0.0918	0.0876	0.0918
6.38	2.14	6.55	1.60	6.38	1.84	8.89	0.91	16.10	0.91	28.4314	0.3032	0.031	0.3032	0.031	34.902	0.2963	0.0478	0.2963	0.0478
6.40	2.15	6.57	1.61	6.40	1.85	8.92	0.91	16.14	0.91	18.4314	0.2376	0.0321	0.2376	0.0321	24.5098	0.9883	0.1658	0.9883	0.1658
6.41	2.15	6.59	1.61	6.41	1.85	8.94	0.92	16.18	0.92	23.1373	0.1817	0.0522	0.1817	0.0522	28.2353	1.0248	0.4357	1.0248	0.4357
6.43	2.16	6.60	1.62	6.43	1.85	8.96	0.92	16.22	0.92	45.4902	0.3717	0.0378	0.3717	0.0378	35.2941	0.3079	0.0366	0.3079	0.0366
6.44	2.16	6.62	1.62	6.44	1.86	8.98	0.92	16.26	0.92	41.7647	0.3168	0.0758	0.3168	0.0758	20.9804	0.3101	0.0348	0.3101	0.0348
6.46	2.17	6.63	1.62	6.46	1.86	9.01	0.92	16.31	0.92	44.902	0.5017	0.0696	0.5017	0.0696	8.6275	0.8373	0.324	0.8373	0.324
6.48	2.17	6.65	1.63	6.48	1.87	9.03	0.93	16.35	0.93	16.2745	0.099	0.0737	0.099	0.0737	23.9216	0.0622	0.4484	0.0622	0.4484
6.49	2.18	6.67	1.63	6.49	1.87	9.05	0.93	16.39	0.93	22.3529	0.3241	0.0354	0.3241	0.0354	28.4314	0.3304	0.0338	0.3304	0.0338
6.51	2.18	6.68	1.64	6.51	1.88	9.07	0.93	16.43	0.93	7.2549	0.6245	0.0683	0.6245	0.0683	20.000	0.4167	0.054	0.4167	0.054
6.52	2.19	6.70	1.64	6.52	1.88	9.10	0.93	16.47	0.93	15.098	0.4577	0.0498	0.4577	0.0498	26.0784	2.0495	0.2956	2.0495	0.2956
6.54	2.20	6.72	1.64	6.54	1.89	9.12	0.93	16.51	0.93	28.2353	0.9617	0.0969	0.9617	0.0969	28.4314	0.4277	0.0569	0.4277	0.0569
6.56	2.20	6.73	1.65	6.56	1.89	9.14	0.94	16.55	0.94	28.2353	0.2314	0.0391	0.2314	0.0391	46.6667	0.5641	0.0842	0.5641	0.0842
6.57	2.21	6.75	1.65	6.57	1.90	9.16	0.94	16.59	0.94	21.3725	0.401	0.0502	0.401	0.0502	49.0196	0.3029	0.0397	0.3029	0.0397
6.59	2.21	6.77	1.66	6.59	1.90	9.19	0.94	16.63	0.94	20.1961	1.0841	0.1101	1.0841	0.1101	6.8627	0.2184	0.0332	0.2184	0.0332
6.61	2.22	6.79	1.66	6.61	1.91	9.21	0.94	16.68	0.94	29.4118	0.328	0.0441	0.328	0.0441	46.6667	0.3553	0.0588	0.3553	0.0588
6.62	2.22	6.80	1.67	6.62	1.91	9.23	0.95	16.72	0.95	6.8627	0.1963	0.0564	0.1963	0.0564	39.2157	0.6779	0.0714	0.6779	0.0714
6.64	2.23	6.82	1.67	6.64	1.92	9.26	0.95	16.76	0.95	10.7843	0.3845	0.0422	0.3845	0.0422	44.902	0.3743	0.0474	0.3743	0.0474
6.66	2.23	6.84	1.67	6.66	1.92	9.28	0.95	16.80	0.95	39.8039	0.4958	0.054	0.4958	0.054	26.6667	0.2427	0.0861	0.2427	0.0861
6.67	2.24	6.85	1.68	6.67	1.93	9.30	0.95	16.84	0.95	15.6863	0.3111	0.047	0.3111	0.047	29.8039	0.2486	0.0502	0.2486	0.0502
6.69	2.25	6.87	1.68	6.69	1.93	9.33	0.96	16.89	0.96	30.000	0.2541	0.0747	0.2541	0.0747	41.7647	0.2526	0.0313	0.2526	0.0313
6.71	2.25	6.89	1.69	6.71	1.94	9.35	0.96	16.93	0.96	42.3529	0.2138	0.0403	0.2138	0.0403	28.8235	0.3429	0.0489	0.3429	0.0489
6.72	2.26	6.91	1.69	6.72	1.94	9.37	0.96	16.97	0.96	35.098	0.4967	0.0651	0.4967	0.0651	45.4902	0.3587	0.0369	0.3587	0.0369
6.74	2.26	6.92	1.69	6.74	1.94	9.40	0.96	17.01	0.96	49.0196	0.3065	0.0368	0.3065	0.0368	18.0392	0.3994	0.0618	0.3994	0.0618
6.76	2.27	6.94	1.70	6.76	1.95	9.42	0.97	17.05	0.97	23.5294	0.4601	0.1253	0.4601	0.1253	1.5686	0.2771	0.0354	0.2771	0.0354
6.77	2.27	6.96	1.70	6.77	1.95	9.44	0.97	17.10	0.97	26.0784	0.7807	0.1028	0.7807	0.1028	30.7843	0.5494	0.0588	0.5494	0.0588
6.79	2.28	6.97	1.71	6.79	1.96	9.47	0.97	17.14	0.97	33.3333	0.4519	0.0486	0.4519	0.0486	7.6471	0.153	0.046	0.153	0.046
6.81	2.29	6.99	1.71	6.81	1.96	9.49	0.97	17.18	0.97	6.0784	0.3468	0.0793	0.3468	0.0793	7.8431	0.3114	0.0376	0.3114	0.0376
6.82	2.29	7.01	1.72	6.82	1.97	9.51	0.97	17.23	0.97	14.3137	1.3753	0.1425	1.3753	0.1425	35.8824	0.4533	0.0544	0.4533	0.0544
6.84	2.30	7.03	1.72	6.84	1.97	9.54	0.98	17.27	0.98	8.4314	0.5808	0.0833	0.5808	0.0833	10.5882	0.34	0.0443	0.34	0.0443
6.86	2.30	7.04	1.72	6.86	1.98	9.56	0.98	17.31	0.98	5.6863	0.3009	0.0332	0.3009	0.0332	27.6471	0.4607	0.0502	0.4607	0.0502
6.88	2.31	7.06	1.73	6.88	1.98	9.59	0.98	17.36	0.98	17.8431	0.2352	0.0308	0.2352	0.0308	47.6471	0.5265	0.1726	0.5265	0.1726
6.89	2.31	7.08	1.73	6.89	1.99	9.61	0.98	17.40	0.98	45.2941	1.2084	0.1356	1.2084	0.1356	3.5294	0.2168	0.0749	0.2168	0.0749
6.91	2.32	7.10	1.74	6.91	1.99	9.63	0.99	17.44	0.99	50.000	0.3628	0.0379	0.3628	0.0379	11.9608	0.3632	0.0562	0.3632	0.0562
6.93	2.33	7.12	1.74	6.93	2.00	9.66	0.99	17.49	0.99	4.5098	0.441	0.0517	0.441	0.0517	7.0588	0.394	0.045	0.394	0.045

6.94	2.33	7.13	1.75	6.94	2.00	9.68	0.99	17.53	0.99	1.3725	0.2658	0.055	0.2658	0.055	34.1176	0.5571	0.0589	0.5571	0.0589
6.96	2.34	7.15	1.75	6.96	2.01	9.71	0.99	17.57	0.99	49.4118	0.4651	0.0871	0.4651	0.0871	33.7255	0.3659	0.0763	0.3659	0.0763
6.98	2.34	7.17	1.75	6.98	2.01	9.73	1.00	17.62	1.00	32.1569	1.3581	0.139	1.3581	0.139	44.1176	1.3926	0.2234	1.3926	0.2234
7.00	2.35	7.19	1.76	7.00	2.02	9.76	1.00	17.66	1.00	38.8235	0.6285	0.0633	0.6285	0.0633	25.4902	0.278	0.0287	0.278	0.0287
7.01	2.35	7.20	1.76	7.01	2.02	9.78	1.00	17.71	1.00	44.7059	0.2677	0.0449	0.2677	0.0449	35.098	0.3771	0.047	0.3771	0.047
7.03	2.36	7.22	1.77	7.03	2.03	9.80	1.00	17.75	1.00	46.0784	0.3973	0.0526	0.3973	0.0526	11.9608	0.2093	0.0743	0.2093	0.0743
7.05	2.37	7.24	1.77	7.05	2.03	9.83	1.01	17.79	1.01	31.7647	0.3674	0.0709	0.3674	0.0709	31.3725	0.4175	0.0434	0.4175	0.0434
7.07	2.37	7.26	1.78	7.07	2.04	9.85	1.01	17.84	1.01	3.7255	0.088	0.0886	0.088	0.0886	11.7647	1.8381	0.2176	1.8381	0.2176
7.08	2.38	7.28	1.78	7.08	2.04	9.88	1.01	17.88	1.01	29.8039	0.4473	0.0467	0.4473	0.0467	30.3922	0.2865	0.0329	0.2865	0.0329
7.10	2.38	7.29	1.79	7.10	2.05	9.90	1.01	17.93	1.01	44.1176	0.1417	0.1121	0.1417	0.1121	40.5882	0.3936	0.0421	0.3936	0.0421
7.12	2.39	7.31	1.79	7.12	2.05	9.93	1.02	17.97	1.02	32.1569	0.7231	0.0848	0.7231	0.0848	34.902	0.1551	0.1035	0.1551	0.1035
7.14	2.40	7.33	1.79	7.14	2.06	9.95	1.02	18.02	1.02	46.4706	2.4343	0.2662	2.4343	0.2662	30.7843	0.2847	0.0328	0.2847	0.0328
7.16	2.40	7.35	1.80	7.16	2.06	9.98	1.02	18.06	1.02	23.7255	0.7922	0.124	0.7922	0.124	45.6863	0.238	0.0294	0.238	0.0294
7.17	2.41	7.37	1.80	7.17	2.07	10.00	1.02	18.11	1.02	42.549	1.5235	0.2772	1.5235	0.2772	32.7451	0.4193	0.0428	0.4193	0.0428
7.19	2.41	7.39	1.81	7.19	2.08	10.03	1.03	18.15	1.03	6.8627	0.1963	0.0564	0.1963	0.0564	39.2157	0.6779	0.0714	0.6779	0.0714
7.21	2.42	7.41	1.81	7.21	2.08	10.05	1.03	18.20	1.03	49.8039	0.3274	0.0371	0.3274	0.0371	43.3333	0.7087	0.0943	0.7087	0.0943
7.23	2.43	7.42	1.82	7.23	2.09	10.08	1.03	18.24	1.03	13.3333	0.5405	0.1867	0.5405	0.1867	26.6667	0.2485	0.0367	0.2485	0.0367
7.25	2.43	7.44	1.82	7.25	2.09	10.10	1.04	18.29	1.04	42.7451	0.9861	0.1455	0.9861	0.1455	48.6275	1.406	0.2437	1.406	0.2437
7.26	2.44	7.46	1.83	7.26	2.10	10.13	1.04	18.34	1.04	36.8627	0.2854	0.0304	0.2854	0.0304	10.1961	0.287	0.0334	0.287	0.0334
7.28	2.44	7.48	1.83	7.28	2.10	10.15	1.04	18.38	1.04	42.7451	1.4317	0.1478	1.4317	0.1478	9.6078	0.3449	0.0372	0.3449	0.0372
7.30	2.45	7.50	1.84	7.30	2.11	10.18	1.04	18.43	1.04	28.0392	0.4633	0.048	0.4633	0.048	6.6667	0.2277	0.0323	0.2277	0.0323
7.32	2.46	7.52	1.84	7.32	2.11	10.20	1.05	18.47	1.05	43.1373	0.5412	0.0579	0.5412	0.0579	36.6667	0.2213	0.0386	0.2213	0.0386
7.34	2.46	7.54	1.84	7.34	2.12	10.23	1.05	18.52	1.05	33.3333	0.4519	0.0486	0.4519	0.0486	7.6471	0.153	0.046	0.153	0.046
7.35	2.47	7.55	1.85	7.35	2.12	10.25	1.05	18.57	1.05	45.6863	0.5359	0.0536	0.5359	0.0536	0.1961	0.6564	0.1194	0.6564	0.1194
7.37	2.48	7.57	1.85	7.37	2.13	10.28	1.05	18.61	1.05	1.1765	0.2661	0.0316	0.2661	0.0316	49.0196	0.6036	0.0787	0.6036	0.0787
7.39	2.48	7.59	1.86	7.39	2.13	10.31	1.06	18.66	1.06	45.2941	0.3124	0.1051	0.3124	0.1051	19.6078	0.2371	0.04	0.2371	0.0400
7.41	2.49	7.61	1.86	7.41	2.14	10.33	1.06	18.71	1.06	23.5294	0.1937	0.0428	0.1937	0.0428	24.3137	0.244	0.0297	0.244	0.0297
7.43	2.49	7.63	1.87	7.43	2.14	10.36	1.06	18.75	1.06	46.6667	0.2828	0.0293	0.2828	0.0293	43.3333	0.528	0.0603	0.528	0.0603
7.45	2.50	7.65	1.87	7.45	2.15	10.38	1.06	18.80	1.06	4.3137	0.4231	0.0513	0.4231	0.0513	36.6667	0.3466	0.0473	0.3466	0.0473
7.47	2.51	7.67	1.88	7.47	2.15	10.41	1.07	18.85	1.07	15.4902	0.2582	0.0304	0.2582	0.0304	40.3922	0.3827	0.0406	0.3827	0.0406
7.48	2.51	7.69	1.88	7.48	2.16	10.44	1.07	18.89	1.07	41.7647	0.782	0.0874	0.782	0.0874	30.5882	0.3021	0.0314	0.3021	0.0314
7.50	2.52	7.71	1.89	7.50	2.17	10.46	1.07	18.94	1.07	40.1961	0.937	0.0995	0.937	0.0995	12.549	0.4289	0.0448	0.4289	0.0448
7.52	2.53	7.73	1.89	7.52	2.17	10.49	1.07	18.99	1.07	43.5294	0.2851	0.0293	0.2851	0.0293	13.3333	0.2351	0.0325	0.2351	0.0325
7.54	2.53	7.75	1.90	7.54	2.18	10.51	1.08	19.04	1.08	13.7255	0.3526	0.0532	0.3526	0.0532	46.8627	1.0554	0.1068	1.0554	0.1068
7.56	2.54	7.76	1.90	7.56	2.18	10.54	1.08	19.08	1.08	21.1765	0.4248	0.0442	0.4248	0.0442	24.5098	0.3031	0.0362	0.3031	0.0362
7.58	2.54	7.78	1.91	7.58	2.19	10.57	1.08	19.13	1.08	35.098	0.6822	0.0737	0.6822	0.0737	49.0196	0.3288	0.0444	0.3288	0.0444
7.60	2.55	7.80	1.91	7.60	2.19	10.59	1.09	19.18	1.09	30.000	0.2194	0.0701	0.2194	0.0701	27.8431	0.5495	0.0763	0.5495	0.0763
7.62	2.56	7.82	1.91	7.62	2.20	10.62	1.09	19.23	1.09	8.0392	0.1337	0.055	0.1337	0.055	44.1176	2.3069	0.2809	2.3069	0.2809
7.64	2.56	7.84	1.92	7.64	2.20	10.65	1.09	19.27	1.09	11.7647	0.0904	0.1132	0.0904	0.1132	9.0196	0.4313	0.0629	0.4313	0.0629
7.65	2.57	7.86	1.92	7.65	2.21	10.67	1.09	19.32	1.09	12.9412	0.3049	0.0532	0.3049	0.0532	40.9804	1.0477	0.1564	1.0477	0.1564
7.67	2.58	7.88	1.93	7.67	2.21	10.70	1.10	19.37	1.10	25.2941	0.3201	0.0413	0.3201	0.0413	20.000	0.277	0.0337	0.277	0.0337
7.69	2.58	7.90	1.93	7.69	2.22	10.73	1.10	19.42	1.10	17.451	0.5466	0.0716	0.5466	0.0716	46.8627	0.5506	0.0634	0.5506	0.0634
7.71	2.59	7.92	1.94	7.71	2.23	10.75	1.10	19.47	1.10	28.6275	0.5719	0.0746	0.5719	0.0746	31.3725	0.2556	0.0426	0.2556	0.0426