REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE

DEPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

Thèse présentée par :

GHOURAF Djamel Eddine

Pour l'obtention du diplôme:

Doctorat en sciences

Spécialité : électrotechnique
Option : Convertisseurs Electromécaniques

Intitulé de la thèse :

OPTIMISATION PAR LES ALGORITHMES GENETIQUES POUR L'ADAPTATION DE LA COMMANDE ROBUSTE H∞ DANS LE CONTROLE AUTOMATIQUE D'EXCITATION DES GENERATEURS SYNCHRONES PUISSANTS

Devant le jury composé de :

Mr. ABID Mohamed	Professeur	UDL-Sidi bel abbés	Président
Mr. NACERI Abdellatif	MCA	UDL-Sidi bel abbés	Rapporteur
Mr. YOUNES Mimoun	Professeur	UDL-Sidi bel abbés	Examinateur
Mr. BENABDELLAH Mohamed Badreddine	MCA	USTO-Oran	Examinateur
Mr. MANSOURI Abdallah	Professeur	USTO-MB-Oran	Examinateur
Mr. TAHOUR Ahmed	Professeur	UMS-Mascara	Examinateur

Soutenue le : 08 / 05 /2017

Laboratoire de recherche IRECOM


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

Nous remerciements dieu pour nous avoir donner la force morale et physique pour accomplir ce modeste travail.

*Mes remerciements les plus vifs et chaleureux, vont à mon encadreur de thèse **NACERI Abdellatif** Maître de Conférences A (U.D.L. Sidi Bel-Abbés) pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la confiance, la patience et la compréhension qu'il m'a toujours manifesté …*

*Je remercie monsieur **ABID Mohamed** Professeur (U.D.L.Sidi Bel-Abbès), d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

*J'adresse mes remerciements aux membres du Jury qui ont accepté d'examiner cette thèse en lui apportant de l'intérêt, monsieur **YOUNES Mimoun** Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès), monsieur **BENABDELLAH Mohamed Badreddine** Maître de Conférences A (USTO-Oran), monsieur **MANSOURI Abdallah** Professeur (ENPO-Oran), monsieur **TAHOUR Ahmed** Professeur (UMS-Mascara)*

Je veux aussi exprimer ma vive reconnaissance envers tous les enseignants d'Electrotechnique d'U.D.L. Sidi Bel-Abbès.

Je dédie ce travail

A la mémoire de ma mère

A mon père

Mes frères et ma sœur

SOMMAIRE

CHAPITRE II
MODELISATION ET SIMULATION DE SYSTEME DE PUISSANCE ETUDIE

CHAPITRE III
ÉTUDE ET IMPLEMENTATION DU SYSTEME SMIB SOUS INTERFACE GRAPHIQUE GUI DEVELOPPE

CHAPITRE IV

ETUDE ET APPLICATION DES PSS ROBUSTES BASES SUR LES TECHNIQUES FREQUENTIELLES AVANCEES

CHAPITRE V

OPTIMISATION PAR ALGORITHMES GENETIQUES ET L'ESSAIME PARTICULE

ETUDE COMPARATIVE ET APPLICATION NUMERIQUE

CHAPITRE VI

OPTIMISATION PAR LES ALGORITHMES GENETIQUES POUR L'ADAPTATION PARAMETRIQUE DES PSS-H∞ ROBUSTES

NOMENCLATEURS & ABREVIATIONS

Nomenclateurs & Abréviations

Nomenclatures:

E_{fd} : Tension de sortie de l'excitation.

V_R : Tension de sortie de l'AVR.

V_F : Tension de sortie du filtre (stabilisation).

$E_q^{'}$: La FEM correspondante.

V_t : La tension de sortie de l'alternateur.

P_e/Q_L : Puissance active / réactive fournie au réseau.

T_e : Couple électrique.

T_m : Couple mécanique

P_m : Puissance mécanique

V_d/V_q : Composantes selon l'axe directe / l'axe en quadrature de la tension

I_d/I_q : Composantes du courant selon l'axe direct et en quadrature

X_e/L_e : Réactance / inductance da la ligne de transmission

X_d/L_d : Réactance / inductance synchrone longitudinale

X'_d/L'_d : Réactance /inductance transitoire longitudinale

$X_d^{''}$: Réactance sub-transitoire longitudinale

X_q/L_q : Réactance / inductance synchrone transversale

$X_q^{''}$: Réactance sub-transitoire transversale

X_s : Réactance inductive shunt statorique

X_f : Réactance inductive du circuit d'excitation

X_{sf} : Réactance inductive shunt du circuit d'excitation

X_{sfd} : Réactance inductive shunt du circuit d'amortissement sur l'axe directe

X_{sf1q}/X_{sf2q} : Réactance inductive shunt du premier / seconde amortisseur sur l'axe en quadrature

R_a/R_f : Résistance active statorique / circuit d'excitation (rotor)

R_{1d} : Résistance active du circuit d'amortissement selon l'axe direct

R_{1q}/R_{2q} : Résistance active du premier/seconde circuit d'amortissement selon l'axe en Quadrature

T'_{d0} : Constante du temps transitoire longitudinale à circuit ouvert

T_j : Constante d'inertie

L_D / L_Q : Inductances des circuits amortisseurs D-D' (premier)/ Q-Q' (deuxième)

M_F : Inductance mutuelle entre le circuit rotorique et statorique

M_D : Inductance mutuelle entre le circuit statorique et amortisseur D-D'

M_Q : Inductance mutuelle entre le circuit statorique et amortisseur Q-Q'

M_R : Inductance mutuelle entre les circuits rotoriques

[p.u] : (per unit) : système d'unité relative

[S] : Secondes

Acronymes et Abréviations :

- GA : Algorithme génétique
- PSO : Optimisation par l'essaime particule
- SEE : Systèmes Electro – Energétiques
- RPI : Réseau de puissance Infinie
- SE : Système d'Excitation
- MS : Machines Synchrones
- GS : Générateurs Synchrones
- SMIB: Single Machine Infinite Bus (Système Standard IEEE - MS relié à un RPI).
- AVR : Automatic Voltage Regulator : Régulateur Automatique de Tension
- PSS : Power System Stabiliser : Système Stabilisateur des Puissances
- LFC : Load Frequency Control : contrôle de la fréquence de charge
- Cahier des charges : Le choix de la structure du correcteur est laissé aux ingénieurs électrotechniciens (et/ou automaticiens), le réglage des différents paramètres du SEE se Faisant à partir de tables et de tracés graphiques.
- LTI : Linear Time Invariant : système linéaire stationnaire
- SISO : Single Input Single Output : système à une entrée et une sortie
- MIMO : Multi Input Multi Output : système à plusieurs entrées et plusieurs sorties
- CAO: Conception Assistée par Ordinateur
- LQG : commande Linéaire Quadratique Gaussienne
- H_2 : Commande robuste Quadratique (commande LQG avec filtre de Kalman)
- H_∞ : Commande robuste infini
- CNA/CAN : Conversion Numérique Analogique/ Conversion Analogique Numérique

• LMI : Linear Matrice Inequality (inégalité matricielle linéaire)
• FLC: Fuzzy Logic Control (Commande par logique floue)
• NNC: Neural Network Control (Commande par réseaux de neurones)
• NFC: Neuro – Fuzzy Control (Commande Neuro – Floue)
• ANFIS: Artificial Neuro-Fuzzy Inference Systems (Systèmes Neuronales à inférence floue)
• FMRLC: Fuzzy Model Reference Learning Control (commande floue à apprentissage par Modèle de Référence)
• MRAC: Model Reference Adaptive Control (commande adaptative par modèle de référence)
• SMC : Sliding Mode Control : commande par mode de glissement
• FP : Fonctions de Pondération
• MEF: Méthode éléments finis; MDF: Méthode différences finis ; MVF: des Volumes finis
• RCT – MATLAB©: Robust Control Toolbox du logiciel MATrix LABoratory©
• dq: Axes de transformé de PARK (axes direct ‘d’ et inverse ‘q’)
• Actionneurs : Excitatrices pour MS
• Signaux à commander : sorties du système commandé (ΔE_{fd} - f.e.m d’excitatrice)
• Signaux de perturbations : internes (variation des paramètres de la MS) ou externes dans le SEE (variation de la charge, court – circuit triphasé…)
• Signaux de commande : entrées de la boucle de commande :

pour l’AVR : ΔU_{MS} - variation de la tension de la MS, et pour le PSS : $\Delta\omega_u/\omega'$- variation/dérivée de la fréquence de tension U_{MS}, ΔI_f / I_f' – variation/dérivée du courant d’excitation, ΔU_f - variation de la tension d’excitation, ΔP - variation de la puissance active, $\int P$ - intégrale de la puissance active

• Signaux mesurés : variables d’états estimées et mesurés (les courants statoriques, rotoriques et amortisseurs, les différents flux, vitesse de rotation de MS…).
• Bruits de mesure : perturbations incertains (incertitudes à l’entrée et à la sortie du système).

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

Liste des Tableaux

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis une vingtaine d'années, les systèmes de puissance doivent faire face à des défis très importants, et la libération du marché de l'électricité crée des scénarios de fonctionnement beaucoup plus complexes que par le passé. L'augmentation permanente de la dépendance électrique de la société moderne implique un fonctionnement des systèmes de puissance à 100% de leur capacité et une sûreté maximale. En outre, la qualité de la puissance électrique est devenue actuellement un grand souci pour les consommateurs et les fournisseurs. Par conséquent, des critères rigoureux de développement et de fonctionnement sont de plus en plus exigés.

De nos jours, les problèmes liés au fonctionnement des réseaux de transport et de production d'énergie électrique ont pris une importance considérable. Face à une consommation d'électricité qui ne cesse d'augmenter et à des conditions d'environnement très contraignantes, les réseaux d'énergie électrique ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et interconnectés. Le transport se fait, en outre, sur de longues distances en utilisant des lignes de grande capacité de transport. Cette complexité de structure a de très nombreuses conséquences. La difficulté de maintenir un profil de tension acceptable a substantiellement augmenté. La stabilité de tension du réseau est alors caractérisée par sa capacité de maintenir la tension aux bornes de la charge dans les limites spécifiées dans le fonctionnement normale.

L'étude du comportement de la tension dans les réseaux électriques est devenue une préoccupation majeure des exploitants et planificateurs de ces systèmes. En fait, plusieurs incidents généralisés survenus dans le monde ont été associés à des instabilités de tension [1, 2, 3, 4]. Ce mode d'instabilité n'est pas encore bien maîtrisé, comparé au mode d'instabilité angulaire (dynamique et transitoire) [5, 6]. En effet, le mécanisme causant l'instabilité de tension semble l'un des plus importants problèmes à clarifier [7]. Aujourd'hui encore, il n'y a pas une théorie disponible et largement acceptée pour l'analyse de la stabilité de tension. Les problèmes liés à ce type d'instabilité constituent alors, dans plusieurs pays, un axe de recherche très important [8].

L'étude de stabilité des systèmes de puissances et le comportement dynamique et statique de ces systèmes besoins des modèles mathématiques fideles et capables de synthétiser les lois de commandes, d'autre part un grand nombre de méthodes de réduction des modèles dynamiques des systèmes électriques ont été développées au fil des années. Avec un ordre plus petit que le modèle complet, le modèle réduit doit être capable de reproduire certains phénomènes physiques importants qui existent sur le système complet. Le comportement qui doit être préserve suite à la réduction peut différer d'une méthode à une autre. Toutefois, toutes les approches existantes supposent la connaissance de la structure de tout le système à réduire, alors que cette information n'est pas toujours accessible.la réduction de l'ordre du système considéré comme un inconvénient dépend la fiabilité de l'étude de comportement **réel** du système et la synthèse de la loi de commande, dans ce contexte nous utiliserons un modèle d'équations dynamiques du générateur puissant dite de PARK – GARIOV [9] basé sur la modélisation par réseaux de permeances et prend en considération certains phénomènes électriques importants.

Pour l'amélioration de stabilité des systèmes de puissances plusieurs approches et techniques permettant l'évaluation de la stabilité de système de puissance ont été proposées dans la littérature. Dans le milieu des années 60 l'application des systèmes d'excitations statiques pour les générateurs puissants a donné naissance à des grandes investigations sur leurs effets néfastes (auto – oscillations) sur la stabilité dans son sens général. CONCORDIA et DEMELLO, dans leur travail innovateur [10] ont proposé l'idée d'appliquer un signal de commande additive au régulateur AVR (automatic voltage regulator) afin de remédier aux problèmes de stabilité. En premier lieu la synthèse des stabilisateurs de réseau PSS (Power System Stabilizers), été basé sur les techniques classiques de contrôle (type PID par exemple), depuis lors des innovations ont été apporté.

Les régulateurs Classiques, jouent un rôle très important dans l'amélioration de stabilité, se sont des outils très efficaces pour l'augmentation de degré de stabilité statique et dynamique des SEE et assurent l'amortissement des oscillations électromécaniques.

Ces stabilisateurs conventionnels (réalisés souvent en PI ou PID) ont été longuement acceptés. Mais L'inconvénient principal de ces types de régulation classique étant la mauvaise adaptation à des changements vis-à-vis les paramètres du système et lors des variations brusques des conditions de fonctionnement du système à commander (problèmes incertains).

L'évolution technologique des composants de l'électronique de puissance et des convertisseurs de haute performance, ainsi que les nouveaux progrès et développement dans l'architecture des micro processeurs, et des théorie de la commande automatique moderne, ont permis la mise en œuvre de récents algorithmes de commande plus complexes mais fiable autour d'un calculateur numérique.

Ces techniques avancées utilisent les concepts de commandes : optimale, adaptative et robuste. Une des principales caractéristiques actuellement exiges des régulateurs est la robustesse de stabilité, c'est l'aptitude de maintenir la stabilité en présence des variations paramétriques du système (ou non-paramétriques), appelé ainsi incertitudes ou aussi les problèmes incertains. L'investigation des algorithmes de commande adaptative (Logique flou, réseau de neurones…) a été largement reportée. Récemment, les algorithmes de commande optimal et robuste: commande LQG, par mode de glissement, commande robuste H_2 et H_∞ ont été appliqués. Tous ces algorithmes supposent la connaissance d'un modèle du système ou des intervalles sur les incertitudes.

La commande fréquentielle avancée (commande robuste H_2 ou H_∞) est née de la recherche d'une meilleure formalisation du cahier des charges par des critères mathématiques dont la résolution efficace permet de synthétiser un correcteur satisfaisant ce cahier des charges. La commande fréquentielle avancée (commande robuste H_∞) [8, 9] propose une solution (imparfaite mais très intéressante).

En pratique, on essaye de transformer des spécifications en termes de marge de robustesse, de rejet de perturbation et de bruit, de performance en régulation en un problème d'optimisation d'un critère H_∞. Pour ce faire, ce sont les fonctions de pondération fréquentielle qui jouent ce rôle. En effet, un choix judicieux de ces fonctions donne au correcteur synthétisé les propriétés désirées. Par ailleurs, on peut également souhaiter optimiser plusieurs critères à la fois comme un critère de performance et un critère de robustesse ce qui nécessite le plus souvent un compromis. Différentes approches pour la synthèse multicritère sont à explorées : Optimisation des fonctions de pondération par application des méthodes modernes comme les Algorithmes évolutionnaires (génétiques par exemple), colonie de fourmis (ANT- colony)…etc.

En outre du problème le réglage des paramètres de PSS, et l'adaptation des commandes avancées avec les différentes variations du système de puissance pour obtenir une performance optimale de stabilisation et leur robustesse. Dans la littérature, différentes approches utilisant l'algorithme génétique (AG) ont été proposées pour le réglage robuste des PSSs dans le système de puissance [11, 12 et 13] .L'avantage des AG par rapport aux autres techniques d'optimisation est leur indépendance par rapport à la complexité des problèmes. De plus, il travaille sur un ensemble de points (une population) et non sur un seul point. L'AG est donc une méthode d'optimisation globale. Les algorithmes génétiques restent à nos jours les méthodes évolutionnaires les plus utilisés dans le domaine de la commande. Ils peuvent êtres exploités par exemple pour obtenir les valeurs optimisées des paramètres des régulateurs PID, LQG, $H\infty$.

La complicité de l'étude de système puissance compose des plusieurs éléments (générateurs, transformateurs, lignes (courte, moyenne et longue)), et fonctionné sous plusieurs régimes (sous excité, nominale et sur excité). D'autre part avec les développements des outils informatiques et pour effectuer cette étude on a réalisé des interfaces graphiques 'GUI' permettant de faciliter les calculs lors de la commande d'une centrale de production d'énergie électrique lors des opérations d'analyse et de synthèse des régulateurs, avec résolution du compromis : précision résultats / rapidité de calcul.

OBJECTIF GENERAL :

Le but principal visé, étant d'assurer une meilleure qualité et fiabilité des alimentations électriques tout en garantissant une robustesse de stabilité de système de puissance par l'application d'un algorithme de commande robuste dans le contrôle automatique d'excitation des générateurs synchrones puissants, basé sur les approches fréquentielles avancées et adaptés vis-à-vis les variations incertains et stochastiques du système commandé à l'aide des techniques d'optimisations (l'algorithme génétique (AG))qui permettent d'établir des stabilisateurs de puissances optimales et robustes.

OBJECTIFS SPECIFIQUES

Les objectifs qui sont spécifiquement visés, dans cette étude peuvent être illustrés comme suit:

- Assurer d'une meilleure stabilité, rapidité et précision au niveau de la tension génératrice et la robustesse de stabilité système de puissance.
- Optimise les différents paramètres de stabilisateur de système de puissance par les méthodes d'optimisations par algorithme génétique et essaime particule.
- Amélioration de l'amortissement des oscillations de puissance de la génératrice.
- Etude comparative entre les différentes techniques utilisées pour réaliser cette étude :
  - Etude comparative entre deux modèles mathématiques du système de puissance : modélisation analogique par modèle de PARK et PARK – GARIOV [9] basé sur la modélisation par réseaux de puissance infini.
  - Etude comparative entre deux techniques de commandes : conventionnelle réalisés en PI ou PID et une technique de commande avancée par la commande robuste H_{∞}.
  - Etude comparative entre deux techniques de commandes avancées : commande robuste H_{∞} basée sur une technique fréquentielle avancée et commande robuste H_2 basée sur le contrôleur LQG et filtre de KALMAN.

  - Etude comparative entre deux techniques d'optimisations: algorithme génétique GA et essaime particule PSO.

- Implémentation notre système sous interface graphique pour une étude bien précise et très rapide et pour l'utilisation en future.

METHODOLOGIE ET ORGANISATION DE LA THESE

Notre travail est structuré suivant six parties principales élaborées selon le cheminement ci -dessous :

- État de l'art sur l'amélioration de stabilité des systèmes de puissances :

Dans le premier chapitre on présentera un état de l'art sur la stabilité de système de puissance et ses différents types ainsi que la technique d'amélioration de la stabilité par techniques de commandes classique PSS (Power System Stabilizers), AVR (Automatic Voltage Regulator), et techniques de commandes avancées optimale, adaptative et robuste. Pour optimiser, synthétiser et adapter ces techniques des commandes les méthodes des évolutionnaires telles que l'AG (Algorithme Génétique) et l'OEP (Optimisation par Essaims de Particules) seront également présentées dans cette partie.

- Modélisation de système puissance étudié :

L'étude de la stabilité de système de puissance nécessite l'utilisation des méthodes qui rendent le système de puissance stable. Pour cela, il est indispensable de modéliser les principaux éléments de système SMIB 'machine synchrone reliée à un bus infinie'. Ce chapitre on a base plus sur le choix de modèle fiable et capable de simuler le comportement réel et synthétiser les lois de commande de notre système étudié pour cela on a fait une étude comparative entre deux type de modélisation : la modélisation analogique traduit par le modèle de PARK et la modélisation par réseaux de permeances traduit par le modèle de PARK-GARIOV.

- Étude et implémentation de système SMIB Sous interface graphique GUI

Dans le troisième chapitre on développera un code de calcul (programmes MATLAB et blocks SIMULINK), et par la suite d'une interface graphique 'GUI' sous logiciel MATLAB, permettant de résoudre le compromis précision / rapidité avec plus de souplesses et d'efficacité dans l'interaction Homme Machine, lors des études d'analyse et de synthèse pour la commande des centrales de production d'énergie électrique afin d'améliorer la stabilité des SEE.

- Etude et application de la commande robuste H_∞ et H_2 au système de puissance

Le Quatrième chapitre est réservé à l'étude de façon simple, les éléments de base de la théorie de «sensibilité mixte» et du «problème standard », qui aboutissent à la fin par la présentation de l'algorithme de synthèse du correcteur robuste $H\infty$ de « Glover-Doyle » [9]. Cette technique de commande avancée compare avec la commande robuste H_2 basé sur le contrôle LQG (linéaire quadratique gaussienne) avec filtre de KALMEN pour synthétiser un stabilisateur robuste PSS appliqué à la régulation automatique d'excitation de machines synchrones puissantes.

- optimisations par l'algorithme génétique GA et essaime particule PSO Etude comparative et application numérique

Cinquième chapitre portera à une étude comparative et application numérique entre deux techniques d'optimisation les algorithmes génétiques GA et essaims particules PSO pour la voir la fiabilité de technique d'optimisation proposée.

- Optimisation par algorithmes génétiques pour l'adaptation paramétrique des PSS-$H\infty$ robustes

Dans le dernier chapitre on va exploiter les deux techniques d'optimisation GA et POS pour adapter la commande robuste H_∞ avec les différents variations paramétriques électrique ou mécanique de système de puissance, l'étude proposée basée sur de méthode d'adaptation : Adaptation de la commande robuste H_∞ par l'optimisation de l'objet de commande (réglage des paramètres de PSS) et l'adaptation de la commande robuste H_∞ par le choix optimal des fonctions de pondération W_1, W_2, W_3 (problème de la synthèse de contrôleur robuste H_∞)

Enfin, nous tirons conclusion générale résumant l'ensemble de notre travail, comme nous proposons nos perspectives futures dans cette orientation.

CHAPITRE I

ETAT DE L’ART SUR L’AMELIORATION DE STABILITE DES SYSTEMES DE PUISSANCES

CHAPITRE I
ETAT DE L'ART SUR L'AMELIORATION DE STABILITE DES SYSTEMES DE PUISSANCES

I.1 INTRODUCTION

Les systèmes électriques ont connu ces dernières décennies des développements considérables. Leur fonctionnement et leur exploitation sont devenus de plus en plus complexes. La stabilité d'un système de puissance est un facteur essentiel pour préserver le matériel et assurer la continuité du service. Le régime de fonctionnement doit rester stable en marche normale ainsi que pendant les périodes troubles dues aux modifications aléatoires dans la topologie du système [1]. Ces modifications peuvent être des charges, des défauts, …etc.

La stabilité des systèmes de puissance est considérée comme condition nécessaire de fonctionnement normal d'un réseau électrique. Le rôle des systèmes de régulation et de contrôle est d'assurer cette stabilité en déterminant les éléments essentiels qui influent sur celle-ci.

Le système AVR - PSS [14] joue un rôle très important dans l'amélioration des performances dynamiques des systèmes puissance, en maintenant un niveau de tension terminale bien stable, par action sur le système de régulation d'excitation des groupes Turboalternateurs. Par ailleurs, et vue le développement rapide et la modernisation des structures des systèmes puissance , ainsi que la complication des conditions de fonctionnement des stations électriques (configuration réseaux - régimes stations), et en présence des perturbations incertaines (incertitudes), nous a obligé la recherche d'autres structures plus efficaces et plus fiables des systèmes AVR-PSS, capables de résoudre le problème de robustesse de stabilité, et de garantir un niveau acceptable des performances exigées des systèmes puissances.

Ces techniques avancées utilisent les concepts de commande : optimale, adaptative et robuste. Une des principales caractéristiques actuellement exiges des régulateurs est la robustesse de stabilité, c'est l'aptitude de maintenir la stabilité en présence des variations paramétriques du système (ou aussi non-paramétriques), appelé ainsi incertitudes ou bien les problèmes incertains. L'investigation des algorithmes de commande adaptative (Logique flou, réseau de neurones…) a été largement reportée. Récemment, les algorithmes de commande optimal et robuste: commande LQG, par mode de glissement, commande robuste H_2 et H_∞ ont été appliqués. Tous ces algorithmes supposent la connaissance d'un modèle du système ou des intervalles sur les incertitudes.

Nous allons présenter dans ce chapitre, des notions sur la stabilité du système de puissance et ses différents types ainsi que la technique d'amélioration de la stabilité par techniques de commandes classique PSS (Power System Stabilizers), AVR (Automatic Voltage Regulator), et techniques de commandes avancées optimale, adaptative et robuste. Pour optimiser, synthétiser et adapter ces techniques des commandes les méthodes des évolutionnaires telles que l'AG (Algorithme Génétique) et l'OEP (Optimisation par Essaims de Particules) seront également présentées dans cette partie

I.2. DESCRIPTION GENERAL DU SYSTEME DE PUISSANCE

On appelle un système de puissance un ensemble d'installations électriques destinées à produire, transporter et à la fois distribuer l'énergie électrique aux consommateurs.

Figure I.1 : Les différents éléments d'un système de puissance.

Conduire un système électrique revient à définir le partage des rôles et responsabilités des différents acteurs concernés.

On distingue au sein d'un système électrique trois parties aux fonctions différentes [15]:

1. **La production** : cette partie concerne la production de l'électricité, elle est représentée par les centrales électriques selon les différents types de production : thermique, hydraulique, solaire, nucléaire … etc.
2. **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.

3. **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.

Un système électrique est donc un ensemble de composants et d'installations qui transforme des énergies primaires (combustible, eau, vent, rayonnement solaire, etc.) en énergie électrique, avant de la transporter et la mettre instantanément à la disposition des consommateurs en fonction des besoins et de la demande. Un tel système, avec toute sa complexité et sa dimension, a besoin d'être bien géré et contrôlé afin d'en **assurer la fiabilité, la sécurité et la stabilité**. De plus, et surtout avec l'avènement de l'ère de la dérégulation, les réseaux électriques sont de plus en plus exploités prés de leurs limites physiques, pour des raisons économiques, ce qui complique davantage leur conduite et gestion, et nécessite une optimisation de beaucoup de phases de fonctionnement et de contrôle.

Sur un autre plan, différents types de perturbations peuvent affecter un réseau électrique, dont on peut citer :

- Variation de la charge au cours de la journée,
- Déclenchement d'une unité de production ou d'une charge,
- Foudre atteignant une ligne,
- Court- circuit en réseau, dont les causes peuvent être nombreuses,
- Etc...

Ces perturbations provoquent des phénomènes physiques très variés au sein du réseau, tels que :

- Propagation d'ondes de surtension,
- circulation de courants de court- circuit,
- oscillations rotorique des alternateurs et la perte du synchronisme,
- phénomènes d'écroulement de la fréquence ou de la tension.

Pour l'exploitant, ces phénomènes sont pris en considération prioritairement dans les différentes actions à entreprendre. Trois mesures importantes se démarquent [2] :

1. **La protection**: elle vise à prévenir les risques physiques des personnes, les dégâts matériels tout en minimisant l'impact de la perturbation sur la marche du système.
2. **Le réglage** : qu'il soit automatique ou manuel, il a pour but de maintenir le système autour d'un point de fonctionnement défini et ce en dépit des perturbations apparues.

3. **La conduite** : celle-ci garantit les moyens du réglage afin de maintenir à tout instant l'équilibre Production- Consommation à un niveau de sécurité requis en minimisant au maximum les coûts d'exploitation.

Les oscillations électromécaniques entre les machines synchrones interconnectées sont des phénomènes physiques dans les réseaux électriques. Cependant, la stabilité du système face à de telles oscillations est un problème d'ordre majeur. Les oscillations instables à faible fréquence sont observées dans un groupe d'unités de production ou dans des systèmes interconnectés par de faibles lignes d'interconnexion, impliquant l'oscillation d'un groupe ou d'une unité de génération contre un autre groupe du même réseau. Les oscillations associées à un seul générateur génèrent un mode local, alors que ceux qui impliquent un groupe de générateurs sont appelés modes interzonaux. Les caractéristiques de ces modes ainsi que les facteurs les influençant sont mal connus. Ils sont assez compliqués pour être exactement identifiés, étudiés et contrôlés.

I. 3 STABILITE DU SYSTEME DE PUISSANCE

La stabilité est définie comme la propriété d'un système à retrouver son point de fonctionnement (ou point d'équilibre) après avoir subi une ou plusieurs perturbations. Elle est caractérisée par les fluctuations de puissances transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions et fréquences associées.

I.3.1 LES DIFFERENTS TYPES DE LA STABILITE DU SYSTEME DE PUISSANCE.

Pendant des années, des recherches diverses et complexes étaient effectuées pour comprendre les problèmes de stabilité des systèmes de puissance. Ainsi de nombreuses définitions de la stabilité de systèmes de puissance étaient proposées en insistant sur les divers aspects qui reflètent la manifestation de l'état stable de système. La définition la plus récente, que nous adopterons, est le résultat d'un groupe de travail conjoint IEEE/CIGRE [16]

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

Ainsi un système de puissance possédant un état d'équilibre est considéré comme stable, si suite à une perturbation, le système peut encore retrouver une position d'équilibre. Le système est également considéré comme stable s'il tend vers une autre position d'équilibre située dans la proximité du point d'équilibre initial. Cela correspond aux propriétés de la stabilité du point d'équilibre au sens de Lyapunov [16].

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 initiale).

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

- soit instantanément : c'est le cas des points d'équilibre,
- soit périodiquement : c'est le cas des variations périodiques lentes en raison des petites fluctuations continuelles sur les charges ou la génération.

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.

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

Pour analyser et résoudre les problèmes d'instabilité dans les systèmes de puissance, il est indispensable de regrouper les différents groupes de stabilité. Cette classification de la stabilité est basée sur les considérations suivantes [17] :

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

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

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

La figure (I.2) présente ces principales catégories de stabilité d'un système de puissance et leurs sous-catégories.

Traditionnellement, le problème de la stabilité a été de maintenir le fonctionnement synchrone des générateurs du système. Ainsi, pour avoir une production satisfaisante de la puissance électrique, toutes les machines synchrones du système doivent fonctionner en synchronisme. Cet aspect de la stabilité est influencé par les dynamiques de l'angle de rotor de générateur et de la relation puissance-angle.

L'instabilité peut également avoir lieu sans perte de synchronisme. Par exemple, un système composé d'un générateur alimentant un moteur à induction peut devenir instable en raison de l'effondrement de la tension de la charge. Dans ce cas, c'est la stabilité et le contrôle de la tension qui créent le problème, plutôt que le maintien du synchronisme. Ce type d'instabilité peut aussi se produire dans le cas de charges couvrant une vaste zone dans un grand système.

Un autre type d'instabilité peut avoir lieu : dans l'éventualité d'un fort écart entre la puissance de la charge et la puissance de la génération, les contrôleurs principaux des générateurs et de la charge deviennent importants. S'ils ne sont pas bien coordonnés, il est possible que la fréquence du réseau devienne instable. Des unités de générations et/ou de charges peuvent finalement être déclenchées en entraînant une panne du système. Dans ce cas, les générateurs peuvent rester en synchronisme mais le système devient instable.

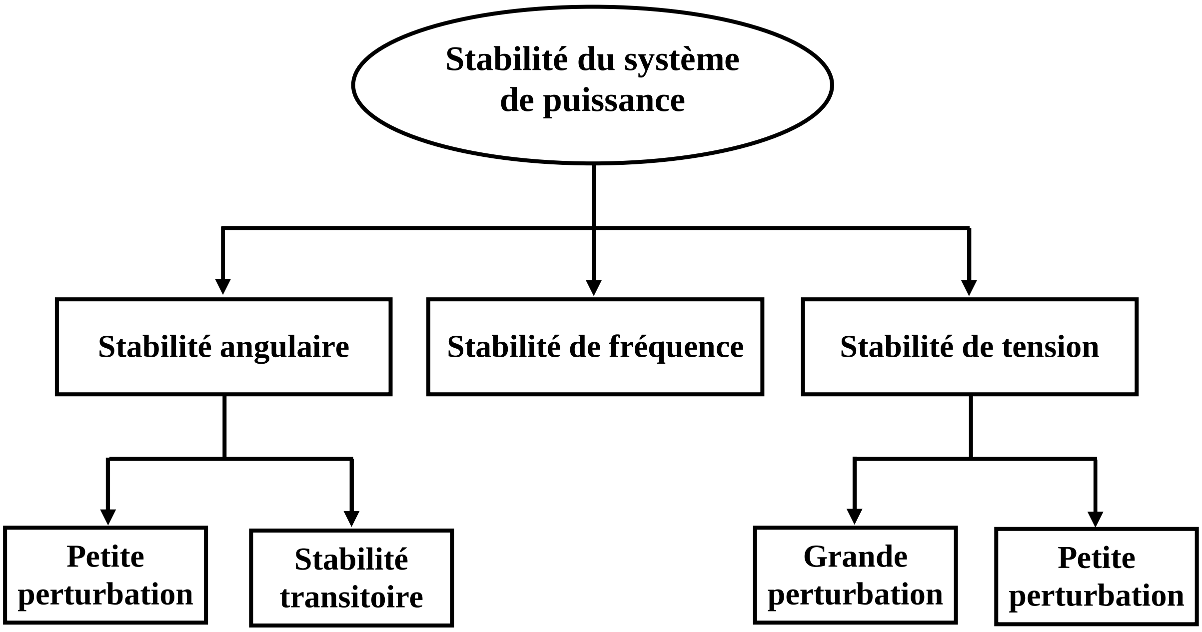


Figure I.2 : Classification des différents types de la stabilité du système de puissance.

I.3.2 STABILITE ANGULAIRE

Etant donné que les systèmes de puissance recourent principalement aux machines synchrones pour la génération de puissance électrique, un aspect important est le fonctionnement de ces générateurs au synchronisme.

La stabilité angulaire (ou stabilité d'angle rotorique) implique l'étude des oscillations électromécaniques inhérentes aux réseaux électriques [1 ,2]. Elle est définie comme la capacité d'un ensemble de machines synchrones interconnectées de conserver le synchronisme dans des conditions de fonctionnement normales ou après avoir été soumis à une perturbation.

L'instabilité angulaire se manifeste sous forme d'un écart croissant entre les angles rotoriques : soit d'une machine et de reste du système, soit d'un groupe de machines et du reste du système. Une machine qui a perdu le synchronisme sera déclenchée par une protection de survitesse ou par une protection de perte de synchronisme, ce qui met en danger l'équilibre production consommation du système.

Selon l'amplitude de la perturbation, on parle de la stabilité angulaire aux petites perturbations ou de la stabilité transitoire.

I.3.2.1 Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique)

La stabilité angulaire aux petites perturbations concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations comme : une petite variation de la charge ou de génération, manœuvre d'équipement, etc.

I.3.2.2 Stabilité angulaire aux grandes perturbations (Stabilité transitoire)

La stabilité transitoire d'un réseau de transport d'énergie électrique est son aptitude à retrouver une position d'équilibre stable après une perturbation brusque et de forte amplitude. Cette perturbation peut écarter notablement le réseau de sa position initiale. Le phénomène de stabilité transitoire concerne les grandes perturbations. Nous pouvons citer :

- Les courts-circuits affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines,
- La Perte d'ouvrages
- La Perte des groupes de production, … etc.

Les conséquences de ses défauts peuvent être très graves, pouvant même conduire l'effondrement complet du réseau. La stabilité transitoire dépend :

- du type de perturbation
- de la durée de perturbation
- du lieu de perturbation
- de la performance des systèmes de protection (relais, réenclenchèrent)
- du point de fonctionnement avant défaut (niveau de puissance active, topologie du réseau et degré d'excitation des machines)
- des caractéristiques dynamiques (des générateurs, des charges et des régulateurs mis en place dans les stations ainsi que des stabilisateurs comme le PSS).

Ce qui importe dans une méthode d'analyse de la stabilité transitoire, c'est la rapidité et l'exactitude des réponses obtenues.

I.3.3 La Stabilite de Tension

La stabilité de tension, par définition, se rapporte à la capacité d'un système de puissance, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de maintenir des valeurs de tensions acceptables à tous les nœuds du système après avoir subi une perturbation. La stabilité de tension dépend donc de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre la demande de la charge et la fourniture de la puissance à la charge. L'instabilité résultante se produit très souvent sous forme de décroissance progressive de tensions à quelques nœuds.

Suite à une perturbation, certaines charges ont tendance à restaurer la puissance consommée avant perturbation. C'est le cas des moteurs asynchrones, des charges dont la tension est contrôlée par un régleur en charge automatique, des chauffages électriques commandé par thermostat, … . Il existe une puissance maximale transmissible entre les centres de production et ceux de consommation. Cette puissance maximale disponible dépend non seulement des caractéristiques du réseau de transport (distances électriques) mais également de celles des générateurs (possibilité de maintenir la tension grâce à une réserve de puissance réactive suffisante). Par conséquent, si la puissance que les charges tendent à restaurer devient supérieure à la puissance maximale transmissible, le mécanisme de restauration des charges va contraindre le réseau haute tension en augmentant la puissance réactive consommée et en faisant donc baisser progressivement la tension du réseau jusqu'à des valeurs inacceptables [18].

Généralement, l'instabilité de tension se produit lorsqu'une perturbation entraîne une augmentation de puissance réactive demandée au-delà de la puissance réactive possible. Plusieurs changements dans le système de puissance peuvent contribuer à l'instabilité de tension, ce sont par exemple : [15]

- une augmentation de charge.
- des générateurs, des condensateurs synchrones, ou des SVCs (Static Var Compensator systems) qui atteignent les limites de puissance réactive.
- une tentative d'un régleur automatique en charge ayant échouée de restaurer la tension de charge à son niveau initial avant la perturbation.
- une panne de générateur, une perte d'une charge importante ou un déclenchement de ligne.
- une perte d'une source de puissance réactive (condensateurs, machines synchrones,...).

La plupart de ces changements ont des effets significatifs sur la production, la consommation et la transmission de puissance réactive, ainsi sur la stabilité de tension. Par conséquent, des mesures peuvent être utilisées pour améliorer la stabilité de tension, tels [19] :

- un contrôle automatique des condensateurs shunts.
- un blocage des régleurs en charge automatique.
- une nouvelle répartition de la génération.
- une replanification du fonctionnement des générateurs et des nœuds de commande.
- une régulation de tension secondaire.
- un plan de délestage

La gamme de temps de l'instabilité de tension s'étend de quelques secondes à plusieurs minutes. Ainsi, l'instabilité de tension peut être considérée comme un phénomène à court terme (de l'ordre de plusieurs secondes) ou, dans l'autre cas limite, comme un phénomène à long terme (de l'ordre de plusieurs minutes).

Pour l'instabilité de tension à court terme l'effondrement de tension se produit immédiatement après la perturbation. Dans ce type d'instabilité, les charges et les dispositifs, qui ont des caractéristiques spéciales de puissance réactive tels les moteurs asynchrones sont souvent impliqués. Les moteurs asynchrones consomment, juste après la perturbation, beaucoup de puissance réactive pour assurer leur stabilité vis-à-vis leurs charge. D'autres éléments peuvent aussi participer à cette instabilité : les charges commandées électroniquement, les convertisseurs HVDC, ...[2]

L'instabilité de tension à long terme se développe lors d'un manque graduel de puissance réactive d'un nœud ou une partie du système. Elle implique, quant à elle, des équipements ayant une action plus lente tels les régleurs en charge automatique, les charges commandées thermo statiquement, ...

Il est aussi important de noter que l'instabilité de tension ne se produit pas toujours toute seule. Souvent, l'instabilité de tension et l'instabilité de l'angle de rotor se produisent ensemble, l'une pouvant entraîner l'autre.

Enfin, la stabilité de tension peut être classée en deux catégories ; la stabilité de tension aux grandes perturbations et aux petites perturbations :

- Stabilité de tension aux grandes perturbations. Le souci dans ce cas est de maintenir des tensions normales aux nœuds de réseau électrique après une grande perturbation. La stabilité est déterminée ici par les caractéristiques du système et de charge, et par les interactions entre les différents dispositifs de commande de tension dans le système.

- Stabilité de tension aux petites perturbations. Dans ce cas, les caractéristiques de la charge et des dispositifs de commande déterminent la capacité du système à maintenir les tensions équilibrées.

I.3.3 LA STABILITE DE FREQUENCE

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système de maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à un important déséquilibre, entre les puissances produite et consommée.

Le maintien de la fréquence à une valeur nominale dans un système de puissance est lié à l'équilibre global entre les puissances actives produites et consommées (y compris les pertes).

Autrement dit, suite à certaines perturbations, l'équilibre global des puissances produites consommée peut être déséquilibré : ce déséquilibre entraîne alors une variation de fréquence. L'énergie cinétique stockée dans les pièces tournantes des machines synchrones et autres machines électriques tournantes peut éventuellement compenser ce déséquilibre. Si ce dernier n'est pas trop grand, les générateurs participant à la commande de fréquence régleront la puissance active fournie à travers leurs réglages secondaires fréquence-puissance et ramèneront ainsi l'écart de fréquence à des valeurs acceptables. Par ailleurs, si le déséquilibre est trop grand, l'écart de fréquence sera significatif avec des graves conséquences (effondrement complet du système), [2]

Lorsque la fréquence varie, les caractéristiques de temps des processus et des différents dispositifs activés vont varier de quelques secondes à quelques minutes. La stabilité de fréquence peut donc être classifiée en phénomènes à court terme et à long terme.

Dans un grand système de puissance et suite à un incident sévère et, par la suite, à l'action de protections (par exemple, un déclenchement de plusieurs lignes de transmission), l'instabilité de la fréquence est généralement associée à l'îlotage où un scénario typique peut avoir lieu. Un ou plusieurs sous-réseaux se retrouvent isolés du reste du système. Les générateurs de chaque sous réseau résultant essayent de garder le synchronisme entre eux, mais la réserve tournante est nettement insuffisante pour faire face à la charge connectée au sous-réseau. La fréquence décroît ainsi rapidement et l'instabilité produite est donc à court terme.

L'instabilité de fréquence peut également se manifester à long terme, lorsqu'elle provient d'une mauvaise réponse en puissance des centrales ou d'une mauvaise coordination entre des régulations et protections [20].

Dans cette étude, nous nous intéressons seulement à la stabilité de tension.

I.4 AMELIORATION DE LA STABILITE DES SYSTEMES DE PUISSANCE

La nécessité de faire fonctionner les réseaux électriques près de leurs limites de stabilité (à cause du retard dans la construction de nouvelles centrales de production d'énergie et de nouvelles lignes de transport, dérégulation du marché d'électricité et interconnexion des réseaux électriques), a donné une importance capitale à l'évaluation de la stabilité des réseaux d'énergie électrique en temps réel .

Plusieurs approches permettant l'évaluation de la stabilité du système de puissance ont été proposées dans la littérature. Elles peuvent être classées en quatre familles :

1. Méthodes indirectes d'intégration numérique (simulation dans le temps) ;
2. Méthodes directes énergétiques ;
3. Méthodes directes par l'automatique;
4. Méthodes hybrides.

Dans cette étude, nous nous intéressons seulement à l'amélioration de stabilité du système de puissance par l'automatique qui divisé en deux techniques figure I.3 :

- Techniques de commandes classiques ou conventionnelles
- Techniques de commandes avancées

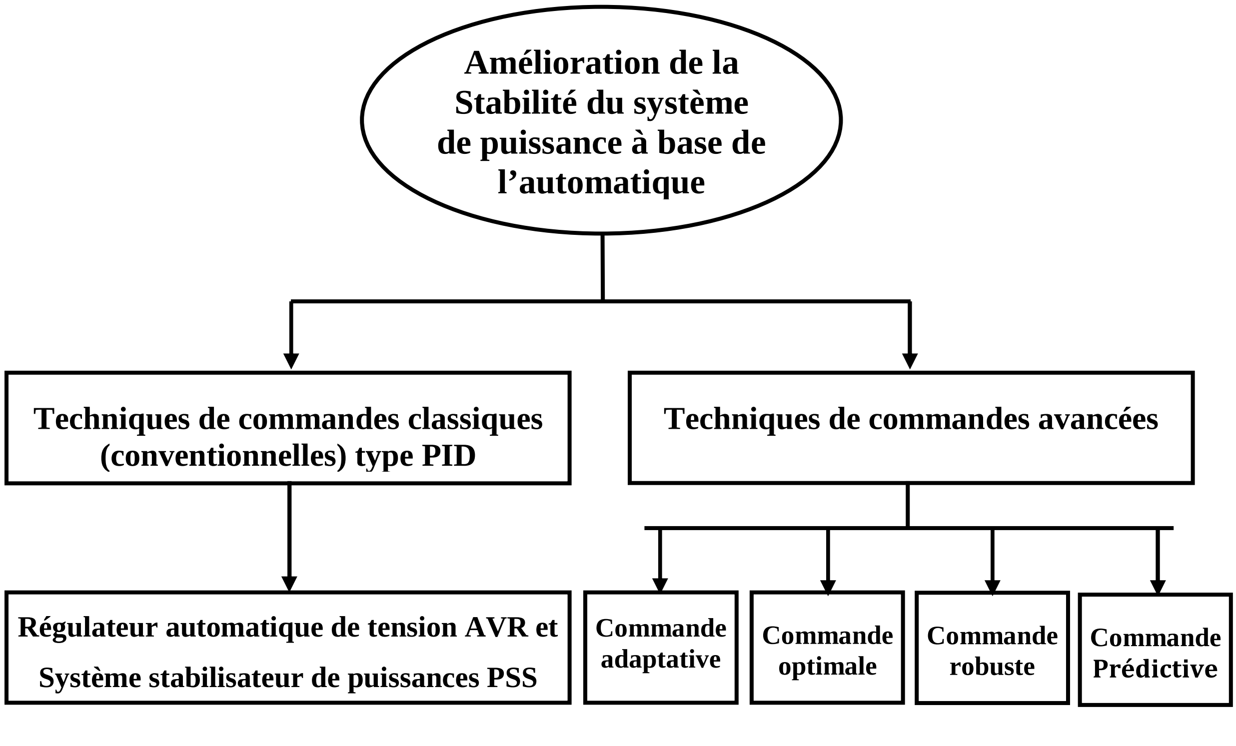


Figure I.3 : Amélioration de la Stabilité des systèmes de puissances à base de l'automatique

I.4.1 AMELIORATION DE LA STABILITE DES SYSTEMES DE PUISSANCES PAR AVR-PSS CONVENTIONNEL

I.4.1.1. HISTORIQUE DE DEVELOPPEMENT DES SYSTEMES DE REGULATION AVR-PSS:

Une très grande attention à été donnée en premier lieu aux méthodes de régulation d'excitation a action proportionnelle (AVR- PSS), avec une loi de régulation par déviation (écart) de la tension statorique (Δu), ce qui a permis de garantir la stabilité statique apériodique, mais 1'application des grandes valeurs des gains, a présente un inconvénient très grave, par l'apparition d'un phénomène "auto oscillatoire", et donc la perturbation de la stabilité du système.

Dans les année 50, est après plusieurs recherches et expérimentations, pour assure la stabilité des SSE, les résultats d'études sont amenés élaborer des régulateurs automatiques d'excitation a forte action AVR - PSS (AVR avec des systèmes de stabilisation PSS), qui sont caractérises par des grandes valeurs de gains, on introduisant dans la loi de régulation des signaux de stabilisation par première et deuxième dérivée des paramètres du régime, ce qui a permet d'assurer des grandes limites de la stabilité statique et dynamique, des systèmes énergétiques a structures complexes et des très meilleurs performances de la pratique des régimes oscillatoires.

L'étape suivant dans le développement des systèmes AVR, a été lié avec la réalisation des nouvelles structures plus complexes des régulateurs, basés sur les nouvelles techniques de la commande automatique afin de garantir des performances dynamiques.

Vers les années 60, le développement des méthodes numériques de régulation, et les micro-processeurs ont permis d'élaborer des nouveaux algorithmes et structures des régulateurs.

Le premier AVR – PSS numérique a été inventé en 1978 (type PID), qui a permis une adaptation des lois de commande des générateurs synchrones, vis-à-vis aux changements des conditions de fonctionnement du Système électro – énergétique (régimes / configuration), ainsi que les différents perturbations qui peuvent le solliciter (même de types incertains).

I.4.1.2 REGULATEUR AUTOMATIQUE DE TENSION AVR :

L'AVR (Automatic Voltage Regulator) est un système de régulation de la tension d'un système Turbo-alternateur. Le système AVR agit pour réguler cette tension par l'intermédiaire de l'excitatrice (figure I.4).

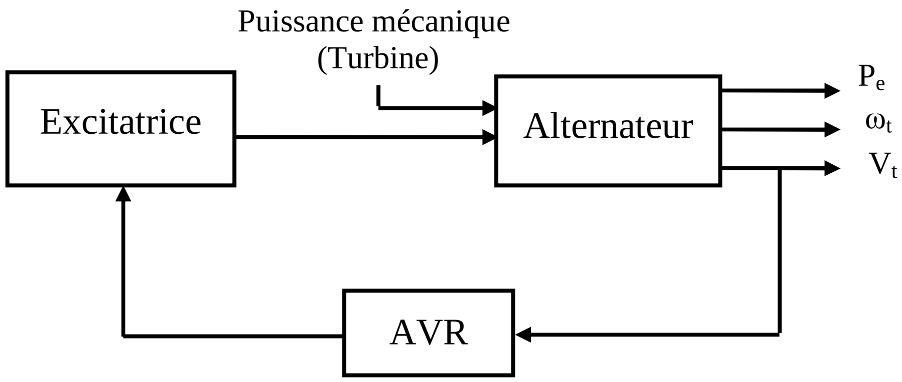


Figure I.4 schéma synoptique d'ensemble Turbo – Alternateur avec AVR

I.4.1.3 SYSTEME STABILISATEUR DE PUISSANCE PSS

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 [13,14]. Ces Stabilisateurs de puissance sont un moyen efficace et économique d'amélioration de la stabilité dynamique d'un système électrique [15,16]. Un choix adéquat des paramètres des PSS engendre un bon amortissement des oscillations induites par les perturbations et améliore la stabilité de l'ensemble du système.

- **Fonctionnement du PSS [16]**

Un système stabilisateur de puissance PSS, permet d'ajouter un signal de tension supplémentaire et proportionnel à la variation de vitesse de rotor dans l'entrée du régulateur de tension (AVR) du générateur (figure I.5). Un couple électrique en phase avec la variation de vitesse de rotor est ainsi produit dans le générateur. Par conséquent, avec un système d'excitation rapide et fort, l'avantage présenté par un couple synchronisant important est toujours assuré et le problème de la décroissance du couple d'amortissement est corrigé. Le PSS va s'opposer à toutes les faibles oscillations en forçant le système d'excitation à varier au plus juste et au bon moment.

Par conséquent, l'ensemble du système de contrôle d'excitation (AVR et PSS) doit assurer les points suivants:

- supporter les premières oscillations faisant suite à une grande perturbation ; c.-à-d. assurer la stabilité transitoire du système.
- maximiser l'amortissement des oscillations électromécaniques associées aux modes locaux ainsi qu'aux modes interrégionaux sans effets négatifs sur les autres modes.
- minimiser la probabilité d'effets défavorables, à savoir :
  - les interactions avec les phénomènes de hautes fréquences dans le système de puissance telle la résonance dans le réseau de transport.

- les instabilités locales dans la bande de l'action désirée du système de contrôle.

- être suffisamment robuste pour permettre au système de contrôle d'assurer ses objectifs pour divers points de fonctionnement probables du système de puissance.

Le choix du signal d'entrée de PSS représente une étape critique dans la conception du PSS.

Plusieurs considérations interviennent dans ce choix, telles :

- la sensibilité du signal d'entrée aux oscillations électromécaniques (autrement dit, les modes oscillatoires doivent être "observables" dans le signal choisi).
- l'insensibilité du signal d'entrée du PSS à son propre signal de sortie. D'une façon similaire, la sensibilité doit être très la plus faible possible pour les signaux de sortie d'autres PSSs.

Un bon résultat peut être obtenu si l'entrée du PSS est la variation de la vitesse de rotor ($\Delta\omega$), la variation de puissance produite du générateur (ΔP_e) ou la fréquence du jeu de barre (Δf). Etant donné que le PSS est utilisé pour produire un couple électrique proportionnel à la variation de vitesse, il apparaît donc plus convenable d'utiliser la variation de vitesse ($\Delta\omega$) comme entrée du PSS. Cependant, quel que soit le signal d'entrée, la fonction de transfert du PSS doit compenser les caractéristiques de phase du système d'excitation, des parties électriques du générateur et des autres parties électriques du système. L'ensemble de ces dernières déterminent la fonction de transfert entre l'entrée du système d'excitation (ΔV_{er}) et le couple électrique du générateur (ΔT_e).Cette fonction de transfert est dénotée $GEP(s)$, figure (I.5).

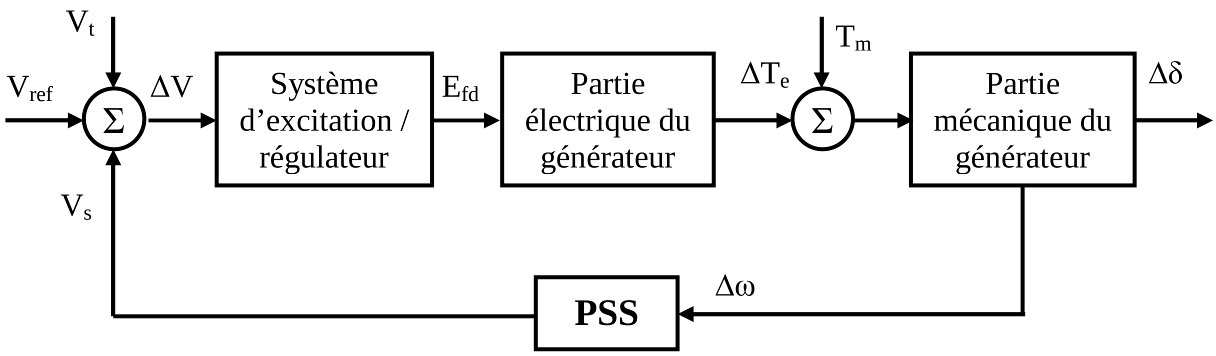


Figure I.5 : Système d'excitation avec PSS

I.4.2 AMELIORATION DE LA STABILITE DE SYSTEM DE PUISSANCE PAR LES TECHNIQUES DE COMMANDES AVANCEES

Le système AVR - PSS joue un rôle très important dans l'amélioration des performances dynamiques des systèmes électro-énergétique, en maintenant un niveau de tension terminale bien stable, par action sur le système de régulation d'excitation des groupes Turbo - Alternateurs.

Par ailleurs, le problème de robustesse de stabilité est posé de façon sérieuse pour garantir un bon fonctionnement des Systèmes Electro-Energétiques, et surmonter le problème des oscillations électromécaniques en améliorant l'amortissement du système (la stabilité) , pour ces fins des signaux supplémentaires stabilisateurs sont introduits dans le système d'excitation via son régulateur de tension. Ces signaux stabilisateurs vont produire des couples en phase avec la variation de vitesse du générateur pour compenser le retard de phase introduit par le système d'excitation. Les stabilisateurs de puissance [1] (Power System Stabilizers, PSSs), grâce à leurs avantages en terme de coût économique et d'efficacité, sont les moyens habituels, non seulement pour éliminer les effets négatifs des régulateurs de tension, mais aussi pour amortir les oscillations électromécaniques et assurer la stabilité globale du système .

Ces stabilisateurs conventionnels (réalisés souvent en PI ou PID) ont pour inconvénient principal [2] la mauvaise adaptation à des changements des paramètres du système et lors des variations brusques des conditions de fonctionnement du système à commander (problèmes incertains).

Pour assurer la stabilité du système puissance en présence des diverses variations nous utilisons les techniques de commande avancées telles que : optimale, adaptative et robuste plutôt que celles classiques. Une des principales caractéristiques actuellement exigées des régulateurs est la robustesse de stabilité, c'est l'aptitude de maintenir la stabilité en présence des variations paramétriques du système (ou aussi non-paramétriques), appelé ainsi incertitudes ou problèmes incertains. L'investigation des algorithmes de commande adaptative (Logique flou, réseau de neurones…) a été largement reportée. Récemment, les algorithmes de commande optimale et robuste: commande LQG, par mode de glissement, commande robuste H_2 et H_∞ [9 ,21] ont été appliqués. Tous ces algorithmes supposent la connaissance d'un modèle du système ou des intervalles sur les incertitudes.

1.4.2.1 Commande Robuste

La commande fréquentielle avancée (commande robuste H_2 ou H_∞) est née de la recherche d'une meilleure formalisation du cahier des charges par des critères mathématiques dont la résolution efficace permet de synthétiser un correcteur satisfaisant ce cahier des charges.

La commande fréquentielle avancée (commande robuste H_2 ou H_∞) propose une solution imparfaite mais très intéressante. Tout comme en automatique fréquentielle classique, l'incertitude est explicitement prise en compte. De plus [21] :

- Le cahier des charges est formalisé par un critère mathématique.
- Un algorithme numérique efficace permet de tester s'il existe un correcteur que satisfasse au critère en un temps raisonnable (quelques secondes): si oui, un correcteur est alors proposé en sortie de l'algorithme.
- Le cas des systèmes de commande types MIMO est naturellement traité.

- **Structure du Système de Puissance avec les Contrôleurs Robustes**

On utilise la structure de base du système de commande d'un générateur synchrone puissant avec le régulateur robuste illustré sur les figures I.6 [14]:
Comme objet de commande on a le générateur synchrone avec le régulateur AVR- FA (type PID avec PSS conventionnel), un système d'excitation SE (excitatrice), et un block d'informations et de mesures (BIM) des paramètres de sortie à régulés.

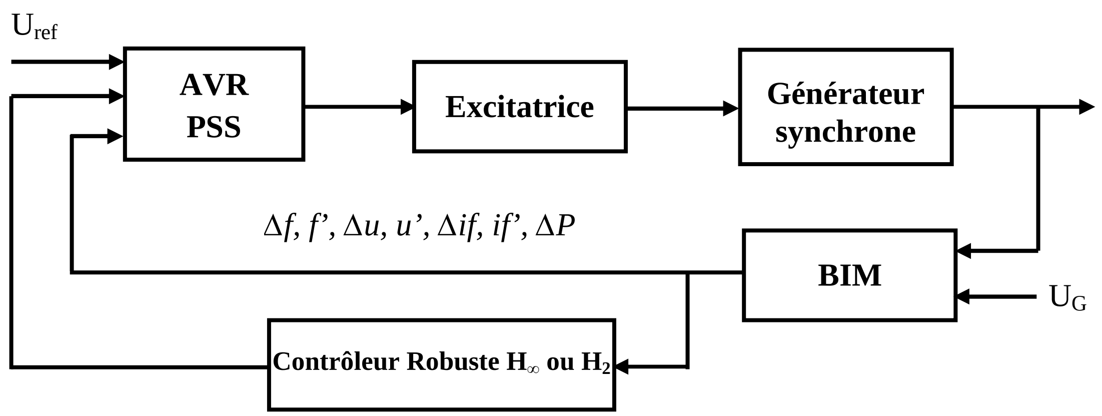


Figure I.6: Système de commande d'excitation GS [14]

1.4.2.2 Commande Optimale et adaptative

Elle s'intéresse à trouver à partir d'un modèle et parmi les commandes admissibles, celle qui permet à la fois de vérifier des conditions initiales et finales données, de satisfaire diverses contraintes imposées et d'optimiser un critère mathématique choisi, comme par exemple **:** la commande neuronale, elle s'avère intéressante pour la commande des systèmes en s'appuyant sur des modèles non linéaires d'entrée-sortie obtenus à partir des données [12].

1.4.2. 3 Commande Predictive

Elle se base sur l'utilisation d'un modèle dynamique du système pour anticiper son comportement futur, comme la commande prédictive à base de modèle ou de l'anglais Model Predictive Control (MPC) à laquelle on va apporter une attention particulière car il est bien connu que le MPC est une technique basée sur la construction d'une séquence optimale de commandes pour un horizon glissant. En raison de la formulation dans le domaine temporel, elle s'avère être un outil puissant pour la manipulation explicite des contraintes et des incertitudes dans l'étape de synthèse, avec un incontestable succès parmi les praticiens. On distingue le MPC non linéaire [22] et MPC sous contraintes [23].

I. 5 INTEGRATIONS DES TECHNIQUES D'OPTIMISATION ROBUSTES AUX AVR-PSS

Les techniques du commande (conventionnelles ou avancées) résoudre le problème de robustesse de stabilité du système de puissance .Par conséquent, l'optimisation des paramètres du PSS et l'adaptation des commandes avancées avec les différant variation incertains du système assure une grande fiabilité des techniques de commande par leur hybridation.

Les méthodes évolutionnaires restent à nos jours les plus utilisés dans le domaine de la commande par hybridation. Ils peuvent êtres exploités par exemple pour obtenir les valeurs optimisées des paramètres des régulateurs PID, LQG, H_∞, H_2, logique floue…etc.

Il existe une grande variété de techniques d'optimisation. Notre intérêt se portera sur les Algorithmes Génétiques et les Essaims de Particules.

I. 5.1 ALGORITHMES GENETIQUES

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

Les premiers travaux sur les algorithmes génétiques ont été initialement développés par John Holland (1975) [24] qui, sur la base de travaux précédents, a développé les principes fondamentaux des algorithmes génétiques dans le cadre de l'optimisation mathématique.

A cette époque, l'informatique n'avait pas encore connu de développement et ses travaux n'ont pas pu être appliqués sur des problèmes réels de grande taille. La parution en 1989 de l'ouvrage de référence écrit par D.E Goldberg , qui décrit l'utilisation de ces algorithmes dans le cadre de résolution de problème concrets, a permis de mieux faire connaître ces derniers dans la communauté scientifique et a marqué le début d'un nouvel intérêt pour cette technique d'optimisation.

Les algorithmes génétiques, comme les réseaux de neurones, font partie des « Réseaux Adaptatifs Non-linéaires » (RAN) [24]. Ils sont composés d'un grand nombre d'unités élémentaires ou agents, qui sont dans notre cas des chromosomes. Ces agents traitent l'information le plus souvent de façon parallèle et distribuée. Ils interagissent entre eux d'une manière non linéaire et sans contrôle central. Si l'environnement extérieur dans lequel ils baignent est capable de leur fournir une rétroaction, alors les agents et leurs interactions sont modifiés par des « opérateurs » de telle sorte que le système global s'adapte progressivement à son environnement et améliore sa réponse. Développés pour des fins d'optimisation, les algorithmes génétiques permettent la recherche d'un extremum global [25].

L'Application des AG à la conception des contrôleurs pour l'amélioration de la stabilité des systèmes de puissance a été l'objet de plusieurs travaux [26,27].

Dans [28], l'AG à été utilisé pour l'amortissement d'un système de puissance possédant une structure de contrôleur décentralisé. L'installation de plusieurs PSSs ou SVCs dans un réseau revient à effectuer une coordination de leurs paramètres donc une optimisation via les AGs [29].

I. 5. 2 OPTIMISATION PAR Essaims Particulaires

L'optimisation par essaims particules (OEP) est une technique d'optimisation parallèle développée par Kennedy et Eberhart [30], et inspirée du comportement social des individus qui ont tendance à imiter les comportements réussis qu'ils observent dans leur entourage, tout en y apportant leurs variations personnelles. A la différence des algorithmes génétiques, qui miment les mécanismes génétiques de l'évolution, l'OEP s'inspire plutôt de la formation d'une culture. Dans l'ouvrage [31], se trouve les racines sociales de l'OEP ainsi que les techniques mathématiques mises en œuvre pour la modélisation.

L'algorithme OEP est initialisé par une population de solutions potentielles aléatoires, interprétées comme des particules se déplaçant dans l'espace de recherche. Chaque particule est attirée vers sa meilleure position découverte par le passé ainsi que vers la meilleure position découverte par les particules de son voisinage (ou de tout l'essaim, dans la version globale de l'algorithme).

L'algorithme OEP comprend plusieurs paramètres de réglage qui permettent d'agir sur le compromis exploration – exploitation. L'exploration est la capacité de tester différentes régions de l'espace à la recherche de bonnes solutions candidates. L'exploitation est la capacité de concentrer la recherche autour des solutions prometteuses afin de s'approcher le plus possible de l'optimum. Le choix des paramètres reste en grande partie empirique. Une analyse complète de l'algorithme a été faite par Clerc et Kennedy [32].

En plus des avantages issus des méthodes traditionnelles d'optimisation, l'OEP possède les qualités suivantes [33] :

- Contrairement aux (AGs) et à d'autres Algorithmes heuristiques, l'OEP possède une grande flexibilité de contrôle qui permet de balancer entre l'exploration globale et locale de l'espace de recherche.
- L'OEP utilise des règles de transition probabilistiques, et non pas déterministes.

Cela permet d'obtenir une recherche dans des domaines considérés compliqués et incertains. Cet avantage confère à l'OEP une grande robustesse et une flexibilité qui dépassent celles des méthodes conventionnelles d'optimisation.

Différents modèles de l'algorithme OEP ont été présentés dans [34] pour l'optimisation numérique.

De plus en plus, l'OEP voit son importance grandir dans le domaine des systèmes de puissance. Nous retrouvons cette technique d'optimisation dans le contrôle de la tension et de la puissance réactive [35].

Dans [36], l'optimisation des paramètres du SVC par le biais de l'OEP donnent de très bons résultats quant à la stabilité d'un système de Micro turbines raccordées à un réseau de distribution Electrique.

I. 6 CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu sur la stabilité des systèmes des puissances, ses différents types ainsi que les procédés permettant son amélioration. L'utilisation des Techniques de commande classiques et avancées a été également présentée et discutée. Nous avons également introduit les deux techniques d'optimisations avancées par l'Algorithme Génétique et les essaims particulaires en vue de leur application pour l'optimisation de différentes techniques des commandes utilisées dans les suivants chapitres.

CHAPITRE II

MODELISATION ET SIMULATION DE SYSTEME DE PUISSANCE ETUDIE

CHAPITRE II

MODELISATION ET SIMULATION DE SYSTEME DE PUISSANCE ETUDIE

II.1 INTRODUCTION:

La modélisation est une démarche ambitieuse, et la démarche ne peut pas être complète, satisfaisante et définitive. Elle ne relève donc pas uniquement des mathématiques, elle fait appel également à toute connaissance théorique et pratique, mais aussi à l'habileté de l'opérateur, habileté qui vient avec la pratique du métier.

L'étude de la performance dynamique d'un système de puissance est très importante pour les opérateurs du système (point de vue économique) et la société en général (point de vue de fiabilité). Une étape essentielle dans ce type d'étude est de comprendre physiquement et mathématiquement les phénomènes dynamiques d'intérêt. Ensuite, la modélisation et la simulation effectuées du système peuvent refléter son comportement critique.

L'analyse de leur stabilité de même que pour l'étude des systèmes de contrôle nécessite des modèles mathématiques fidèles à ces objectifs.

Dans la littérature, nous discernons principalement trois approches concernant la modélisation des machines synchrones. En choisissant de les présenter par leur degré de complexités croissantes, nous avons :

- La modélisation de Park (analogique) ;
- La modélisation par réseaux de permeances (analogique - numérique) ;
- La modélisation numérique (par éléments finis, différence finis, volume finis...etc.)

La modélisation de Park : La modélisation de Park est construite à partir des équations électriques de la machine. Ce modèle fait un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. L'induction dans l'entrefer est sinusoïdale, la saturation du circuit magnétique, les pertes fer, les harmoniques d'encoches et d'espaces ne sont pas pris en compte dans la modélisation. En raison de la simplicité de la formulation algébrique, ce type d'approche est bien adapté à l'élaboration d'algorithmes de commande.

La modélisation par réseaux de permeances: La modélisation par réseaux de permeances permet d'obtenir une meilleure précision avec un coût de calcul inférieur aux modèles basés sur les méthodes numériques, on trouve par exemple le modèle de PARK-GARIOV, et qui sera utilisé dans notre présente étude. Ce type de modélisation consiste à modéliser le circuit magnétique de la machine par un schéma électrique équivalent. La principale difficulté de la modélisation par réseaux de perméances se situe au niveau de la représentation de l'entrefer de la machine [37, 38].

L'erreur de modélisation est très sensible au modèle utilisé pour la perméance d'entrefer. Cette méthode constitue un intermédiaire entre la modélisation de Park et la modélisation numérique. Elle est inadéquate pour la formulation d'une commande mais elle semble très intéressante pour tester la robustesse des algorithmes. En outre, elle peut contribuer à l'estimation des paramètres de la machine.

La modélisation numérique: Ce type de modélisation est le plus précis, et il est basé sur les équations de MAXWELL. Les temps de calculs offerts par cette approche sont très courts dans un contexte de commande de machines électriques. Néanmoins, lors d'un dimensionnement ou lors d'une estimation des paramètres de la machine, sa précision justifie son utilisation. Des logiciels (tels que 'Flux2D', pdetool de MATLAB, FEMM…etc.) permettent la modélisation par éléments finis des dispositifs électromagnétiques. Ce type d'approche est également utilisé lors d'un dimensionnement de machine électrique, ou bien pour l'ajustement des paramètres d'un modèle par réseaux de perméances.

L'étude de la stabilité de système de puissance nécessite l'utilisation des méthodes qui rendent le système de puissance stable. Pour cela, il est indispensable de modéliser les principaux éléments de système SMIB 'machine synchrone reliée à un bus infinie'. Ce chapitre on a base plus sur le choix de modèle fiable et capable de simuler le comportement réel et synthétiser les lois de commande de notre système étudié pour cela on a fait une étude comparative entre deux type de modélisation : la modélisation analogique traduit par le modèle de PARK et la modélisation par réseaux de perméances traduit par le modèle de PARK-GARIOV.

II.2 DESCRIPTION DU SYSTEME SMIB ETUDIE

Un réseau SMIB est constitué d'une machine synchrone qui alimente un réseau électrique de puissance infinie (c'est-à-dire dont la puissance est largement supérieure à celle de la génératrice synchrone) au travers de lignes et d'un transformateur. La machine synchrone est modélisée par une force électromotrice constante E derrière une réactance x'_d. Le nœud infini est un point où la tension est constante et fixée en module et en phase (inertie très grande des autres machines).

Le schéma ci-dessus (Fig. 1) présente de façon simplifiée du groupe turboalternateur : On ajustant le débit de la puissance calorifique qui entre à la turbine, le gouvernail contrôle la puissance mécanique que délivre la turbine. Le contrôle permet d'assurer la stabilité du système par rapport aux variations de la demande.

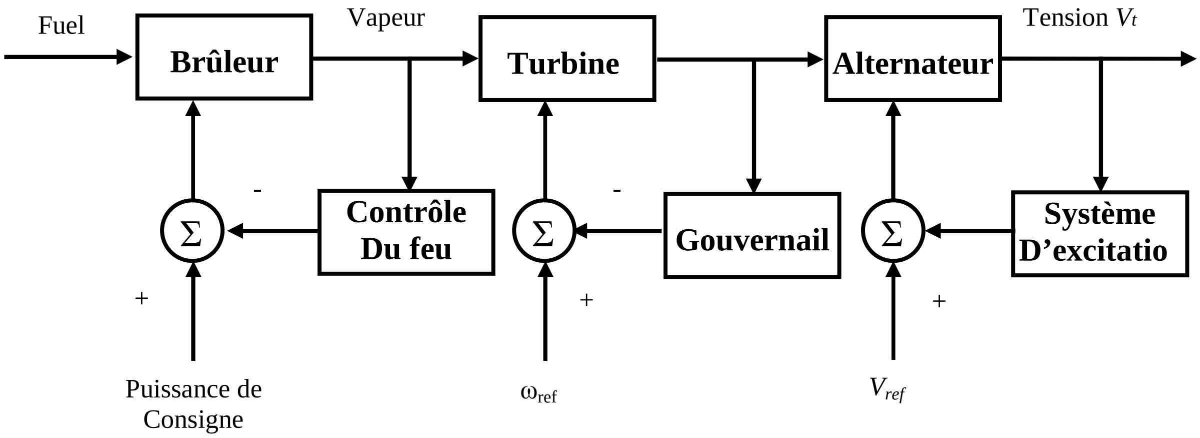


Figure II.1 : groupe turboalternateur (configuration de base)

De nous jours l'excitation de la machine se fait à partir du système d'excitation statique. A base de thyristors ces systèmes sont très adaptés aux exigences portées sur les alternateurs puis qu'ils répondent plus rapidement que les excitatrices classiques.

Dans la majorité des cas, le groupe turboalternateur est raccordé à un réseau de transporte de puissance de court-circuit très élevé, comportant d'autres alternateurs reparties géographiquement et assurant l'écoulement de l'énergie produite vers les centres de consommations. Le groupe est alors raccordé à un réseau de puissance dit « infinie » figure 2. Cette configuration constitue l'une des systèmes d'étude standard « IEEE » appelé 'SMIB'.

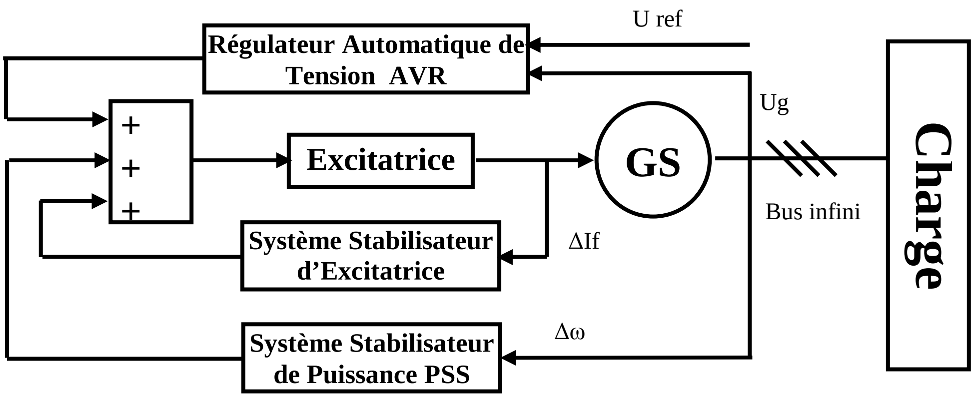


Figure II.2 : Configuration du système d'étude type SMIB

II.3 MODELISATION DE LA MACHINE SYNCHRONE

Une grande partie de l'énergie électrique est produite à l'heure actuelle par les machines synchrones des différentes centrales de production. Nous donnerons dans ce qui suit le principe de fonctionnement et nous établissons un modèle dynamique de la machine synchrone. Mise à part la production d'énergie, le rôle des machines synchrones est de maintenir constantes les tensions aux nœuds du réseau ainsi que la fréquence. A cette fin, les machines synchrones des centrales sont dotées de régulateurs de tension et de vitesse.

II.3 .1 PRINCIPE DE LA MACHINE SYNCHRONE

Une machine synchrone est constituée :

- d'un stator, doté d'un ensemble de trois enroulements triphasés d´écales de 120 degrés les uns par rapport aux autres comme montre en Figure 2.3. En régime établi, ces enroulements sont parcourus par des courants triphasés équilibres i_a, i_b et i_c. Ces courants produisent dans l'entrefer de la machine un champ tournant à la vitesse angulaire ω/p, ou ω est la pulsation des courants et p le nombre de paires de pôles de la machine. Pour des raisons de simplicité, nous supposons provisoirement que p = 1;
- d'un rotor, doté d'un enroulement d'excitation. En régime établi, cet enroulement est parcouru par du courant continu. Ce dernier produit dans l'entrefer un champ magnétique fixe par rapport au rotor.

Une machine synchrone est caractérisée par le fait qu'en régime établi le rotor tourne à la même vitesse ω que le champ produit par le stator. Cette vitesse est appelée vitesse de synchronisme.

En conséquence, les champs statoriques et rotoriques sont fixes l'un par rapport `a l'autre et tournent tous deux `a la vitesse de synchronisme.

Ces deux champs tendent à s'aligner à la façon de deux aimants attirés l'un par l'autre. Si l'on cherche à les écarter, un couple de rappel s'y oppose, du moins jusqu'à un certain point.

Ce couple de rappel est appelé couple électromagnétique. Il est à l'origine de la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique et inversement.

Considérons plus précisément les deux situations suivantes :

- Supposons que l'on applique au rotor de la machine un couple mécanique résistant Tm, opposé à la rotation, comme si l'on voulait freiner le rotor. Dans ce cas, il apparaît un couple de rappel T_e de même sens que la rotation. Cette situation, représentée en Figure 2.3 (partie gauche), est celle d'un moteur synchrone entraînant un ventilateur, une pompe, etc. La puissance mécanique transmise au rotor par le moteur est ωT_e ;
- Supposons que l'on applique au rotor de la machine un couple mécanique d'entraînement T_m, dans le même sens que la rotation, comme si l'on voulait accélérer

le rotor. Dans ce cas, il apparait un couple de rappel T_e de sens opposé à la rotation. Cette situation, représentée en Figure 2.3 (partie droite), est celle d'un générateur synchrone entraîné par une turbine. La puissance mécanique transmise par la turbine au rotor est ωT_m ;

Notons que, dans les deux cas :

- En régime établi, la vitesse de rotation du rotor est constante et égale à ω ; les couples T_m et T_e sont donc de même amplitude ;
- Au fur et à mesure que l'on augmente le couple mécanique T_m, les deux champs magnétiques s'écartent l'un de l'autre mais continuent à tourner à la même vitesse ;
- Il existe une valeur maximale du couple de rappel T_e. Si le couple T_m tend à dépasser cette valeur, l'équilibre des couples n'est plus possible ; le rotor ne peut plus tourner à la vitesse de synchronisme. On parle de rupture de synchronisme.

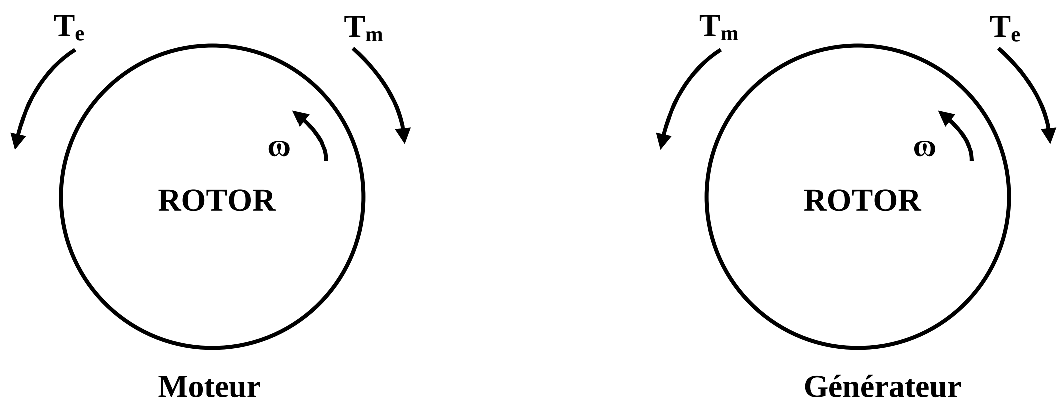


Figure II.3 : Orientation relative des couples et de la vitesse

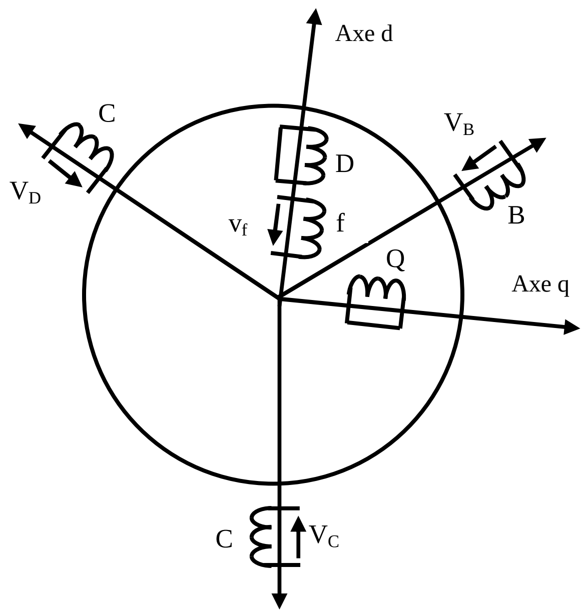


Figure II.4 : Enroulements de la machine synchrone

II.3 .2 MODELE DE PARK DE LA GENERATRICE SYNCHRONE PUISSANT

La machine synchrone considérée dans notre travail représente un alternateur synchrone à pôles saillants, elle est principalement composée de trois enroulements au stator, un enroulement au rotor et deux enroulements amortisseurs.

Après l'application de la transformée de Park aux équations de la génératrice, le modèle mathématique est exprimé en unité réduite (pu) par les équations électriques de tension et de flux ainsi que les équations mécaniques [39].

Dans notre travail, il s'agit en partie de réaliser un contrôle des grandeurs de sortie de la génératrice au niveau du système d'excitation.

II.3 .2.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

On prend en considération certaines hypothèses simplificatrices que nous énumérons comme suit [39]:

- La machine synchrone est supposée non saturée ;
- La constante d'énergie est supposée fixe, puisque les variations de la vitesse du rotor sont petites ;
- Le flux tournant est supposé constant durant les premiers instants qui suivent l'apparition de la perturbation ;
- Les amortissements sont négligés.

II.3 .2.2 MODELE DE LA GENERATRICE SYNCHRONE DANS LE REPERE abc

Les relations entre les flux et courants s'écrivent sous la forme matricielle suivante:

$$\phi = L(\theta)i \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \phi_s^{abc} \\ \phi_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{ss}^{abc}(\theta) & L_{sr}^{abc}(\theta) \\ -L_{sr}^{abc}(\theta) & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} \tag{II.1}$$

Avec

$$\begin{aligned} \phi_s^{abc} &= [\phi_a \quad \phi_b \quad \phi_c]^T \quad \phi_r^{abc} = [\phi_f \quad \phi_D \quad \phi_Q]^T \\ i_s^{abc} &= [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \quad i_r^{abc} = [i_f \quad i_D \quad i_Q]^T \end{aligned} \tag{II.2}$$

$$L_{ss}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{cc}(\theta) \\ L_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & L_{bc}(\theta) \\ {}_{ca}(\theta) & L_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) \end{bmatrix} \tag{II.3}$$

$$L_{sr}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{af}(\theta) & L_{aD}(\theta) & L_{cQ}(\theta) \\ L_{bf}(\theta) & L_{bD}(\theta) & L_{bQ}(\theta) \\ {}_{cf}(\theta) & L_{cD}(\theta) & L_{cQ}(\theta) \end{bmatrix} \tag{II.4}$$

$$L_{rr}^{abc}(\theta)=\begin{bmatrix} L_{ff}(\theta) & L_{fD}(\theta) & L_{fQ}(\theta) \\ L_{Df}(\theta) & L_{DD}(\theta) & L_{DQ}(\theta) \\ _{Qf}(\theta) & L_{QD}(\theta) & L_{QQ}(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{(II.5)}$$

Et les équations de tensions sont écrites comme suit :

$$V = RI + \frac{d}{dt}(\phi) \Leftrightarrow \begin{pmatrix} v_s^{abs} \\ v_r^{abs} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abs} \\ i_r^{abs} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_s^{abs} \\ \phi_r^{abs} \end{pmatrix} \quad \text{(II.6)}$$

Telles que

$$v_s^{abc} = [v_a \quad v_b \quad v_c]^T \quad v_r^{abc} = [v_f \quad 0 \quad 0]^T \quad \text{(II.7)}$$

$$R_s = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix} \quad R_r = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \quad \text{(II.8)}$$

$$\begin{pmatrix} v_s^{abs} \\ v_r^{abs} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abs} \\ i_r^{abs} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} -L_{ss}^{abc}(\theta) & L_{sr}^{abc}(\theta) \\ -L_{sr}^{abc}(\theta) & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} \right) \quad \text{(II.9)}$$

Pour les trois phases du stator :

$$\begin{aligned} V_a &= -R_a I_a - \frac{d\phi_a}{dt} \\ V_b &= -R_b I_b - \frac{d\phi_b}{dt} \\ V_c &= -R_c I_c - \frac{d\phi_c}{dt} \end{aligned} \quad \text{(II.10)}$$

Pour les circuits du rotor :

$$\begin{aligned} V_f &= R_f I_f - \frac{d\phi_f}{dt} \\ 0 &= R_D I_D - \frac{d\phi_D}{dt} \\ 0 &= R_Q I_Q - \frac{d\phi_Q}{dt} \end{aligned} \quad \text{(II.11)}$$

II.3 .2.3 MODELE DE LA GENERATRICE SYNCHRONE DANS LE REPERE DE PARK (dqo)

La transformation de Park définie une transformation triphasée-diphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère fixe *(abc)* vers le repère mobile *(dqo)*, afin de simplifier le modèle du système vu la complexité de l'étude du système.

Les enroulements au niveau du stator (repère *abc)* sont alors remplacés par deux enroulements *(dqo)* en quadrature.

La matrice de passage *P* est notée comme suit :

$$P(\theta)=\frac{2}{3}\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right)\\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right)\\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\end{bmatrix} \tag{II.12}$$

La matrice inverse P^{-1} sera alors :

$$P^{-1}(\theta)=\begin{bmatrix}\cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1\\ \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & 1\\ \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & 1\end{bmatrix} \tag{II.13}$$

L'application de la transformation de Park se fait comme suit :

$$[I_{dq0}]=P[I_{abc}]=[i_d \quad i_q \quad i_0]^T \tag{II.14}$$

$$[\phi_{dq0}]=P[\phi_{abc}]=[\phi_d \quad \phi_q \quad \phi_0]^T \tag{II.15}$$

$$[V_{dq0}]=P[V_{abc}]=[v_d \quad v_q \quad v_0]^T \tag{II.16}$$

Et les équations obtenues sont données par :

- **Équations de flux :**

$$\begin{pmatrix}\phi_s^{dqo}\\ \phi_r^{dqo}\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}-L_{ss}^{dqo} & L_{sr}^{dqo}\\ -\frac{3}{2}L_{sr}^{dqo} & L_{rr}\end{bmatrix}\begin{pmatrix}i_s^{dqo}\\ i_r^{dqo}\end{pmatrix} \tag{II.17}$$

Telles que

$$L_{ss}^{dqo}=P\left(L_{ss}^{abc}(\theta)\right)P^{-1}=\begin{bmatrix}L_{dd} & 0 & 0\\ 0 & L_{qq} & 0\\ 0 & 0 & L_{oo}\end{bmatrix} \tag{II.18}$$

$$L_{sr}^{dqo} = P\left(L_{sr}^{abc}(\theta)\right)P^{-1} = \begin{bmatrix} L_{afo} & L_{aDo} & 0 \\ 0 & 0 & L_{aQo} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{(II.19)}$$

- **Équations des tensions :**

A partir de la formule des tensions dans le repère *abc* dans l'équation (16). Les tensions au niveau du stator peuvent s'écrire :

$$\begin{pmatrix} v_s^{dqo} \\ v_r^{dqo} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{dqo} \\ i_r^{dqo} \end{pmatrix} + P\begin{pmatrix} \phi_s^{dqo} \\ \phi_r^{dqo} \end{pmatrix} + \omega_m W \begin{pmatrix} \phi_s^{dqo} \\ \phi_r^{dqo} \end{pmatrix} \quad \text{(II.20)}$$

Avec

$$\omega_m = \frac{d\theta}{dt} \qquad \mathrm{W} = \begin{bmatrix} \mathrm{J} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \mathrm{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{(II.21)}$$

La conversion des équations en valeur relative (pu) permet de faciliter le calcul et l'évaluation du modèle mathématique plus aisément. Après avoir introduits les valeurs de références (V_{sref}, I_{sref}, S_{sref},ω_{sref}…….) de chaque grandeur, les résultats alors obtenus sont donnés en valeur réduite (pu) dans les équations suivantes :

- **Expression des flux en pu :**

$$\begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -X_{ss} X_{sr} \\ -X_{sr} X_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_s \\ I_r \end{pmatrix} \quad \text{(II.22)}$$

Avec

$$X_{ss} = \begin{bmatrix} x_d & 0 & 0 \\ 0 & x_q & 0 \\ 0 & 0 & x_o \end{bmatrix} \quad X_{rr} = \begin{bmatrix} x_{ff} & x_{fD} & 0 \\ x_{Df} & x_{DD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{QQ} \end{bmatrix} \quad X_{sr} = \begin{bmatrix} x_{df} & x_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{Qq} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{(II.23)}$$

Telles que les réactances mutuelles sont calculées comme suit :

$$\begin{array}{lll} x_d = x_{md} + x_a & x_q = x_{mq} + x_a & x_o \approx x_a \\ x_{ff} = x_{md} + x_{kf1} + x_f & x_{DD} = x_{md} + x_{kf1} + x_D & x_{QQ} = x_{mq} + x_Q \\ x_{df} = x_{fd} = x_{md} & x_{dD} = x_{Dd} = x_{md} & x_{Qq} = x_{qQ} + x_{mq} \\ x_{fD} = x_{Df} = x_{DD} - x_D = x_{md} + x_{kf1} & & \end{array} \quad \text{(II.24)}$$

- **Expression des tensions en pu :**

$$\begin{pmatrix} V_s \\ V_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_s \\ I_r \end{pmatrix} + \frac{1}{\omega_n} P \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} + \omega_n \begin{bmatrix} J & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{pmatrix} \quad \text{(II.25)}$$

Avec

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \omega_n = \omega_{ref} = 2\pi f_{ref} \tag{II.26}$$

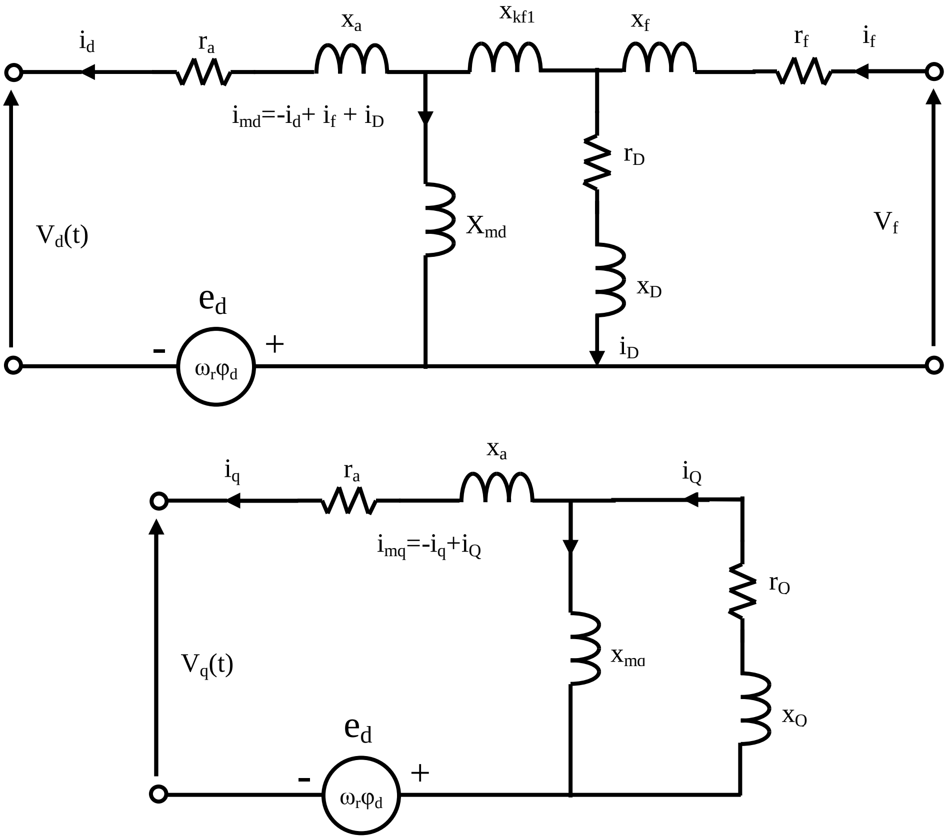


Figure II.5 : Circuits électriques équivalents de la génératrice synchrone triphasée dans le repère de Park (en pu)

II.3 .2.4 EQUATIONS MECANIQUES DE CONSERVATION DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT DE L'ENSEMBLE TURBINE-MACHINE SYNCHRONE

D'une manière générale, le mouvement de rotation de l'arbre est régi par les deux équations suivantes [40 ,41 et 42] :

$$\dot{\delta}(t) = \omega(t) \tag{II.27}$$

$$\dot{\omega}(t) = -\frac{D}{H}\omega(t) + \frac{\omega_0}{2H}\left(P_m(t) - P_e(t)\right) \tag{II.28}$$

Avec :

δ: Angle de puissance du générateur en [rad],

ω : Vitesse relative de rotation électrique du générateur en [rad/s].

A l'équilibre, on doit avoir $P_m=P_e$ compte tenu des pertes mécaniques. On en déduit la valeur de l'angle interne initial. Suite à une perturbation, *X*: change instantanément mais pas δ. Ceci induit une rupture de l'équilibre des couples (accélération,…). Autour du point d'équilibre, il y a un domaine de stabilité limité. Ainsi, si la perturbation est trop grande, c'est-à-dire qu'elle injecte trop d'énergie dans le système, l'état après perturbation peut sortir du domaine de stabilité et entraine une perte de synchronisme irrévocable en quelques millisecondes.

Dans le cadre de ce travail, nous allons considérer la puissance mécanique P_m constante.

II.3 .2.5 Equations Electriques de la Machine Synchrone

Les dynamiques très rapides sont négligées car elles sont dominées par les dynamiques électromagnétiques et électromécaniques de la machine synchrone. Nous nous limitons au modèle à un axe de la machine synchrone.

A- Dynamique électrique du générateur

Ce comportement est défini par :

$$\dot{E}'_q(t) = \frac{1}{T'_{d0}}\left(E_f(t) - E_q(t)\right) \tag{II.29}$$

T'_{d0}: Constante de temps de l'excitation, enroulements axe d.

B- Equations électriques

$$E_q(t) = \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} E'_q(t) - \frac{x_d - x'_d}{x'_{ds}} V_s \cos(\delta(t)) \tag{II.30}$$

$$x_{ds} = x_d + x_s$$

$$x'_{ds} = x'_d + x_s \tag{II.31}$$

$$E_f(t) = k_c u_f(t) \tag{II.32}$$

k_c: Constante de proportionnalité.

$$P_e(t) = \frac{V_s E_q(t)}{x_{ds}} \sin(\delta(t)) \tag{II.33}$$

$$I_q(t) = \frac{V_s}{x_{ds}} \sin(\delta(t)) = \frac{P_e(t)}{x_{ad} I_f} \tag{II.34}$$

$$Q(t) = \frac{V_s E_q(t)}{x_{ds}} \cos(\delta(t)) - \frac{V_s^2}{x_{ds}} \tag{II.35}$$

$$E_q(t) = x_{ad} I_f(t) \tag{II.36}$$

$$V_t(t) = \frac{1}{x_{ds}}\left[x_s^2 E_q^2(t) + x_s^2 V_q^2 + 2 x_d x_s x_{ds} P_e(t) \cos(\delta(t))\right]^{1/2} \tag{II.37}$$

Auxquelles on ajoute les équations de la turbine :

$$\dot{P}_m(t) = -\frac{1}{T_T} P_m(t) + \frac{K_T}{T_T} X_E(t) \tag{II.38}$$

$$\dot{X}_E(t) = -\frac{1}{T_G} X_E(t) + \frac{K_G}{T_G}\left(P_c(t) - \frac{1}{R\omega_0}\omega(t)\right) \tag{II.39}$$

II.3 .3 MODELE PARK-GARIOV DE LA GENERATEUR SYNCHRONE

Ou va se baser dans la deuxième partie de ce chapitre sur le modèle semi numérique par réseau de permeance du générateur synchrone dite PARK-GARIOV et illustre (à la figure II.6), réalisé avec l'utilisation des coordonnées relative de type mutuelle (système ‘ X_{ad}’) qu’est défini par les équations suivantes [9]:

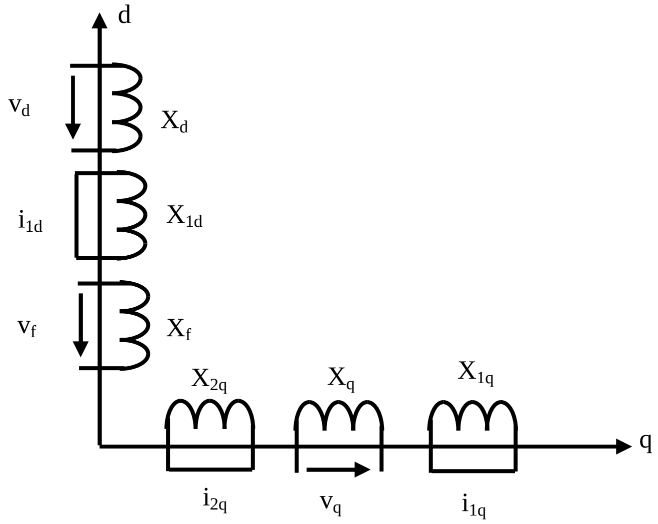


Figure II.6 : Représentation de la machine synchrone sur les axes de Park-gariov

$$\begin{aligned} P\frac{\phi_{1d}}{\omega_s} &= -r_{1d} i_{1d} \\ P\frac{\phi_{1q}}{\omega_s} &= -r_{1q} i_{1q} \\ P\frac{\phi_{2q}}{\omega_s} &= -r_{2q} i_{2q} \\ P\frac{\phi_{f}}{\omega_s} &= -U_f + r_f i_f \end{aligned} \tag{II.40}$$

Les relations flux - courant sur les deux axes (d) et (q) sont données par le système d'équation algébrique linéaire suivant:

$$\begin{aligned} \phi_d &= L_d i_d + M_d i_f + M_d i_D \\ \phi_q &= L_q i_q + M_q i_Q \end{aligned} \tag{II.41}$$

Dans les coordonnées relatives on *a X=L,* et donc les valeurs relatives des flux seront :

$$\begin{aligned}
\phi_d &= X_d i_d + X_{ad} i_f + X_{ad}\sum_{k=1}^{n} i_{kd} \\
\phi_q &= X_q i_q + X_{aq}\sum_{k=1}^{n} i_{kq} \\
\phi_f &= X_{ad} i_d + X_f i_f + X_{ad}\sum_{k=1}^{n} i_{kd} \\
\phi_{1d} &= X_{ad} i_d + X_{ad} i_f + X_{1d} i_{1d} + X_{ad}\sum_{k=1}^{n} i_{kd} \\
\phi_{1q} &= X_{aq} i_q + X_{1d} i_{1q} + X_{aq}\sum_{k=1}^{n} i_{kq} \\
\phi_{2q} &= X_{aq} i_q + X_{2d} i_{2q} + X_{aq}\sum_{k=1}^{n} i_{kq}
\end{aligned} \qquad \text{(II.42)}$$

Avec:

$$X_d = \omega_s L_d \quad X_q = \omega_s L_q \quad X_{ad} = \omega_s M_d \quad X_{aq} = \omega_s M_q \quad X_d = \omega_s L_d \qquad \text{(II.43)}$$

Les flux à effets mutuelles sont définis par :

$$\begin{aligned}
\phi_{ad} &= X_{ad}\left(i_d + i_f + \sum_{K=1}^{n} i_{Kd}\right) \\
\phi_{aq} &= X_{aq}\left(i_q + \sum_{l=1}^{m} i_{lq}\right)
\end{aligned} \qquad \text{(II.44)}$$

On peut écrire les réactances inductives en fonction des réactances mutuelles et shunt *Xs* :

$$X_d = X_{ad} + X_s \qquad X_q = X_{aq} + X_s \qquad X_f = X_{ad} + X_s \qquad X_q < X_d \qquad \text{(II.45)}$$

L'équation (41) on calcule (46) sera :

$$\begin{aligned}
\phi_d &= X_s i_d + \phi_{ad} \\
\phi_q &= X_s i_q + \phi_{aq} \\
\phi_f &= X_{sf} i_f + \phi_{ad} \\
\phi_{nd} &= X_{snd} i_{nd} + \phi_{ad} \\
\phi_{mq} &= X_{smq} i_{nq} + \phi_{aq}
\end{aligned} \qquad \text{(II.46)}$$

L'équation (47) on peut déduire les équations de courant des circuits :

$$\begin{aligned}
i_d &= \frac{\phi_d - \phi_{ad}}{X_s} \\
i_q &= \frac{\phi_q - \phi_{aq}}{X_s} \\
i_f &= \frac{\phi_f - \phi_{ad}}{X_s} \\
i_{kd} &= \frac{\phi_{kd} - \phi_{ad}}{X_{skd}} \\
i_{kq} &= \frac{\phi_{kq} - \phi_{aq}}{X_{skq}}
\end{aligned} \qquad \text{(II.47)}$$

Remplaçant dans (46) les équations de courant (47) on obtient:

$$\frac{\phi_{ad}}{X_{ad}} = \frac{\phi_d - \phi_{ad}}{X_s} + \frac{\phi_f - \phi_{ad}}{X_{sf}} + \sum_{k=1}^{n} \frac{\phi_{kd} - \phi_{ad}}{X_{skd}} \tag{II.48}$$

Et on aura :

$$\phi_{ad} = \frac{\dfrac{\phi_d}{X_s} + \dfrac{\phi_f}{X_{sf}} + \sum_{k=1}^{n} \dfrac{\phi_{kd}}{X_{skd}}}{\dfrac{1}{X_{ad}} + \dfrac{1}{X_s} + \dfrac{1}{X_{sf}} + \sum_{k=1}^{n} \dfrac{1}{X_{skd}}} \tag{II.49}$$

De même pour le flux mutuel transversal :

$$\phi_{aq} = \frac{\dfrac{\phi_q}{X_s} + \sum_{l=1}^{n} \dfrac{\phi_{lq}}{X_{slq}}}{\dfrac{1}{X_{aq}} + \dfrac{1}{X_s} + \sum_{l=1}^{n} \dfrac{1}{X_{sld}}} \tag{II.50}$$

Remarque : Pour la modélisation des turbo-alternateurs série TBB et BBC, il suffit de modéliser un seul circuit amortisseur par l'axe d (n = l), et deux circuits amortisseurs par l'axe q (m = 2). Les paramètres des Turbo Alternateurs utilisés dans notre travail (TBB-200, TBB-500, TBB-1000 et BBC-720) sont données à l'annexe A.

- La réactance inductive transitoire longitudinale est calculée comme suit:

$$X_d^{'} = X_s + \frac{X_{sf} X_{ad}}{X_{sf} + X_{ad}} \tag{II.51}$$

- Les réactances inductives subtransitoires (direct et en quadrature) seront calculées par:

$$X_d^{"} = X_s + \frac{1}{\dfrac{1}{X_{ad}} + \dfrac{1}{X_{sf}} + \dfrac{1}{X_{sfd}}} \tag{II.52}$$

$$X_q^{"} = X_s + \frac{1}{\dfrac{1}{X_{aq}} + \dfrac{1}{X_{sfq}}} \tag{II.53}$$

- Les constant de temps du circuit d'excitation :

$$T_f = \frac{L_f}{r_f} = \frac{X_f}{r_f \omega_f} \tag{II.54}$$

- Le constant de temps transitoire du circuit d'excitation :

$$T_f^{'} = \frac{X_d^{'}}{X_d} T_f \tag{II.55}$$

- Le constant de temps subtransitoire pour l'axe d :
  - Si le stator est ouvert :

$$X_d'' = X_{sf} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{sf}} + \frac{1}{X_{sfd}}} \quad \text{(II.56)}$$

$$T_d'' = \frac{X_q}{r_{fd} X_s} \quad \text{(II.57)}$$

- Si le stator est fermé :

$$X_d'' = X_{sf} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{sfd}}} \quad \text{(II.58)}$$

$$T_{d0}'' = \frac{X_q}{r_{fd} X_s} \quad \text{(II.59)}$$

Les constant de temps des circuits d'amortisseurs :

$$X_{fd} = X_{sfd} + X_{ad} \qquad X_{fq} = X_{sfq} + X_{aq} \qquad T_{fd} = \frac{X_{fd}}{\omega_s \cdot r_{fd}} \qquad T_{fq} = \frac{X_{fq}}{\omega_s \cdot r_{fq}} \quad \text{(II.60)}$$

Les équations des f.e.m sont les suivantes :

F.E.M. statorique crée par le courant rotorique à la fréquence synchrone

$$E_q = \omega_s M_d i_d \quad \text{(II.61)}$$

F.E.M. synchrone en relation avec courants des circuits d'amortisseurs/ q

$$E_{fd} = -\omega_s M_q i_{fq} \quad \text{(II.62)}$$

F.E.M. synchrone en relation avec courants des circuits d'amortisseurs/ à)

$$E_{fq} = \omega_s M_d i_{fd} \quad \text{(II.63)}$$

F.E.M transitoires

$$E_q' = \frac{\omega_s M_d}{L_f \phi_f}$$
$$E_{fd}' = \frac{\omega_s M_d}{L_{fd} \phi_{fd}} \quad \text{(II.64)}$$
$$E_{fq}' = \frac{\omega_s M_q}{L_{fq} \phi_{fq}}$$

Dans les coordonnées relatives on aura :

$$\phi_d = X_d i_d + E_q + E_{fq}$$
$$\phi_q = X_q i_q - E_{fd} \quad \text{(II.65)}$$

- Equations en régime transitoire du circuit rotorique de la machine synchrone ;

On va utilisés les mêmes équations de flux du circuit statorique définies précédemment pour déterminer les équations du circuit rotorique en régime transitoire :

$$\frac{dE_d}{dt} = \frac{1}{T_f}\left(E_f - E_q\right) \quad \text{(II.66)}$$

E_f : Tension relatif à la borne du rotor

E_q : F.E.M statorique

- Schémas équivalents de la machine synchrone et f.e.m. équivalentes :

On va utiliser les équations de PARK - GARIOV suivantes :

On a:

$$\frac{X_f E_q}{X_{ad}} = \phi_{ad} + \frac{X_{sf} E_q}{X_{ad}} \qquad \text{(II.67)}$$
$$\phi_{ad} = X_{ad} i_d + E_q + E_{fq}$$

Avec:

$$E_q^{'} = \frac{X_{ad}^2}{X_f} i_d + E_q + \frac{X_d}{X_f} E_{fq}$$
$$E_{fq}^{'} = \frac{X_{ad}^2}{X_{fd}} i_d + E_q + \frac{X_d}{X_{fd}} E_{fq} \qquad \text{(II.68)}$$
$$\frac{E_{fq}^{'}}{dt} = \frac{1}{T_{fd}} E_{fq}$$

On écrit aussi les équations :

$$u_q = (1+s)\phi_d - \frac{1}{\omega_s}\frac{d\phi_q}{dt} - ri_q$$
$$u_d = -(1+s)\phi_q + \frac{1}{\omega_s}\frac{d\phi_d}{dt} + ri_d \qquad \text{(II.69)}$$

Pour s=0 et l+s=l on aura le schéma équivalent de la machine synchrone suivant :

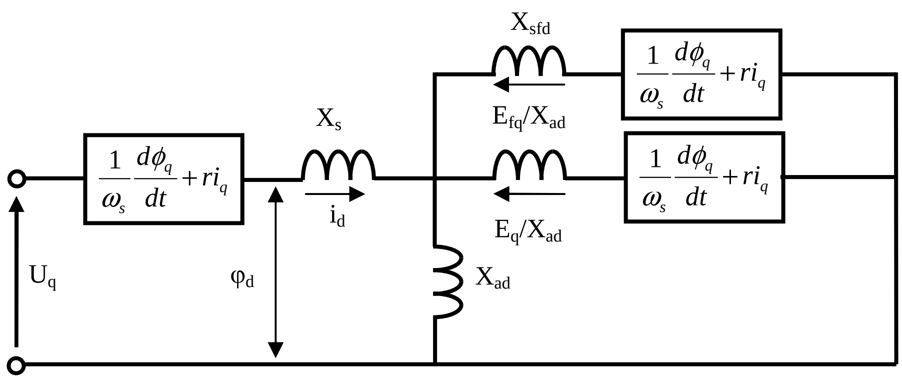


Figure II.7 : Schéma équivalant de la machine synchrone sur l'axe d

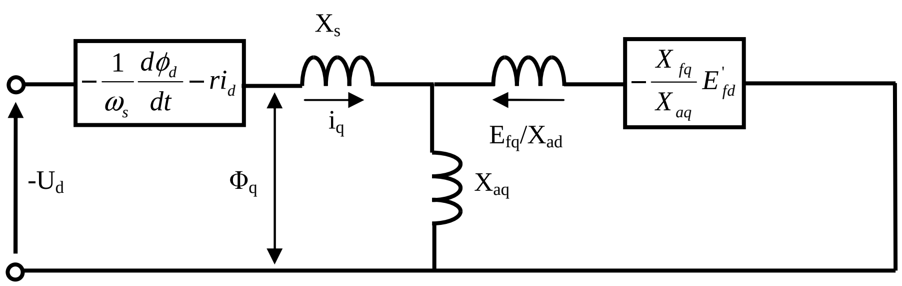


Figure II.8 : Schéma équivalant de la machine synchrone sur l'axe q

On peut simplifier les schémas obtenus par les schémas de la figure (9) suivante:

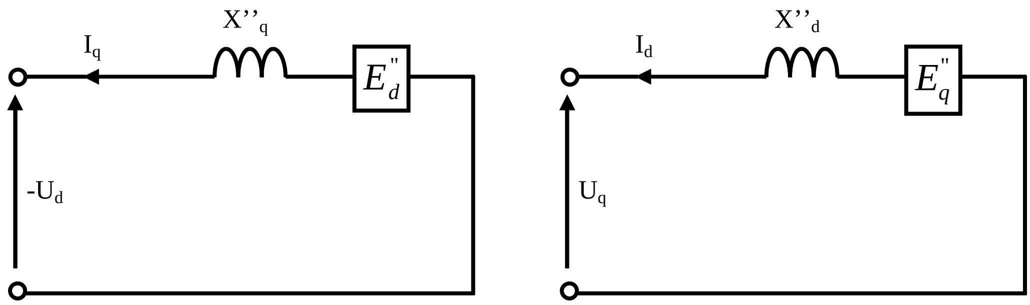


Figure II.9 : Schémas équivalents simplifie de la machine synchrone avec circuits d'amortisseurs

On réélit utiliser les f.e.m. *($E_d^{''}$ et $E_q^{''}$)* pour le calcule des variables du régime perturbé de la Machine synchrone :

$$i_d^{"} = \frac{E_d^{"}}{X_d^{"}} \quad \text{Si}$$
$$E^{"} = \sqrt{E_d^{"2} + E_q^{"2}} \qquad \text{(II.70)}$$
$$i^{"} = \frac{E^{"}}{X^{"}}$$

Avec :

$$E_q^{"} = \frac{\dfrac{1}{\dfrac{X_{sf} X_f}{X_{ad}}} E_q^{'} + \dfrac{1}{\dfrac{X_{sfd} X_{fd}}{X_{ad}}} E_{fq}^{'}}{\dfrac{1}{X_{ad}} + \dfrac{1}{X_{sf}} + \dfrac{1}{X_{sfd}}} \qquad \text{(II.71)}$$

$$E_q^{"} = \frac{\dfrac{1}{\dfrac{X_{sfq} X_{fq}}{X_{aq}}} E_{fd}^{'}}{\dfrac{1}{X_{ad}} + \dfrac{1}{X_{sfq}}} \qquad \text{(II.72)}$$

Les équations du circuit statorique de la machine synchrone seront :

- Pour la machine synchrone avec circuit d'amortissement

$$-U_d = X_q^{"} i_q + E_d^{"} + r i_d$$
$$U_q = X_d^{"} i_d + E_q^{"} - r i_q \qquad \text{(II.73)}$$

- Pour la machine synchrone sans circuit d'amortissement

$$-U_d = X_q^{'} i_q + E_d^{'} + r i_d$$
$$U_q = X_d^{'} i_d + E_q^{'} - r i_q \qquad \text{(II.74)}$$

On aura donc les équations des courants et des flux suivant :

Système d'équation des courants :

$$
\begin{aligned}
i_d &= \frac{U_q - E_q^{"}}{X_d^{"}} \\
i_q &= \frac{-U_d + E_d^{"}}{X_q^{"}} \\
i_f &= \frac{\phi_f - \phi_{ad}}{X_{sr}} \\
i_{1d} &= \frac{\phi_{1d} - \phi_{ad}}{X_{srd}} \\
i_{1q} &= \frac{\phi_{1q} - \phi_{aq}}{X_{sr1q}} \\
i_{2q} &= \frac{\phi_{2q} - \phi_{aq}}{X_{sr2q}}
\end{aligned}
\qquad (II.75)
$$

Système d'équation des flux:

$$
\begin{aligned}
\phi_{ad} &= E_q^{"} + \left(X_d^{"} - X_s\right) i_d \\
\phi_{aq} &= E_d^{"} + \left(X_q^{"} - X_s\right) i_q \\
\phi_f &= \omega_s \int_0^{\phi_f} \left(U_{f0} - R_f i_f\right) dt \\
\phi_{1d} &= \omega_s \int_0^{\phi_{1d}} \left(-R_{1d} i_{1d}\right) dt \\
\phi_{1q} &= \omega_s \int_0^{\phi_{1q}} \left(-R_{1q} i_{1q}\right) dt \\
\phi_{2q} &= \omega_s \int_0^{\phi_{2q}} \left(-R_{2q} i_{2q}\right) dt
\end{aligned}
\qquad (II.76)
$$

Equation du mouvement du rotor de la machine (mécanique):

$$
\begin{aligned}
d\delta &= \left(\omega - \omega_s\right) dt \\
s &= \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s} \\
\frac{d\delta}{dt} &= \omega_s s
\end{aligned}
\qquad (II.77)
$$

La balance des moments de la machine synchrone :

$$
\begin{aligned}
M_T + M_j + M_e &= 0 \\
M_j &= -j \frac{d\omega}{dt}
\end{aligned}
\qquad (II.78)
$$

M_T: moment de turbine = constant

M_e : moment électromagnétique

$$
\left(M_e = \frac{-P_e}{\omega_s} \right) \qquad (II.79)
$$

On aura:

$$j\frac{d\omega}{dt}+\frac{P_e}{\omega_s}=M_T \qquad \text{(II.80)}$$

On obtient:

$$\begin{aligned} T_j\frac{d}{dt}S+\left(\phi_{ad}i_q-\phi_{aq}i_d\right)&=M_T\\ T_j\frac{d}{dt}S&=M_T-M_e \end{aligned} \qquad \text{(II.81)}$$

Le tableau suivant résumé le model de PARK et PARK-GARIOV de la machine synchrone puissant

TABLEAU 1 : La différance entre le model de PARK et PARK-GARIOV

	Model de PARK-GARIOV	**Model de PARK**
Hypothèses Simplificatrices	*Négligeable*	*En consideration*
Les équations des courants	$i_d=\frac{U_q-E_q^{''}}{X_d^{''}}$ $i_q=\frac{-U_d+E_d^{''}}{X_q^{''}}$ $i_f=\frac{\phi_f-\phi_{ad}}{X_{sr}}$ $i_{1d}=\frac{\phi_{1d}-\phi_{ad}}{X_{srd}}$ $i_{1q}=\frac{\phi_{1q}-\phi_{aq}}{X_{sr1q}}$ $i_{2q}=\frac{\phi_{2q}-\phi_{aq}}{X_{sr2q}}$	$i_d=\frac{T_{d0}^{'}\frac{dE_q^{'}}{dt}+E_q^{'}-E_{fd}}{(x_d-x_d^{'})}$ $i_q=\frac{T_{q0}^{'}\frac{dE_d^{'}}{dt}+E_d^{'}}{(x_q-x_q^{'})}$
Les équations des flux	$\phi_f=\omega_s\int_0^{\phi_f}\left(U_{f0}-R_f i_f\right)dt$ $\phi_{1d}=\omega_s\int_0^{\phi_{1d}}\left(-R_{1d}i_{1d}\right)dt$ $\phi_{1q}=\omega_s\int_0^{\phi_{1q}}\left(-R_{1q}i_{1q}\right)dt$ $\phi_{2q}=\omega_s\int_0^{\phi_{2q}}\left(-R_{2q}i_{2q}\right)dt$	$\begin{pmatrix}\phi_s^{dqo}\\ \phi_r^{dqo}\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}-L_{ss}^{dqo} & L_{sr}^{dqo}\\ -\frac{3}{2}L_{sr}^{dqo} & L_{rr}\end{bmatrix}\begin{pmatrix}i_s^{dqo}\\ i_r^{dqo}\end{pmatrix}$

Les équations des flux mutule	$\phi_{ad} = E_q^{''} + \left(X_d^{''} - X_s\right)i_d$ $\phi_{aq} = E_d^{''} + \left(X_q^{''} - X_s\right)i_q$	*Non modélisé*
Les équations FEM subtransitoire	$E_q^{''} = \dfrac{\dfrac{1}{\dfrac{X_{sf}X_f}{X_{ad}}E_q^{'}} + \dfrac{1}{\dfrac{X_{sfd}X_{fd}}{X_{ad}}E_{fq}^{'}}}{\dfrac{1}{X_{ad}} + \dfrac{1}{X_{sf}} + \dfrac{1}{X_{sfd}}}$ $E_q^{''} = \dfrac{\dfrac{1}{\dfrac{X_{sfq}X_{fq}}{X_{aq}}E_{fd}^{'}}}{\dfrac{1}{X_{ad}} + \dfrac{1}{X_{sfq}}}$	*Non modélisé*
Les équations des tensions	$U_d = -X_q^{''}i_q - E_d^{''} - ri_d$ $U_q = X_d^{''}i_d + E_q^{''} - ri_q$	$U_q = E_q^{'} + x_d^{'}i_d - R_a i_q$ $U_d = E_d^{'} - x_q^{'}i_q - R_a i_d$

II.4 MODELE DE RESEAU DE PUISSANCE INFINI :

Considérons le système de la figure II.10 ou la machine synchrone est connectée par une ligne de transmission à un réseau de puissance infini. La ligne ayant une résistance R_e, et une inductance L_e [38]

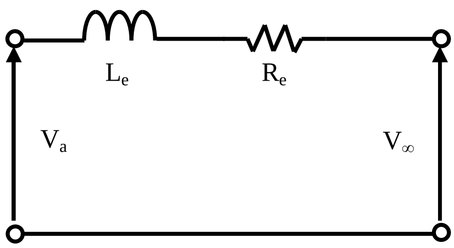


Figure II.10 : Machine synchrone connectée à un réseau bus infini

De la figure (11) nous pouvons écrire :

$$V_a = V_{a\infty} + R_e i_a + L_e \frac{di_a}{dt} \tag{II.82}$$

Ainsi pour les 3 phases :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a\infty} \\ V_{b\infty} \\ V_{c\infty} \end{bmatrix} + R_e \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_e \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{II.83}$$

La transformation de Park de cette équation nous permet d'écrire :

$$V_{odq} = PV_{abc} = P\left(V_{abc} + R_e i_{odq} + L_e i_{abc}^{'}\right) \tag{II.84}$$

Sachant que :

$$V_{\infty abc} = \sqrt{2}V \begin{bmatrix} \cos(\omega_r t + \alpha) \\ \cos\left(\omega_r t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega_r t + \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \tag{II.85}$$

Et d'après l'équation (85) on aura :

$$V_{\infty odq} = PV_{\infty abc} = \sqrt{2}V_{\infty o} \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\delta - \alpha) \\ \cos(\delta - \alpha) \end{bmatrix} \tag{II.86}$$

Pour le dernier terme à droite dans (86)

$$Pi'_{abc} = i'_{abc} - Pi'_{abc} = i'_{odq} - P'P^{-1}i_{odq} \tag{II.87}$$

On peut enfin écrire le système d'équation (88) comme suite:

$$V_{\infty odq} = PV_{\infty abc} = \sqrt{2}V_{\infty} \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\delta - \alpha) \\ \cos(\delta - \alpha) \end{bmatrix} + R_e i_{odq} + R_e i'_{odq} + \omega_e L_e \begin{bmatrix} 0 \\ -i_q \\ i_d \end{bmatrix} \tag{II.88}$$

En négligeant la résistance R_c de la ligne devant sa réactance Xe =ωLe on aura :

$$V_{\infty odq} = PV_{\infty abc} = \sqrt{2}V_{\infty} \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\delta - \alpha) \\ \cos(\delta - \alpha) \end{bmatrix} + L_e i'_{odq} + X_e \begin{bmatrix} 0 \\ -i_q \\ i_d \end{bmatrix} \tag{II.89}$$

II.5 MODELISATION DES DISPOSITIFS DE REGULATION

Quand la demande de l'énergie électrique s'écarte de sa valeur normale, l'état du système change. Il faut que le système de régulation automatique détecte ce changement et commence à réagir en temps réel. L'ensemble de ces réactions doit être plus rapide et plus efficace que possible, pour trouver un équilibre entre l'énergie électrique fournie et demandée.

II.5.1 REGULATEUR AUTOMATIQUE DE TENSION AVR

Le régulateur doit fournir une tension d'excitation adéquate pour l'alternateur au niveau de son enroulement d'excitation, cette régulation est fournie soit :

- dans le cas d'une sur - excitation dans le cas d'une chute de tension ;

- Ou bien dans le cas d'une sous - excitation si on a une élévation de tension.

Le régulateur doit être muni d'un signal stabilisateur qui sera introduit dans un sommateur avec les tensions de consigne et celle de la sortie mesurée.

Dans notre étude la machine synchrone est équipée par un régulateur de tension modèle IEEE type -5 [38], représenté par la figure (11).

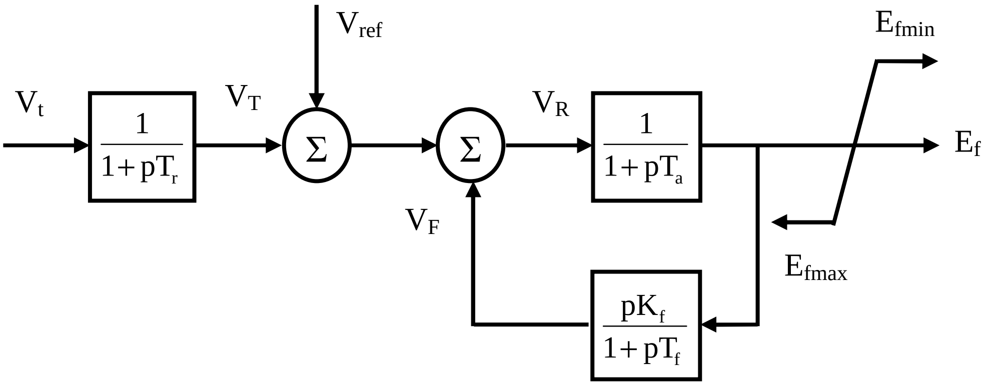


Figure II.11 : Schéma du circuit d'excitation de tension (AVR) « IEEE » type -5

La tension terminale de la machine V_t redressée et filtrée est comparée avec la tension de référence V_{ref} pour déterminer l'erreur de tension entrant à l'amplificateur du régulateur. Cette erreur est combinée à la boucle principale d'amortissement de l'excitation.

La fonction de transfert du régulateur principal est représentée avec un gain K_A et une constante de temps T_A. Le signal de sortie E_{fd} est limité entre E_{fdmin} et E_{fdmax}

$$V_T = \frac{V_T - V_T}{T_r} \tag{II.90}$$

$$V_F = \frac{K_F V_R - V_F}{T_f} \tag{II.91}$$

$$V_R = \frac{K_A V_E - V_R}{T_a} \tag{II.92}$$

$$V_E = V_{\mathrm{Re}\,f} - V_F - V_T \tag{II.93}$$

$$E_{fd} = \begin{cases} E_{fd\,\max} & \text{si} \quad V_R \geq E_{fd\,\max} \\ E_{fd} = V_R & \text{si} \quad E_{fd\,\max} > V_R > E_{fd\,\min} \\ E_{fd\,\min} & \text{si} \quad V_R \leq E_{fd\,\min} \end{cases} \tag{II.94}$$

La boucle d'amortissement principale est fournie par la fonction de transfert de rétroaction

$\frac{pK_F}{1+pT_F}$ à partir de la sortie de l'excitatrice.

$\frac{pK_F}{1+pT_F}$: Fonction de transfert du circuit d'amortissement.

$\frac{pK_A}{1+pT_A}$: Fonction de transfert de l'amplificateur du régulateur.

$\frac{1}{1+pT_R}$: Fonction de transfert du filtre.

II.5.2 STABILISATEUR DES SYSTEMES DE PUISSANCES PSS:

Des efforts considérables ont étaient déployés pour le développement des systèmes 'PSS'. La fonction de base d'un système stabilisateur de puissance PSS est de moduler l'excitation du turboalternateur pour fournir un amortissement aux oscillations, ces dernières se trouvent dans une gamme de fréquence de 0.2 Hz a 2.0 Hz, par contre, l'amortissement insuffisant de ces oscillations peut limiter la capacité de transmission de puissance.

La structure conventionnelle prise au début était un réseau de compensation du PSS ‘’avance - retard de phase’’. C'est le résultat de la théorie de commande conventionnelle ou les marges de phase et de gain obtenues par l'analyse de Bode, sont employées pour concevoir des contrôleurs qui garantissent la stabilité des systèmes de puissance, utilisant comme entrée l'écart de vitesse de rotation du rotor de la machine.

Le signal de stabilisation qui vient modifier par contre - réaction négative la valeur de la référence du régulateur de tension, doit être formé à partir de la puissance d'accélération. Cette puissance est la différence entre la puissance mécanique développé par la turbine et la puissance active générée par l'alternateur (ou bien la différence entre les vitesses de rotation), le résultat de la soustraction devient le signal d'entrée d'un circuit de stabilité.

La figure (13) montre le schéma fonctionnel du PSS qui se compose de trois blocks :

- Le gain de stabilisateur K_{PSS} détermine la quantité d'atténuation présentée par le PSS.
- Le bloc correcteur est un filtre passe-haut, il permet aux signaux liés aux oscillations de passer sans changements, sans ce filtre, les changements réguliers de la vitesse modifies la tension terminale (le correcteur du PSS répond seulement aux changements de la vitesse).
- Le bloc de compensation de phase qui compense le retard de phase entre l'entrée d'excitateur et le Couple électrique de générateur.

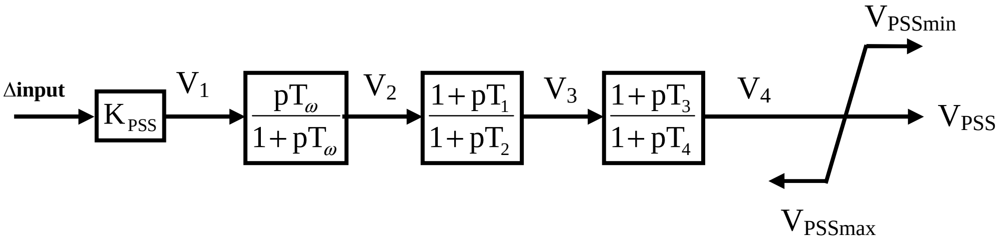


Figure II.12 schéma fonctionnel du PSS [2, 3, 38]

La fonction de transfert est :

$$V_{PSS} = K_{PSS} \frac{pT_{\omega}}{1+pT_{\omega}} \frac{1+pT_1}{1+pT_2} \frac{1+pT_3}{1+pT_4} \Delta input \qquad \text{(II.95)}$$

$$V_{PSS} = \begin{cases} V_{PSS\max} & \text{si} \quad V_4 \geq V_{PSS\max} \\ V_4 & \text{si} \quad V_{PSS\max} > V_4 > V_{PSS\min} \\ V_{PSS\min} & \text{si} \quad V_4 \leq V_{PSS\max} \end{cases} \qquad \text{(II.96)}$$

$$V_4 = \frac{V_3 - V_4}{T_4} + \frac{T_3}{T_4} V_3 \qquad \text{(II.98)}$$

$$V_3 = \frac{V_2 - V_3}{T_3} + \frac{T_2}{T_3} V_2 \qquad \text{(II.99)}$$

$$V_4 = \frac{V_2}{T_{\omega}} V_1 \qquad \text{(II.100)}$$

$$V_1 = K_{PSS} \Delta input \qquad \text{(II.101)}$$

$$\Delta input = \begin{cases} \Delta P, \int P \\ ou \\ \Delta\omega \\ et \\ \Delta i_f \\ et \\ \Delta U_f \end{cases} \qquad \text{(II.102)}$$

Avec :

K_{PSS} : Gain.

$\frac{pT_{\omega}}{1+pT_{\omega}}$: Fonction du transfert du correcteur.

$\frac{1+pT_1}{1+pT_2} \frac{1+pT_3}{1+pT_4}$: Fonction du transfert du compensateur.

II.6 SIMULATION ET DISCUSSION

Les modèles mathématiques du système électro - énergétique étudié, comme le Modèle de PARK et PARK-GARIOV de la MS avec les contrôleurs AVR-FA (AVR-PSS) relié à un Réseau de Puissance Infinie, ont étés élaborés sous logiciel MATLAB/SIMULINK

II.6.1 ÉTUDE DE LA STABILITE AVEC LES MODELES DE PARK ET PARK-GARIOV

Pour une étude comparative entre le deux modèle PARK et PARK-GARIOV on a effectué des perturbations par variation brusque du couple de la turbine a 15% de ΔT_m à l'instant t=0.5s (étude de la stabilité)

II.6.2 TESTE DE ROBUSTESSE AVEC LES MODELES DE PARK ET PARK-GARIOV

Dans un premier temps on effectué des variations paramétriques électriques (majoration de 100% de R) à l'instant t=4s. Puis, on effectue des variations paramétriques mécaniques (minoration de 50% de l'inertie J) t=8s en supposant cette fois ci que les paramètres électriques sont connus (constants).

L'étude du système s'est faite pour le régulateur conventionnel PSS (AVR-FA) type PID appliqué aux deux modèles PARK et PARK-GARIOV [9]

Les courbes obtenues (figures II.13 à II.24) nous donnent respectivement : La tension terminal du Turbo Alternateur (Ug) ; L'angle interne 'delta' du TA entre la tension et la FEM ; la variation de vitesse en terme de glissement ($\Delta\omega$) ; La puissance électromagnétique (Pe).

On a simulé les régimes de fonctionnements suivants :

- Régime nominale ;
- Renvoie de la puissance réactive du réseau vers la machine (Q< 0) en régime sous excité pendant les heures de repos (la nuit par exemple) ;
- la sur - production de l'énergie réactive (Q très grande >>) en régime sur - excité pendant les heures de pointes.
  - Notre étude à été effectuée pour le Turbo – Alternateurs: TBB-200.
  - Le temps de la simulation est évalué à 12 secondes.

- **Résultats de simulation du système SMIB fonctionnent en régime nominale**

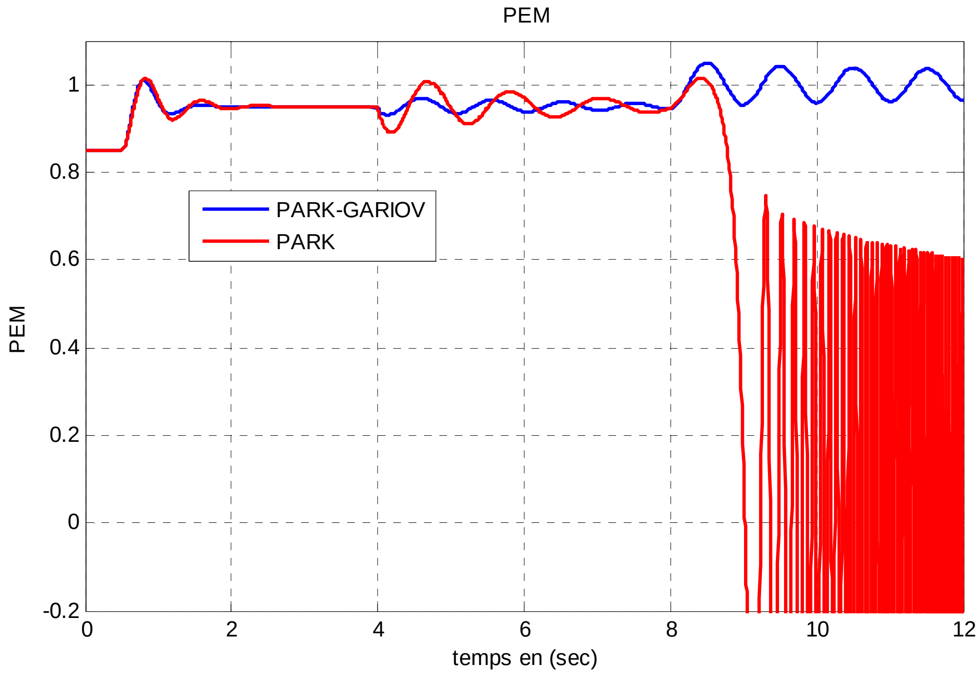


Figure II.13 : puissance électromagnétique

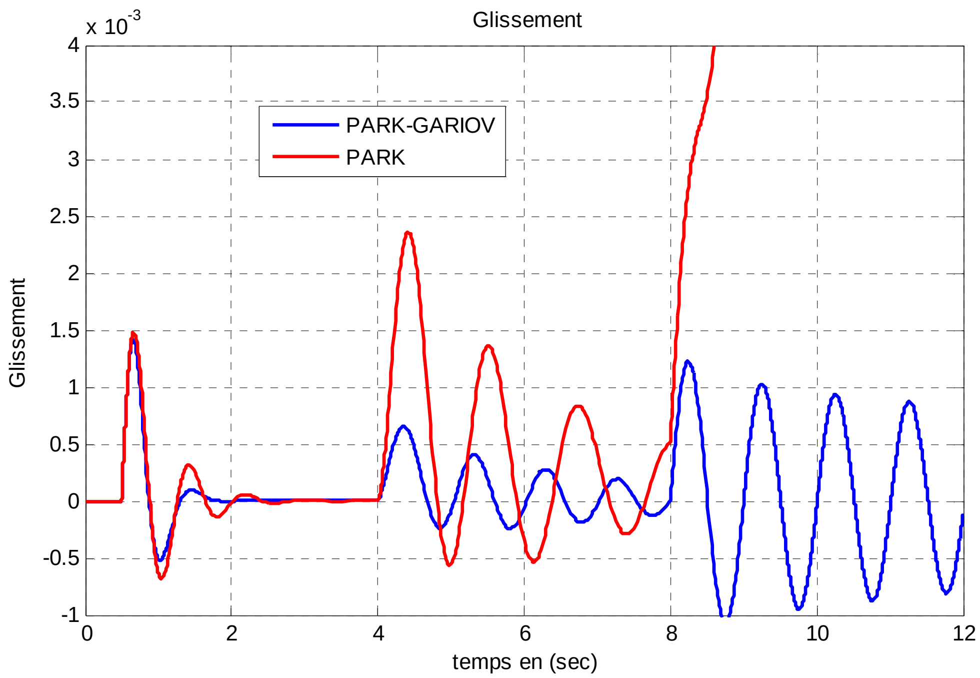


Figure II.14 : variation de vitesse en termes de glissement

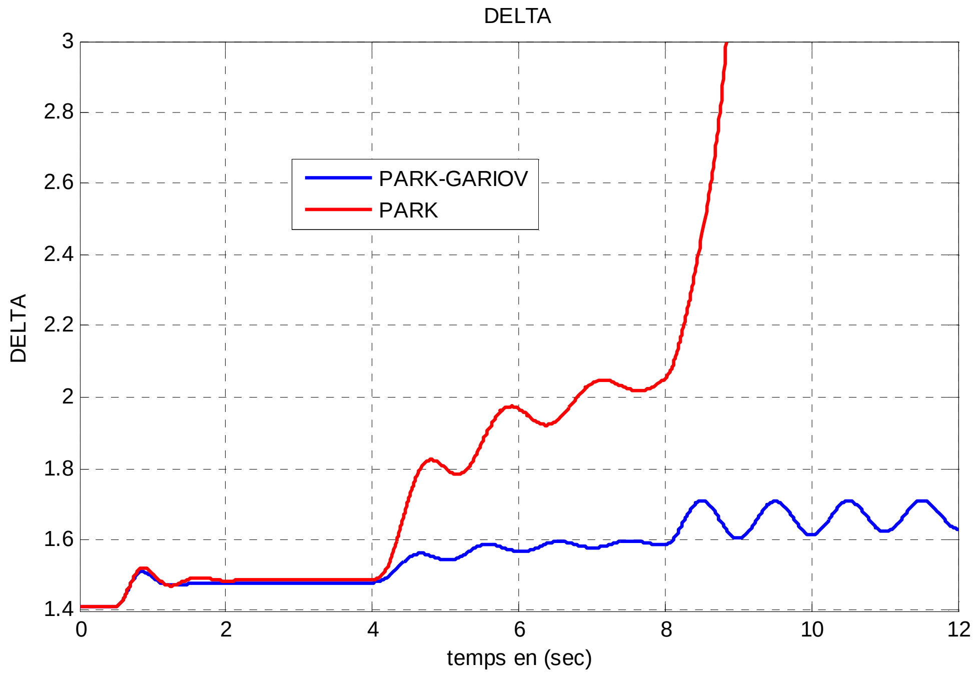


Figure II.15 : angle interne 'delta' du TA entre la tension et la FEM

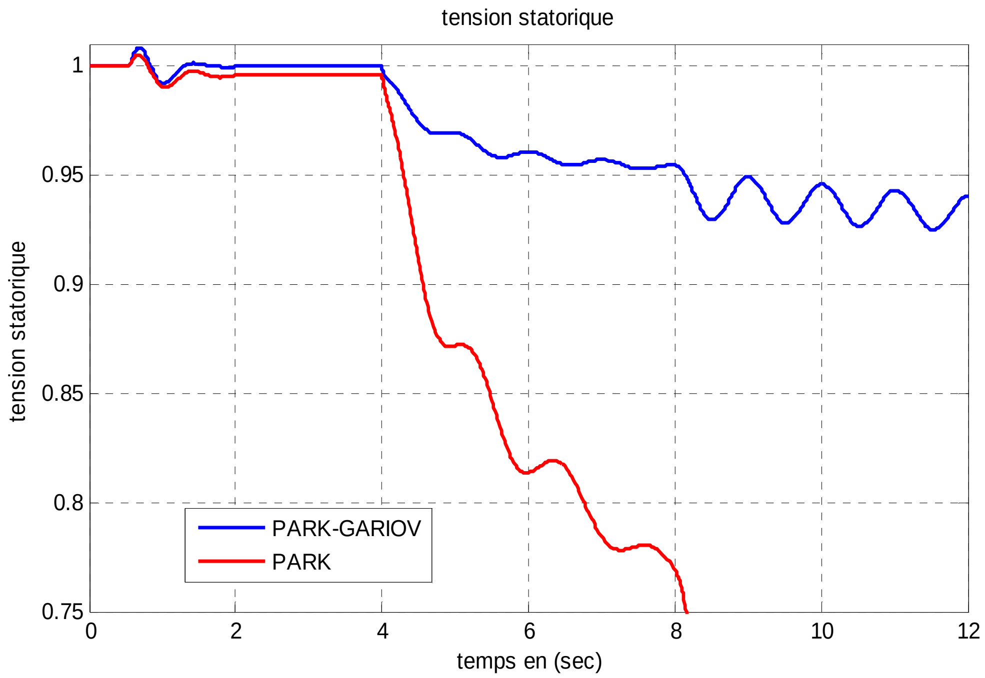


Figure II.16 : tension terminale

➢ **Résultats de simulation de système SMIB fonctionnant en régime sous excité**

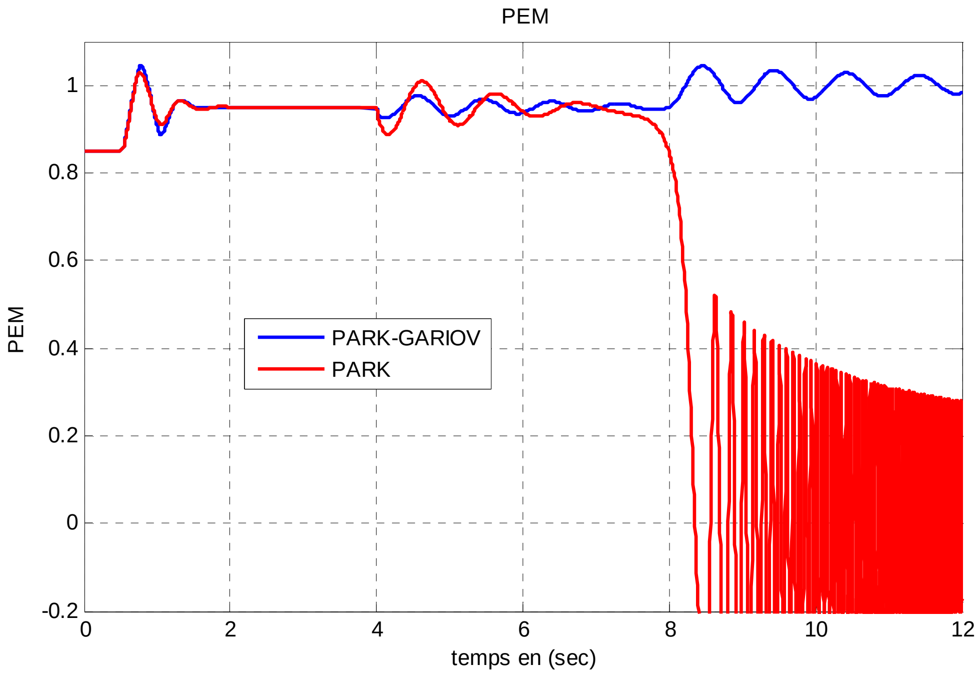


Figure II.17 : puissance électromagnétique

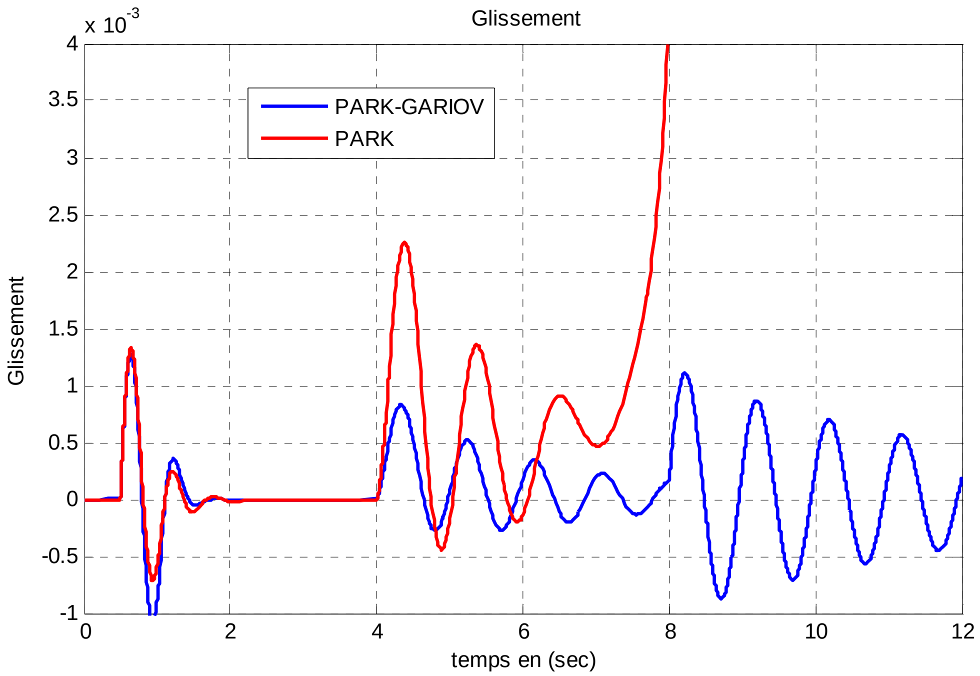


Figure II.18 : variation de vitesse en termes de glissement

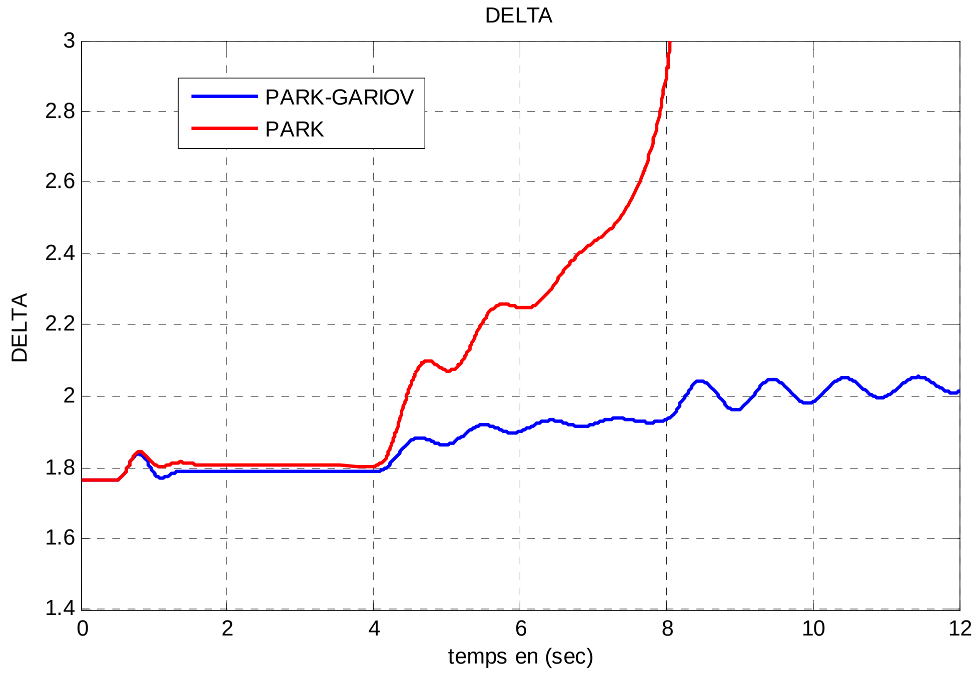


Figure II.19 : angle interne ‘delta’ du TA entre la tension et la FEM

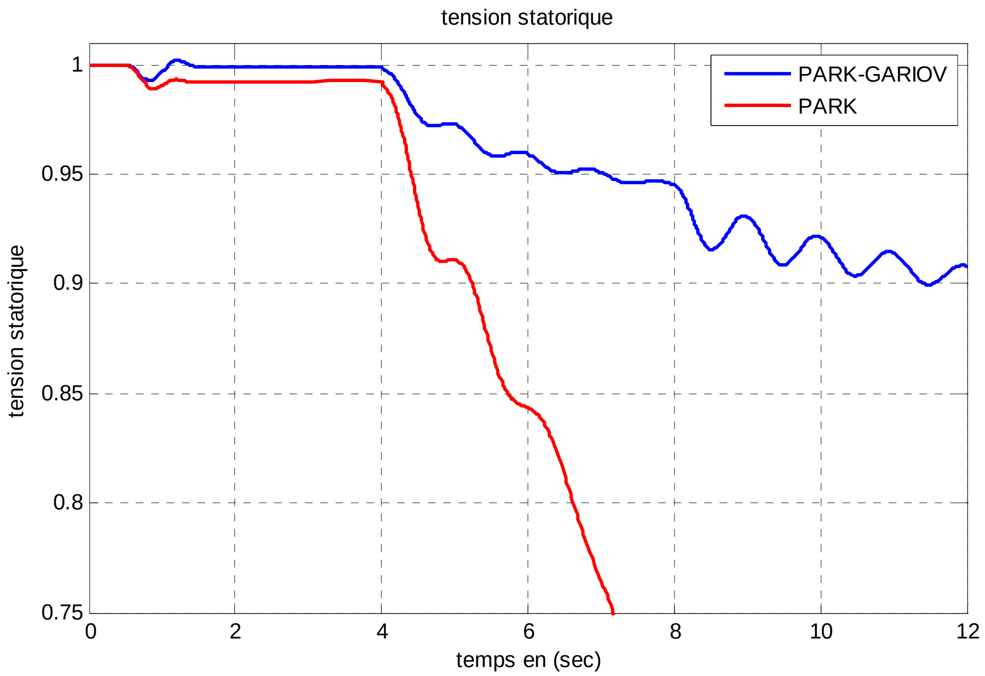


Figure II.20 : tension terminale

- **Résultats de simulation de système SMIB fonctionnant en régime sur excité**

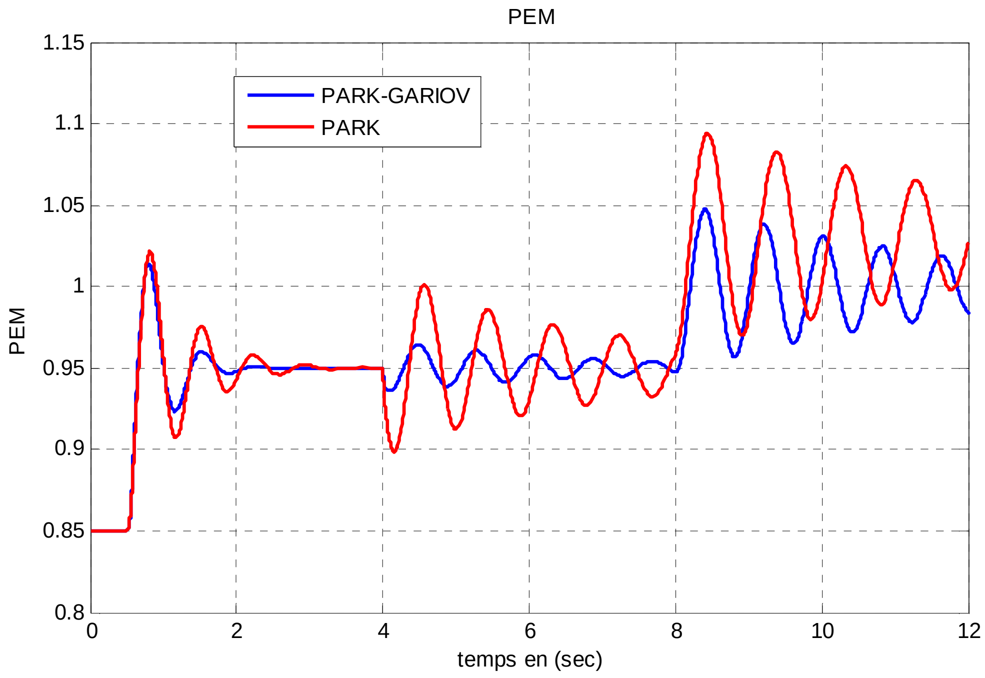


Figure II.21 : puissance électromagnétique

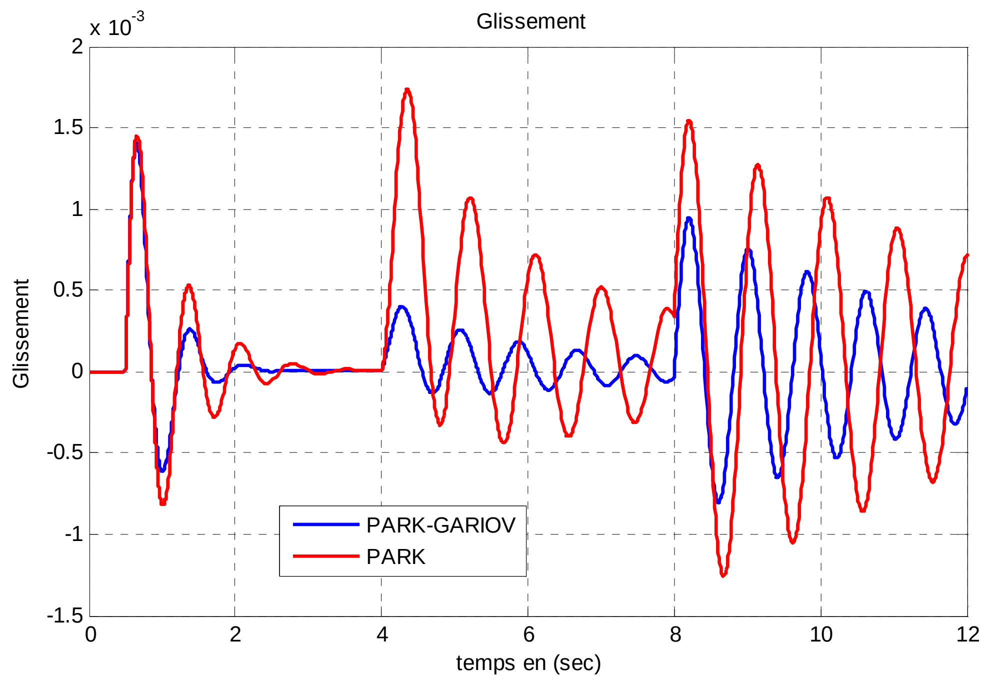


Figure II.22 variation de vitesse en termes de glissement

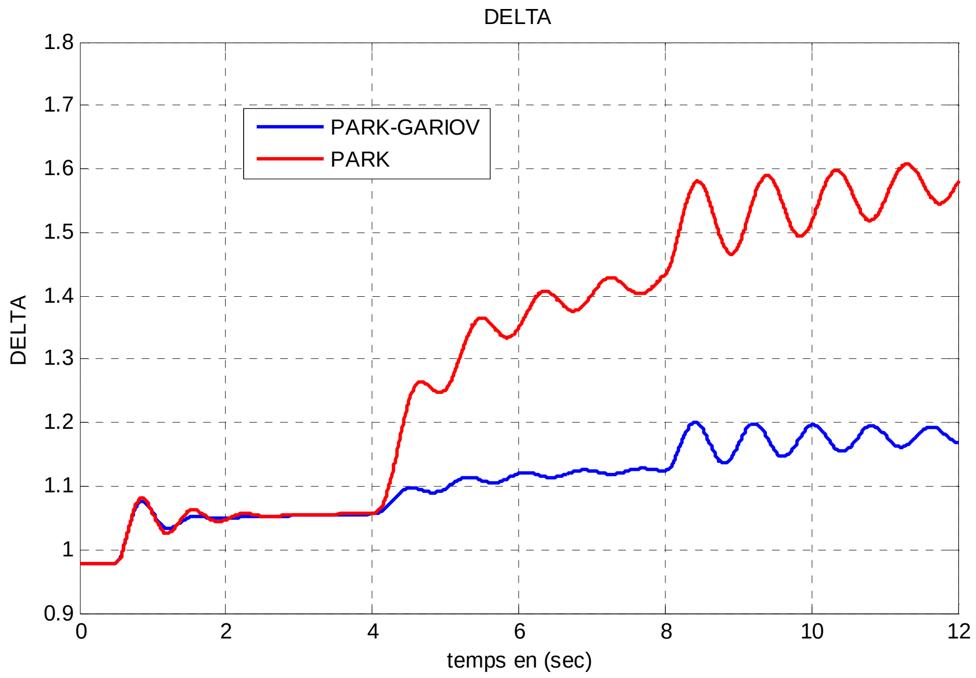


Figure II.23 : angle interne 'delta' du TA entre la tension et la FEM

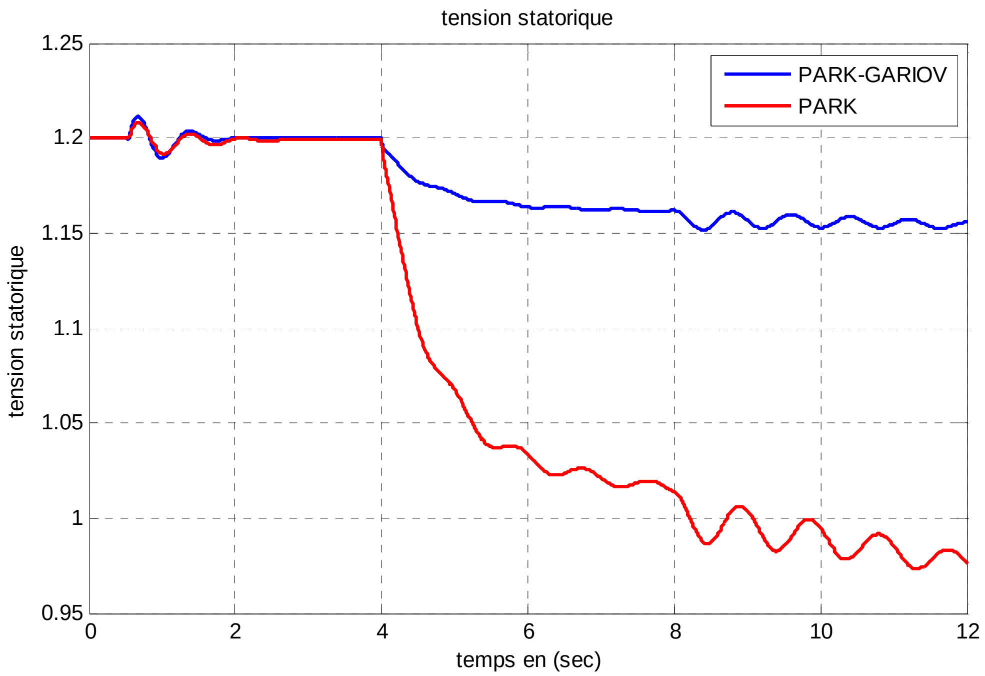


Figure II.24 : tension terminale

D’après les résultats de simulation obtenu on peut constater que :

- Avec les deux modèles (PARK et PARK-GARIOV) on peut étudier la stabilité du système avec des conditions bien spécifiées;
- Suite aux testes de robustesses (variations paramétriques électriques ou mécaniques) notre système avec le modèle PARK ne suit pas ces variations par contre avec le modèle PARK-GARIOV il nous donne des réponses avec de très bonnes performances il est assez robuste et plus fiable pour des études de robustesse de stabilité pour pouvoir tester nos algorithmes de commande avancées qui ont va développer dans les prochaines chapitres.

II.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique, la mise en équation de chaque élément constitutif du système de puissance type SMIB-IEEE ; génératrice synchrone, réseau de puissance infini, système d'excitation AVR et le stabilisateur de système de puissance PSS. Cependant, l’objectif principale dans ce chapitre est la validation d’un modèle fiable permettant d’étudier la robustesse de stabilité de notre système électro-énergétique pour cela on a fait étude comparative entre deux modèles : PARK et PARK-GARIOV, d’où des testes de robustesses montrent la fiabilité du deuxième modèle proposé basé sur la modélisation semi numérique par réseaux de permeances.

Le chapitre suivant présentera une étude détaillée de notre système utilisent le modèle de PARK-GARIOV implémenté avec une interface graphique développée sous MATLAB.

CHAPITRE III

ÉTUDE ET IMPLEMENTATION DU SYSTEME SMIB SOUS INTERFACE GRAPHIQUE GUI DEVELOPPE

CHAPITRE III

ÉTUDE ET IMPLEMENTATION DU SYSTEME SMIB SOUS INTERFACE GRAPHIQUE GUI DEVELOPPE

III.1 INTRODUCTION

Dans les systèmes électro-énergétiques (SEE), la stabilité est considérée l'une des trois grandes études : les deux autres étant l'écoulement de puissance et l'analyse de défauts. Il est clair que les études de stabilité sont plus complexes, tant en termes de modélisation que de méthodes des résolutions. La stabilité d'un système de puissance est la capacité du système, pour des conditions initiales données, de retrouver un point d'équilibre suite à une perturbation.

L'instabilité peut avoir différentes formes et peut être influencée par différents facteurs. L'analyse des problèmes de stabilité implique l'indentification des facteurs essentiels contribuant à l'instabilité et le développement des méthodes (synthèse) pouvant améliorer la stabilité du système.

Dans ce chapitre, on développera un code de calcul (programmes MATLAB et blocks SIMULINK), et par la suite d'une interface graphique 'GUI' sous logiciel MATLAB, permettant de résoudre le compromis précision / rapidité avec plus de souplesses et d'efficacité dans l'interaction Homme Machine, lors des études d'analyse et de synthèse pour la commande des centrales de production d'énergie électrique afin d'améliorer la stabilité des SEE.

III.2 LA démarche à suivre proposée pour notre étude:

Pour une étude plus d'efficace de notre système type SMIB on propose les étapes suivants (figure III.1):

- Faire l'étude pour différentes type des turbo-alternateurs (voire annexe)
  - TBB 200.
  - TBB 500.
  - BBC 700.
  - TBB 1000.
- utiliser les techniques de commande suivantes :
  - Techniques conventionnelles type PID (AVR et PSS).

  - Techniques commandes avancées robustes H_∞ et H_2.
- simuler les différents régimes de fonctionnements de système SMIB suivants :
  - Régime nominal.
  - régime sous excité.
  - régime sur excité.
- Simuler différentes configurations du réseau extérieur
  - ligne longue.
  - ligne moyenne.
  - ligne courte.
- étudier de stabilité de système SMIB.
- tester de robustesse de stabilité avec :
  - variation paramétrique électrique.
  - variation paramétrique mécanique.
- Optimisation avancées des techniques de commandes :
  - par l'algorithme génétique AG.
  - par essaim de particules (OEP).
- Pour l'étude de comportement dynamique et statique du système on a calculé les paramètres suivants :
  - σ: Partie réelle des pôles dominats
  - ε %: erreurs statiques.
  - d %: dépassements.
  - t_s : temps d'établissements.

La difficulté de cette étude a dû de la chercher des moyennes fiables permet de réalisés ce travail en temps très court avec une grande précision des résultats. Pour cela et grâce à la rapidité du développement de l'informatique on peut implémenter notre système sous interface graphique.

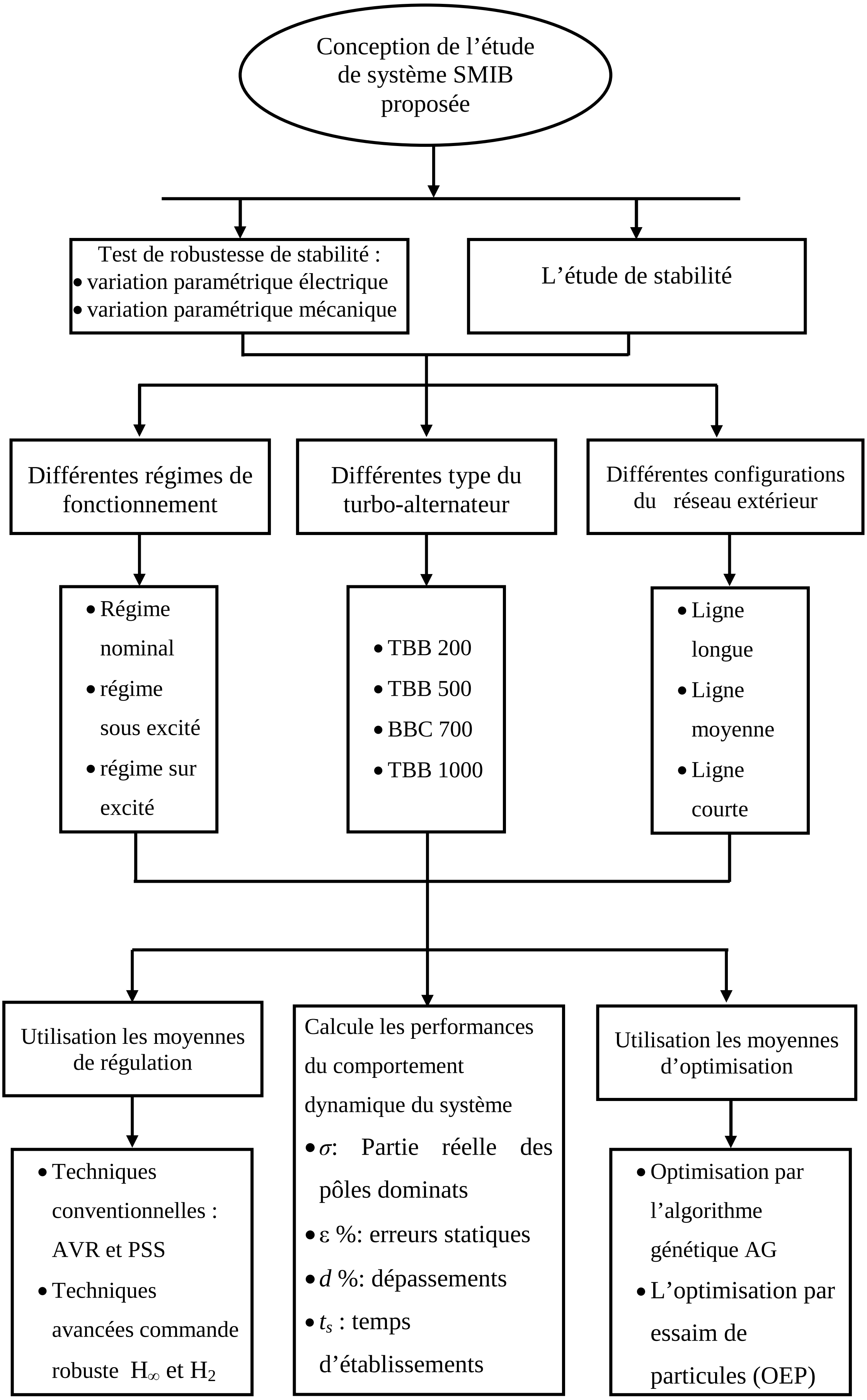


Figure III.1 Organisation représentative des étapes de notre étude

III. 3 SIMULATION DE SYSTEME SMIB SOUS MATLAB-SIMILINK

III. 3.1 REALISATION D'UN CODE DE CALCUL SOUS MATLAB

Les modèles mathématiques du système électro-énergétique étudié type SMIB, et qui ont étés développés dans le chapitre précédent (Modèle Park - Gariov de la machine synchrone avec le régulateur de tension AVR et le stabilisateur PSS utilisé dans notre présent travail qui est l'AVR-FA, le réseaux de puissance infinie), seront élaborés sous logiciel Matlab / Simulink pour la réalisation d'un code de calcul et finalement d'une interface 'GUI' sous Matlab, comportant une bibliothèque avec des blocks Simulink et des programmes réalisés avec l'exploitation des boites à outils 'Toolbox' contenant dans le logiciel. Permettant de faciliter les calculs d'analyses et/ou de synthèse avec des précisions meilleurs, lors de la commande de la machine synchrone fonctionnant en générateur, reliée à un système de puissance

III. 3.2 STRUCTURE GENERALE

Un code de calcul basé sur les modèles mathématiques à été développé. Ce code de calcul à été réalisé à partir des sous modules effectuant chacun une tache différente. Chaque module est réalisé par un programme interactif.

La figure III .2 présente l'organisation du code de calcul réalisé pour la résolution du problème et compromis Précision / Rapidité pour la commande de la centrale de production d'énergie électrique afin d'améliorer la stabilité du système de puissance universel (type SMIB dans notre présente étude).

Ce code de calcul est constitué de trois bloques principaux, qui sont des sous programmes utilisés sous logiciel MATLAB (figure III.3) :

1 - **Bloque d'entrée** (introduction des données) qui représente le prés-processeur, Il consiste à préparer les données nécessaire pour le bloque suivant (de résolution), et qui est constitué des modules suivants :

- Module Paramètres du système électro-énergétique étudié : paramètres et types des machines synchrones utilisées (Alternateurs), lignes de transport, charges…etc. ;
- Module Régimes de fonctionnement de la station (nominale, sous excité, sur excité)
- Module Configuration du réseau extérieur (par exemple : types de lignes utilisées: courte moyenne ou longue) ;

2- **Bloque de résolution** (procédure de calcul), qui représente le Processeur, qui est constitué des modules suivants :

- Module Calcul du régime permanent nominal du système (courants, tensions, flux, fem, couples, puissances, angles de charges, vitesses,…etc.);
- Module Calcul des paramètres du système après défauts et analysé son comportement,
- Module Synthèse des régulateurs et commande du système (AVR, PSS..);
- Module d'Etude et d'analyse de la stabilité du système (statique et / ou dynamique) avec ou sans régulation (en Boucles ouverte BO et fermée BF) ;
- Module d'Optimisation des paramètres des régulateurs pour l'amélioration des performances;

3- **Bloque de sortie** (visualisation des résultats obtenus après calcul), représente le Post-Processeur : constitué de plusieurs modules, qui sont les modules d'exploitation. Ces modules consistent à visualiser (en 2D ou 3D) les grandeurs électromécaniques du phénomène et système en questions, à savoir la tension au borne du stator de la MS, l'angle de charge la puissance électromagnétique, et la variation de vitesse du rotor.

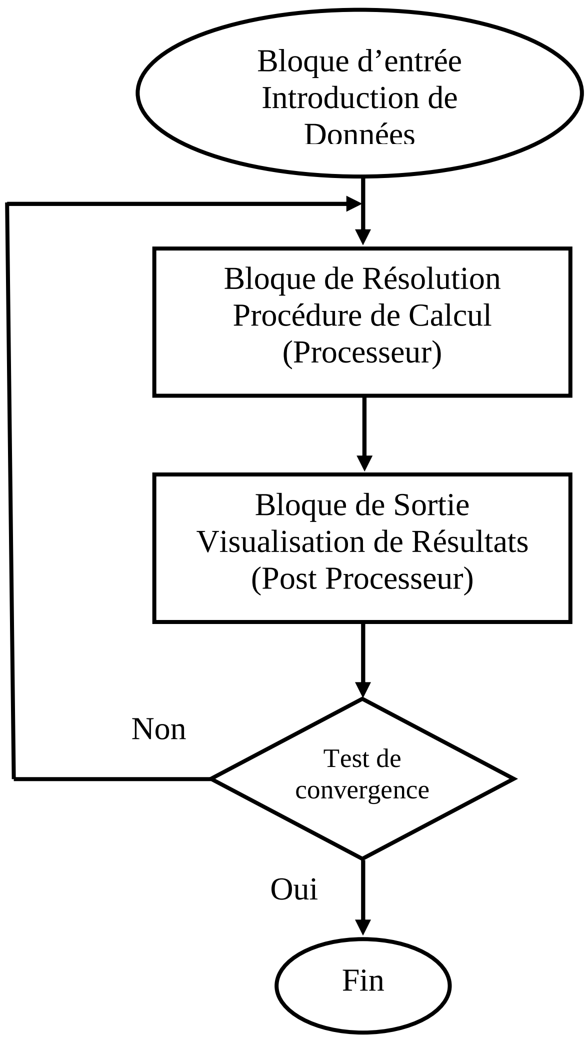


Figure III.2 Organisation du code de calcul proposé

Le code de calcule réalisé sous MATLAB est donné à la figure III.3 :

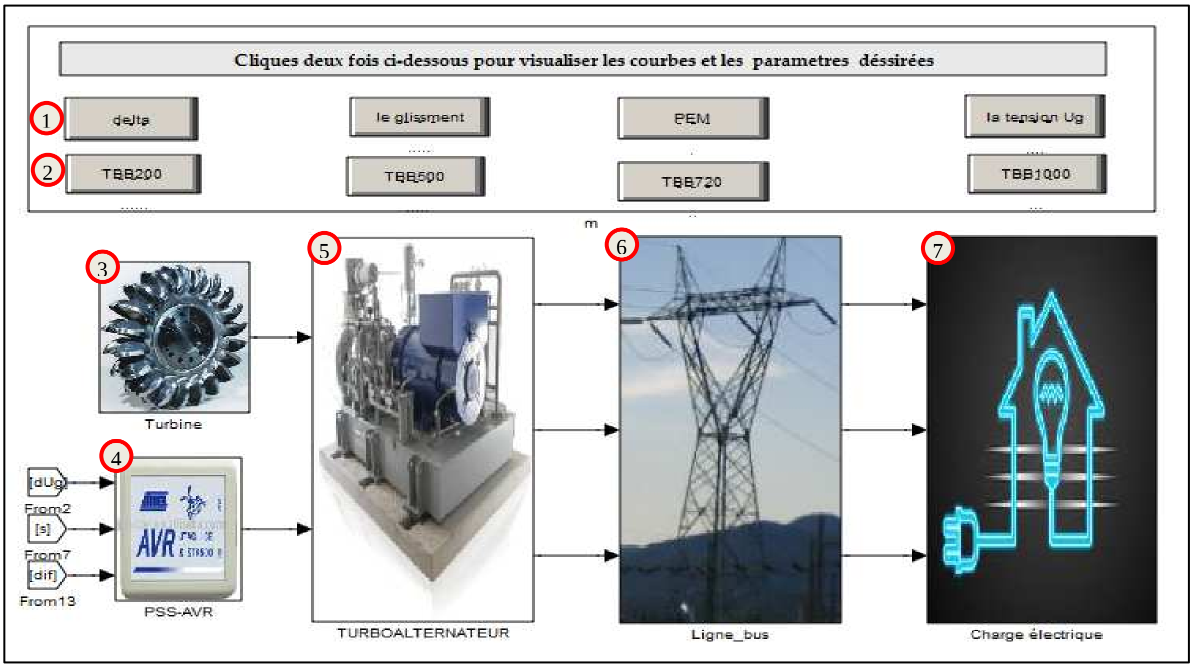


Figure III.3 Structure du système SMIB élaboré sous MATLAB

1 Visualiser les résultats de simulation.

2 Choi des turboalternateurs simulés.

3 Turbine.

4 Régulateur AVR et stabilisateur PSS.

5 Turboalternateur.

6 Réseau de puissance infini.

7 Consommateur de l’énergie électrique (charges).

III. 4. Implementation de Systeme SMIB Sous Interface Graphique GUI

III. 4. 1. Interaction Homme Machine(IHM) :

Une interface Graphique (anglais GUI graphical user interface) est une dispositif de dialogue homme-machine, dans lequel les objets à manipuler sont dessinés sous forme de pictogrammes à l'écran, que l'usager peut utiliser en imitant la manipulation physique de ces objets avec un dispositif de pointage, le plus souvent une souris. [43 ,44]

III. 4. 2. Etapes de Conception:

Il clair qu‘il ne suffit pas de s‘asseoir et de se mettre à programmer. Il faut passer par certaines étapes figure III.4 :

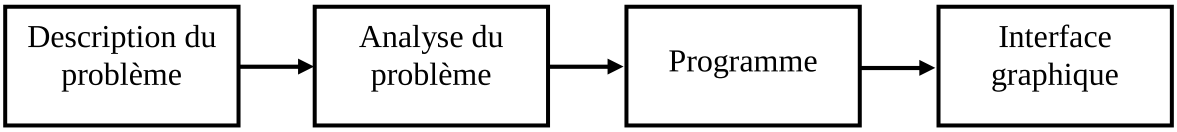


Figure III.4 Les différentes étapes de création d'une interface graphique

III. 4. 3. CREATION D'UNE INTERFACE GRAPHIQUE AVEC MATLAB GUIDE

L'environnement GUIDE de MATLAB permet de développer des GUI, des interfaces graphiques. Un GUI est défini dans MATLAB par deux fichiers dépendants, respectivement une figure et un script. La programmation d'un GUI utilise des callbacks, et les échanges de données s'opèrent avec des handlers [45].

Le GUIDE de MATLAB (figure III.5) est un outil graphique qui regroupe tout ce dont le programmeur à besoin pour créer une interface graphique de façon intuitive.

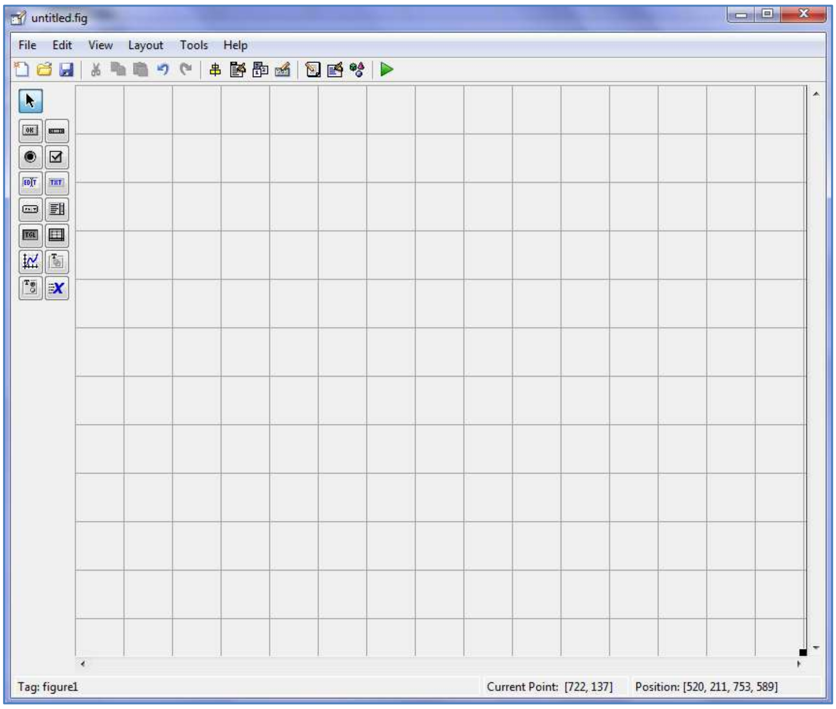


Figure III.5 fenêtre de GUIDE sous MATLAB (fichier .fig)

Le placement des objets est réalisé par sélection dans la boite à outils (figure III.6), mise en place et mise à dimension à la souris. Un double-clique sur chaque objet permet de faire apparaître un menu avec les propriétés de cet objet (figure III.7). Leur modification et l'aperçu de ces modifications sont immédiats. Au final, le code est généré automatiquement et l'interface est enregistrée sous deux fichiers portant le même nom mais dont les deux extensions sont .fig et .m. Le premier (figure III.5), contient la définition des objets graphiques. Le second (figure III.8) contient les lignes de code qui assurent le fonctionnement de l'interface graphique

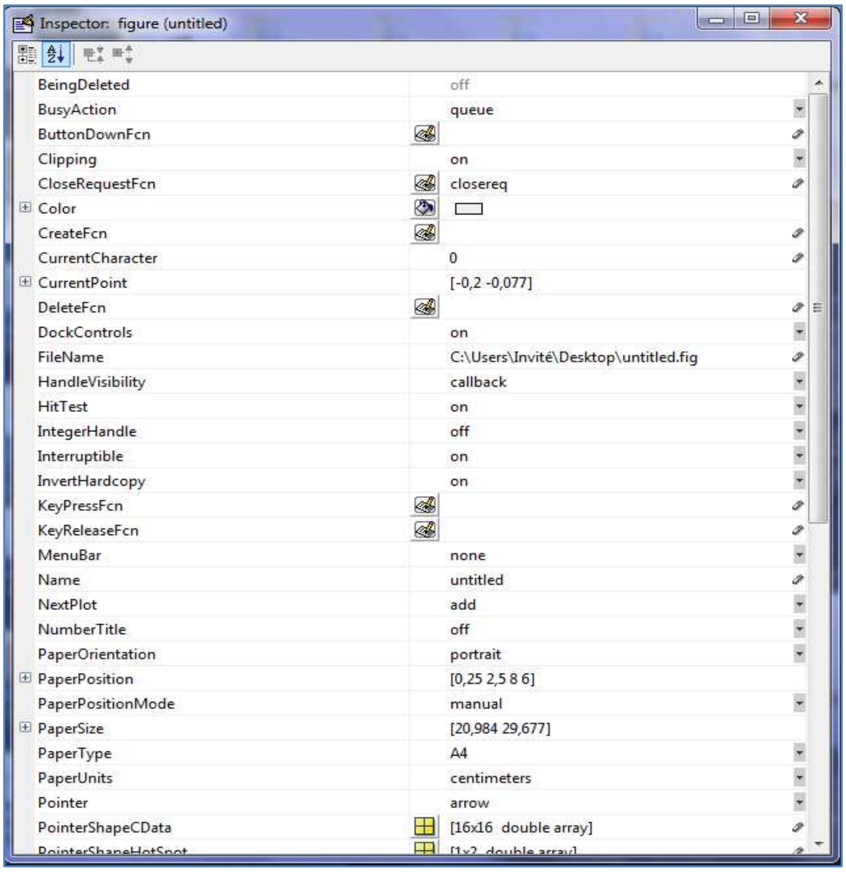


Figure III.6 Les propriétés de l'objet

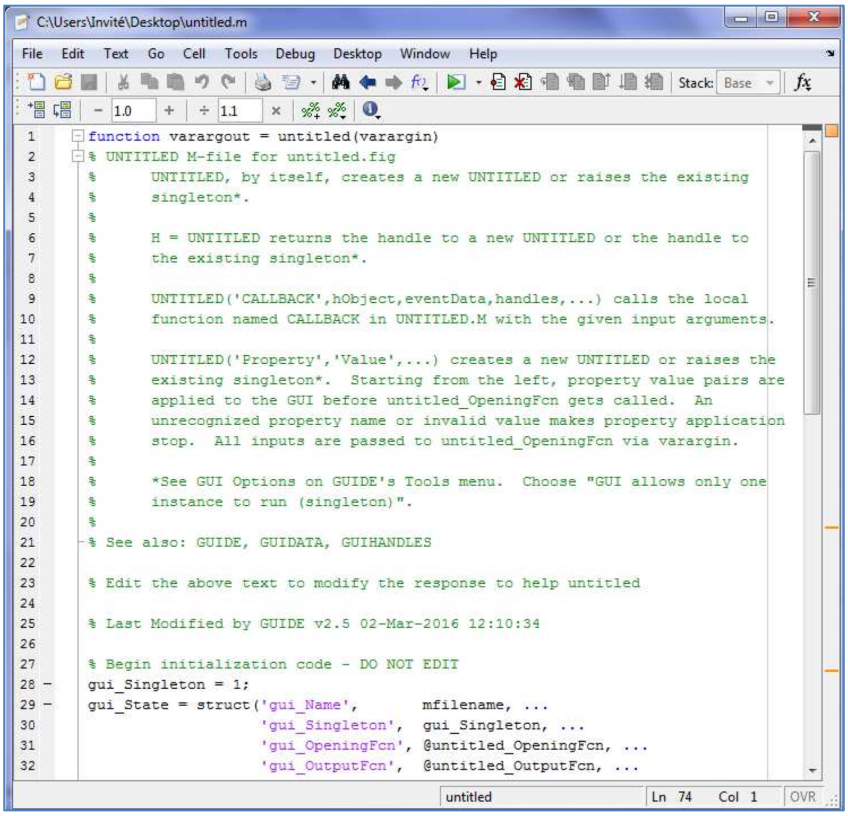


Figure III.7 programme de GUI (fichier .m)

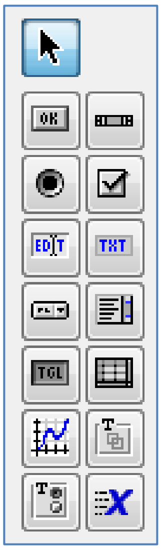


Figure III.8 la boite à outils de GUI (composants visuels)

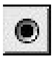
III. 4. 4. COMPOSANTS DES ELEMENTS VISUELS :

Push buttons : (boutons poussoirs)

- Un seul état (stable).
- Identifié avec un court texte (paramètre ‘String‘).
- Événement à traiter: clic ou relâchement du bouton gauche de la souris.

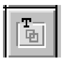
Checkboxes : (cases à cocher)

- Deux états possibles.
- Boutons d‘un même groupe sont indépendants (plusieurs options peuvent être sélectionnées simultanément).



Radio buttons : (boutons radio)

- Deux états (comme case à cocher).
- Boutons d‘un même groupe sont mutuellement exclusifs (une seule option peut être sélectionnée à la fois).



Frames : (cadres)

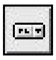
- Bordure rectangulaire délimitant un groupe de contrôles.

Static text : (champ de texte fixe)

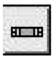
- Affichage de texte.

Edit text : (champ de texte éditable)

- Saisie de texte.
- Pas pour affichage.

 Pop-up menus : (menus déroulants)

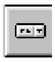
- Choix d'un item parmi une liste.
- Seul l'item sélectionné est affiché.
- Événement à traiter : item cliqué par la souris.

 Sliders : (barres de défilement)

- Choix d'une valeur numérique à l'intérieur d'un intervalle.
- Peuvent être orientées horizontalement ou verticalement.
- Événement à traiter : déplacement de la barre.

 Listboxes : (listes)

- Choix d'un item parmi une liste.
- Un groupe d'items, dont l'item sélectionné, est affiché.
- Événement à traiter: item choisi par clic de la souris.

 Menus : (à partir du MenuEditor)

- Choix d'un item parmi une liste d'options permises ou non.
- Possibilité de clé de raccourcis.
- Possibilité de sous-menus.
- Événement à traiter: item de menu choisi par clic de souris.

 Axes :

- Permet d'afficher un graphique tracé par **MATLAB**
- Permet d'afficher des fichiers image

III. 4. 5. ETUDE SOUS INTERFACE GRAPHIQUE 'GUI' REALISE SOUS MATLAB

Pour analyser et visualiser les différents comportements dynamiques du système électro énergétique étudié, nous somme arrivé à une étude d'une interface graphique GUI (Graphical User Interfaces) élaborée sous logiciel MATLAB. Cette démarche avec le Gui Matlab nous a permet:

- D'analyser le système étudié (avant et après la commande) ;
- D'Effectuer le contrôle du système à partir des régulateurs (AVR et PSS) ;
- D'Optimiser les paramètres des régulateurs ;
- De visualiser les résultats de la régulation avec la simulation de notre système ;

- De calculer les paramètres dynamiques du système ;
- De tester la stabilité (et la robustesse) du système avec différentes situations de défauts;
- D'étudier les différentes situations possibles régimes de fonctionnement (sous excité, nominale et sur excité) / configuration du réseau extérieur, avec différents types des générateurs synchrones puissants.

L'interface graphique 'GUI' réalisée sous Matlab pour l'exécution des différentes opérations, est représenté à la figure III.9 suivante:

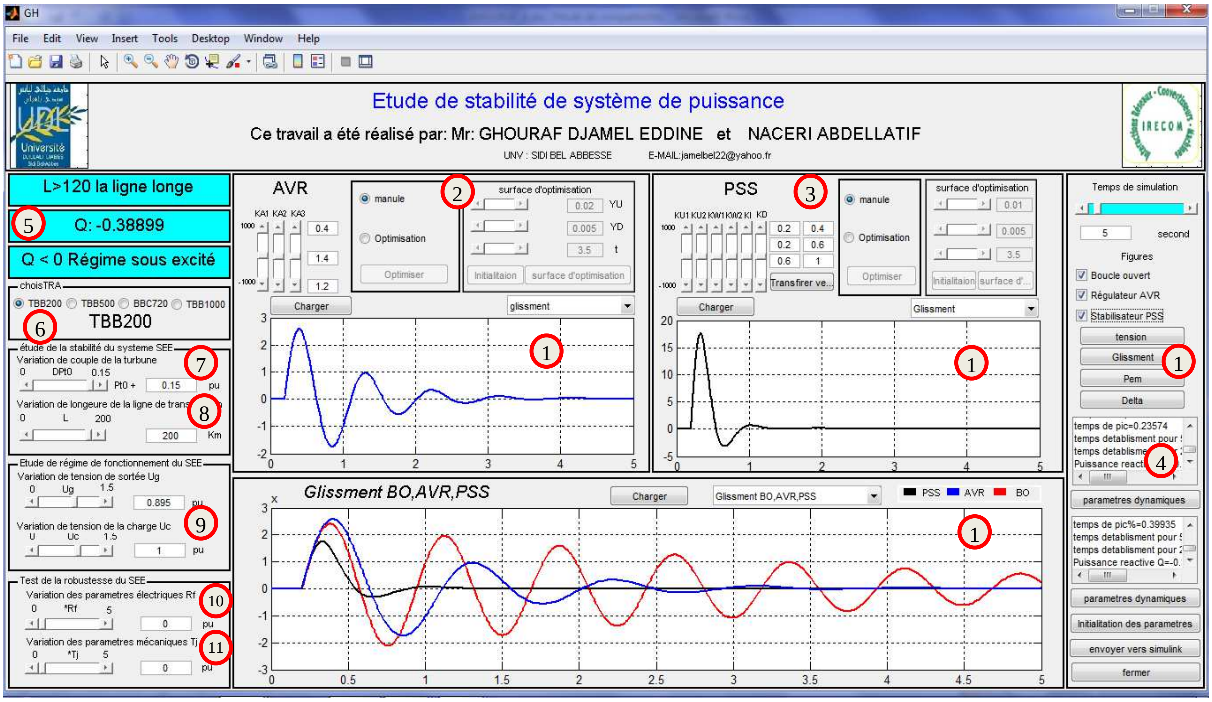


Figure III.9 Interface graphique GUI réalisé sous MATLAB

1 Résultats de simulation avec AVR, PSS et sans régulation.

2 Régulation et optimisation de l'AVR.

3 Régulation et optimisation du PSS.

4 Les performances dynamique et statique du système SMIB.

5 Diagnostique et analyser du système SMIB.

6 Choix des turboalternateurs.

7 Création une perturbation au niveau de la turbine (pour l'étude de stabilité)

8 Variation configurations du réseau extérieur (court, moyenne, longue).

9 Variation régimes de fonctionnement (nominal, sous excité, sur excité).

10 Test de robustesse variation paramétrique électrique.

11 Test de robustesse variation paramétrique mécanique.

III. 5. RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATION :

III. 5. 1 ETUDE DE LA STABILITE DU SYSTEME:

Les résultats ci-après (Tableaux **III.**1 à 3 et figures **III.10.** à 13), ont été obtenus par l'étude des performances dynamiques du système électro- énergétique étudié (type SMIB) dans les trois cas suivants:

- Système en Boucle Ouverte (sans régulation) ;
- Système en Boucle Fermé avec le régulateur automatique de tension AVR ;
- Système en Boucle Fermé avec le régulateur AVR et le contrôleur PSS (AVR-FA).

On a effectué des perturbations par variation brusque du couple de la turbine à 15% de ΔT_m à l'instant t=1 s, avec variations des paramètres du réseau extérieur (variation de X_L):

- pour une ligne longue avec L > 120 km (X_L =0.5 pu);
- pour une ligne moyenne de longueur 80 km < L < 120 km (X_L =0.4 pu et X_L =0.3 pu);
- pour une ligne courte de longueur L < 80 km (X_L =0.2 pu et X_L =0.1 pu).

On a simulé les régimes de fonctionnements suivants (avec différentes configurations du réseau extérieur cités en haut):

- Régime nominal ;
- Renvoie de la puissance réactive du réseau vers la machine (Q< 0) en régime sous excité pendant les heures de repos (la nuit par exemple) ;
- la sur - production de l'énergie réactive (Q très grande >>) en régime sur - excité pendant les heures de pointes.

• Notre étude à été effectuée pour différents types des Turbo – Alternateurs: TBB-200, TBB-500, BBC-720 et TBB-1000, dont les paramètres de ces machines sont donnés en annexes A.

III. 5. 2 TESTE DE ROBUSTESSE DU SYSTEME:

III. 5. 2.1 ETUDE DE L'EFFET DES INCERTITUDES PARAMETRIQUES :

Les paramètres des machines ne donnent pas lieu à des valeurs certaines et définitives. Ces variations correspondent à la dispersion constatée lors de la fabrication en nombre, aux évaluations des valeurs lors du fonctionnement ou aux méthodes utilisées pour l'identification des machines. Plusieurs phénomènes physiques provoquent des variations des paramètres de la machine synchrone. Entre autres, une évaluation de température augmente les valeurs des résistances. A ce phénomène vient s'ajouter l'effet de peau du aux fréquences des courants, le type de ventilation de la machine ainsi que l'erreur d'identification de ces de ces paramètres.

III. 5. 2.2 VARIATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES ET MECANIQUES :

Nous nous intéressons dans cette partie à l'étude des effets des incertitudes des paramètres électriques et mécaniques du turbo – alternateur. Nous limitons notre étude à La variation de la résistance statorique R comme paramètre électrique, et de l'inertie de la machine comme paramètre mécanique J.

Les marges d'incertitudes ont été choisies délibérément grandes devant la réalité physique de ces incertitudes pour vérifier les performances et la stabilité du turbo- Alternateur dans les cas extrêmes.

Dans un premier temps on fait étude des variations paramétriques électriques en supposant que les paramètres mécaniques sont connus (constants). Nous limitons notre étude au cas où des incertitudes constantes sur la résistance statorique avec une augmentation de deux fois sa valeur nominale (minoration de 100% de R à l'instant t = 5 s).

Puis par la suite, on à effectué Dans un deuxièmes temps des variations paramétriques mécaniques en supposant cette fois ci que les paramètres électriques sont connus (constants). Nous limitons ainsi cette étude au cas où des incertitudes constantes sur l'inertie de la machine avec une minimisation de la moitié de sa valeur nominale (majoration de 50% de l'inertie J à l'instant t = 10 s).

Le temps de la simulation 15 secondes.

a. LES TABLEAUX :

Les performances du comportement dynamique du système sont les suivants:

- σ: Partie réelle des pôles dominats (étude de stabilité et l'amortissement du système commandé).
- ε %: erreurs statiques en % (Pour l'étude des performances du système commandé).
- d %: dépassements en % (Pour l'étude de l'état critique de système commandé).
- t_s : temps d'établissements ou temps de réponse (étude de la réponse du système à commandé).

b. LES FIGURES :

Les courbes obtenues (**Figure III.10** à 13) nous donnent respectivement :

- La puissance électromagnétique (Pe).
- La tension terminale du Turbo Alternateur (Ug).
- L'angle interne 'delta' du TA entre la tension et la FEM.
- La variation de vitesse en termes de glissement (Δω).

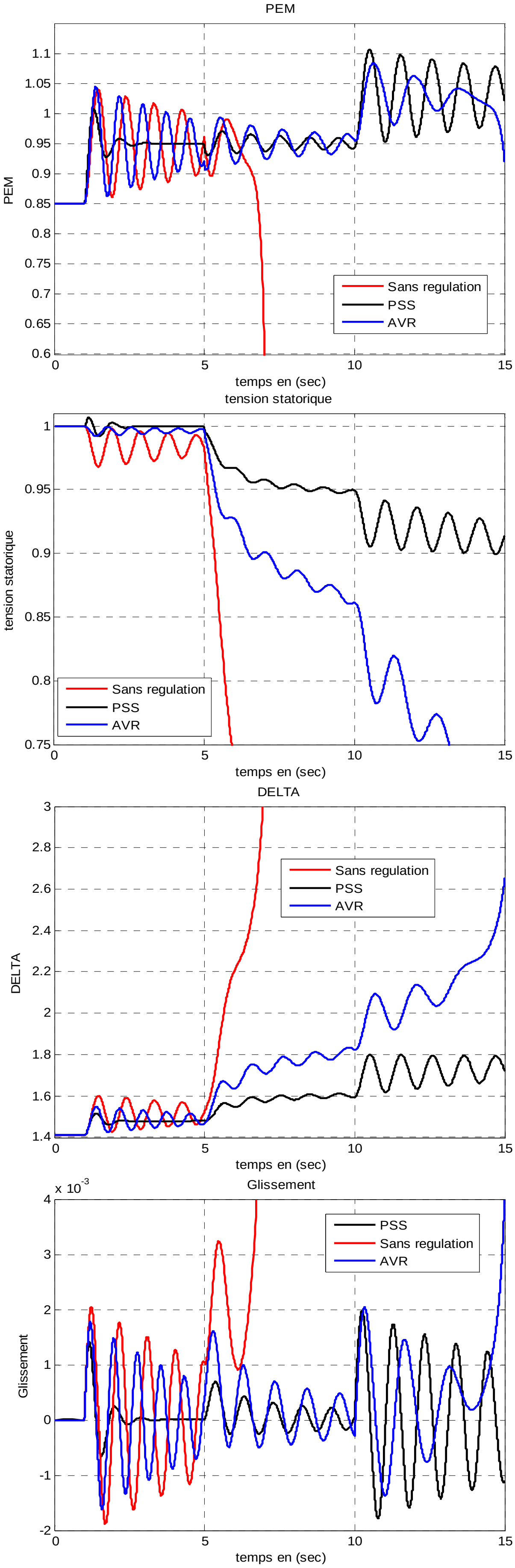


Figure III.10 : GS TBB-500 fonctionnant sous régime nominal raccordé avec une ligne longue

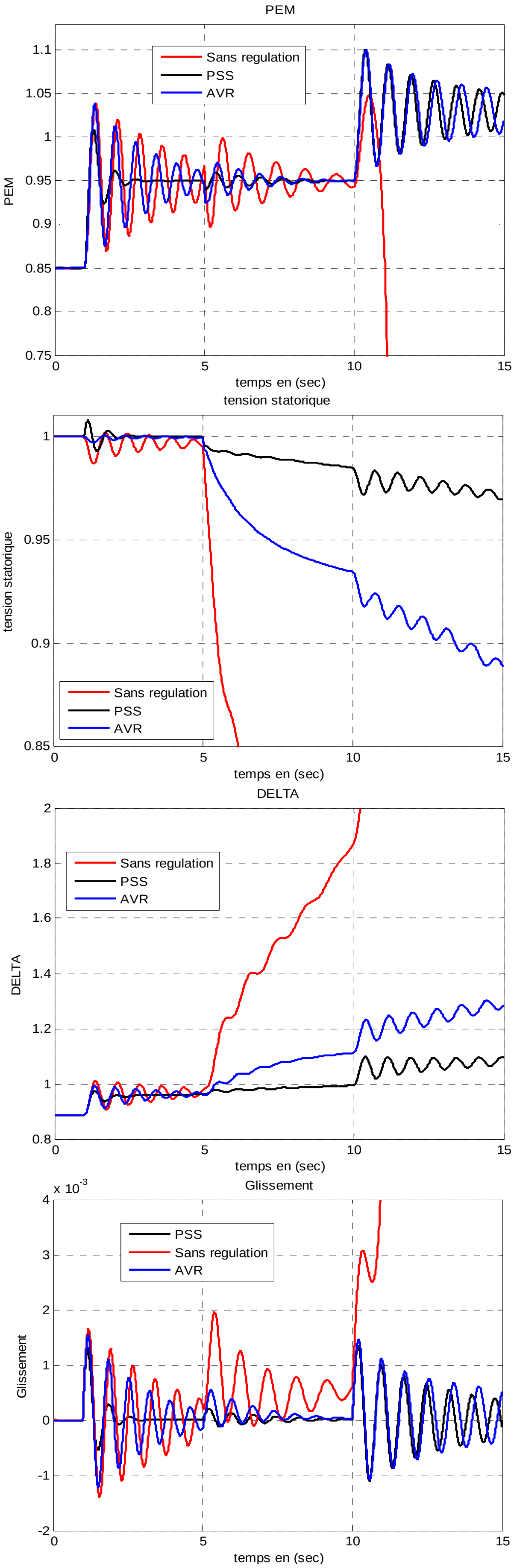


Figure III.11 : GS TBB-200 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne courte

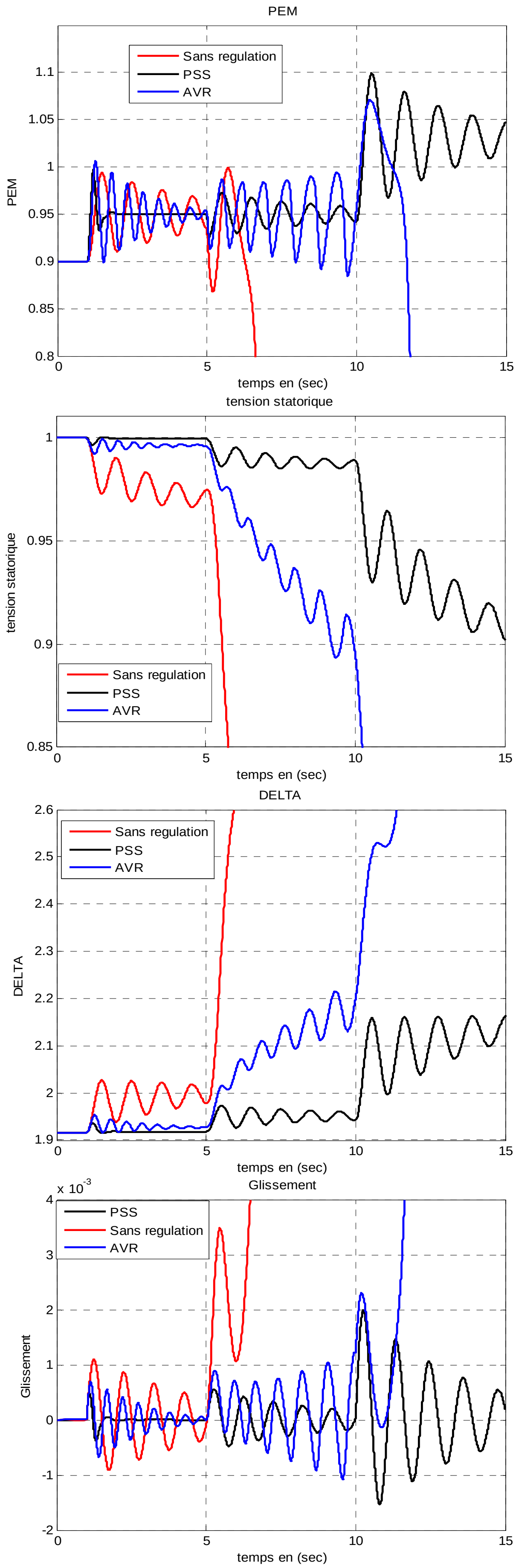


Figure III.12 : GS TBB-1000 fonctionnant sous régime sur excité raccordé avec une ligne longue

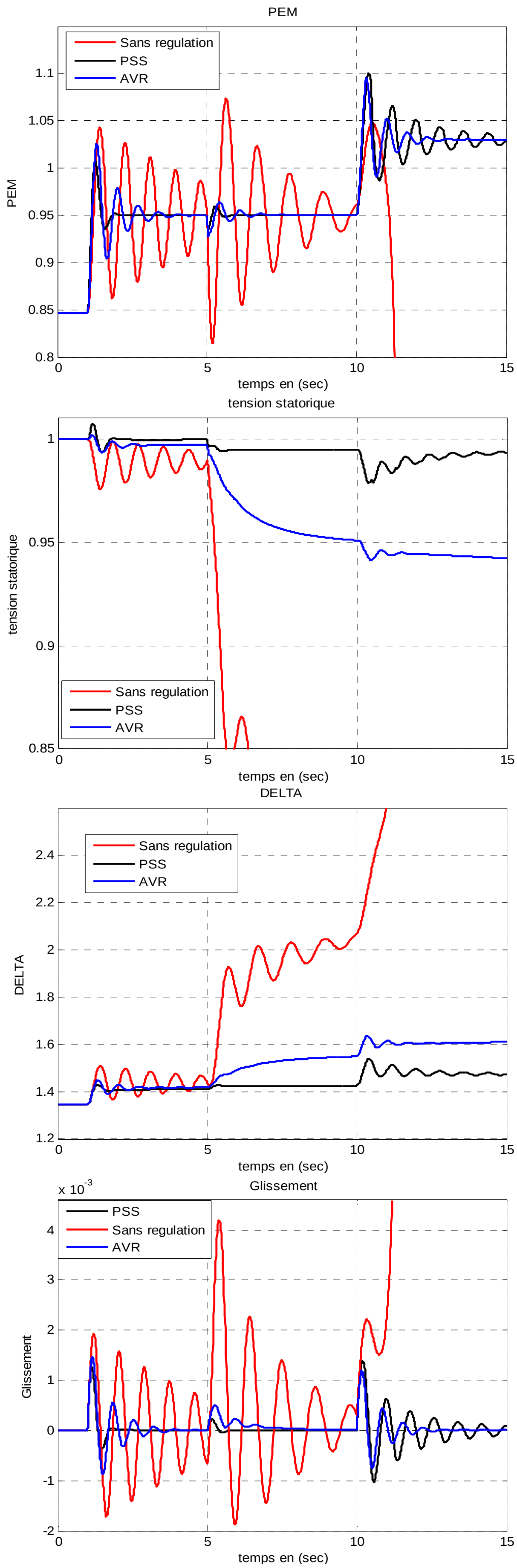


Figure III.13 : GS BBC720 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne moyenne

Tableau III. 1. Les performances statiques et dynamiques du système SMIB raccordé avec une ligne longue

TBB-200												
	σ			**ε_s %**			**t_s (± 5%)**			**D %**		
Q(pu)	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**
Régime sur excité	instable	-0.709	-1.761	instable	-2.640	-1.620	instable	4,231	1,704	9.572	9,053	7,892
	instable	-0.708	-1.751	instable	-2.673	-1.629	instable	4,237	1,713	9.487	9,036	7,847
Régime nominal	-0.2442	-0.791	-1.855	-5.038	-2.269	-1.487	-	3,793	1,617	10,959	9,447	8,314
	-0.2354	-0.634	-1.759	-5.202	-1.807	-1.235	-	4,732	1,706	10,564	8,778	7,883
Régime sous excité	-0.2095	-0.403	-1.470	-3.777	-0.933	-0.687	14,320	7,444	2,041	9,402	6,851	6,588
	-0.2080	-0.396	-1.442	-3.597	-0.900	-0.656	14,423	7,576	2,080	9,335	6,732	6,463
TBB-500												
	σ			**ε_s %**			**Ts (± 5%)**			**D %**		
Q(pu)	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**
Régime sur excité	instable	-0.765	-1.956	instable	-4.197	-1.459	instable	3,922	1,534	9.458	9,405	8,766
	instable	-0.758	-1.926	instable	-4.230	-1.461	instable	3,958	1,558	9.254	9,137	8,632
Régime nominal	-0.2061	-0.761	-1.966	-5.933	-3.460	-1.386	-	3,942	1,526	9,249	9,635	8,811
	-0.2245	-0.691	-1.850	-5.802	-2.525	-1.170	-	4,342	1,621	9,075	9,500	8,292
Régime sous excité	-0.3577	-0.492	-1.412	-4.903	-1.205	-0.659	8,387	6,098	2,125	8,053	7,380	6,328
	-0.3660	-0.484	-1.401	-4.597	-1.157	-0.683	8,197	6,198	2,141	7,426	7,260	6,279
BBC-720												
	σ			**ε_s %**			**t_s (± 5%)**			**D %**		
Q(pu)	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**
Régime sur excité	instable	-0.736	-1.858	instable	-2.640	-1.577	instable	4,076	1,349	9.956	9,776	8,955
	instable	-0.728	-1.818	instable	-2.673	-1.579	instable	4,121	1,323	9.935	9,648	8,762
Régime nominal	-0.2810	-0.790	-2.049	-6.350	-2.269	-1.496	-	3,797	1,408	10,717	9,964	9,876
	-0.2651	-0.714	-2.017	-6.260	-1.807	-1.262	-	4,202	1,630	10,110	9,424	8,721
Régime sous excité	-0.2377	-0.428	-1.704	-5.058	-0.933	-0.783	14,118	7,009	1,877	9,065	7,848	7,213
	-0.2365	-0.421	-1.398	-4.617	-0.900	-0.758	14,218	7,126	1,801	9,020	7,736	6,738
TBB-1000												
	σ			**ε_s %**			**t_s (± 5%)**			**D %**		
Q(pu)	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**
Régime sur excité	instable	-0.766	-1.761	instable	-2.302	-1.530	instable	3,916	1,704	9.456	8,490	7,892
	instable	-0.762	-1.731	instable	-3.787	-1.517	instable	3,937	1,713	9.412	8,430	7,847
Régime nominal	-0.2442	-0.785	-1.855	-5.214	-3.195	-1.432	-	3,822	1,617	10,127	8,775	8,314
	-0.2354	-0.677	-1.759	-5.111	-2.565	-1.222	-	4,431	1,706	10,342	8,155	7,883
Régime sous excité	-0.2095	-0.444	-1.470	-3.711	-1.312	-0.701	14,000	6,757	2,041	9,127	6,660	6,588
	-0.2080	-0.433	-1.442	-3.432	-1.266	-0.665	14,675	6,928	2,080	9,428	6,495	6,463

Tableau III.2. Les performances statiques et dynamiques du système SMIB raccordé avec une ligne moyenne

TBB-200												
σ				**εs %**			**ts (± 5%)**			**D %**		
Q(pu)	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**
Régime sur excité	instable	-0.729	-1.887	instable	-2.410	-1.557	instable	4,231	1,704	9.572	9,053	7,892
	instable	-0.735	-1.866	instable	-2.576	-1.547	instable	4,237	1,713	9.487	9,036	7,847
Régime nominal	-0.2860	-0.737	-1.895	-4.852	-2.033	-1.343	Introuvable	3,793	1,617	10,95	9,447	8,314
	-0.2762	-0.671	-1.787	-4.675	-1.691	-1.093	Introuvable	4,732	1,706	10,56	8,778	7,883
Régime sous excité	-0.2489	-0.423	-1.593	-2.888	-0.853	-0.632	14,320	7,444	2,041	9,402	6,851	6,588
	-0.2469	-0.415	-1.558	-2.737	-0.821	-0.603	14,423	7,576	2,080	9,335	6,732	6,463
TBB-500												
σ				**εs %**			**Ts (± 5%)**			**D %**		
Q(pu)	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**
Régime sur excité	instable	-0.724	-1.958	instable	-4.126	-1.421	instable	3,922	1,534	9.458	9,405	8,766
	instable	-0.734	-1.910	instable	-4.234	-1.432	instable	3,958	1,558	9.254	9,137	8,632
Régime nominal	-0.3173	-0.732	-2.106	-5.852	-3.026	-1.277	Introuvable	3,942	1,526	9,249	9,115	8,811
	-0.2885	-0.659	-1.977	-5.675	-2.449	-1.056	Introuvable	4,342	1,621	9,075	9.000	8,292
Régime sous excité	-0.4730	-0.432	-1.429	-3.637	-1.462	-0.622	8,387	6,098	2,125	8,053	7,380	6,328
	-0.5922	-0.425	-1.400	-3.410	-1.415	-0.600	8,197	6,198	2,141	7,426	7,260	6,279
BBC-720												
σ				**εs %**			**ts (± 5%)**			**D %**		
Q(pu)	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**
Régime sur excité	instable	-0.715	-1.847	instable	-4.539	-1.542	instable	4,076	1,615	9.956	9,776	8,955
	instable	-0.725	-1.782	instable	-4.724	-1.551	instable	4,121	1,650	9.935	9,648	8,762
Régime nominal	-0.3134	-0.758	-2.194	-5.950	-3.292	-1.380	Introuvable	3,797	1,464	10,71	9,964	9,876
	-0.2995	-0.717	-2.155	-5.580	-2.525	-1.140	Introuvable	4,202	1,487	10,11	9,424	8,721
Régime sous excité	-0.2775	-0.516	-1.819	-3.859	-1.317	-0.669	Introuvable	7,009	1,761	9,065	7,848	7,213
	-0.2761	-0.509	-1.791	-3.612	-1.263	-0.664	12,685	7,126	2,146	9,020	7,736	6,738
TBB-1000												
σ				**εs %**			**ts (± 5%)**			**D %**		
Q(pu)	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**
Régime sur excité	instable	-0.701	-1.755	instable	-3.642	-1.565	instable	2.456	1.460	9.870	8,490	7,718
	instable	-0.707	-1.733	instable	-3.720	-1.584	instable	2.467	1.472	9.657	8,430	7,664
Régime nominal	-0.2040	-0.719	-1.757	-6.021	-2.816	-1.460	Introuvable	2.354	1.320	9,401	8,775	7,852
	-0.1923	-0.654	-1.670	-5.816	-2.202	-1.210	Introuvable	2.454	1.358	7,818	8,155	7,552
Régime sous excité	-0.1730	-0.417	-1.316	-3.750	-1.188	-0.710	Introuvable	2.812	1.632	6,781	6,660	5,719
	-0.1718	-0.408	-1.293	-3.516	-1.141	-0.685	4.847	2.841	1.657	6,736	6,495	5,638

Tableau III.3. Les performances statiques et dynamiques du système SMIB raccordé avec une ligne courte

TBB-200												
σ				ε_s%			t_s (± 5%)			D %		
Q(pu)	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**
Régime sur excité	instable	-0.697	-1.923	instable	-2.025	-1.327	instable	3.100	1.700	9.780	9,136	9,095
	instable	-0.706	-1.919	instable	-2.085	-1.355	instable	3.109	1.708	9.691	9,06	8,994
Régime nominal	-0.4396	-0.648	-1.982	-4.302	-1.775	-1.203	4.15	3.130	1.600	9,835	9,203	9,133
	-0.4240	-0.516	-1.721	-4.206	-1.304	-0.993	4.20	3.000	1.613	9,396	8,749	8,613
Régime sous excité	-0.3942	-0.508	-1.522	-2.963	-0.934	-0.721	4.34	3.658	1.914	8,170	8,037	7,710
	-0.3938	-0.506	-1.518	-2.900	-0.930	-0.718	4.40	3.700	2.000	8,081	7,885	7,509
TBB-500												
σ				ε_s%			Ts (± 5%)			D %		
Q(pu)	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**
Régime sur excité	instable	-0.724	-2.059	instable	-4.161	-1.280	instable	3.221	1.912	9.456	9,310	8,896
	instable	-0.734	-2.029	instable	-4.183	-1.302	instable	3.229	1.921	9.368	9,160	8,560
Régime nominal	-0.3679	-0.622	-2.100	-6.302	-2.657	-1.174	Introuvable	3.239	1.945	9,940	9,498	9,439
	-0.3667	-0.559	-1.982	-6.206	-2.019	-0.931	Introuvable	3.150	1.851	8,948	9,185	8,860
Régime sous excité	-0.3618	-0.546	-1.768	-3.901	-1.391	-0.719	4.395	3.298	1.987	8,228	6,480	6,404
	-0.3616	-0.535	-1.764	-3.860	-1.384	-0.716	4.400	3.320	2.056	8,578	6,375	6,274
BBC-720												
σ				ε_s%			t_s (± 5%)			D %		
Q(pu)	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**
Régime sur excité	instable	-0.644	-1.825	instable	-3.542	-1.388	instable	3.189	1.812	10.050	9,410	8,278
	instable	-0.654	-1.815	instable	-3.710	-1.412	instable	3.207	1.821	9.896	9,230	7,986
Régime nominal	-0.4368	-0.600	-1.846	-5.680	-2.897	-1.269	Introuvable	3.058	1.700	10,065	9,644	8,833
	-0.4286	-0.541	-1.781	-5.520	-2.213	-1.005	Introuvable	3.125	1.721	9,841	9,606	8,658
Régime sous excité	-0.4151	-0.480	-1.600	-4.178	-1.493	-0.774	4.409	3.308	1.816	9,454	9,288	8,152
	-0.4148	-0.470	-1.597	-4.135	-1.485	-0.771	4.491	3.320	1.824	9,391	9,162	8,027
TBB-1000												
σ				ε_s%			t_s (± 5%)			D %		
Q(pu)	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**	**BO**	**AVR**	**PSS**
Régime sur excité	instable	-0.605	-1.871	instable	-2.892	-1.459	instable	2.310	1.320	9.987	9,800	7,865
	instable	-0.613	-1.863	instable	-2.997	-1.485	instable	2.318	1.329	9.745	9,695	7,767
Régime nominal	-02682	-0.565	-1.947	-5.752	-2.464	-1.054	Introuvable	2.309	1.120	9,155	9,785	7,874
	-0.2590	-0.505	-1.831	-5.771	-1.820	-0.836	Introuvable	2.315	1.126	8,854	9,810	7,484
Régime sous excité	-0.2456	-0.443	-1.555	-3.981	-1.337	-0.810	4.365	2.419	1.504	7,674	6,255	5,898
	-0.2454	-0.442	-1.552	-3.942	-1.330	-0.806	4.750	2.425	1.564	7,155	6,120	5,795

Les différents paramètres des tableaux III.1 à III.3 calculés à l'aide d'une interface graphique qu'on a réalisé (voire annexe) ce dernier nous permette de :

- D'étudier et analyser les différents systèmes asservis.
- De visualiser les réponses temporelles et fréquentielles des systèmes asservis.
- De faire la régulation par des méthodes conventionnelles type PID.

De l'analyse des résultats trouvés dans les tableaux on peut constater ce qui suit:

Le régime le plus critique qui influe sur le système est le régime sur excité (cas plus défavorable) pour les différentes configurations.

Concernant les régulateurs AVR, PSS nous remarquons que le système est plus stable dans tous les régimes et avec tous types des lignes de transmission, on a des améliorations considérables des performances dynamiques (augmentation de la précision) du système avec régulation en comparaison avec celui en boucle ouverte.

On remarque ainsi que le contrôleur PSS (l'AVR-FA) apportent beaucoup plus d'améliorations de ces performances, par rapport l'utilisation du régulateur AVR seul. D'après ces tableaux on a vérifié les conditions de stabilité et d'amélioration des performances dynamiques du système commandé avec les contrôleurs conventionnels PSS.

Les résultats trouvés sont en concordance avec les théories d'asservissement et de régulation [25], pour l'étude des comportements dynamiques d'un système asservi: les coefficients d'amortissements sont proportionnels avec les temps de réponses et aux dépassements.

A partir des courbes des résultats obtenues on peut constater que:

Pour la variation du couple mécanique, les performances de l'AVR se voient nettement su la courbe de la tension. Après certains régimes transitoires acceptables la tension se stabilise.

Par contre l'impact de l'excitatrice sur les grandeurs mécaniques se voit sur la vitesse $\Delta\omega$. Dans le cas de changement de ΔT_m un régime oscillatoire amorti se manifeste (auto-oscillation).

Cette notation, est celle prise comme étude dés les années 60 pour arriver à la mise en service des stabilisateurs des réseaux PSS.

Ce qui Concerne le stabilisateur AVR -FA, on note la présence d'une boucle de commande de fréquence (appelé LFC – Load Frequency Control) ayant comme rôle le contrôle de la puissance mécanique délivrée par " la turbine par le bai du gouvernail. L'objectif de cette boucle est de stabiliser la fréquence ($\Delta\omega_u$) ainsi que le contrôle de la puissance active dans le cas de variations de la charge par exemple. D'un autre coté, on trouve un autre canal de stabilisation du courant d'excitation 'Δi_f' et de la tension inducteur 'Δu_f', pour le contrôle et le maintient de la puissance réactive.

Le système avec le régulateur AVR est stable, mais avec un temps d'établissement plus grand, l'amortissement est moins performant que celui du système sans introduction du stabilisateur PSS (AVR-FA). Le dépassement maximal diffère pour chaque sortie et avec des performances relativement acceptables et raisonnables ($\varepsilon_{AVR\text{-}FA} < 5\%$ de la tension nominale), qui dépend ainsi des conditions de fonctionnements (régime – configuration) et d'une situation à une autre.

Avec l'utilisation du contrôleur d'excitation (l'AVR-FA), Le système est nettement plus stable et plus performant par rapport au système sans régulation ou avec AVR seul, on admet des coefficients d'amortissements élevés, les temps de réponse sont plus court (rapidité du système), des erreurs statiques faibles (précision). Généralement on a obtenue de très bonnes qualités des régimes transitoires avec l'amortissement des oscillations électromécanique meilleurs avec ce contrôleur d'excitation.

Concernant le teste de robustesse vis-à-vis aux variations paramétriques par l'utilisation du contrôleur d'excitation (AVR-FA). Dans certaines situations il est sensible et moins robuste (surtout lors des incertitudes électriques en régime sous-excité).

III. 5. CONCLUSION :

Pour réaliser notre étude on a développé dans le cadre de cette thèse un code de calcul sous MATLAB avec une interface graphique 'GUI' permettant de faciliter les calculs lors de la commande d'une centrale de production d'énergie électrique et des opérations d'analyse et de synthèse des régulateurs ce qui donne plus de l'efficacité de l'IHM et résolution du compromis : précision résultats / rapidité de calcul.

D'après les résultats de simulation obtenus, on peut constater que le système en BF avec l'AVR et en présence du stabilisateur de réseaux 'PSS' (AVR-FA) pour plusieurs types des générateurs synchrones puissants, donne des meilleures performances statiques et dynamiques en terme de stabilité dans la majorité des cas étudiés (régimes de fonctionnements de la station et configurations du réseau), et surtout dans le régime sous – excité (qui présente le cas le plus dangereux dans les stations de production d'énergie électrique).

Par conséquent, l'étude de la commande d'excitation du TA avec le contrôleur conventionnel type PID (AVR-FA), lors des incertitudes paramétriques montre quelle est relativement robuste, mais très sensible aux variations des paramètres de la machine et surtout électriques (lors des régimes sous-excités).

L'interface graphique est devenue un outil d'aide à la décision en donnant à l'utilisateur un accès complet au système commandé avec ses différents paramètres.

Avec les interfaces graphiques, l'interaction homme-machine est devenue plus souple et efficace.

Afin d'améliorer les performances d'un tel contrôleur d'excitation, et d'assurer beaucoup plus de fiabilité et de robustesse et on va introduire dans les chapitres suivants la technique de commande fréquentielle avancée H_∞ et H_2 dans ces contrôleurs d'excitation.

CHAPITRE IV

ETUDE ET APPLICATION DES PSS ROBUSTES BASES SUR LES TECHNIQUES FREQUENTIELLES AVANCEES

CHAPITRE IV
ETUDE ET APPLICATION DES PSS ROBUSTES BASES SUR LES TECHNIQUES FREQUENTIELLES AVANCEES

IV.1. INTRODUCTION

Les années 60 ont connus un développement rapide de technologie touchant divers domaines d'engineering comme secteur énergétique, l'aérospatiale, secteur militaire… etc.

La complexité de ces systèmes entraînera la nécessité de développer des techniques de contrôle plus efficace afin des performances de plus en plus sévères. Dans ce sens les méthodes de modélisation développée a mis en évidences les limitations des approches mathématiques basées sur l'hypothèse d'une possibilité de connaissance exacte des processus et d'une mesure exacte d'arrivée à des variables mises en œuvre. C'est ainsi que c'est développé la notion de robustesse, dont l'objet est de permettre une approche d'une commande garantissant un fonctionnement satisfaisant d'un processus indépendamment des incertitudes existants. Dés les années 70 deux approches sont distinguées :

- la première basée sur un modèle déterminé, on peut citer par exemple :
  - Les approches dans 1'espace d'état : LQ, LQG, LTR, placement de pôle ...etc.
  - Les approches fréquentielles : la commande robuste $H\infty$, H2, la synthèse μ…etc.
- La deuxième qui n'est pas basé sur un modèle explicité mais utilisant des signaux et variables mesurables, comme la logique floue et réseaux de neurone qui entrent dans ce cadre.

L'approche H-infini dans le cadre de la commande robuste est un sujet de très grande actualité à nos jours, et qui a fait la production de plusieurs publications scientifiques dans tout les secteurs.

Toute a été commencé par un article de G. ZAMES en 1981, Avec l'introduction du modèle standard par C- Doyle en 1984 permettra le développement des algorithmes de résolution.

En 1989, a eu l'apparition de l'algorithme de synthèse de Glover-Doyle [51], suivie par les travaux Safonov [46].

Le présent chapitre développera de façon simple, les éléments de base de la théorie de «sensibilité mixte» et du «problème standard », qui aboutissent à la fin par la présentation de l'algorithme de synthèse du correcteur robuste $H\infty$ de Glover-Doyle [51]. Cette technique de commande avancée compare avec la commande robuste H_2 basé sur le contrôle LQG (linéaire quadratique gaussienne) avec filtre de KALMEN pour synthétiser un stabilisateur robuste PSS appliqué à la régulation automatique d'excitation de machines synchrones puissantes

IV.2. TECHNIQUE DE COMMANDE ROBUSTE H∞

IV.2.1 CONTEXTE GENERALE:

a. But:

Les signaux à commander doivent être proches de signaux désirés (ou signaux de référence ou de consigne) bien que le système soit soumis à des signaux de perturbations non contrôlables et assez souvent non mesurés. Ce sont les objectifs de performance. Pour cela, on doit appliquer des signaux de commande (en général, ils doivent appartenir à un certain ensemble) à l'entrée du système par l'intermédiaire d'actionneurs, calculés à partir des signaux mesurés par les capteurs et des signaux de référence. Les signaux mesurés peuvent être entachés de bruits de mesure. L'objectif est donc de mettre au point l'algorithme qui permette de construire le signal de commande à partir du signal mesuré (correcteur) [47].

b. Cahier des charges :

Il doit contenir la définition de l'ensemble des signaux désirés. Le choix des actionneurs/capteurs dépend de cela. Le choix des actionneurs définit un ensemble de signaux admissibles (tenant compte par exemple de la saturation des actionneurs). Rien ne garantit a priori qu'avec le choix initial des objectifs de performance, des actionneurs et des capteurs un tel correcteur existe.

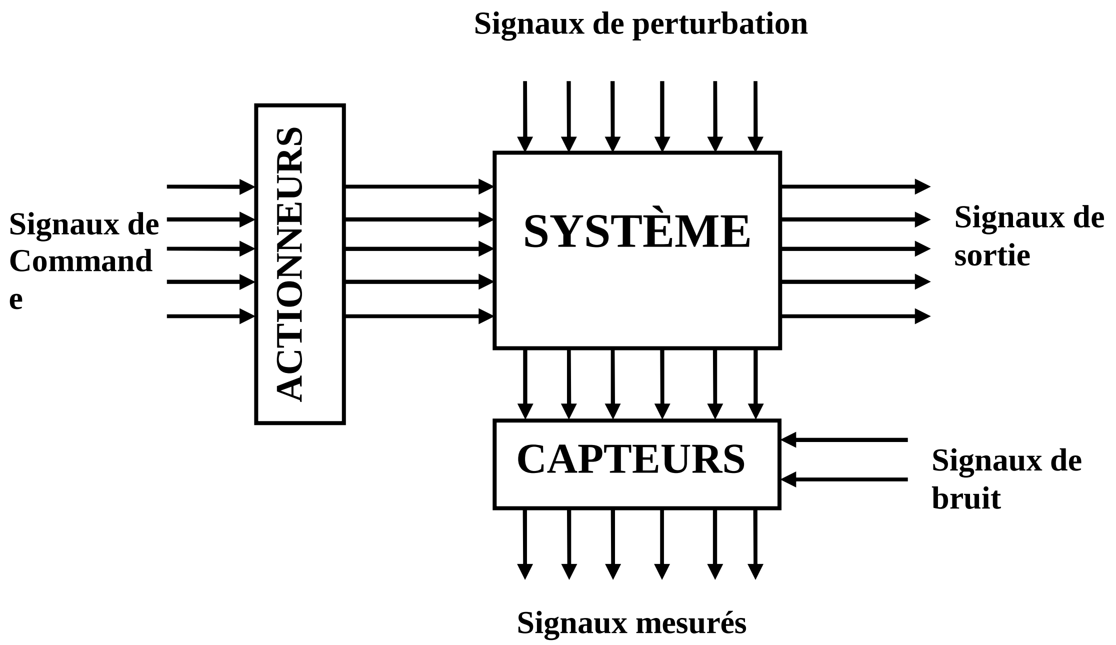


Figure IV.1. Le Système de commande

IV.2.2. DEMARCHES

1. Pour agir sur le Système Electro-Energétique, il est nécessaire de connaître son comportement c'est-à-dire le lien entre les différents signaux d'entrée (commande, perturbations, bruits) et les différents signaux de sortie (sortie à commander, mesure). Cette connaissance prend la forme d'un modèle mathématique quantitatif, acquis par *identification* et/ou *modélisation physique*. Il doit s'accompagner d'informations sur les classes de signaux susceptibles d'être appliqués en entrée (perturbations, bruits).
2. Il faut ensuite écrire le cahier des charges sous la forme de *critères mathématiques* permettant de définir l'ensemble des signaux de sortie désirés, l'erreur que l'on peut tolérer entre les signaux réels de sortie et les signaux désirés, l'ensemble des signaux de commande qui est admissible, l'ensemble des signaux de perturbation
3. La dernière étape est la recherche de l'algorithme (*loi*) de commande qui satisfasse les critères mathématiques traduisant le cahier des charges pour le modèle mathématique représentant le système (synthèse). Cette recherche est généralement faite via l'exécution d'un algorithme sur un calculateur. Il ne faut pas oublier que le but est que le cahier des charges soit vérifié sur le système bouclé réel et pas simplement sur le modèle manipulé. Assurer la ***robustesse*** du correcteur consiste à essayer d'avoir le plus de garanties a priori sur le bon fonctionnement du correcteur lorsqu'il est appliqué sur le système réel.

IV.4.3. MOYENS DISPONIBLES

Considérons les points 2 et 3. Actuellement aucune méthode *efficace* de synthèse de correcteurs ne repose sur un ensemble de critères suffisamment riche pour traiter des différents aspects d'un cahier des charges, même dans le cas des systèmes linéaires stationnaires. Par efficace, il faut comprendre que l'algorithme de recherche du correcteur se termine normalement en un temps raisonnable (généralement en un temps qui est une fonction polynomiale d'une grandeur caractéristique du problème de commande).

Par exemple, on désire rechercher une loi de commande pour un système d'ordre n par l'exécution d'un algorithme. Le temps que va mettre sa résolution sur un ordinateur est fonction de la taille n du système à commander. Les problèmes considérés comme faciles (faible complexité) seront ceux pour lesquels le temps de résolution est une fonction polynomiale de la taille du problème (par exemple une fonction en n^3), ceux qui seront considérés comme difficile seront ceux pour lesquels le temps de résolution est une fonction exponentielle de la taille du problème (par exemple une fonction en 2^n). Dans le tableau 1.1

sont indiqués les temps de calcul correspondant à différentes valeurs de *n* dans les deux cas. Il est clair que la résolution des problèmes difficiles mène rapidement `à des temps de calcul irréalistes (supérieur à plusieurs milliers d'années). Il est important de noter que la complexité d'un problème est intrinsèque, c'est-à-dire indépendante par exemple des évolutions technologiques des ordinateurs : l'augmentation de la rapidité de calcul des ordinateurs ne sera jamais suffisante pour mener à des temps de calcul réaliste

Tableau IV.1 : Exemple de temps de calcul en fonction de la complexité et de la taille du problème

complexité	Taille *n* du problème				
	10	**20**	**30**	**40**	**50**
n^3	0.01 s	0.08 s	0.27 s	0.64 s	1.25 s
	10 s	1.33 mn	4.50 mn	10.67 mn	20.83 mn
2^n	0.01 s	10.24 s	2.91 h	124.3 jours	348.7 ans
	10 s	2.84 h	121.4 jours	348.7 ans	3.49×10^5 ans

IV.4.4. STRATEGIES DE COMMANDE FREQUENTIELLE CLASSIQUE :

L'automatique fréquentielle classique (telle qu'elle s'est développée des années 30 aux années 60 avec les travaux de Black, Nyquist, Bode, Horowitz, etc...) est basée sur un principe différent. Tout ce qui est supposé, c'est que le système est contenu dans un ensemble de modèles (système $\in$ {modèles}). L'ensemble de modèles est déterminé, par contre, on ne sait pas à quel élément correspond le système réel. Le système est alors dit *incertain*. Pour garantir que le correcteur remplisse le cahier des charges pour le système réel, il est donc nécessaire de s'assurer qu'elle le remplit pour l'ensemble des modèles possibles. Les marges classiques de gain, de phase et de module visent à définir un ensemble de modèles. Par suite, l'automatique fréquentielle classique propose une solution pertinente à l'indétermination des systèmes. Cette approche présente un certain nombre de défauts. D'une part, elle ne repose pas sur une formalisation claire du cahier des charges en un ou plusieurs critères mathématiques. Par suite, cette méthode de synthèse peut être qualifiée de "semi-automatique" : l'automaticien en se basant sur les résultats théoriques disponibles et les différents critères graphiques basés sur les représentations graphiques (Bode, Nyquist, Nichols, etc...), doit choisir lui-même la structure de son correcteur (PI, PID, PI avec avance de phase, etc..) et de déterminer les valeurs de ses différents paramètres de façon à régler un correcteur respectant le cahier des charges. Sa mise en œuvre demande donc une grande expertise. De plus, il est difficile de savoir si les choix de structure et de paramètres du correcteur sont les meilleurs possibles. D'autre part, les méthodes d'automatique fréquentielle classique permettent de traiter les systèmes à une entrée et une sortie (*SISO*).

Pour les systèmes *MIMO* comme il est le cas dans notre étude (SEE), elles sont de mise en œuvre plus difficile voire inextricable, conduisant parfois à des correcteurs *non robustes.*

IV.4.5. STRATEGIES DE COMMANDE FREQUENTIELLE AVANCEE :

La commande fréquentielle avancée (commande robuste H_2 ou H_∞) est née de la recherche d'une meilleure formalisation du cahier des charges par des critères mathématiques dont la résolution efficace permet de synthétiser un correcteur satisfaisant ce cahier des charges. Pour cela, elle utilise le cadre fréquentiel. Pour ce qui est de la notion de robustesse qui apparaît dans le point 3, beaucoup de méthodes de synthèse de correcteurs (placement de pôles, LQG, etc...) reposent sur le principe d'équivalence : on suppose que le système est exactement représenté par le modèle (système $\Leftrightarrow$ modèle). Or, il est évident qu'un modèle représente de façon approximative un système réel : un nombre limité de dynamiques sont prises en compte dans le modèle, la mesure des paramètres physiques du système est toujours entachée d'erreurs, ceux-ci peuvent être différents d'une situation à l'autre.

IV.5. METHODE DE COMMANDE FREQUENTIELLE AVANCEE H∞

La commande fréquentielle avancée (commande robuste H_∞) propose une solution (imparfaite mais très intéressante) aux problèmes évoqués précédemment. Tout comme en automatique fréquentielle classique, l'incertitude est explicitement prise en compte. De plus :

- Le cahier des charges est formalisé par un critère mathématique.
- Un algorithme numérique efficace permet de tester s'il existe un correcteur qui satisfasse au critère en un temps raisonnable (quelques secondes): si oui, un correcteur est alors proposé en sortie de l'algorithme.
- Le cas des systèmes de commande types MIMO est naturellement traité.

Cette méthode constitue une véritable méthode de *CAO (Conception Assistée par Ordinateur).* Elle a été rendue possible par les évolutions récentes de la théorie en Automatique, de l'optimisation numérique et de la puissance de calcul disponible pour un coût de plus en plus faible. Avec cette méthode, la tâche de l'ingénieur (électrotechnicien / automaticien) est de choisir le critère mathématique qui reflète le mieux le cahier des charges et d'en régler les différents paramètres : la synthèse effective d'un correcteur vérifiant le critère est alors effectuée par un calculateur.

D'autres méthodes classiques traitent des critères mathématiques qui permettent une traduction plus fidèle du cahier des charges, mais :

- Un critère trop complexe est difficile à manipuler et à comprendre ;
- Les algorithmes de synthèse de correcteurs ne sont pas "efficaces" ou n'existent pas ;
- La classe des systèmes considérés est assez réduite ;
- Le niveau d'automatisation de la méthode de synthèse est assez faible.

IV.5.1. APPLICATION DES TECHNIQUES FREQUENTIELLES AVANCEES (COMMANDE ROBUSTE H_2 ET H_∞) AUX SYSTEMES AVR- PSS :

a. Sur le cahier des charges :

Un schéma très général de correcteur est présenté (figure IV.2). Le SEE à commander (soit *G)* est soumis à des signaux de perturbation mesurés *b*1 ou non - mesurés *b2*.

On cherche à faire suivre par la sortie *z* le signal de référence *r*.

Pour cela, le signal *y* est mesuré par un capteur avec un bruit *w*. Le correcteur *K* admet donc comme entrée le signal de référence *r*, le signal de mesure bruité (*y*+*w)* et la perturbation mesurée *b*1.

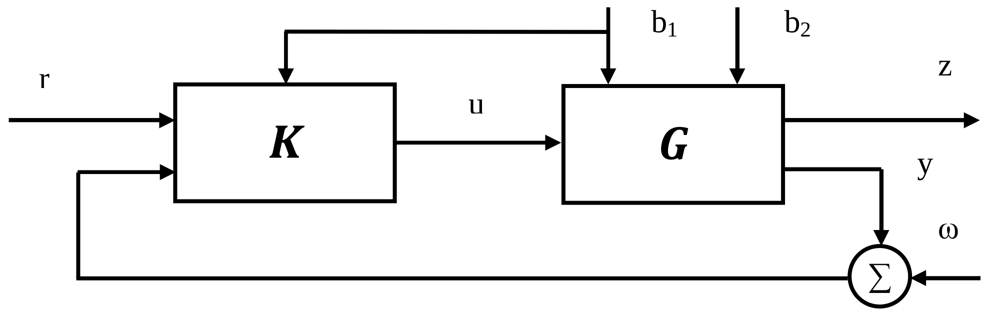


Figure IV.2. Système en BF général

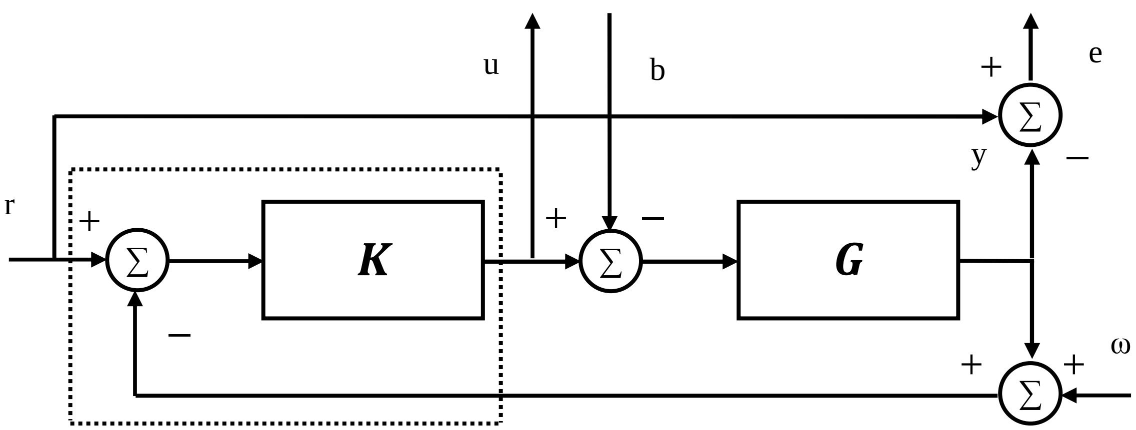


Figure IV. 3. Système en BF illustratif

Afin d'illustrer les méthodes de synthèse des lois de commande H_2 *ou* H_∞, on a considérer le schéma classique en boucle fermée représenté figure IV 3, qui est beaucoup plus simple. Cela ne veut pas dire que les méthodes H_2 *ou* H_∞ ne s'appliquent pas dans la configuration plus générale ou dans d'autres configurations. Au contraire, l'un des atouts de ces approches est leur plasticité, permettant de pouvoir considérer un très large spectre de schémas en boucle fermé.

Dans ce schéma, il s'agit de faire suivre dans la mesure du possible par la sortie du système $y(t)$ un signal de référence $r(t)$ appartenant à un ensemble bien défini. L'erreur de suivi de trajectoires est désignée par $\varepsilon(t) = r(t)\text{-}y(t)$. La façon dont la sortie du système suit la trajectoire de référence $r(t)$ peut être exprimée par le fait que $\varepsilon(t)$ doit appartenir à un ensemble bien déterminé.

Cette spécification doit être réalisée malgré la présence de perturbations $b(t)$ qui agissent sur le système (par exemple en entrée de celui-ci) et des bruits $w(t)$ sur la mesure de la sortie $y(t)$. Même si les perturbations et/ou les bruits ne sont pas mesurés, on sait par contre a priori que ces signaux appartiennent à des ensembles déterminés.

De plus, la commande $u(t)$ appliquée doit être raisonnable par rapport `à l'application considérée (elle ne doit pas solliciter de façon trop importante les actionneurs). Ici encore, cela revient à dire que l'on a défini pour $u(t)$ un ensemble admissible : la loi de commande doit assurer que $u(t)$ appartient bien à cet ensemble.

Cela constitue les objectifs de performance. Ils se traduisent tous par le fait que pour des signaux d'entrée $r(t)$, $b(t)$ et $w(t)$ appartenant à des ensembles bien définis, un correcteur est recherché tel que les signaux de sortie $y(t)$ et $u(t)$ appartiennent à des ensembles correspondant aux spécifications du cahier des charges.

Une propriété nécessaire (mais en général loin d'être suffisante) est la stabilité de la boucle fermée : pour des signaux d'entrée $r(t)$, $w(t)$ et $b(t)$ d'amplitude finie, les signaux du système (ε (t), $u(t)$) sont aussi d'amplitude finie

b. Fonctions de Pondération et Optimisation:

L'approche utilisée dans nos travaux pour la synthèse des correcteurs robustes H_2 ou H_∞ consiste à optimiser le choix des fonctions de pondération fréquentielle, mais également le choix du modèle nominal du système quand le système comporte une incertitude importante ou quand sa dynamique change avec le point de fonctionnement. En effet, le correcteur robuste H_2 ou H_∞ peut être vu comme une fonction des paramètres de synthèse qui sont les coefficients des filtres de pondération et les paramètres du modèle nominal qui sont incertains où éventuellement variant dans le temps. Le choix de ces paramètres peut être optimisé en fonction de différents critères de robustesse et de performance du SEE.

La formalisation mathématique du cahier des charges passe par la définition de l'ensemble des signaux d'entrée possibles et de l'ensemble des signaux de sortie désirés pour le système bouclé. Enfin, la loi de commande est construite à partir d'un modèle qui est une représentation idéalisée du système réel : les mesures des paramètres physiques sont toujours entachées d'incertitudes, les dynamiques hautes fréquences sont difficilement modélisables... Malgré toutes ces imperfections, la loi de commande doit fonctionner correctement sur le *système réel* c'est-à-dire assurer la stabilité et les performances recherchées (robustesse).

IV.5.2 Formalisation d'un Cahier De Charges en Automatique Frequentielle Avancee

Le cahier des charges peut contenir quatre classes de spécifications :

Suivi de trajectoires de référence (consignes) il s'agit d'étudier l'influence du signal de référence $r(t)$ sur le signal d'erreur $\varepsilon(t)$; Rejet/atténuation de signaux de perturbation il s'agit d'étudier l'influence du signal de perturbation $v(t)$ sur le signal d'erreur $\varepsilon(t)$; Atténuation des bruits de mesure il s'agit d'étudier l'influence des signaux de bruit $w(t)$ sur le signal de commande $u(t)$ et sur le signal de sortie $y(t)$ (en général, le système à commander G est un système passe-bas, ce qui fait qu'il est plus impératif d'étudier l'influence du bruit $w(t)$ sur $u(t)$ que sur $y(t)$) ; Commande modérée il s'agit d'étudier l'influence des signaux de référence $r(t)$ et du signal de perturbation $v(t)$ sur le signal de commande $u(t)$;

Une autre spécification qui est absolument nécessaire de prendre en compte est que la stabilité du système bouclé doit être assurée.

Si on considère le schéma classique d'un système G bouclé par une loi de commande K (voir la figure I.4), on y voit naturellement apparaitre les signaux d'entrée apparaissant dans le cahier des charges :

- la consigne $r(t)$;
- la perturbation en entrée du système $b(t)$;
- le bruit de mesure $w(t)$

Ainsi que les signaux de sortie :

- l'erreur de suivi de référence $\varepsilon(t) = r(t) - y(t)$;
- la commande $u(t)$ délivrée par le correcteur K.

Or, en notant $T_{x \to y}$ la fonction de transfert du signal d'entrée x vers le signal de sortie y, on a les relations suivantes entre les sorties et les entrées du système:

$$\varepsilon(p) = T_{r\to\varepsilon}(p).r(p) + T_{b\to\varepsilon}(p).b(p) + T_{\omega\to\varepsilon}(p).W(p) \tag{IV.1}$$

$$U(p) = T_{r\to u}(p).r(p) + T_{b\to u}(p).b(p) + T_{\omega\to u}(p).W(p) \tag{IV.2}$$

Ou:

1. $T_{r\to\varepsilon}(p) = \dfrac{1}{1+G(p).K(p)}$ est souvent notée $S(p)$ et appelée fonction de sensibilité ;

2. $T_{r\to y}(p) = \dfrac{G(p).K(p)}{1+G(p).K(p)}$ est souvent notée $T(p)$ et appelée fonction de transmission (car elle relie l'entrée de consigne r à la sortie y). Elle est aussi nommée fonction de sensibilité complémentaire car on a la relation

$$T(p) + S(p) = \frac{1}{1+G(p).K(p)} + \frac{G(p).K(p)}{1+G(p).K(p)} = 1 \tag{IV.3}$$

3. $T_{b\to\varepsilon}(p) = G(p).S(p)$ (IV.4)

4. $T_{r\to u}(p) = K(p).S(p)$ (IV.5)

5. $T_{\omega\to u}(p) = -K(p).S(p)$ (IV.6)

6. $T_{\omega\to\varepsilon}(p) = T(p)$ (IV.7)

Il est possible (et conseillé) d'étudier chacune des spécifications indépendamment les unes des autre s. Ceci est en fait pleinement justifié par le Théorème de Superposition qui est valable ici car les systèmes que nous étudions sont tous linéaires stationnaires. Ce théorème permet d'affirmer que l'influence de plusieurs signaux d'entrée non nuls sur les signaux de sortie est égale à la somme des influences de chacun des signaux d'entrée pris individuellement. Par exemple, prenons

$$\varepsilon(p) = S(p).r(p) + G(p).S(p).b(p) + T(p).W(p) \tag{IV.8}$$

1. Le terme $S(p)r(p)$ représente l'erreur de suivi de référence dans le cas sans perturbation ($b(p) = 0$) et sans bruit ($W(p) = 0$) ;

2. $G(p)S(p)b(p)$ représente l'erreur de régulation à 0 ($r(p) = 0$) dans le cas sans bruit ($W(p) = 0$) ;

3. $T(p)W(p)$ représente l'effet du bruit sur la sortie dans le cas d'une régulation à 0 ($r(p) = 0$) et sans perturbation ($b(p) = 0$).

Chaque spécification peut donc être étudiée en examinant les fonctions de transfert reliant les signaux d'entrée et de sortie concernés :

Tableau IV. 2 spécification pour examinant les fonctions de transfert reliant les signaux d'entrée et de sortie concernés

Spécifications	fonctions de transfert associées	notations usuelles
suivi de trajectoires de référence	$T_{r\rightarrow e}(p)$	$S(p)$
rejet/atténuation de perturbation	$T_{b\rightarrow e}(p)$	$S(p)G(p)$
atténuation des bruits sur commande	$T_{\omega\rightarrow e}(p)$	$-K(p)S(p)$
atténuation des bruits sur sortie	$T_{\omega\rightarrow e}(p)$	$T(p)$
commande modérée	$T_{r\rightarrow u}(p), T_{b\rightarrow u}(p)$ et $T_{\omega\rightarrow u}(p)$	$-K(p)S(p)$et $T(p)$

IV.5.3 STABILITE

Une notion très importante est celle de *stabilité interne*. Une boucle fermée est dite *stable de façon interne* si toutes les fonctions de transfert du système en boucle fermée produisent des sorties bornées (ε (*t*) et *u*(*t*) sur la figure IV.2) à partir d'entrées d'amplitude bornée (*r*(*t*), *b*(*t*) et *w*(*t*)). Ainsi, d'après ce qui a été vu précédemment, pour qu'il y ait stabilité interne, il faut que les fonctions de transfert *S*(*p*), *T*(*p*), *G*(*p*)*S*(*p*) et *K*(*p*)*S*(*p*) soient simultanément stables (pôles à partie réelle strictement négative). Il est d'autre part possible de démontrer qu'il y a stabilité interne si et seulement si la fonction de transfert *S* est stable et s'il n'y a pas de compensations pôles-zéros instables entre le système *G* et la loi de commande *K*.

IV.5.4 SUIVI DE TRAJECTOIRES DE REFERENCE (CONSIGNES)

Le suivi est d'autant mieux assuré que l'erreur ε (*t*) = *r*(*t*)- *y*(*t*) est proche de zéro pour les signaux de référence qui nous intéressent. Le signal d'erreur ²(*t*) va être caractérisé d'une part par son *régime permanent* et d'autre part, par son *régime transitoire*. Pour cela, on va considérer plusieurs classes de signaux d'entrée :

1. échelons ;
2. rampes, paraboles, etc. ;
3. sinusoïdes ;
4. signaux définis par le module de leur transformée de Fourier.

IV.5.5 REJET/ATTENUATION DE SIGNAUX DE PERTURBATION :

Après avoir étudié le suivi de signaux de référence *r*(*t*), on considère le problème du rejet de la perturbation *b*(*t*). On suppose que le signal de référence est 0 (problème de *régulation*) et on souhaite rejeter l'effet de la perturbation sur la sortie *y*(*t*) (ou de façon équivalente sur l'erreur de suivi de trajectoire ε (*t*)).

Pour cela, on utilise la même approche que précédemment. La seule différence est qu'au lieu de considérer $T_{r\to\varepsilon}$, la fonction de transfert qui relie le signal de référence *r*(*t*) à l'erreur de suivi de trajectoires ε(*t*), on considère la fonction de transfert $T_{b\to\varepsilon} = GS$ qui relie le signal de perturbation *b*(*t*) à l'erreur de suivi de trajectoires *ε*(*t*). En faisant (strictement) le même raisonnement que précédemment, on arrive à la conclusion que la perturbation sera atténuée si :

$$\left\| W_{\varepsilon} T_{b\to\varepsilon} W_b \right\|_{\infty} \leq 1 \tag{IV.9}$$

Ou la fonction de transfert W_b définit l'ensemble *B* des signaux de perturbations de la façon suivante :

$$B = \left\{ b(j\omega) \text{ tel que } \left| b(j\omega) \right| \leq \left| W_b(j\omega) \right| \right\} \tag{IV.10}$$

Et ou la fonction de transfert W_{ε} définit l'erreur de suivi de trajectoire. De la même façon que précédemment, on peut faire le raisonnement qualitatif suivant. Sur les gammes de pulsations ou le module de la transformée de Fourier du signal *b*(*t*) est important, pour assurer une bonne atténuation (voire un rejet) des perturbations, le module de la fonction de transfert *GS* doit y être faible.

IV.5.6. ATTENUATION DES BRUITS DE MESURE.

On désire limiter la puissance de commande due aux bruits de mesure *w*. En notant *Su*(*jω*) la densité spectrale de puissance du signal *u*, on a la puissance du signal *u* qui est donnée par :

$$\begin{aligned} \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t)^2 dt &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_u(j\omega) d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| T_{\omega\to u}(j\omega) \right|^2 S_{\omega}(j\omega) d\omega \end{aligned} \tag{IV.11}$$

La densité spectrale de puissance du bruit de mesure *w* est importante dans les hautes pulsations. Comme précédemment, si on assimile le bruit à un signal déterministe, on peut définir un ensemble de signaux de bruits *W* par l'introduction d'une fonction de transfert *Ww* telle que :

$$w = \left\{ w(j\omega) \text{ tel que } \left| w(j\omega) \right| \leq \left| W_w(j\omega) \right| \right\} \tag{IV.12}$$

Ou W_w est une fonction de transfert passe-haut. Pour assurer l'atténuation de l'effet des bruits sur la commande et sur la sortie du système, il faut donc que $T_{\omega\to u}$, la fonction de transfert qui relie le bruit de mesure *w* à la commande *u* et $T_{\omega\to y}$, la fonction de transfert qui relie le bruit de mesure *w* à la sortie du système *y* soient faibles en module pour la gamme des hautes pulsations. La forme générale des fonctions de transfert $T_{\omega\to u}$ et $T_{\omega\to y}$ est donc celle de fonctions de transfert passe-bas.

IV.5.7. COMMANDE MODEREE.

Un autre point important mentionné précédemment est que la commande ne doit pas être trop forte. Pour définir cela, on peut introduire une pondération *Wu* telle que les signaux de commande *u* désirables appartiennent à l'ensemble *U* avec :

$$U = \{u(j\omega) \text{ tel que } |u(j\omega)| \leq \frac{1}{|W_u(j\omega)|} \}$$
$$U(p) = T_{r\to u}(p).r(p) + T_{w\to u}(p).w(p) + T_{b\to u}(p).b(p) \tag{IV.14}$$

Par suite, par exemple, pour éviter une influence trop grande du bruit de mesure *w*(*t*) sur la commande, les gains de la fonction de transfert $T_{\omega\to u}$ = *KS* doivent être limités dans les hautes pulsations, donc la fonction de transfert *KS* doit avoir la forme d'un transfert passe-bas. Cela peut se formaliser mathématiquement par le fait que :

$$\|W_u T_{w\to u} W_w\|_\infty \leq 1 \tag{IV.15}$$

De plus, par rapport aux signaux de référence, les commandes ne doivent pas être trop fortes. Or, dans le cas ou $w = 0$ et $b = 0$:

$$\lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} u(t)^2 dt = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} S_u(j\omega)d\omega$$
$$= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} |T_{r\to u}(j\omega)|^2 S_r(j\omega)d\omega \tag{IV.16}$$

On a donc intérêt à limiter au maximum $|T_{r\to u}(j\omega)|$ ce qui peut se traduire par une contrainte du type

$$\|W_u T_{r\to u} W_r\|_\infty \leq 1 \tag{IV.17}$$

Notons que dans le cas de la boucle fermée d´écrite par la figure IV.3 on a $T_{\omega\to u}$ = $T_{r\to u}$ = *KS*. Les contraintes (16) et (17) sont vérifiées si en introduisant une pondération W_2 telle que ¸ $\max(|W_u(j\omega)W_w(j\omega)|, |W_u(j\omega)W_r(j\omega)|)$, on a $\|W_2.KS\|_\infty \leq 1$ .D'après la discussion précédente, l'inverse de la fonction de transfert W_2 est une fonction passe-bas.

IV.6. SYNTHESE D'UN CORRECTEUR ROBUSTE H∞ : [48, 49]

En commande robuste H_2 et H_∞, le problème est généralement mis sous la forme standard représentée à la figure IV.4 où le vecteur *w* représente des entrées extérieures, telles que signaux de référence, perturbations et bruit ; le vecteur u représente les commandes ; le vecteur z représente des signaux d'erreur caractérisant le bon fonctionnement du système asservi ; le vecteur y représente les mesures renvoyées au correcteur ; la matrice P(s) est alors la matrice de transfert du système généralisé et K(s) est la fonction de transfert du correcteur.

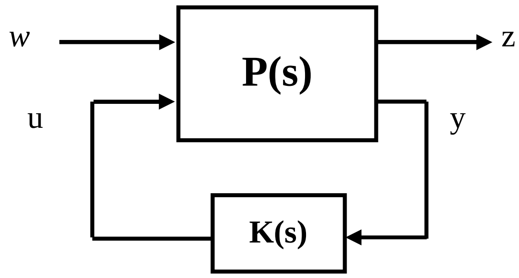


Figure IV. 4. problème standard de la commande robuste H_∞

Le problème standard consiste à trouver un correcteur K(s) stabilisant de manière interne P(s) et minimisant la norme H_∞ de la matrice de transfert en boucle fermé de w vers z.

Notons que P(s) est un système augmenté à partir système nominal et prenant en compte des spécifications de performance et de robustesse.

Le système augmenté peut être partitionné comme ainsi :

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \tag{IV.18}$$

Ainsi le schéma de la figure IV.4 peut être décrit comme suit :

$$\begin{aligned} z &= P_{11}w + P_{12}u \\ y &= P_{12}w + P_{22}u \\ u &= Ky \end{aligned} \tag{IV.19}$$

D'où l'on déduit :

$$z = \left[P_{11}w + P_{12}K\left(I - P_{22}K\right)^{-1}P_{21}\right]w \tag{IV.20}$$

Pour souci de simplicité on va noter :

$$T(P,K) = \left[P_{11}w + P_{12}K\left(I - P_{22}K\right)^{-1}P_{21}\right] \tag{IV.21}$$

Sachant que le système à une réalisation minimale : P(s) = [A, B, C, D]

Ayant deux entrées et deux sorties les matrices A, B, C, D ont les formes suivantes :

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & B_1 \end{bmatrix}$$
$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \qquad \text{(IV.21)}$$
$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}$$

P(s) Vérifie:

$$\begin{aligned} x(t) &= Ax + B_1 w + B_2 u \\ z &= C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \\ y &= C_2 x + D_{21} w + D_{22} u \end{aligned} \qquad \text{(IV.22)}$$

Avec l'étude de l'approche de la sensibilité mixte on peut construire le système global suivant (Figure IV.5):

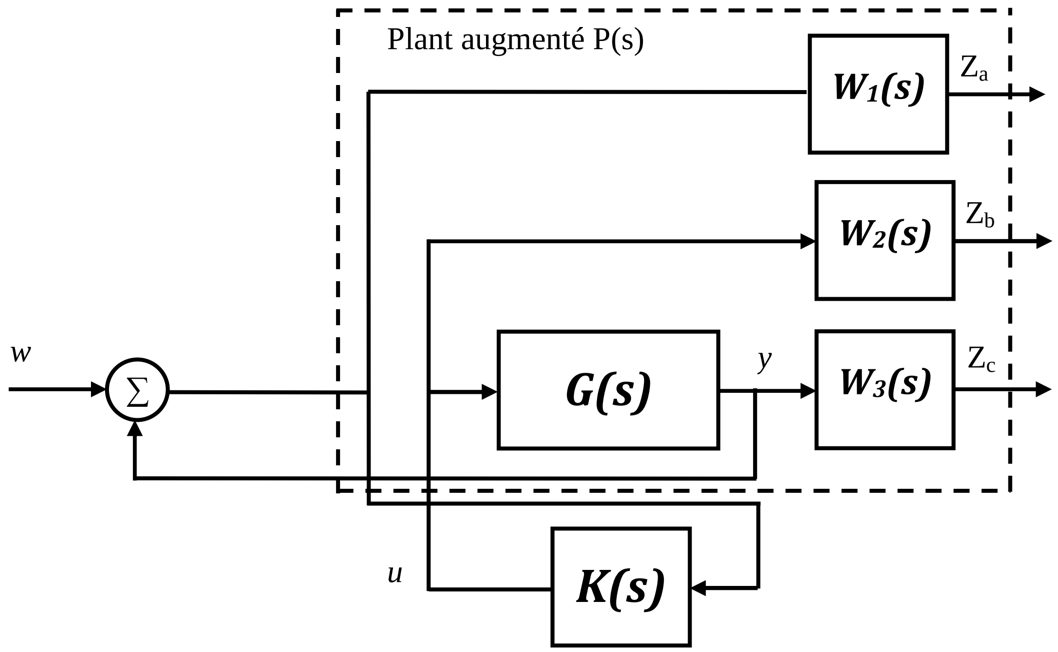


Figure IV.5 : Représentation du système augmenté

Le système augmenté devient alors:

$$P(s) = \left[\begin{array}{cc} W_1 & -W_1 G \\ 0 & W_2 \\ 0 & W_3 G \\ \hdashline 1 & -G \end{array}\right] = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \qquad \text{(IV.23)}$$

Si G(s), W_1(s), W_2 (s), W_3 (s) ont les réalisations suivantes:

$$\begin{aligned} G(s) &= \begin{bmatrix} A_G & B_G & C_G & D_G \end{bmatrix} \\ W_1(s) &= \begin{bmatrix} Aw_1 & Bw_1 & Cw_1 & Dw_1 \end{bmatrix} \\ W_2(s) &= \begin{bmatrix} Aw_2 & Bw_2 & Cw_2 & Dw_2 \end{bmatrix} \\ W_3(s) &= \begin{bmatrix} Aw_3 & Bw_3 & Cw_3 & Dw_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \qquad \text{(IV.24)}$$

Alors la réalisation de P(s) est comme suit :

$$P(s)=\begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \tag{IV.25}$$

Et encore :

$$P(s)=\left[\begin{array}{cccc|c|c} A_G & 0 & 0 & 0 & 0 & B_G \\ -BW_1 C_G & AW_1 & 0 & 0 & BW_1 & -BW_1 D_G \\ 0 & 0 & AW_2 & 0 & 0 & BW_2 \\ BW_3 C_G & 0 & 0 & AW_3 & 0 & BW_3 D_G \\ \hline -DW_3 C_G & CW_1 & 0 & 0 & DW_1 & DW_1 D_G \\ 0 & 0 & CW_2 & 0 & 0 & DW_2 \\ DW_3 C_G & 0 & 0 & CW_3 & 0 & DW_3 D_G \\ C & 0 & 0 & 0 & 1 & D_G \end{array}\right] \tag{IV.26}$$

IV.6. 1 LA RESOLUTION DU PROBLEME H∞ - ALGORITHME DE GLOVER- DOYLE:

La recherche d'un contrôleur stabilisant *K(S)*, est obtenue par résolution de [9]:

- Problème standard : $\|T_{z\omega}\|_\infty \leq \gamma_{\min}$ (IV.27)
- Problème optimal : $Min\|T_{z\omega}\|_\infty \leq \gamma_{\min}$ (IV.28)

Pour résoudre le problème optimal, la procédure γ-itération (voir l'annexe D), qui consiste à faire varier la valeur de γ pour avoir des solutions sous optimal et qui correspond à: $\|T_{z\omega}\|_\infty \leq \gamma_{\min}$

γ : valeur constante positive appelé niveau d'optimisation.

Considérons le problème standard de la figure IV.4, la représentation d'état du système P(s) est décrite dans la Fig. IV-8, sera sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ e(t) \end{bmatrix} \tag{IV.29}$$

Avec : $w \in \Re^{m_1}; u \in \Re^{m_2}; e \in \Re^{p_1}; y \in \Re^{p_2}; x \in \Re^{m_n}$.

Pour résoudre le problème H∞ standard, les hypothèses suivantes doivent être satisfaites:

$H_1 \rightarrow$ (A, B_2) est stabilisante et (C_2, A) est détectable.

$H_2 \rightarrow$ rang (D_{12}) = m_2 et rang (D_{21}) = p_2.

$H_3 \rightarrow \quad \forall w \in \Re, rang\begin{pmatrix} A - jwl_n & B_2 \\ C_1 & D_{12} \end{pmatrix} = n + m_2$ (IV.30)

$H_4 \rightarrow \quad \forall w \in \Re, rang\begin{pmatrix} A - jwl_n & B_1 \\ C_2 & D_{21} \end{pmatrix} = n + p_2$ (IV.31)

On rajoute ainsi les conditions suivantes :

$$D_{11} = 0 \qquad D_{12}{}^{T}(C_1, D_{12}) = (0, I_{n_2}) \tag{IV.32}$$

$$D_{22} = 0 \qquad \begin{pmatrix} B_1 \\ D_{21} \end{pmatrix} . D_{12}^T = \begin{pmatrix} 0 \\ I_{P2} \end{pmatrix} \tag{IV.33}$$

Remarque : Ces dernières conditions ne sont pas nécessaires à la résolution du problème H∞. M. Safonov (et autres), ont présentés un algorithme qui peut satisfaire à ces conditions [46, 50,51].

Les deux théories suivantes permettent de décrire toutes les solutions du problème standard (à base de la résolution des deux équations de RICCATI) :

Théorie 1 :

Le système décrit par (4-21) et vérifiant les hypothèses H_1 - H_4 avec les conditions (4-31) peut être stabilisé par un correcteur K (s) assurant $\| fi(p,K) \|_\infty < \gamma$ si et seulement si :

- La matrice $H_\infty = \begin{bmatrix} A^T & -\gamma^2 B_1 B_1^T - B_2 B_2^T \\ C_1 C_1^T & -A \end{bmatrix}$ n'a pas de valeur propre sur l'axe imaginaire, et il existe une unique matrice $X_\infty = R(H_\infty) \geq 0$
- La matrice $J_\infty = \begin{bmatrix} A^T & -\gamma^2 C_1 C_1^T - C_2 C_2^T \\ B_1 B_1^T & -A \end{bmatrix}$ n'a pas de valeur propre sur l'axe imaginaire, et il existe une unique matrice $Y_\infty = R(J_\infty) \geq 0$

  Avec : H et J - deux matrices de HAMILTHON
- $p(X_\infty Y_\infty) < \gamma$, ou p (.) désigne le module de la plus grande valeur propre (rayon spectral).

Théorie 2 :

Sous les conditions du théorème 1 l'ensemble de tous les correcteurs rationnels K(s) stabilisant le système et satisfaisant $\| fi(p,K) \|_\infty < \gamma$ est donné par :

$$K = f_p(K_a, \Phi) \tag{IV.34}$$

Ou Φ(s) est une matrice de transfert $(m_\infty X p_\infty)$ propre et stable arbitraire vérifiant $\| \Phi_2 \|_2 < \gamma$ et Ka (s) admet la représentation d'état suivante:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_a(t) \\ U(t) \\ \dot{Y}_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_\infty & Z_\infty Y_\infty C_2^T & Z_\infty B_2 \\ -B_2^T X_\infty & 0 & I_{m2} \\ -C_2 & I_{p2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a(t) \\ U(t) \\ Y_a(t) \end{bmatrix} \tag{IV.35}$$

Avec :

$$\hat{A}_{\infty} = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_{\infty} - B_2 B_2^T X_{\infty} - Z_{\infty} Y_{\infty} C_2^T C_2 \qquad \text{(IV.36)}$$

$$Z_{\infty} = (I_n - \gamma^2 Y_{\infty} X_{\infty})^{-1} \qquad \text{(IV.37)}$$

On peut distinguer un correcteur appelé correcteur centralisé avec la condition suivante Φ= 0 Définit par:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_a(t) \\ \dot{U}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_{\infty} & Z_{\infty} Y_{\infty} C_2^T \\ -B_2^T X_{\infty} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a(t) \\ U(t) \end{bmatrix} \qquad \text{(IV.38)}$$

Notons enfin, que ce contrôleur au même ordre que le système augmenté par les fonctions de pondérations.

Remarque : On peut calculer le contrôleur robuste K par :

$$K(S) = -F_{\infty}[(SI - A_{\infty})^{-1}] Z_{\infty} L_{\infty} \qquad \text{(IV.39)}$$

Avec:

$$A_{\infty} = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_{\infty} + B_2 F_{\infty} + Z_{\infty} L_{\infty} C_2 \qquad \text{(IV.40)}$$

$$F_{\infty} = -B_2^T X_{\infty} \qquad \text{(IV.41)}$$

$$L_{\infty} = -Y_{\infty} C_2^T \qquad \text{(IV.42)}$$

$$Z_{\infty} = (I_n - \gamma^2 Y_{\infty} X_{\infty})^{-1} \qquad \text{(IV.43)}$$

IV.6. 2 L'ALGORITHME DE SYNTHESE DU CONTROLEUR ROBUSTE D'EXCITATION PSS-H∞

Les paramètres du générateur synchrone (comme objet de commande) dans un système énergétique, varient relativement en fonction des régimes des fonctionnements, ce qui nécessite reconstruction des coefficients de l'AVR (gains et constants de temps, PID par exemple) [50].

D'autre difficultés actuellement est liés aux le fonctionnement du générateur synchrone dans les heures de nuit, sous le régime sous excité (Q_g<0), aussi que les heures de pointe sous le régime sur excité (Q_g très grande).Pour maintenir la stabilité du système, les paramètres et la structure du régulateur doivent êtres reconstruire.

Le problème de la réalisation d'un régulateur automatique d'excitation robuste pour les machines synchrones garantissant la stabilité du système et des performances statiques et dynamiques acceptables, suite à des variations des conditions des fonctionnements (régimes / configuration) et des perturbations incertains, est un sujet de très grande actuellement.

La résolution du problème de commande (Figure I.4) est proposée comme suit:

1. Calcule du régime permanent établi (RP).

2. Linéarisation du système l'objet de commande.

3. Le problème principal dans la commande H_∞ et la définition de l'objet de commande augmenté P(s) dans l'espace d'état :

3-1. Choix des fonctions de pondérations : W_1, W_2, W_3 (selon la procédure proposée) ;

3-2. L'obtention de l'objet de commande augmenté à partir des fonctions de pondérations $W_{1,2,3}$ correspondant à la réalisation d'un objet MIMO (deux entrés / deux sorties).

4. Vérifier si toutes les conditions aux rangs des matrices sont satisfaire, si non on change dans la structure des fonctions des pondérations ;

5. Choix d'une grande valeur de γ (niveau d'optimisation) ;

6. Résolution des deux équations de RICCATI définies par les deux matrices de HAMILTHON H et J ;

7. Si toutes les conditions sont vérifiées (la théorie 1), on fait diminuer la valeur de γ, si non on fait augmenté γ, et en refaire les étapes 4 a 5 jusqu' au l'obtention d'une solution optimale satisfaisante (une valeur optimale γ_{min}) ;

8. Réduction de l'ordre du régulateur si nécessaire

9. Par l'obtention des valeurs optimales et deux solutions d'équations de RICCATI on obtient la structure du régulateur H_∞ ainsi que les racines de la boucle fermée avec le régulateur robuste ;

10. Les paramètres du contrôleur robuste H_∞ sous forme linéaire 'LTI (SS espace d'état, TF fonction de transfert ou ZPK zéros - pôles - gains), seront transférés de l'espace de travail

11. La mise en marche du sous-système 'simulation' et la réalisation de l'étude de la stabilité et la robustesse du système électro-énergétique sous différents conditions de fonctionnements.

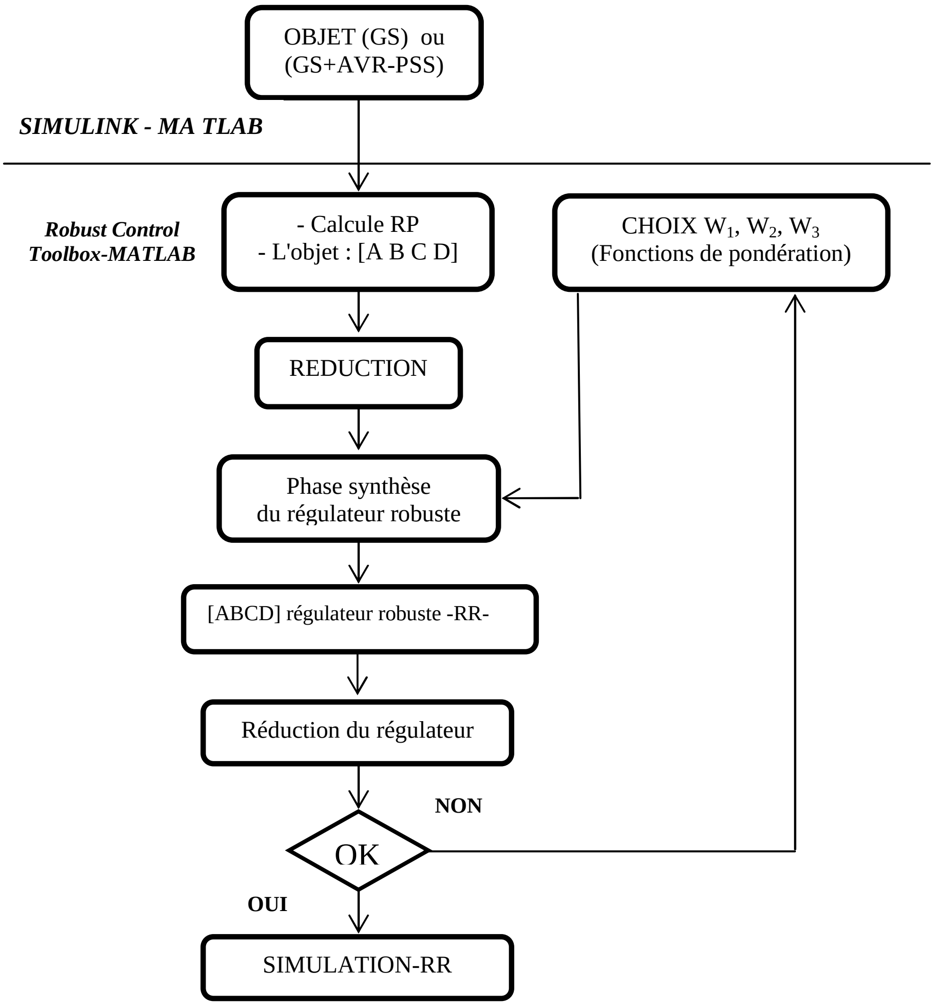


Figure IV.6.Algorithme de synthèse du régulateur robuste d'excitation de la MS

IV.7. COMMANDE ROBUSTE H_2 BASE SUR LE CONTROLEUR LQG ET FILTRE DE KALMAN :

Les problèmes de la commande optimale se rencontrent dans la vie de tous les jours : comment arriver à destination le plus rapidement possible, comment minimiser sa consommation... Pour un système dynamique donné dont les équations sont connues, le problème de commande optimale consiste alors à trouver la commande minimisant un critère donné.

La commande LQG est optimale au sens de la norme H_2. Pour faire le lien avec les techniques fréquentielles de type H_∞: il est possible de réaliser une optimisation dans le domaine fréquentiel au sens de la norme H_2 sur le même schéma de synthèse d'une commande H_∞. La synthèse H_2 peut être réalisée sur les mêmes entrées-sorties que la synthèse H_∞, tout juste sera-t-il nécessaire de régler les pondérations fréquentielles [47].

La commande LQG réunit un contrôleur LQ (Linear Quadratic) et un estimateur de Kalman pouvant être calculé indépendamment suivant le principe de séparation. La commande LQ garantit une certaine robustesse de la boucle fermée, ce qui n'est pas le cas de la boucle LQG [52]

La synthèse d'un contrôleur optimal par la commande LQG est particulièrement bien adaptée au problème de la commande de système de puissance SEE. En effet, la synthèse LQG permet d'obtenir un comportement d'un système linéaire en boucle fermée optimal pour un critère quadratique dépendant des différents objectifs de commande. De plus, la synthèse LQG prend en considération les propriétés stochastiques des perturbations affectant le système et des bruits de mesure, et donc les propriétés stochastiques du système de puissance étudié.

Ainsi pour chaque point de linéarisation du modèle S_i (x_i, u_i), un contrôleur LQG est synthétisé, compose d'un filtre de Kalman estimant l'état du modèle linéarisé $\Delta\hat{x} = \hat{x} - x$ et d'un retour d'état $\Delta u = K\Delta\hat{x}$ (Figure IV.7). Le retour d'´etat K est calculé de manière à minimiser une fonction quadratique J, qui dépend des objectifs de commande, et est par conséquent différente selon les zones d'opération du système [11].

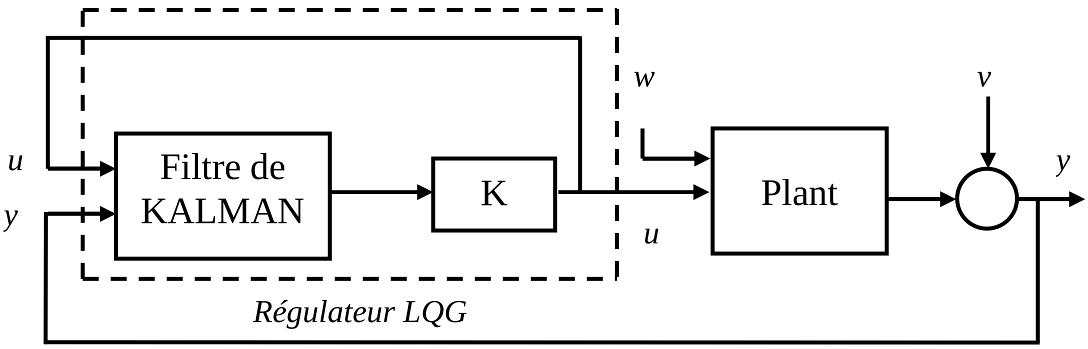


Figure IV.7. Structure d'un contrôleur LQG

Si on considère le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + v(t) \\ y(t) = C(t)x(t) + w(t) \end{cases} \quad \text{(IV.44)}$$

Où

- *y :* vecteur de variables contrôlées
- *u :* vecteur de commande
- *v :* bruit blanc gaussien sur l'état
- *w :* bruit blanc gaussien sur la sortie.

Dans le cadre de la commande par synthèse H_2, on cherche à établir une loi de commande par retour d'état qui minimise un critère quadratique du type suivant :

$$J = \int_0^T (z^T Qz + u^T Ru + 2x^T Sx)dt \tag{IV.45}$$

Où

Q, R et S sont des matrices de pondérations définies positives.

Le contrôleur LQG est la solution des équations:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A(t)\hat{x}(t) + B(t)u(t) + K(t)(y(t) - C(t)\hat{x}(t)) \tag{IV.46}$$

$$\hat{x}(0) = E(x(0)) \tag{IV.47}$$

$$u(t) = -L(t)\hat{x}(t) \tag{IV.48}$$

La matrice *K(t)* est appelée gain de Kalman du filtre de Kalman associée à la première équation. Ce filtre estime l'état du système $\hat{x}(t)$. Le gain de Kalman *K(t)*est calculé à partir des matrices *A(t)* ,*C(t)*et les deux matrices de covariances *V(t)*, *W(t)*des bruits blancs gaussiens *v(t)*et *w(t)*et de l'état initial $E(x'(0)x(0))$. Le gain de Kalman est calculé par résolution de l'équation différentielle matricielle dite de Riccati :

$$\begin{aligned} \dot{P}(t) &= A(t)P(t) + P(t)A'(t) - P(t)C'(t)W^{-1}(t)C(t)P(t) + V(t) \\ P(0) &= E(x(0)x'(0)) \end{aligned} \tag{IV.49}$$

Soit $P(t), 0 \le t \le T$ le gain de Kalman est $K(t) = P(t)C'(t)W^{-1}(t)$

La matrice L(t) est le gain du correcteur LQ. Cette matrice est déterminée par les matrices A(t), C(t), Q(t), R(t) et F(t) par résolution de l'équation de Riccati,

$$\begin{aligned} -\dot{S}(t) &= A(t)S(t) + S(t)A(t) - S(t)B(t)R^{-1}(t)B'(t)S(t) + Q(t) \\ S(t) &= F(t) \end{aligned} \tag{IV.50}$$

Soit $S(t), 0 \le t \le T$ Il vient $L(t) = R^{-1}(t)B'(t)S(t)$ (IV.51)

On peut observer la similarité entre les deux équations différentielles: la première est dans le sens de la flèche du temps tandis que la deuxième est à rebours. Cela vient de la dualité entre les problèmes de contrôle et d'estimation.

Quand A(t), B(t), C(t), Q(t), R(t), et les matrices de covariances W(t), V(t) ne dépendent pas du temps, le contrôleur LQG est invariant dans le temps et les équations deviennent des équations de Riccati algébriques.

IV.8 APPLICATION DES CONTROLEURS ROBUSTES AU SYSTEME SMIB

IV.8 .1 REALISATION D'UN GUI POUR L'ETUDE SOUS MATLAB

Pour analyser et visualiser les différents comportements dynamiques du système électro énergétique on a créé et élaboré un GUI (**G**raphical **U**ser **I**nterfaces) sous logiciel MATLAB. Cette technique avec le Gui MATLAB réalisé nous ont permet:

- D'Effectuer le contrôle du système à partir des régulateurs (PSS, PSS-H_∞ et PSS-H_2)
- De visualiser les résultats de la régulation et la simulation de notre système
- De calculer les paramètres dynamiques du système.
- De tester la stabilité et la robustesse du système.
- D'étudier les différents régimes de fonctionnement du générateur synchrone puissant (sous excité, nominale, sur excité).

Les différentes opérations sont effectuées à partir du GUI réalisé représenté à la figure IV.8

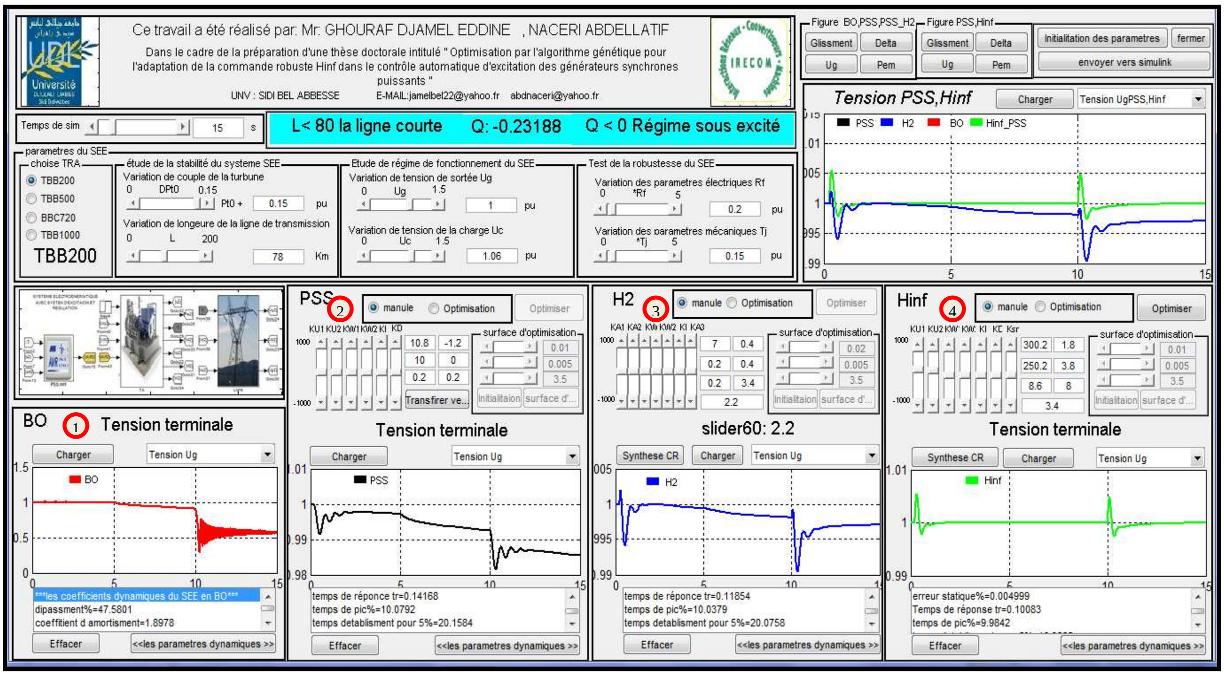


Figure IV.8. L'application du système sous GUI/MATLAB

1 Bloc associé au système SMIB sans régulation :

- Résultats de simulation.
- Calcule les performances dynamique et statique.

2 Bloc associé au système SMIB avec régulateur PSS :

- Régulation et optimisation du PSS.
- Résultats de simulation.
- Calcule les performances dynamique et statique.

3 Bloc associé au système SMIB avec régulateur PSS-H_2 :

- Synthétiser un contrôleur robuste PSS-H_2.
- Régulation et optimisation du PSS-H_2.

- Résultats de simulation.
- Calcule les performances dynamique et statique.

4 Bloc associé au système SMIB avec régulateur PSS-H_∞ :

- Synthétiser un contrôleur robuste PSS-H_∞.
- Régulation et optimisation du PSS-H_∞.
- Résultats de simulation.
- Calcule les performances dynamique et statique.

Les différents blocs qui reste a été défini précédemment dans le chapitre 3.

IV.8.2 RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATION

Les résultats précédemment obtenus en boucle ouverte et avec l'utilisation des régulateurs AVR et AVR- FA (chapitre III), seront maintenant exploités pour effectuer la synthèse des régulateurs permettant d'améliorer les performances dynamiques du système et la robustesse de stabilité, tout en appliquant le contrôleur d'excitation robuste H_∞ et H_2.

Pour évaluer les performances du système étudié en présence du contrôleur H-infini, on considère le modèle énuméré par la figure I.7 (chapitre I) et on va examiner les performances du contrôleur d'excitation H∞ sur la réponse du système pour divers modes de fonctionnements de la machine synchrone (nominal, sur excité, sous excité), pour différents valeurs de la réactance Xe du réseau extérieur (plusieurs configurations).

On présente dans cette partie une étude comparative entre les deux contrôleurs :

- Modèle avec la boucle AVR-FA (PSS-H_∞) : Contrôleur AVR-FA avec stabilisateur H∞
- Modèle avec la boucle AVR-FA (PSS-H_2) : Contrôleur AVR-FA avec stabilisateur H_2

Cette étude réalise pour voir la fiabilité de contrôleur robuste H_∞ utilisé

Les tableaux IV.3 à 5 nous donnent les valeurs Les performances du comportement dynamique du système contrôleur AVR-FA avec stabilisateur H∞ et Contrôleur AVR-FA avec stabilisateur H_2 sous différents conditions 'régimes –configurations' et plusieurs types des Turbo – Alternateurs avec :

- σ: Partie réelle des pôles dominats.
- ε %: erreurs statiques en %.
- d %: dépassements en %.
- t_s : temps d'établissements ou temps de réponse.

Pour une étude de stabilité on crée une perturbation au niveau de la turbine a différents 15% de ΔTm_{ref} à l'instant t = 1 s avec les différentes conditions de fonctionnement 'régimes – configurations' et divers types des Turbo –Alternateurs (TBB-200 à 1000 et BBC-720).

Concernant test de robustesse on effectue dans le premier temps des variations paramétriques électriques à l'instant t = 5 s (minoration de 100% de R). Puis, on effectue des variations paramétriques mécaniques à l'instant t = 10 s (majoration de 50% de l'inertie J) en supposant cette fois ci que les paramètres électriques sont connus (constants).

D'après les résultats obtenus figure IV.9 à 12 et l es tableaux IV.3 à 5 on constate de très grandes améliorations des performances dynamiques du système avec l'utilisation du contrôleur robuste PSS-H_∞ en comparaison avec un contrôleur robuste PSS-H_2.La stabilité du système en BF est bien maintenue avec le contrôleur PSS-H_∞.

La stabilité transitoire du système est très performante et surtout avec le contrôleur PSS-H_∞, on obtient des améliorations considérables dans la qualité des régimes transitoires de tous les paramètres du système, même pour notre régime critique qui est le régime de repos de la station (sous excité). Après des petites oscillations le système retrouve son état initial avec :

- Les erreurs statiques négligeables (précisions meilleures)
- Le temps de monté et d'établissement en était réduit pour les variables à tendance lente $\Delta\omega$ et $\Delta\delta$ ainsi qu'une amélioration de régulation de la tension de sortie ΔVt.

On constate que, vu l'amélioration du comportement du système avec le contrôleur PSS-H_2 le contrôleur H_∞ PSS se voit plus performant en augmentant les valeurs des coefficients d'amortissement et en améliorant la qualité des régimes transitoires établis en réduisant les oscillations électromécaniques des grandeurs (ΔP, $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, ΔVt) et on améliorant les temps d'établissements et les dépassements maximales.

Concernant les résultats de teste de robustesse obtenus on peut constater qu'une très grande robustesse de stabilité de notre système, vis-à-vis ces variations paramétriques (électrique et mécaniques) se manifeste avec l'utilisation du contrôleur d'excitation PSS-H_∞.

Dans certaines situations critiques (régime de fonctionnement sous-excité), ce contrôleur est plus robuste, il améliore considérablement son efficacité pendant ces périodes de fonctionnent très difficiles de la station électrique, pour supporter par exemple des coupures de courants et assure la continuée de service du SEE universel.

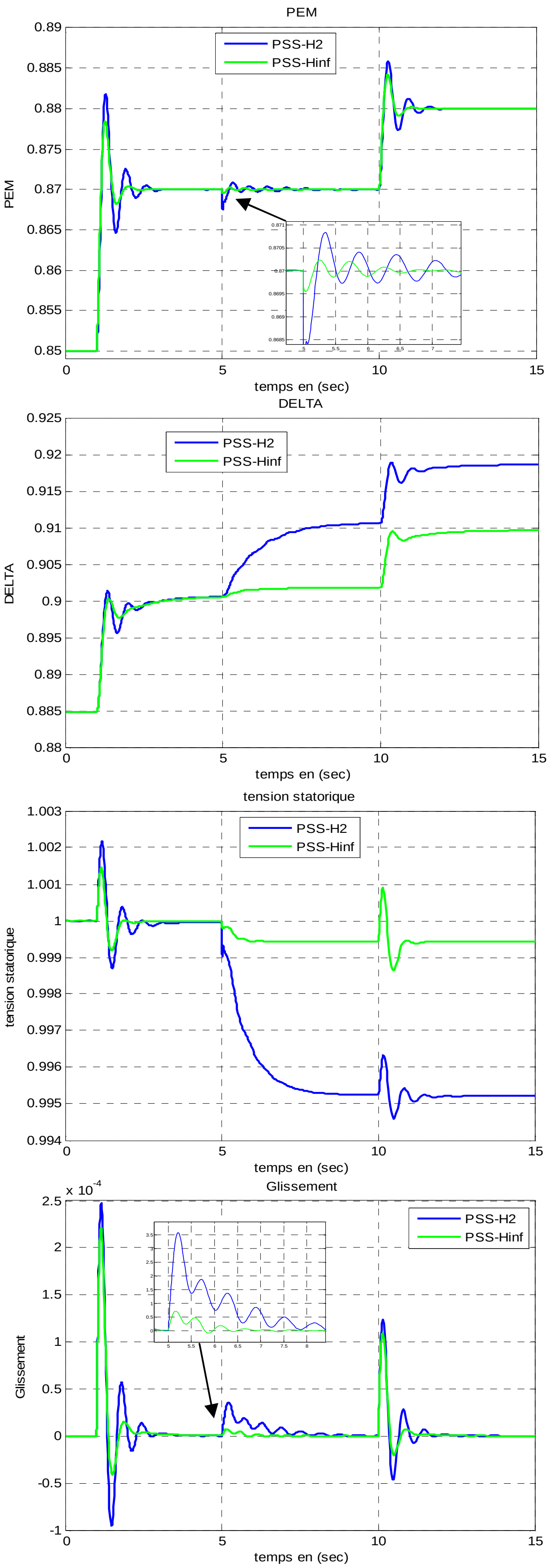


Figure IV.9 : GS TBB-200 fonctionnant sous régime nominal raccordé avec une ligne longue

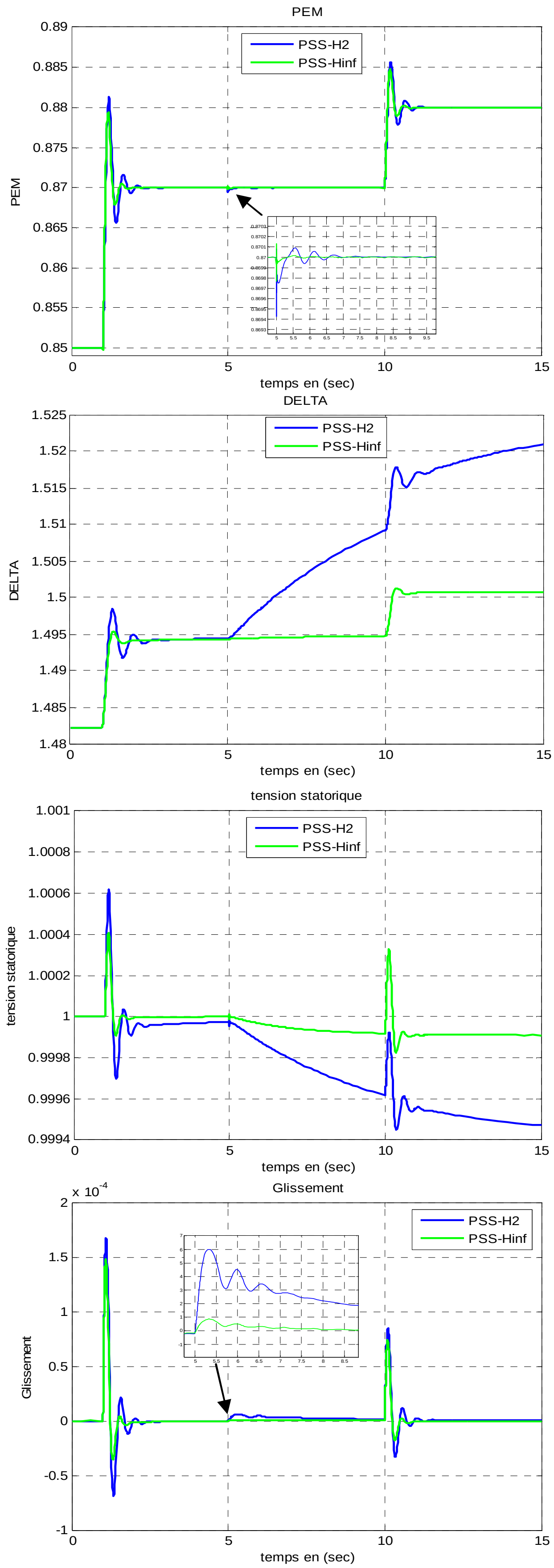


Figure IV.10 : GS TBB-500 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne longue

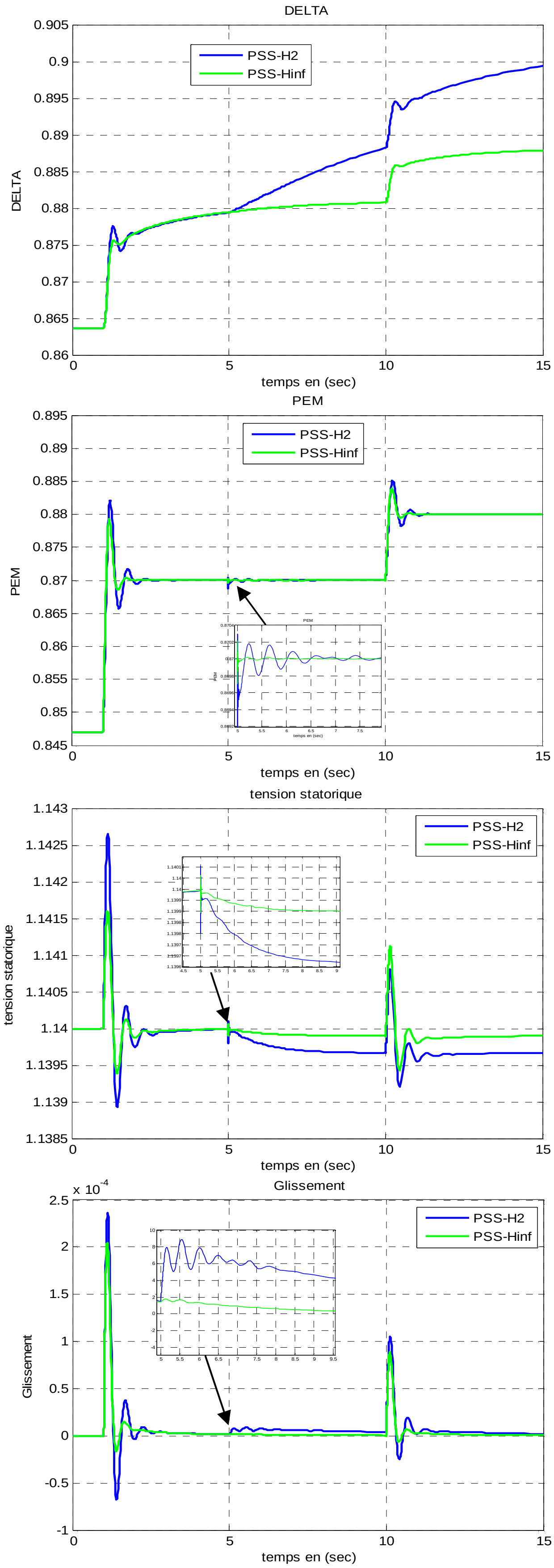


Figure IV.11 : GS BB720 fonctionnant sous régime sur excité raccordé avec une ligne moyenne

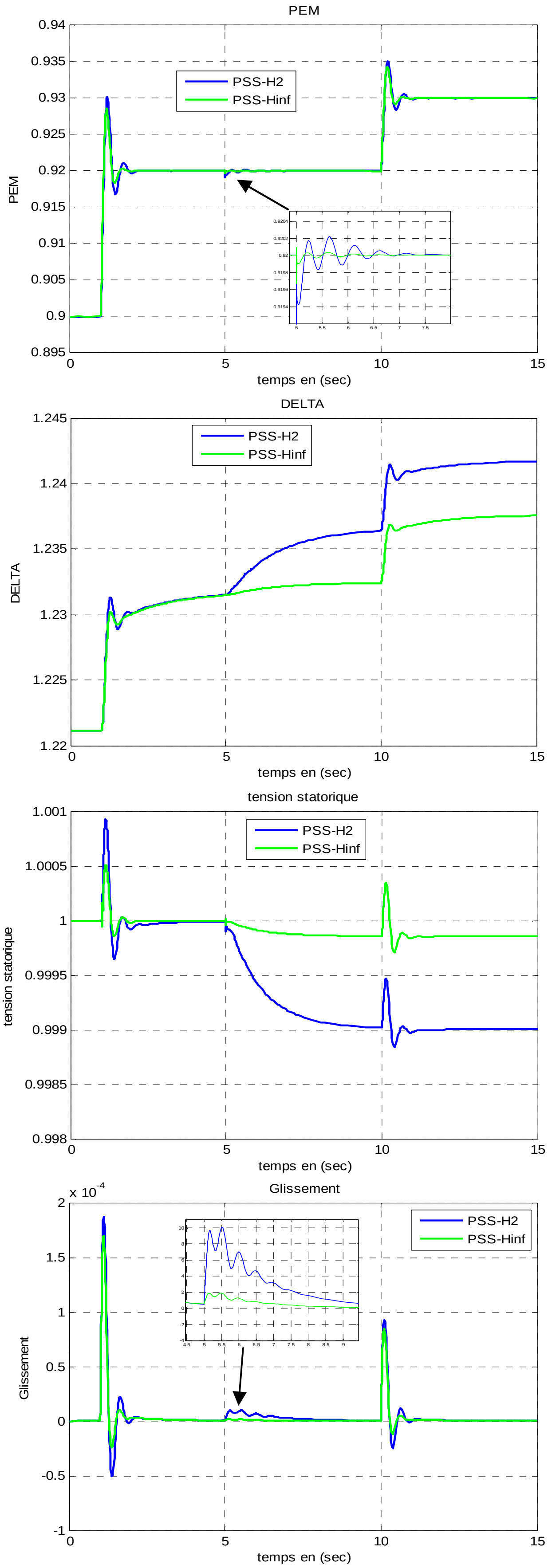


Figure IV.12 : GS TBB1000 fonctionnant sous régime sur excité raccordé avec une ligne courte

Tableau IV. 3. Les performances statiques et dynamiques du système SMIB raccordé avec une ligne longue

TBB-200												
σ				ε_s %			t_s (± 5%)			D %		
Q(pu)	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞
Régime sur excité	-1.761	-1.955	-2.412	-1.620	-0.665	négligeable	1,704	1,776	1,122	7,892	5,289	4,682
	-1.751	-1.937	-2.405	-1.629	-0.672	négligeable	1,713	1,797	1,156	7,847	5,179	4,482
Régime nominal	-1.855	-1.994	-2.500	-1.487	-0.631	négligeable	1,617	1,674	1,084	8,314	5,856	4,915
	-1.759	-1.909	-2.438	-1.235	-0.514	négligeable	1,706	1,760	1,113	7,883	5,372	4,737
Régime sous excité	-1.470	-1.867	-1.924	-0.687	-0.410	négligeable	2,041	2,248	1,417	6,588	4,337	3,290
	-1.442	-1.865	-1.916	-0.656	-0.408	négligeable	2,080	2,284	1,429	6,463	4,221	3,247
TBB-500												
σ				ε_s %			Ts (± 5%)			D %		
Q(pu)	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞
Régime sur excité	-1.956	-2.014	-2.730	-1.459	-0.999	négligeable	1,534	1,870	0.800	8,766	5,822	4,795
	-1.926	-2.275	-2.655	-1.461	-0.998	négligeable	1,558	1,909	0.812	8,632	5,640	4,619
Régime nominal	-1.966	-2.330	-2.741	-1.386	-0.931	négligeable	1,526	1,733	0.754	8,811	5,520	4,014
	-1.850	-2.308	-2.682	-1.170	-0.766	négligeable	1,621	1,776	0.798	8,292	5,289	4,770
Régime sous excité	-1.412	-1.981	-2.238	-0.659	-0.389	négligeable	2,125	2,156	0.868	6,328	4,650	3,527
	-1.401	-1.954	-2.232	-0.683	-0.274	négligeable	2,141	2,188	0.907	6,279	4,540	3,345
BBC-720												
σ				ε_s %			t_s (± 5%)			D %		
Q(pu)	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞
Régime sur excité	-1.858	-1.965	-2.629	-1.577	-1.075	négligeable	1,349	1.602	0.850	8,955	5,723	4,988
	-1.818	-2.499	-2.598	-1.579	-1.069	négligeable	1,323	1.612	0.856	8,762	5,349	4,947
Régime nominal	-2.049	-2.357	-2.661	-1.496	-0.994	négligeable	1,408	1.500	0.810	9,876	5,251	4,147
	-2.017	-2.348	-2.570	-1.262	-0.819	négligeable	1,630	1.523	0.817	8,721	5,234	4,689
Régime sous excité	-1.704	-1.809	-1.897	-0.783	-0.652	négligeable	1,877	1.540	0.901	7,213	4,969	3,532
	-1.398	-1.508	-1.888	-0.758	-0.650	négligeable	1,801	1.542	0.910	6,738	4,876	3,361
TBB-1000												
σ				ε_s %			t_s (± 5%)			D %		
Q(pu)	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞
Régime sur excité	-1.761	-1.975	-2.647	-1.530	-0.961	négligeable	1,704	1.450	0.945	7,892	5,932	4,775
	-1.731	-1.959	-2.631	-1.517	-0.959	négligeable	1,713	1.461	0.947	7,847	5,838	4,740
Régime nominal	-1.855	-1.993	-2.694	-1.432	-0.919	négligeable	1,617	1.499	0.977	8,314	5,904	4,970
	-1.759	-1.918	-2.511	-1.222	-0.736	négligeable	1,706	1.320	0.610	7,883	5,624	4,690
Régime sous excité	-1.470	-1.777	-1.865	-0.701	-0.613	négligeable	2,041	1.454	0.897	6,588	4,062	3,345
	-1.442	-1.774	-1.858	-0.665	-0.611	négligeable	2,080	1.512	0.974	6,463	4,963	3,157

Tableau IV. 4. Les performances statiques et dynamiques du système SMIB raccordé avec une ligne moyenne

TBB-200												
σ				ε_s%			t_s (± 5%)			D %		
Q(pu)	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞
Régime sur excité	-1.887	-1.908	-2.631	-1.557	-0.730	négligeable	1,704	1.300	0.650	7,892	5,844	4,577
	-1.866	-1.978	-2.618	-1.547	-0.742	négligeable	1,713	1.321	0.671	7,847	5,679	4,545
Régime nominal	-1.895	-1.956	-2.700	-1.343	-0.609	négligeable	1,617	0.900	0.610	8,314	5,658	4,750
	-1.787	-1.969	-2.637	-1.093	-0.587	négligeable	1,706	1.009	0.680	7,883	5,179	4,592
Régime sous excité	-1.593	-1.740	-1.970	-0.632	-0.355	négligeable	2,041	1.231	0.805	6,588	5,370	4,925
	-1.558	-1.716	-1.928	-0.603	-0.343	négligeable	2,080	1.251	0.812	6,463	5,238	4,820

TBB-500												
σ				ε_s%			Ts (± 5%)			D %		
Q(pu)	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞
Régime sur excité	-1.958	-2.365	-2.466	-1.421	-1.047	négligeable	1,534	1.301	0.700	8,766	5,607	4,904
	-1.910	-2.320	-2.369	-1.432	-1.047	négligeable	1,558	1.312	0.712	8,632	5,360	4,633
Régime nominal	-2.106	-2.321	-2.550	-1.277	-0.987	négligeable	1,526	1.320	0.600	8,811	5,482	4,140
	-1.977	-2.289	-2.488	-1.056	-0.814	négligeable	1,621	1.398	0.670	8,292	5,289	4,966
Régime sous excité	-1.429	-1.947	-2.001	-0.622	-0.411	négligeable	2,125	1.633	0.840	6,328	4,008	3,602
	-1.400	-1.924	-1.957	-0.600	-0.407	négligeable	2,141	1.650	0.870	6,279	4,682	3,479

BBC-720												
σ				ε_s%			t_s (± 5%)			D %		
Q(pu)	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞
Régime sur excité	-1.847	-1.923	-2.578	-1.542	-1.108	négligeable	1,615	1.320	0.900	8,955	5,926	4,960
	-1.782	-1.946	-2.568	-1.551	-1.108	négligeable	1,650	1.328	0.910	8,762	5,503	4,933
Régime nominal	-2.194	-2.385	-2.637	-1.380	-1.106	négligeable	1,464	1.250	0.812	9,876	5,817	4,119
	-2.155	-2.308	-2.531	-1.140	-0.902	négligeable	1,487	1.261	0.874	8,721	5,394	4,833
Régime sous excité	-1.819	-2.379	-2.658	-0.669	-0.504	négligeable	1,761	1.341	0.924	7,213	4,134	3,556
	-1.791	-1.957	-1.981	-0.664	-0.488	négligeable	2,146	1.351	0.931	6,738	4,013	3,348

TBB-1000												
σ				ε_s%			t_s (± 5%)			D %		
Q(pu)	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞	PSS	PSS-H_2	PSS-H_∞
Régime sur excité	-1.755	-1.944	-2.667	-1.565	-1.022	négligeable	1.460	1.251	0.678	7,718	5,042	4,667
	-1.733	-1.915	-2.643	-1.584	-1.022	négligeable	1.472	1.267	0.701	7,664	5,882	4,607
Régime nominal	-1.757	-1997	-2.694	-1.460	-0.987	négligeable	1.320	1.230	0.610	7,852	5,438	4,735
	-1.670	-1.947	-2.561	-1.210	-0.842	négligeable	1.358	1.101	0.697	7,552	5,058	4,402
Régime sous excité	-1.316	-1.643	-2.100	-0.710	-0.529	négligeable	1.632	1.458	0.709	5,719	4,386	3,250
	-1.293	-1.720	-1.987	-0.685	-0.512	négligeable	1.657	1.512	0.711	5,638	4,260	3,096

Tableau IV. 5. Les performances statiques et dynamiques du système SMIB raccordé avec une ligne courte

TBB-200												
σ				**ε_s %**			**t_s (± 5%)**			**D %**		
Q(pu)	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**
Régime sur excité	-1.923	-2.389	-2.673	-1.327	-1.093	négligeable	1.700	1.400	0.750	9,095	5,102	4,753
	-1.919	-2.369	-2.593	-1.355	-1.093	négligeable	1.708	1.412	0.758	8,994	5,003	4,734
Régime nominal	-1.982	-2.192	-2.766	-1.203	-1.084	négligeable	1.600	1.320	0.700	9,133	5,317	4.000
	-1.721	-2.104	-2.695	-0.993	-0.929	négligeable	1.613	1.398	0.725	8,613	5,884	3,826
Régime sous excité	-1.522	-2.034	-2.116	-0.721	-0.549	négligeable	1.914	1.418	0.791	7,710	5,068	3,387
	-1.518	-1.713	-2.099	-0.718	-0.532	négligeable	2.000	1.420	0.800	7,509	5,057	3,364
TBB-500												
σ				**ε_s %**			**Ts (± 5%)**			**D %**		
Q(pu)	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**
Régime sur excité	-2.059	-2.304	-2.427	-1.280	-1.073	négligeable	1.912	1.300	0.910	8,896	5,877	4,098
	-2.029	-2.271	-2.364	-1.302	-1.071	négligeable	1.921	1.315	0.912	8,560	5,662	4,903
Régime nominal	-2.100	-2.431	-2.505	-1.174	-1.061	négligeable	1.945	1.250	0.900	9,439	5,515	4126
	-1.982	-2.389	-2.418	-0.931	-0.902	négligeable	1.851	1.264	0.909	8,860	5,394	4,973
Régime sous excité	-1.768	-1.891	-1.974	-0.719	-0.517	négligeable	1.987	1.311	0.936	6,404	4,045	3,818
	-1.764	-1.871	-1.909	-0.716	-0.501	négligeable	2.056	1.320	0.980	6,274	4,897	3,803
BBC-720												
σ				**ε_s %**			**t_s (± 5%)**			**D %**		
Q(pu)	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**
Régime sur excité	-1.825	-1.968	-2.688	-1.388	-1.137	négligeable	1.812	1.320	0.851	8,278	5,157	4,835
	-1.815	-1.918	-2.672	-1.412	-1.134	négligeable	1.821	1.325	0.862	7,986	5,799	4,754
Régime nominal	-1.846	-1.982	-2.749	-1.269	-1.039	négligeable	1.700	1.250	0.810	8,833	5,113	4,918
	-1.781	-1.979	-2.573	-1.005	-0.981	négligeable	1.721	1.280	0.818	8,658	5,514	4,682
Régime sous excité	-1.600	-1.749	-2.128	-0.774	-0.581	négligeable	1.816	1.398	0.897	8,152	5,299	3,691
	-1.597	-1.732	-2.062	-0.771	-0.564	négligeable	1.824	1.420	0.932	8,027	5,294	3,664
TBB-1000												
σ				**ε_s %**			**t_s (± 5%)**			**D %**		
Q(pu)	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**	**PSS**	**PSS-H_2**	**PSS-H_∞**
Régime sur excité	-1.871	-1.924	-2.710	-1.459	-1.055	négligeable	1.320	1.140	0.550	7,865	5,212	4,411
	-1.863	-1.907	-2.696	-1.485	-1.053	négligeable	1.329	1.145	0.578	7,767	5,124	4,366
Régime nominal	-1.947	-1.996	-2.788	-1.054	-1.006	négligeable	1.120	1.051	0.500	7,874	5,311	4,543
	-1.831	-1.968	-2.676	-0.836	-0.921	négligeable	1.126	1.001	0.512	7,484	5,899	4,030
Régime sous excité	-1.555	-1.684	-2.138	-0.810	-0.552	négligeable	1.504	1.387	0.687	5,898	4,123	3,222
	-1.552	-1.766	-2.063	-0.806	-0.535	négligeable	1.564	1.410	0.710	5,795	4,107	3,202

IV.9. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a présenté une étude comparative entre deux techniques de commande avances basées sur les techniques fréquentielles avancées la commande robuste $H\infty$ basé sur la méthode de loop shaping et la Commande Robuste H_2 basé sur le contrôle LQG (linéaire quadratique gaussienne) avec filtre de KALMAN appliquées au système de régulations de tension d'excitation des générateurs synchrones puissants pour amélioré la robustesse de la stabilité du système SMIB .

Les résultats d'étude montrent que Le contrôleur H_∞ PSS a donné des performances dynamiques meilleures, le système est plus stable et assez robuste (quelque soit le type d'incertitude paramétrique et le régime de fonctionnement de la station électrique), par rapport l'utilisation de la commande robuste H_2

Les résultats de simulation obtenus justifient notre contribution dans l'amélioration da la stabilité et sa robustesse par application d'un contrôleur fiable à base de cette technique de commande avancée.

Notons enfin, qu'un handicap se manifeste lors de l'étape décisive de la sélection des fonctions de pondérations. Pour cette raison et pour résoudre ce problème, d'issues et solutions seront a proposés dans cette orientation.

Dans le chapitre suivant on va exploiter les techniques d'optimisation robuste par les algorithmes génétiques et les essaims de particules pour la sélection optimum des ces fonctions de pondérations pour finalement l'adaptation et la robustesse de la commande robuste H_∞ sous différentes conditions de fonctionnements de la station électrique.

CHAPITRE V

OPTIMISATION PAR ALGORITHMES GENETIQUES ET L'ESSAIME PARTICULE ETUDE COMPARATIVE ET APPLICATION NUMERIQUE

CHAPITRE V

OPTIMISATION PAR ALGORITHMES GENETIQUES ET L'ESSAIM PARTICULAIRE ETUDE COMPARATIVE ET APPLICATION NUMERIQUE

V.1. INTRODUCTION

Le meilleur réglage des paramètres de PSS et l'adaptation de la commande robuste avec les différentes variations de système de puissance considéré comme des conditions nécessaires de bon fonctionnement de ce dernier. D'autre part et au fil des années, de nombreuses recherches ont été effectuées et de nombreuses approches ont été proposées pour effectuer le réglage de PSS et commande de système de puissance tel que les algorithmes évolutionnaires

Grâce à leurs nombreux avantages, les algorithmes évolutionnaires sont appliqués avec beaucoup de succès dans le domaine industriel et l'ingénierie. De nombreux problèmes liés aux systèmes de puissance sont résolus par les algorithmes évolutionnaires telles les répartitions économiques, la prévision de charges, la planification de génération, la coordination des contrôleurs, les études de sûreté des systèmes de puissance,… .

Les algorithmes génétiques, forment une des principales classes des algorithmes évolutionnaires ; ils ont suscité beaucoup d'enthousiasme depuis plusieurs années. Leur efficacité pour produire des solutions de qualité dans un grand nombre de problème d'optimisation est maintenant bien établie. Ils représentent les méthodes d'optimisations les plus utilisées.

Les premiers travaux sur les algorithmes génétiques ont commencé dans les années cinquante, lorsque plusieurs biologistes américains ont simulé des structures biologiques sur ordinateur. Puis, entre 1960 et 1970 John Holland [24], sur la base des travaux précédents, développe les principes fondamentaux des algorithmes génétiques dans le cadre de l'optimisation mathématique. A cette époque, l'informatique n'avait pas encore connu de développement et ses travaux n'ont pas pu être appliqués sur des problèmes réels de grande taille. La parution en 1989 de l'ouvrage de référence écrit par D. E. Goldberg [53], qui décrit l'utilisation de ces algorithmes dans le cadre de résolution de problèmes concrets, a permis de mieux faire connaître ces derniers dans la communauté scientifique et a marqué le début d'un nouvel intérêt pour cette technique d'optimisation.

Autre part il existe plusieurs techniques d'optimisations appliquées dans le domaine de système de puissance pour l'optimisation énergétique et contrôle d'entre elles les essaims de particulaires cette dernier est une méthode d'optimisation stochastique qui est inspiré d'un comportement social des animaux évoluant en essaim.

Dans ce chapitre on va réaliser une étude comparative et application numérique entre deux techniques d'optimisation les algorithmes génétiques GA et essaims particulaires PSO pour la voir la fiabilité de technique d'optimisation proposée.

V.2. TECHNIQUES D'OPTIMISATIONS

La résolution d'un problème d'optimisation consiste à explorer un espace de recherche afin d'optimiser (maximiser ou minimiser) une fonction donnée (une fonction objective) sous certaines contraintes. La complexité du problème, en taille ou en structure, relative à l'espace de recherche et à la fonction à optimiser conduit à développer diverses méthodes. Ces méthodes peuvent être regroupées en deux catégories : les méthodes déterministes (classiques) et les méthodes non-déterministes (stochastiques).

V.2.1. LES METHODES DETERMINISTES :

Qualifiées de classiques (telles la méthode du gradient, les méthodes énumératives,…), elles n'utilisent aucun concept stochastique. Une méthode déterministe utilise donc toujours le même cheminement pour arriver à la solution, et nous pouvons donc déterminer à l'avance les étapes de la recherche. Ces méthodes sont limitées par leur "faible" espace de recherche. Elles requièrent des hypothèses sur la fonction objective à optimiser, telles que continuité et dérivabilité de la fonction en tout point du domaine des solutions. Elles consistent généralement à se focaliser sur un point unique de l'espace de recherche en le déplaçant au cours de temps dans le but de trouver un extremum. Ces méthodes sont généralement efficaces lorsque l'évaluation de la fonction est très rapide ou lorsque sa forme est connue *à priori*. Mais, lorsque la dimension du problème ou l'espace de recherche est grand, ces méthodes peuvent :

- avoir des temps de calcul déraisonnables ou
- boucler et revenir sans cesse au même point.

Enfin, un grand nombre de fonctions à optimiser ne sont pas dérivables et souvent même pas continues. Par conséquent, ces méthodes restent limitées à des problèmes très précis.

V.2.2. LES METHODES NON-DETERMINISTES :

Ces méthodes, qualifiées de stochastiques, sont bien adaptées aux problèmes importants et complexes (tels les problèmes discrets) ou même à des problèmes ayant des multifonctions objectives.

Dans cette famille de méthodes, on parle couramment d'heuristique et de métaheuristiques.

V.2.2.1. LES METHODES HEURISTIQUES ET METAHEURISTIQUE

Les méthodes heuristiques modernes sont un ensemble de techniques d'optimisation stochastiques inspirées de phénomènes naturels et biologiques. Ces techniques peuvent être classées en deux groupes : les méthodes à population de solutions connues sous le nom d'algorithmes évolutionnaires comme les algorithmes génétiques, les stratégies d'évolution, la programmation évolutionnaire ou les algorithmes à essaim de particulaires, et les méthodes à solution unique comme la recherche tabou ou le recuit simulé [54].

Une méthode métaheuristique consiste en une stratégie de choix pouvant piloter une ou plusieurs heuristiques de manière abstraite, sans faire appel à un problème spécifique. Les méthodes métaheuristiques sont ainsi des méthodes à population de solutions : à chaque itération, elles manipulent un ensemble de solutions en parallèle [55]. Ces méthodes sont aussi considérées comme des méthodes d'optimisation globale : elles visent la détermination de l'optimum global de la fonction objective du problème, en évitant le "piégeage" dans l'un de ses optima locaux. Elles comblent ainsi le handicap des méthodes classiques et des méthodes heuristiques en conduisant la recherche vers l'optimum global. En outre, ces méthodes font usage de l'expérience accumulée durant la recherche de l'optimum, pour mieux guider la suite du processus de recherche. Elles permettent ainsi d'explorer et d'exploiter l'espace de recherche plus efficacement.

- **Les Stratégies d'Evolution (Evolution Strategies)**

Les stratégies d'évolution (SE) ressemblent beaucoup aux algorithmes génétiques dans leur principe d'exécution. Les principales différences entre ces deux algorithmes sont : les SE opèrent directement sur des vecteurs de réelles ou d'entiers, alors que les AG classiques opèrent sur des chaînes de caractères binaires ; les AG reposent sur l'opérateur de croisement plus que sur l'opérateur de mutation pour explorer l'espace de recherche, alors que les SE utilisent la mutation comme opérateur dominant.

- **La Programmation Evolutionnaire (Evolutionary Programming)**

La méthode de programmation évolutionnaire (PE) est souvent confondue avec la méthode des stratégies d'évolution (bien qu'elles aient été créées indépendamment) du fait qu'elles ont pratiquement la même approche algorithmique. La raison fondamentale qui permet de distinguer entre ces deux algorithmes est le fait que la PE pure n'utilise pas d'opérateurs de croisement et repose uniquement sur la mutation.

- **La Recherche Tabou (Tabu Search)**

La recherche Tabou a été introduite par F. Glover [56] et a montré sa performance sur de nombreux problèmes d'optimisation. Elle n'a aucun caractère stochastique et utilise la notion de mémoire pour éviter de tomber dans un optimum local. Le principe de l'algorithme est le suivant : à chaque itération, le voisinage de la solution courante est examiné et la meilleure solution est sélectionnée. En appliquant ce principe, la méthode autorise de remonter vers des solutions qui semblent moins intéressantes mais qui ont peut être un meilleur voisinage. Pour éviter les phénomènes de cyclage entre deux solutions, la méthode a l'interdiction de visiter une solution récemment visitée. Pour cela, une liste taboue contenant les attributs des dernières solutions visitées est tenue à jour. Chaque nouvelle solution considérée enlève de cette liste la solution la plus anciennement visitée. Ainsi, la recherche de la solution suivante se fait dans le voisinage de la solution actuelle sans considérer les solutions appartenant à la liste taboue.

- **Le Recuit Simulé (Simulated Annealing)**

Cette méthode s'inspire du recuit des métaux en métallurgie : un métal refroidi trop vite présente de nombreux défauts microscopiques, c'est l'équivalent d'un optimum local pour un problème d'optimisation. Si on le refroidit lentement, les atomes se réarrangent, les défauts disparaissent, et le métal a alors une structure très ordonnée, équivalente à un optimum global. La méthode du recuit simulé, appliquée aux problèmes d'optimisation, considère une solution initiale et recherche dans son voisinage une autre solution de façon aléatoire. Au début de l'algorithme, un paramètre T, apparenté à la température, est déterminé et décroît tout au long de l'algorithme pour tendre vers 0. De la valeur de ce paramètre va dépendre la probabilité d'acceptation des solutions détériorantes (plus la température T est élevée, plus cette probabilité sera forte).

- **Les Algorithmes Génétiques (Genetic Algorithms)**

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes basées sur les mécanismes biologiques et simulent le processus d'évolution d'une population. A partir d'une population de N solutions du problème représentant des individus, on applique des opérateurs simulant les interventions sur le génome tel que le croisement (cross-over) ou la mutation pour arriver à une population de solutions de mieux en mieux adaptée au problème. Cette adaptation est évaluée grâce à une fonction coût (fitness function). La particularité de ces algorithmes est qu'ils n'opèrent pas directement sur les paramètres à optimiser mais plutôt sur des paramètres codés. Traditionnellement, les algorithmes génétiques utilisent un codage binaire sous forme de chaîne de caractères appelée chromosome par analogie à la génétique biologique.

- **Algorithme à Essaim de particulaires (Particle Swarm)**

Les algorithmes d'optimisation par essaim de particulaires ont été introduits en 1995 par Kennedy et Eberhart [57] comme une alternative aux algorithmes génétiques standards. Ces algorithmes sont inspirés des essaims d'insectes (ou des bancs de poissons ou des nuées d'oiseaux) et de leurs mouvements coordonnés. En effet, tout comme ces animaux se déplacent en groupe pour trouver de la nourriture ou éviter les prédateurs, les algorithmes à essaim de particulaires recherchent des solutions pour un problème d'optimisation. Les individus de l'algorithme sont appelés particules et la population est appelée essaim. Dans cet algorithme, une particule décide de son prochain mouvement en fonction de sa propre expérience, qui est dans ce cas la mémoire de la meilleure position qu'elle a rencontré, et en fonction de son meilleur voisin. Les nouvelles vitesses et direction de la particule seront définies en fonction de trois tendances : la propension à suivre son propre chemin, sa tendance à revenir vers sa meilleure position atteinte et sa tendance à aller vers son meilleur voisin.

V.3 ALGORITHMES GENETIQUES

V.3.1 PRINCIPE ET DEFINITIONS

D'une manière globale, un algorithme génétique manipule les solutions potentielles d'un problème donné afin d'atteindre la solution optimale ou une solution jugée satisfaisante.

L'algorithme est organisé en plusieurs étapes et fonctionne de manière itérative. La figure 1 représente l'algorithme génétique le plus simple introduit par Holland [24]. Celui ci met en œuvre différents opérateurs qui seront décrits dans la section suivante. Mais avant, il est nécessaire de définir quelques termes de base rencontrés dans la littérature :

- **Individu** : solution potentielle du problème.
- **Chromosome** : solution potentielle du problème sous une forme codée, c.-à-d. une suite (chaîne) de caractères.
- **Population** : ensemble fini d'individus (de solutions).
- **Gène** : partie élémentaire (caractère) non divisible d'un chromosome.

- **Fitness** : terme anglo-saxon qui désigne la fonction d'évaluation d'un individu. Cette fonction est liée à la fonction à optimiser et permet de définir le degré de performance d'un individu (donc d'une solution) vis-à-vis du problème.

V.3.2 DESCRIPTION DES ALGORITHMES GENETIQUE

Dans ce qui suit, nous allons décrire plus en détail les différentes étapes d'algorithme génétique de la figure V.1

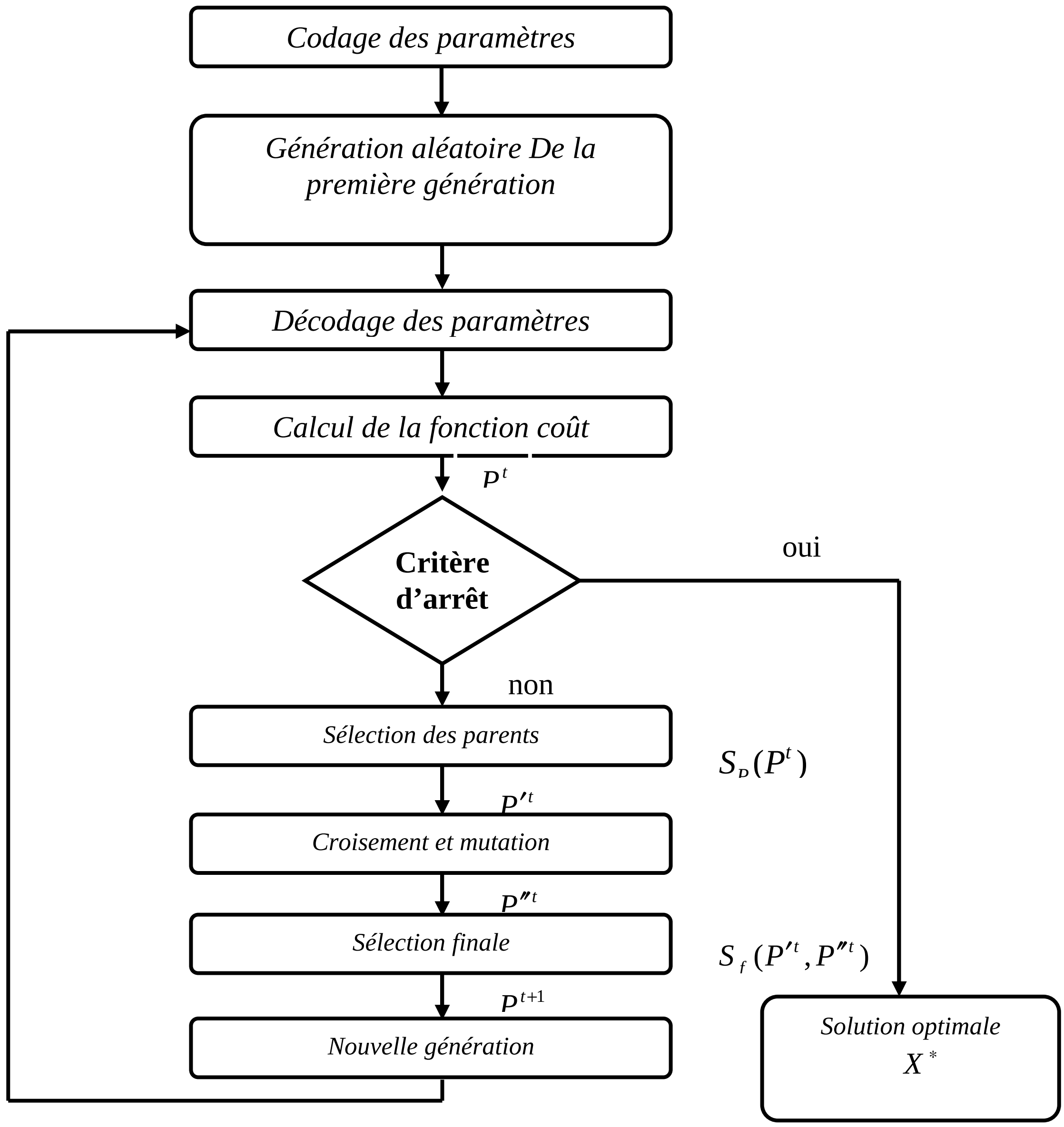


Figure V.1 Organigramme général de l'AG

V.3.2 .1.CODAGE ET INITIALISATION.

La première étape de la construction d'un AG est le choix du type de codage des paramètres du problème. La façon de coder les solutions potentielles est un facteur déterminant dans le succès d'un AG. Ainsi, plusieurs types de codage sont possibles dans la littérature, tels les codages binaires, Gray, réel,… . Le codage le plus populaire dans la représentation d'un AG est le codage binaire {0,1} ; les solutions sont codées selon des chaînes de bits de longueur fixe [58] La plupart des théories liées aux AGs étaient élaborées en se basant sur le concept de codage binaire proposé par J. Holland et son groupe [24] Les opérateurs de l'AG, croisement et mutation, sont en effet plus faciles à mettre en œuvre avec ce type de codage. En outre, le codage binaire représente la méthode la plus facile et la mieux adaptée de coder des éléments qu'ils soient réels, entiers, booléens, … [24] On parle dans ce cas de *génotype* en ce qui concerne la représentation binaire d'un individu et de *phénotype* pour ce qui est de sa valeur réelle correspondante dans l'espace de recherche.

Une fois le choix du type de codage déterminé, une population initiale doit être créée pour le départ de l'AG. La population initiale a pour but de donner naissance à des générations successives, mutées et hybridées à partir de leurs parents. Le choix de la population initiale influence fortement la rapidité et l'efficacité de l'AG. Si la position de l'optimum dans l'espace de recherche est totalement inconnue, il est naturel de générer aléatoirement des individus en faisant des tirages uniformes dans chacun des domaines associés aux composantes de l'espace de recherche, en veillant évidemment à ce que les individus produits respectent les contraintes. Si par contre, des informations *à priori* sur le problème sont disponibles, il parait naturel de générer les individus dans un sous-domaine particulier afin d'accélérer la convergence. Habituellement, cette population initiale est générée d'une manière aléatoire et directement dans sa représentation codée.

Par exemple pour créer une population binaire de *Nind* individus dans lesquels chaque chromosome (individu) est représenté par *Ngen* gènes, il suffit simplement d'effectuer *Nind* × *Ngen* tirages de nombres aléatoires distribués uniformément sur l'ensemble {0,1}, [60]

La seconde étape dans la construction de l'AG est le calcul de la performance (*fitness*) de chaque individu faisant partie de la population. Pour ce faire nous devons en premier lieu décoder les chromosomes (précisément les gènes de chaque chromosome) en les convertissant en leurs valeurs réelles (numériques) [61]

Considérons un problème d'optimisation de n variables à optimiser, où l'espace de recherche de chaque variable xj se trouve entre une limite inférieure $xmin,j$ et une limite supérieure $xmax,j$: $D = [xmin,j\ , xmax,j\ ]$ avec $j = 1, 2,..., n$. On associe des points du domaine D à Sj chaînes de bits (Sj gènes) de longueur lS. Ainsi, chaque chaîne Sj sera donc composée de lS éléments binaires : $Sj = (si)\ j\ ;\ i = 1, 2,..., lS$, où $\in \{0,1\}\ i\ s$. Toute chaîne binaire Sj peut être décodée en une valeur réelle xj en utilisant les deux règles suivantes [61]:

- dans la première, nous convertissons les valeurs binaires de chaque gène, en valeurs de basedécimale selon la règle suivante :

$$\hat{x}_j = \sum_{i=1}^{ls} (S_i)_j .2^{(l_s-1)} \qquad \text{(V.1)}$$

- ensuite, nous calculons les valeurs réelles correspondantes appartenant à l'espace de recherche donné, par la règle suivante :

$$fd(x) = x_j = x_{\min,\ j} + \hat{x}_j .\frac{x_{\max,\ j} - x_{\min,\ j}}{2^{ls} - 1} \qquad \text{(V.2)}$$

Par exemple, supposons que nous cherchons à maximiser une fonction *f* en fonction d'une variable réelle *x* appartenant à l'espace de recherche *D* = [-1, 2]. Soit *S* une chaîne binaire représentant une solution possible avec une longueur *lS* = 22 :
S = {1,1,0,0,1,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1}

En appliquant les relations (1) et (2), nous obtenons respectivement la valeur entière de *x* (En base décimale) et sa valeur réelle :

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^{ls=22} S_i .2^{l_S - i} = 1\times 2^{21} + 1\times 2^{20} + 0\times 2^{19} + ...+ 1\times 2^{0} = 3311359$$

$$x = -1 + 3311359.\frac{2-(-1)}{2^{22}-1} \Rightarrow x = 1.368469 \in [-1{,}2]$$

Après avoir générer la population initiale, nous devons attribuer à chacun des individus une note qui correspond à son adaptation au problème. Cette adaptation est la mesure de la fonction de performance associée à la fonction objective du problème. Les notions de ces deux fonctions font l'objet du paragraphe suivant.

V.3.2 .2.FONCTIONS OBJECTIVE ET DE PERFORMANCE.

a. Fonction objective.

A l'inverse des méthodes déterministes d'optimisation, les algorithmes génétiques ne requièrent pas d'hypothèse particulière sur la régularité de la fonction à optimiser (*objective*). Ainsi, les algorithmes génétiques n'utilisent pas les dérivées successives de la fonction objective, ce qui rend leurs domaines d'application très vaste. Aucune hypothèse sur la continuité n'est également requise. Le peu d'hypothèses requises permet de traiter des problèmes très complexes. La fonction objective peut être le résultat d'une simulation ou d'un modèle mathématique.

Généralement, la fonction objective, d'un problème quelconque d'optimisation à *K* contraintes (dit problème contraint), peut être formulée comme suit :

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

Avec

$$D_K = \begin{cases} X \in D \\ H_k(X) \le b_k \\ \forall k : k = 1,....., K \\ b_k \in \Re \quad \mathrm{H_k} : D \mapsto \Re \end{cases} \tag{V.3}$$

Fobj(*X*) : la fonction objective du problème.

Hk : la fonction de contrainte.

D : l'ensemble des solutions potentielles du problème.

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

La fonction objective peut être formulée d'un ensemble de fonctions de dimension *n*. Elle est donnée d'une façon générale comme suit : $Fobj(X) = \{f1, f2, \text{L}, fi, \text{L}, fn\}$. Lorsque $i = 1$ la fonction est dite monoobjective, autrement elle est multiobjective. Contrairement à l'optimisation monoobjective, la solution d'un problème d'optimisation multiobjective est rarement unique. Elle est constituée de différentes solutions, représentant l'*ensemble des meilleurs compromis* vis-à-vis des différents objectives du problème.

Les méthodes existantes pour formuler une fonction multiobjective sont diverses. Nous allons expliquer brièvement ces méthodes qui peuvent être classées en trois grandes familles [63] :

1- **Les méthodes *à priori*.** Dans ces méthodes, on définit, *à priori*, le compromis désiré entre les objectives avant de lancer la méthode de résolution. Nous trouvons dans cette famille la plupart des méthodes scalaires telles la méthode de pondération, la méthode des objectives bornes, la méthode du critère globale,… . Le principe de ces méthodes se base sur la transformation du problème multiobjective en un problème monoobjective, en pondérant l'ensemble des fonctions objective initiales.

2- **Les méthodes progressives**. Dans ces méthodes, on affine le choix du compromis entre les objectives au cours de l'optimisation. Contrairement aux méthodes *à priori*, ces méthodes ont l'inconvénient de monopoliser l'attention de l'utilisateur tout au long du processus d'optimisation. La méthode lexicographique, par exemple, consiste à minimiser séquentiellement les différents objectives du problème. L'ordre de minimisation est fixé en fonction des résultats séquentiels obtenus. La méthode progresse alors par transformations successives du problème d'optimisation.

3- **Les méthodes *a posteriori*.** Dans ces méthodes, il n'est plus nécessaire de modéliser les préférences entre les objectives avant l'optimisation. Ces méthodes se contentent de produire un ensemble de solutions plutôt qu'un unique compromis. Nous pouvons ensuite choisir *a posteriori* une solution du compromis.

b. Fonction de performance.

Chaque chromosome apporte une solution potentielle au problème à optimiser. Néanmoins, ces solutions n'ont pas toutes le même degré de pertinence. C'est à la fonction de performance (*fitness*) de mesurer cette efficacité pour permettre à l'AG de faire évoluer la population dans un sens bénéfique en cherchant la solution meilleure. Autrement dit, la fonction de performance, $fp(X)$, doit pouvoir attribuer à chaque individu un indicateur représentant sa pertinence pour le problème que nous cherchons à résoudre. La performance sera donc donnée par une fonction à valeurs positives réelles. La construction d'une fonction de performance appropriée est très importante pour obtenir un bon fonctionnement de l'AG.

Dans le cas du codage binaire, la fonction de performance doit affecter une valeur positive au codage binaire correspondant (*phénotype*) à chaque chaîne binaire (*génotype*). Ainsi, elle permet de déterminer l'efficacité de la solution présentée par le génotype pour résoudre le problème. La fonction de performance $f_p(X)$ est généralement dérivée de la fonction objective $Fobj(X)$ du problème. Elle est généralement donnée par la relation suivante :

$$f_p(X) = g(Fobj(X)) \tag{V.4}$$

Où : g : représente la transformation de la fonction objective en performance relative. Les AGs sont naturellement organisés pour résoudre les problèmes de maximisation (c.-à-d. trouver les valeurs positives maximales de la fonction objective). Ainsi, pour les problèmes de maximisation, la fonction de performance peut être considérée comme la fonction objective même. Le but de l'AG est alors simplement de trouver la chaîne binaire qui maximise la fonction de performance :

$$\max(fp(X)) = \min(Fobj(X)) \tag{V.5}$$

Dans le cas de problèmes de minimisation, le problème doit être modifié de sorte qu'il soit équivalent à celui de maximisation. Ainsi, il nous faudra modifier la fonction objective de telle sorte que la fonction de performance soit maximale :

$$\max(fp(X)) = -\min(Fobj(X)) \tag{V.6}$$

$$\max(fp(X)) = 1/\min(Fobj(X)) \tag{V.7}$$

$$\max(fp(X)) = \max(C - Fobj(X)) \; ; (C : \text{une grande constante positive}) \tag{V.8}$$

V.3.2 .3.SELECTION

La sélection, dans les algorithmes génétiques, joue le même rôle que la sélection naturelle. Elle suit le principe Darwinien sur la survie des individus les plus adaptés [64]. Elle décide, en quelque sorte, quels sont les individus qui survivent et quels sont ceux qui disparaissent en se basant sur leurs fonctions fitness. Une population dite intermédiaire est alors formée par les individus sélectionnés.

Il existe plusieurs méthodes de sélection [65]. Nous ne citerons que deux des plus connues :

a. Méthode de la roulette de loterie

C'est une méthode classique de sélection qui consiste à dupliquer chaque individu de la population proportionnellement à sa fonction d'adaptation. Son principe est d'associer à chaque individu une portion d'une roue dont la surface dépend uniquement de sa valeur fitness [66]. Un individu présentant une valeur fitness nulle ne sera pas représenté sur la roue, il n'aura donc aucune chance d'être sélectionné. Les individus ayant une grande valeur fitness auront une grosse portion et auront, par conséquent, plus de chance d'être sélectionnés.

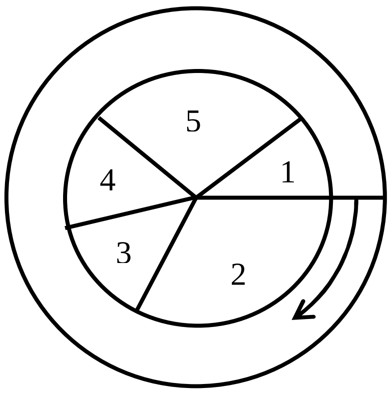


Figure V.2 Sélection par la méthode de la roue de loterie.

Pour réaliser la sélection, il suffit de faire tourner la roue autant de fois que le nombre d'individus. La figure V.2 illustre un exemple de roue de loterie. Les numéros de 1 à 5 représentent les numéros des individus.

b. Méthode du tournoi

Le principe de cette méthode est de tirer aléatoirement un groupe de k individus parmi la population, et de sélectionner le meilleur d'entre eux. Ce processus est répété jusqu'à ce que le nombre d'individus de la population intermédiaire soit égal au nombre total d'individus formant la population initiale. Nous avons trouvé dans la littérature deux versions différentes de cette méthode, notamment, au niveau de la façon dont les groupes sont formés. Selon

[67], la population est divisée en groupes de k individus. Ensuite, on sélectionne le meilleur de chaque groupe. Il faut k itérations pour remplir la population intermédiaire parce qu'à chaque fois m individus sont sélectionnés où m est défini par :

$$m = \frac{\text{Taille de la population}}{\text{k}} \qquad \text{(V.9)}$$

Selon [64 et 67], la procédure est la suivante : on tire k fois un individu avec replacement (chaque tirage inclut tous les individus y compris ceux déjà sélectionnés). Ensuite, on sélectionne celui qui présente la plus grande valeur fitness pour le placer dans la population intermédiaire. Si N est le nombre total d'individus formant la population alors il faut N itérations pour remplir la population intermédiaire. La seule différence que nous avons pu constater, c'est que la deuxième version ne fait pas obligatoirement participer tous les individus, et par conséquent, elle n'assure pas que le meilleur individu soit présent dans la population intermédiaire.

V.3.2 .4.RECOMBINAISON

La recombinaison agie directement sur la structure des chromosomes en modifiant leurs gènes pour obtenir les nouveaux chromosomes d'une nouvelle population. On dira alors, qu'une nouvelle génération 1 d'individus est née. Lors du passage d'une génération à l'autre, le meilleur individu est supposé évoluer afin d'atteindre l'optimum recherché correspondant à une très bonne solution à notre problème. Il existe deux catégories d'opérateurs de recombinaison : l'opérateur de croisement et l'opérateur de mutation.

V.3.2 .5.CROISEMENT

Le croisement permet à un couple d'individus, parmi ceux qui sont sélectionnés, d'échanger leurs informations génétiques c.-à-d. leurs gènes. Son principe est simple : deux individus sont pris au hasard et sont appelés parents, ensuite, on tire aléatoirement un nombre P dans l'intervalle [0, 1] qu'on compare à une certaine probabilité de croisement Pc.

- Si P > Pc le croisement n'aura pas lieu et les parents sont recopiés dans la nouvelle génération.
- Si P ≤ Pc le croisement se produit et les chromosomes des parents sont croisés pour donner deux enfants qui remplaceront leurs parents dans la nouvelle génération.

Il existe différents types de croisement, les plus connus sont le croisement multipoints (figure V.3) et le croisement uniforme (figure V.4).

Pour le croisement multipoints , p positions de croisement, avec p ∈ [1 ,...,2,*l*-1] où *l* représente la taille du chromosome, sont choisies aléatoirement pour chaque couple. Ensuite, les gènes entre deux points de croisement successifs sont échangés entre les deux parents produisant deux nouveaux individus appelés enfants. Les valeurs typiques de p sont : 1 (croisement à 1 point) et 2 (croisement à 2 points).

Le croisement uniforme est une généralisation du croisement multipoints. Ici, chaque gène du chromosome peut constituer un point de croisement. Un chromosome nommé masque, de taille identique à celle des parents, est créé aléatoirement et la valeur des gènes du masque indique de quel parent l'enfant recevra-t-il son gène [61.].

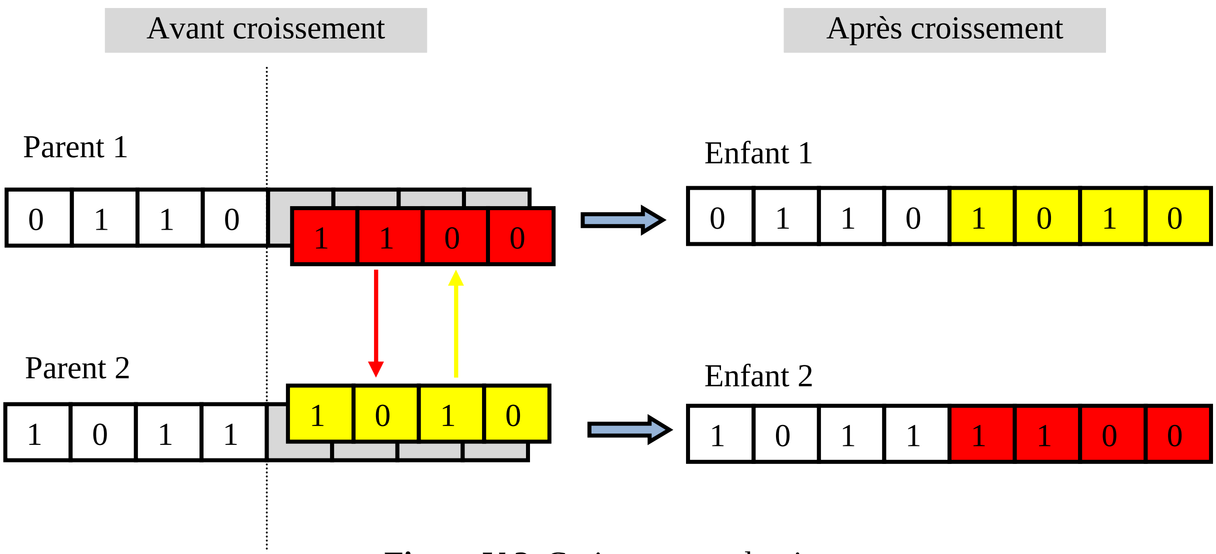


Figure V.3 Croisement seul point

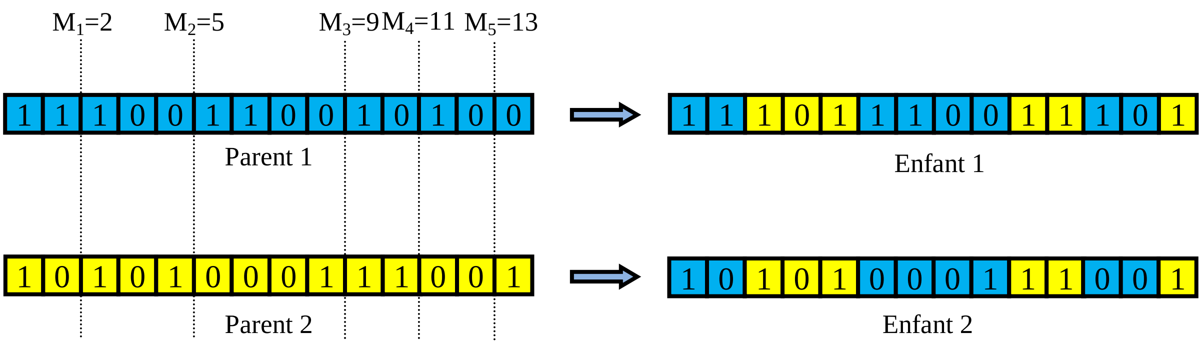


Figure V.4 Croisement multipoints (m = 5).

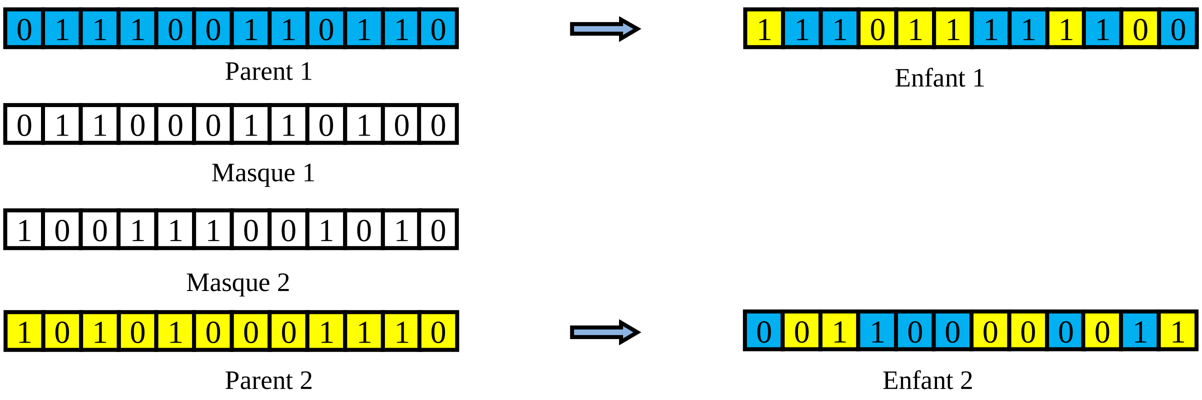


Figure V.5. Croisement uniforme.

V.3.2 .6.Mutation

L'opérateur de mutation permet d'explorer de nouveaux points dans l'espace de recherche et il assure la possibilité de quitter les optimums locaux. La mutation s'applique sur chaque gène de chaque individu avec une probabilité de mutation Pm en suivant le même principe que pour le croisement.

- Si P > Pm la mutation n'aura pas lieu et le gène reste tel qu'il est.
- Si P ≤ Pm la mutation se produit, et le gène sera remplacé par un autre gène tiré aléatoirement parmi les différentes valeurs possibles. Dans le cas d'un codage binaire, cela revient tout simplement à remplacer un 0 par un 1 et vice versa, comme le montre la figure V.6.

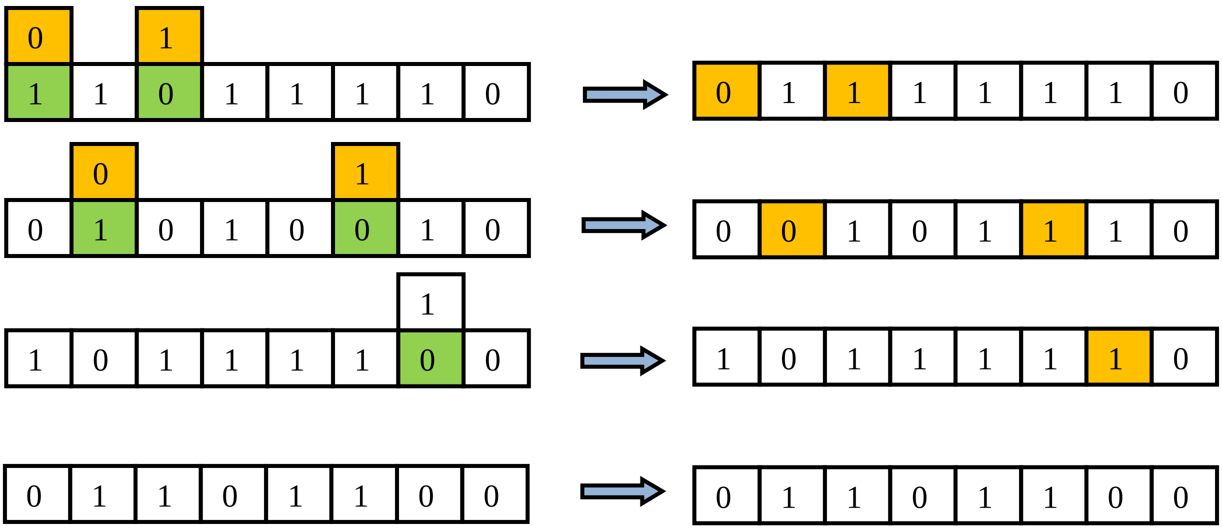


Figure V.6 Mutation dans le cas d'un codage binaire.

Contrairement à l'opérateur de croisement, la mutation est souvent considérée comme secondaire ayant pour rôle de restaurer des informations génétiques perdues [68 et 69]. Par exemple, si tous les chromosomes d'une population convergent vers un 0 à un emplacement donné, et que la solution optimale possède un 1 à cet emplacement, l'opérateur de croisement ne pourra pas faire apparaître le 1, par contre il est possible que l'opérateur de mutation le fasse.

V.3.2 .7.CRITERE D'ARRET

Comme dans tout algorithme itératif, il faut définir un critère d'arrêt. Celui-ci peut être formulé de différentes façons parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Arrêt de l'algorithme lorsque le résultat atteint une solution satisfaisante.
- Arrêt s'il n'y a pas d'amélioration pendant un certain nombre de générations.
- Arrêt si un certain nombre de générations est dépassé.

V.3.3.REGLAGE DES PARAMETRES D'UN AG

L'élaboration d'un algorithme génétique nécessite le réglage de certains paramètres. Ce réglage a une influence sur la convergence de l'algorithme et les résultats obtenus. Cependant, il n'existe pas de règle spécifique pour ajuster les paramètres d'un AG, et ils sont souvent choisis de manière empirique. Quelques remarques sont alors à soulever :

- Probabilité de croisement : la probabilité de croisement a une influence considérable sur la vitesse de convergence d'un algorithme génétique. Plus elle est grande et plus elle favorise la recombinaison des individus tout en favorisant de tomber dans un optimum local. Les valeurs classiques pour ce paramètre varient de 0 à 1.
- Probabilité de mutation : elle doit être assez faible par rapport à celle du croisement de manière à ne pas perturber l'évolution de l'algorithme. Une valeur élevée transformera l'algorithme en une recherche aléatoire, alors qu'une valeur très faible rendra impossible l'extraction des optimums locaux. Les valeurs classiques pour ce paramètre varient de 0.001 à 0.2.
- Taille de la population : augmenter la taille de la population permet d'augmenter sa diversité et réduit la probabilité d'une convergence prématurée vers un optimum local, mais en même temps elle augmente le temps nécessaire pour converger vers les régions optimales de l'espace de recherche [70].

V.3.4. EXEMPLES D'APPLICATION NUMERIQUES

Un exemple d'application simple semble être la meilleure façon de comprendre les concepts de base des algorithmes génétiques. Nous avons vu précédemment, qu'implémenter un AG revient à évaluer des individus et à manipuler des chromosomes. Dans ce qui suit, nous allons suivre étape par étape le déroulement d'un AG, à travers trois exemples.

Exemple 1

Cet exemple est un problème d'optimisation qui consiste à trouver le maximum d'une fonction à une variable réelle. Le problème peut être formulé de la manière suivante :

$$\begin{aligned} &\text{Maximiser} \quad F_{obj} = 4\sin(x) + x \\ &\text{Sujet à} \quad 0 > x \geq 30 \end{aligned} \qquad \text{(V.10)}$$

L'allure de la fonction objective est représentée sur la figure V.8. Cette fonction a été choisie parce qu'elle présente plusieurs optimums locaux. Nous allons montrer que les algorithmes génétiques, de part leur propriété de recherche simultanée, peuvent surmonter ces difficultés avec une très grande simplicité.

- **Codage, initialisation et évaluation**

Nous avons choisi un codage binaire sur 8 bits. L'espace de recherche est, cette fois, discrétisé en valeurs discrètes. Autrement dit, nous recherchons parmi 256 valeurs possibles de x, la valeur qui maximise la fonction objective dans l'intervalle [0,30]. Le chromosome lié à x = 0 est {00000000} et le chromosome lié à x = 30 est {11111111}. Toute autre combinaison, décodée, donne une valeur de x dans l'espace de recherche considéré.

Le nombre d'individus étant de 10, chacun est évalué à travers la fonction objective qui représente la fonction fitness du problème. La figure 2.13 montre les individus de la population initiale après évaluation.

- **Sélection**

Nous avons utilisé la méthode du tournoi [71], avec k = 2 individus/groupe. Ainsi, il faut 2 itérations pour compléter la procédure de sélection. Chaque itération permettra de sélectionner m = 5 individus qui est aussi le nombre de groupes. D'abord, des groupes de 2 individus sont formés aléatoirement. Ensuite, leurs fonctions fitness sont comparées, et le meilleur d'entre eux sera placé dans la population intermédiaire. A la fin de la première itération, la population intermédiaire sera à moitié remplie. Cette procédure est répétée lors de la deuxième itération afin de terminer le remplissage de la population.

- **Croisement**

Pour cet exemple, nous avons utilisé un croisement à deux points avec une probabilité de croisement Pc = 0.7. C'est la même procédure décrite dans l'exemple précédent, sauf qu'ici, un couple d'individus sera deux fois croisé.

- **Mutation**

La mutation est beaucoup plus facile à implémenter, car il suffit de générer autant de valeurs aléatoires entre 0 et 1 que le nombre global de gènes formant la population. Chaque valeur sera alors comparée à la probabilité de mutation Pm pour déterminer si le gène subit ou non une mutation. Dans cet exemple nous avons utilisé une probabilité de mutation P m = 0.2.

Résumé des paramètres utilisés

- codage binaire sur 8 bits.
- l'intervalle de recherche [0,30].
- sélection utilisée la méthode de la roulette de loterie.
- croisement simple (à un point) avec une probabilité de croisement Pc = 0.7.
- probabilité de mutation Pm = 0.2.

Pour effectuer et visualiser les différentes étapes de l'algorithme génétique on a créé et élaboré un GUI (**G**raphical **U**ser **I**nterfaces) sous logiciel MATLAB, ce dernier nous permettant de calculer et visualiser les opérations d'AG (Codage et initialisation, Evaluation, Sélection, Croisement et Mutation) avec des exemples d'application numériques.

La solution du problème représenté dans les figures suivantes :

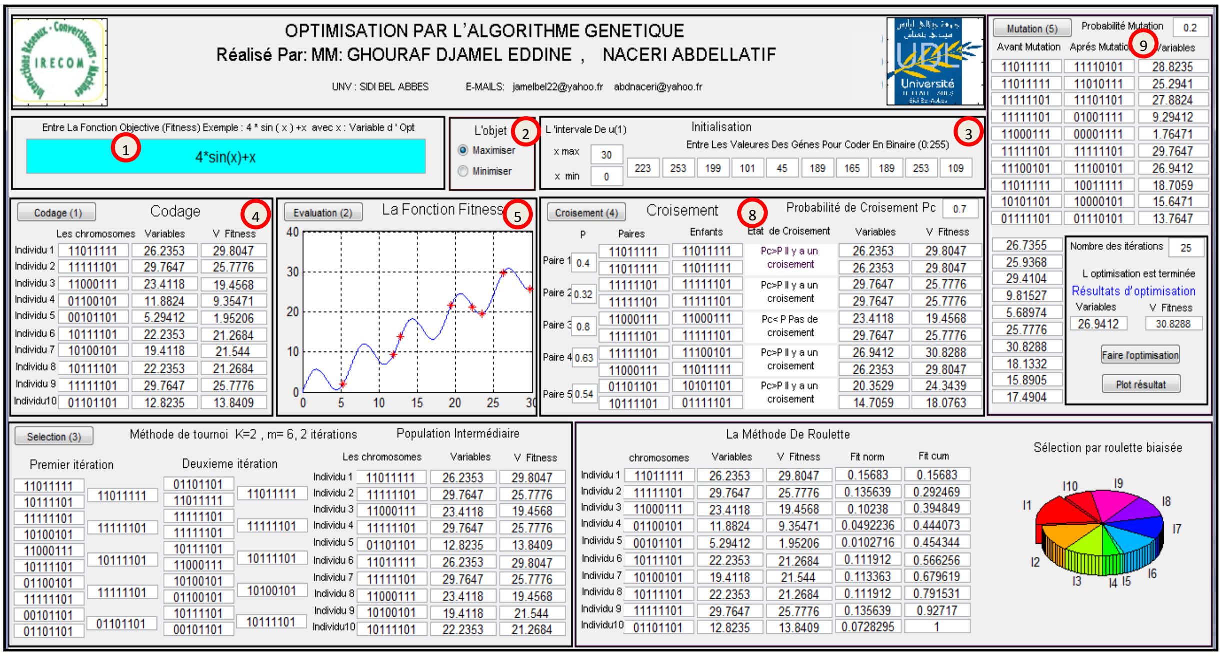


Figure V.7 Applications numérique de l'algorithme génétique sous GUI-MATLAB

1 La fonction optimisée.

2 La fonction objective

3 Les paramètres d'initialisation.

4 L'étape de codage.

5 Visualisation de la fonction optimisée.

6 L'étape de sélection par la méthode de tournoi.

7 L'étape de sélection par la méthode de roulette de loterie.

8 L'étape de croisement.

9 L'étape de mutation.

10 Résulta d'optimisation.

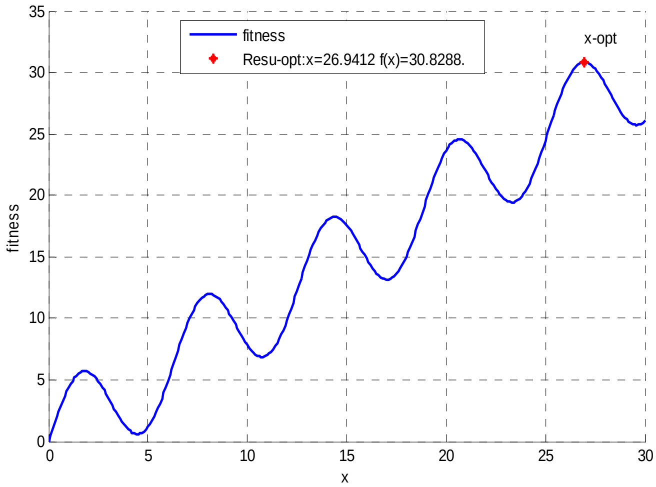


Figure V.8 Résultat d'optimisation par AG

La solution du problème : x= 26.9412, f(x)= 30.8288.

Exemple 2

Dans deuxième exemple, nous considérons le cas d'une fonction multivariable. La fonction à optimiser se présente sous la forme suivante :

Maximiser

$$F_{obj}(x(1),x(2)) = (1-x(1))^2 \exp(-x(1)^2 - (x(2)+1)^2) - (x(1)-x(1)^3 - x(2)^5)\exp(-x(1)^2 - x(2)^2) \qquad \text{(V.11)}$$

Objet $3 > x(1) \geq -3$

$3 > x(2) \geq -3$

Dans ce cas, l'espace de recherche est une surface sur laquelle nous devons chercher une combinaison optimale d'un x et un y, qui maximise la fonction objective. Cette surface est représentée dans le graphique 3D de la figure V.9.

- **Codage, initialisation et évaluation**

Le principe du codage des paramètres d'un problème multivariable reste le même que pour un problème mono variable. Dans notre cas, chaque chromosome résulte d'une association de deux sous-chromosomes, l'un lié à la variable x et l'autre à la variable y. Nous avons utilisé un codage sur 8 bits, mais comme nous avons 2 paramètres, la taille du chromosome sera d 16 bits.

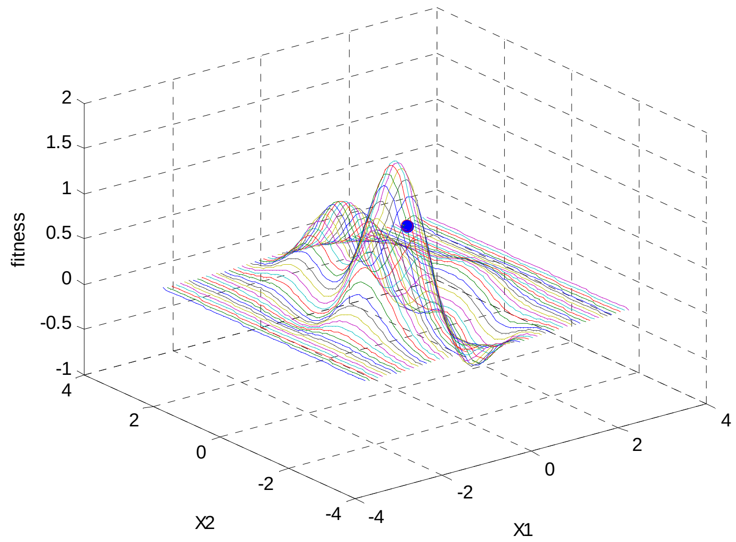


Figure V.9 Représentation de la fonction objective.

- **Sélection, croisement et mutation**

Les méthodes de sélection et de mutation (Pm = 0. 3) utilisées sont les mêmes que dans l'exemple précédent, elles ne seront donc pas décrites ici. Pour le croisement, nous avons utilisé un croisement uniforme avec une probabilité de croisement Pc = 0.7. Des couples d'individus sont formés aléatoirement, puis pour chaque couple un nombre aléatoire est généré indiquant si le croisement s'effectue ou pas. Pour les couples devant être croisés, un chromosome masque est créé aléatoirement. Chaque bit du masque indiquera de qui le chromosome enfant recevra-t-il son gène. Si le bit est de valeur 1, l'enfant (1) recevra son gène du parent (1) et l'enfant (2) recevra son gène du parent (2). Si le bit est de valeur 0, l'enfant (1) recevra son gène du parent (2) et l'enfant (2) recevra son gène du parent (1).

Résumé des paramètres utilisés

- codage binaire sur 8 bits.
- l'intervalle de recherche X1 ϵ [-3,3], X2 ϵ [-3,3] ;
- sélection utilisée la méthode de la roulette de loterie.
- croisement simple (à un point) avec une probabilité de croisement Pc = 0.7.
- probabilité de mutation Pm = 0. 3.

Pour effectuer et visualiser les différentes étapes de l'algorithme génétique on a créé et élaboré un GUI (**G**raphical **U**ser **I**nterfaces) sous logiciel MATLAB, ce dernier permet de calculer et visualiser les opérations d'AG (Codage et initialisation, Evaluation, Sélection, Croisement et Mutation) et visualiser la solution du problème graphiquement figure .10 ,11 et12

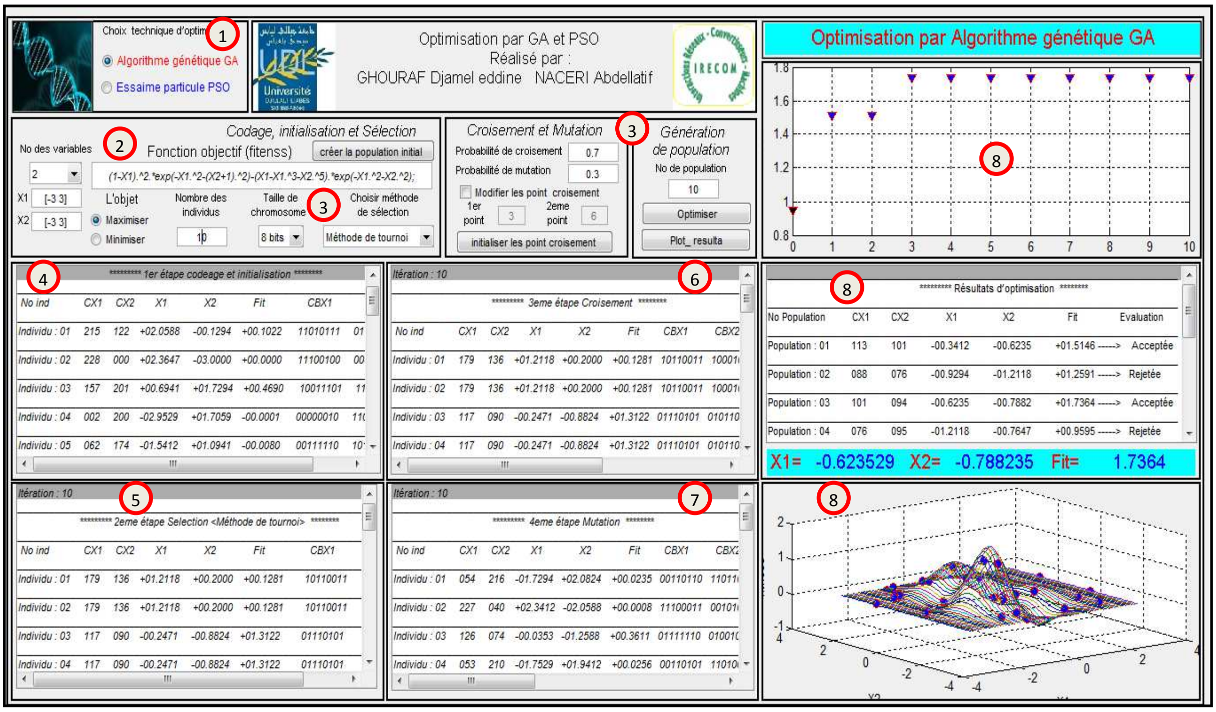


Figure V.10 interface GUI d'optimisation avancée développé sous MATLAB

1 Choix de techniques d'optimisations (GA ou PSO)
2 La fonction objective
3 Les paramètres d'optimisation.
4 L'étape de codage.
5 L'étape de sélection.
6 L'étape de croisement.
7 L'étape de mutation.
8 Résultats d'optimisation.

*********** 1^er^ étape codage et initialisation ***********

No Individu	CX1	CX2	X1	X2	Fit	CBX1	CBX2
Individu : 01	215	122	+02.0588	- 00.1294	+00.1022	11010111	01111010
Individu : 02	228	000	+02.3647	- 03.0000	+00.0000	11100100	00000000
Individu : 03	157	201	+00.6941	+01.7294	+00.4690	10011101	11001001
Individu : 04	002	200	- 02.9529	+01.7059	- 00.0001	00000010	11001000
Individu : 05	062	174	- 01.5412	+01.0941	- 00.0080	00111110	10101110
Individu : 06	143	158	+00.3647	+00.7176	- 00.0473	10001111	10011110
Individu : 07	111	009	- 00.3882	- 02.7882	+00.0069	01101111	00001001
Individu : 08	215	157	+02.0588	+00.6941	+00.0618	11010111	10011101
Individu : 09	009	057	- 02.7882	- 01.6588	+00.0031	00001001	00111001
Individu : 10	252	148	+02.9294	+00.4824	+00.0034	11111100	10010100

*********** 2eme étape Sélection ***********

No Individu	CX1	CX2	X1	X2	Fit	CBX1	CBX2

Individu : 01	179	136	+01.2118	+00.2000	+00.1281	10110011	10001000
Individu : 02	179	136	+01.2118	+00.2000	+00.1281	10110011	10001000
Individu : 03	117	090	-00.2471	-00.8824	+01.3122	01110101	01011010
Individu : 04	117	090	-00.2471	-00.8824	+01.3122	01110101	01011010
Individu : 05	091	110	-00.8588	-00.4118	+01.2554	01011011	01101110
Individu : 06	070	198	-01.3529	+01.6588	+00.1178	01000110	11000110
Individu : 07	234	101	+02.5059	-00.6235	+00.0204	11101010	01100101
Individu : 08	234	101	+02.5059	-00.6235	+00.0204	11101010	01100101
Individu : 09	105	079	-00.5294	-01.1412	+01.4132	01101001	01001111
Individu : 10	105	079	-00.5294	-01.1412	+01.4132	01101001	01001111

*********** 3eme étape Croisement **********

No ind	CX1	CX2	X1	X2	Fit	CBX1	CBX2		Etat de croisement
Ind : 01	179	136	+01.2118	+00.2000	+00.1281	10110011	10001000	0.084	Pc < PC: Il y a un croisement
Ind: 02	179	136	+01.2118	+00.2000	+00.1281	10110011	10001000	0.084	Pc < PC: Il y a un croisement
Ind: 03	117	090	-00.2471	-00.8824	+01.3122	01110101	01011010	0.145	Pc < PC: Il y a un croisement
Ind: 04	117	090	-00.2471	-00.8824	+01.3122	01110101	01011010	0.145	Pc < PC: Il y a un croisement
Ind: 05	091	110	-00.8588	-00.4118	+01.2554	01011011	01101110	0.814	Pc > PC: pas de croisement...
Ind: 06	070	198	-01.3529	+01.6588	+00.1178	01000110	11000110	0.814	Pc > PC: pas de croisement...
Ind: 07	234	101	+02.5059	-00.6235	+00.0204	11101010	01100101	0.845	Pc > PC: pas de croisement...
Ind: 08	234	101	+02.5059	-00.6235	+00.0204	11101010	01100101	0.845	Pc > PC: pas de croisement...
Ind: 09	105	079	-00.5294	-01.1412	+01.4132	01101001	01001111	0.639	Pc < PC: Il y a un croisement
Ind: 10	105	079	-00.5294	-01.1412	+01.4132	01101001	01001111	0.639	Pc < PC: Il y a un croisement

*********** 4eme étape Mutation **********

Probabilités de mutation utilisées

0.015+0.409+0.550+0.402+0.394+0.235+0.507+0.015+ 0.515+0.219+0.830+0.056+0.750+0.771+0.764+0.832
0.762+0.039+0.751+0.176+0.803+0.910+0.382+0.368+ 0.120+0.997+0.262+0.621+0.943+0.477+0.676+0.878
0.640+0.440+0.688+0.554+0.001+0.718+0.215+0.292+ 0.683+0.767+0.308+0.020+0.541+0.989+0.726+0.573
0.474+0.125+0.488+0.336+0.552+0.888+0.574+0.341+ 0.121+0.307+0.723+0.399+0.285+0.436+0.493+0.858
0.628+0.383+0.078+0.919+0.326+0.312+0.090+0.663+ 0.652+0.555+0.631+0.872+0.161+0.965+0.600+0.303
0.422+0.072+0.978+0.598+0.516+0.635+0.731+0.429+ 0.501+0.608+0.987+0.858+0.691+0.114+0.387+0.472
0.391+0.211+0.737+0.046+0.198+0.146+0.887+0.512+ 0.779+0.307+0.385+0.899+0.124+0.947+0.854+0.521
0.165+0.749+0.926+0.484+0.837+0.288+0.320+0.105+ 0.407+0.864+0.966+0.086+0.505+0.357+0.520+0.365
0.499+0.212+0.760+0.140+0.074+0.623+0.715+0.808+ 0.229+0.075+0.338+0.117+0.068+0.212+0.701+0.104
0.535+0.082+0.612+0.008+0.906+0.314+0.326+0.308+ 0.107+0.596+0.581+0.087+0.616+0.327+0.885+0.535

No Individu	CX1	CX2	X1	X2	Fit	CBX1	CBX2
Individu : 01	113	101	-00.3412	- 00.6235	+01.5146	00110110	11011000
Individu : 02	227	040	+02.3412	- 02.0588	+00.0008	11100011	00101000
Individu : 03	126	074	- 00.0353	- 01.2588	+01.3611	01111110	01001010
Individu : 04	053	210	- 01.7529	+01.9412	+00.0256	00110101	11010010
Individu : 05	121	102	- 00.1529	- 00.6000	+01.1553	01111001	01100110
Individu : 06	006	194	- 02.8588	+01.5647	- 00.0003	00000110	11000010
Individu : 07	182	109	+01.2824	- 00.4353	+01.1407	10110110	01101101
Individu : 08	111	117	- 00.3882	- 00.2471	+01.2063	01101111	01110101
Individu : 09	049	146	- 01.8471	+00.4353	- 00.0871	00110001	10010010
Individu : 10	057	223	- 01.6588	+02.2471	+01.0223	00111001	11011111

********* Résultats d'optimisation ********

No Populations	CX1	CX2	X1	X2	Fit
Population : 01	113	101	-00.3412	-00.6235	+01.5146

Population : 02	113	101	-00.3412	-00.6235	+01.5146
Population : 03	101	094	-00.6235	-00.7882	+01.7364
Population : 04	101	094	-00.6235	-00.7882	+01.7364
Population : 05	101	094	-00.6235	-00.7882	+01.7364
Population : 06	101	094	-00.6235	-00.7882	+01.7364
Population : 07	101	094	-00.6235	-00.7882	+01.7364
Population : 08	101	094	-00.6235	-00.7882	+01.7364
Population : 09	101	094	-00.6235	-00.7882	+01.7364
Population : 10	101	094	-00.6235	-00.7882	+01.7364

L'optimisation est terminée.......
Les paramètres optimisés:
F=+01.7364 X1=-00.6235 X2=-00.7882

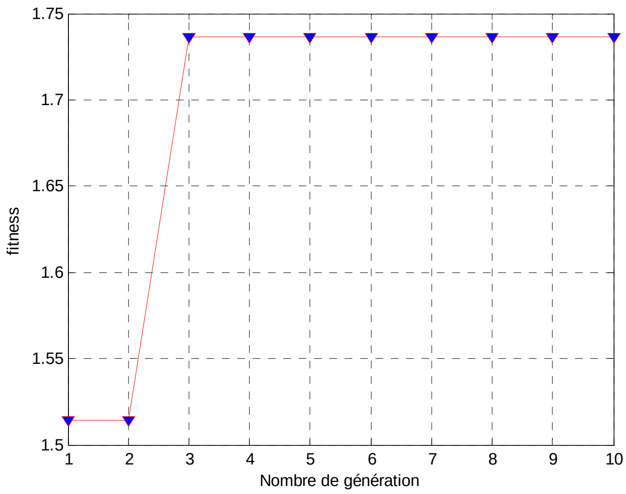


Figure V.11 Convergences de fonction objective par AG

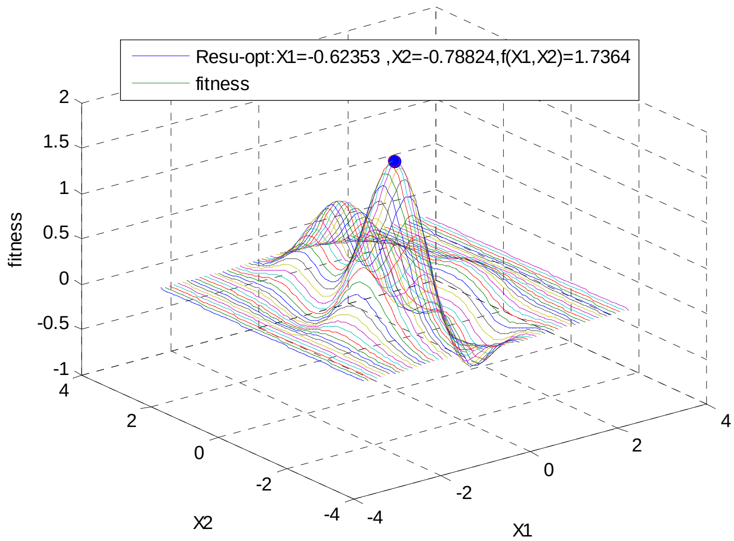


Figure V. 12 Résultat d'optimisation par AG

Pour minimiser cette fonction d'objective

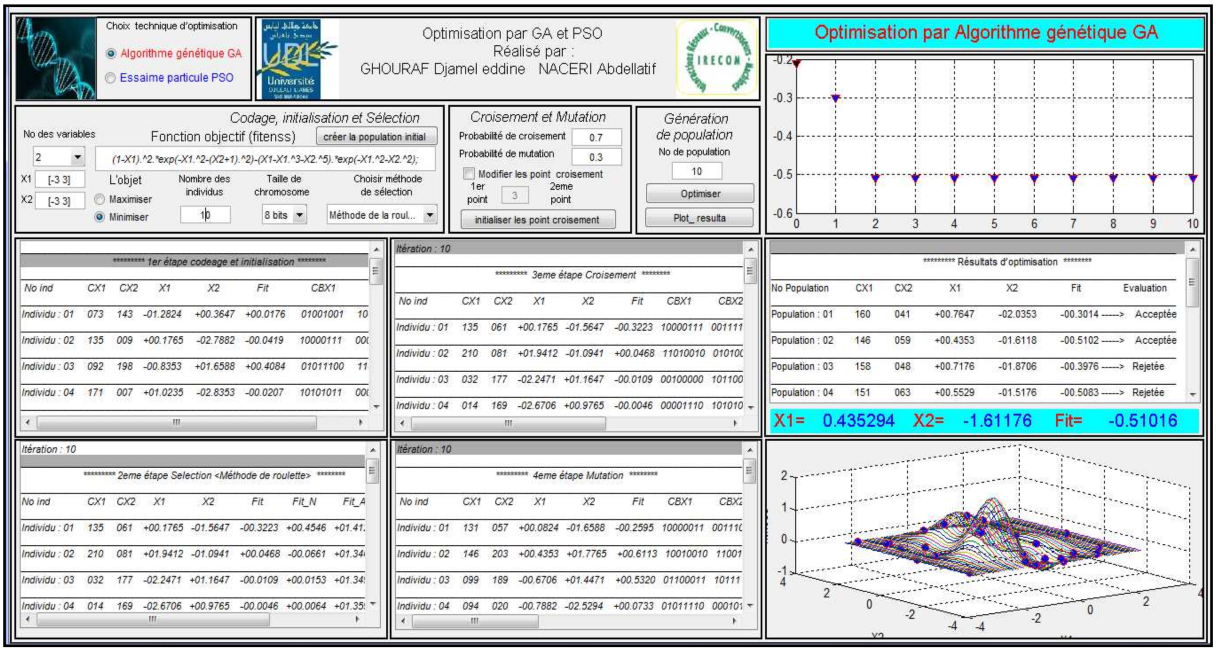


Figure V.13 minimisation de fonction par AG sous GUI-MATLAB

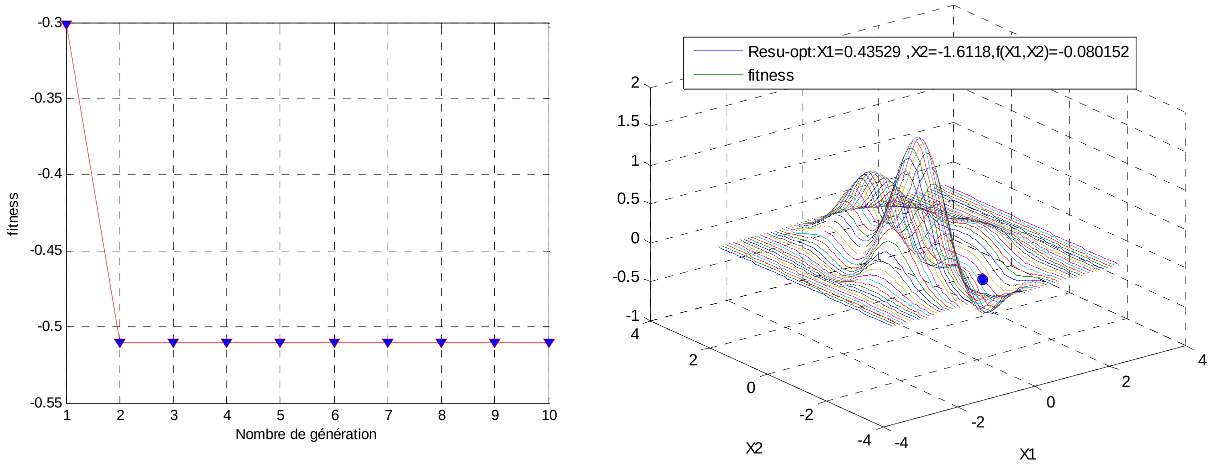


Figure V.14 Résultats d'optimisation par AG (minimisation de la fonction objective)

V.4. L'OPTIMISATION PAR ESSAIMS PARTICULAIRES PSO

L'optimisation par essaims particulaires (PSO : Particle Swarm Optimization) est une stratégie relativement récente pour l'optimisation des fonctions. Conceptuellement des similitudes doivent être trouvées dans les domaines des algorithmes génétiques aussi bien que la vie artificielle. L'optimisation d'essaim de particules (PSO) a été à l'origine conçue par James Kennedy et Russel Eberhart [57, 75] et a été comparée aux algorithmes génétiques [72] pour trouver efficacement les solutions optimales dans les grands espaces de recherche.

PSO est un nouvel algorithme évolutionnaire, où la population s'appelle maintenant un essaim et chaque individu s'appelle une particule. Il a été inspiré de la dynamique des interactions sociales entre les individus, étant au commencement influencé par le travail dans la simulation du vol coordonné en bandes d'oiseaux. PSO a été avec succès appliqué aux domaines de l'optimisation de fonction, du jeu apprenant, groupement de données (data Clustering), de l'analyse d'images et de réseau de neurones.

PSO est aussi liée à l'intelligence en essaim. Selon Millonas [78], qui a développé ses modèles pour des applications dans la vie artificielle, cinq principes de base d'intelligence d'essaim :

1. principe de proximité: la population devrait pouvoir effectuer des calculs simples de l'espace et de temps
2. le principe de qualité: la population devrait pouvoir répondre aux facteurs de qualité dans l'environnement
3. le principe de la réponse diverse: la population ne devrait pas réaliser ses activités le long des canaux excessivement étroits
4. le principe de la stabilité: la population ne devrait pas changer son mode du comportement chaque fois que l'environnement change
5. est le principe de l'adaptabilité: la population doit pouvoir changer le mode de comportement pour répondre aux changements sérieux ou durable de l'environnement.

Notez que les principes (4) et (5) sont les côtés opposés de la même pièce de monnaie [72 ,76, 77].

La nature stochastique de l'algorithme, facilitera cependant, également l'exploration des régions non découvertes dans l'espace de recherche, ayant pour résultat une technique rapide et efficace pour trouver un optimum global simple.

V.4. 1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Comme on a dit précédemment, la population dans PSO s'appelle un essaim, dont chaque individu s'appelle particule. Le mouvement des particules est influencé non seulement par l'expérience précédente de chaque particule (la meilleure position qu'elle a déjà trouvée), mais également par une contrainte sociale de se déplacer vers la meilleure position trouvé par ses voisins. Pour mettre en application ces comportements, chaque particule est définie par sa position et sa vitesse dans l'espace de recherche. Dans chaque itération, des changements-résultants des deux influences de la trajectoire des particules - sont faits à sa vitesse. La position des particules est alors mise à jour en conséquence à la vitesse calculée. Les variantes principales de PSO et le modèle culturel derrière elle est en détail discutés dans [72, 75].

Le mouvement des particules est fait de telle manière qu'il leur permet de trouver incrémentalement de meilleures solutions. Ce qui conduit principalement un algorithme de

PSO, est l'interaction sociale entre ses particules. Les particules dans un essaim partagent leur connaissance l'une avec l'autre, spécifiquement quant à la qualité des solutions qu'elles ont trouvées aux points spécifiques dans l'espace de recherche. La meilleure solution découverte par une particule est désignée sous le nom de *"la meilleure solution personnelle"*. Les particules se déplacent alors vers d'autres meilleures solutions personnelles en utilisant certaines vitesses, afin d'essayer de découvrir des solutions améliorées.

La position de chaque particule, dans l'espace multidimensionnel de recherche, sera représentée dans l'équation par un vecteur X (où chaque dimension représente un paramètre dans la fonction objective). La vitesse de chaque particule est représentée par un vecteur V, et elle permet de mettre à jours la position de la particule dans chaque itération. La particule se déplace dans l'espace de recherche en ajoutant la valeur de la vitesse à sa position. V détermine la trajectoire des particules et dépend de deux paramètres pour chaque particule i : voler vers sa meilleure position précédente et voler vers la meilleure position précédente de ses voisins.

Les équations générales, pour mettre à jour la position et la vitesse pour une certaine particule i, sont les suivantes:

$$\begin{aligned} v(t+1) &= v(t) + \varphi_1^*(p(t) + x(t)) + \varphi_2^*(g(t) + x(t)) \\ x(t+1) &= x(t) + v(t+1) \end{aligned} \tag{V.12}$$

Où

v(t) : est la vitesse courante

x(t) : est la position courante

p(t) : est sa meilleure position précédente

g(t) : est la meilleure position trouvée par ses voisins

$\phi_1 = c_1 * r_1$ et $\phi_2 = c_2 * r_2$: c_1 et c_2 sont les constantes: cognitive et sociale d'accélération respectivement, et r1 et r2 sont des nombres aléatoires distribués entre 0 et 1

La nouvelle position de la particule, au temps t+1, est calculée en additionnant sa position précédente et sa nouvelle vitesse v(t+1). La nouvelle vitesse est obtenue en additionnant la vitesse précédente, le terme $\varphi 1$*(p(t)-x(t)) qui représente la partie cognitive de l'apprentissage et le terme $\varphi 2$*(g(t)-x(t)) qui représente la partie sociale de l'apprentissage.

Shi et Eberhart concluent [74] que l'exécution du PSO n'est pas sensible à la taille de population. Ceci signifie que PSO fonctionnera bien avec un petit nombre de particules comparées au nombre d'individus requis pour un algorithme génétique. Comme chaque particule a une évaluation de fonction de fitness par itération, le nombre d'évaluations de fonction de fitness peut être réduit ou plus d'itérations peuvent être effectuées. Shi et Eberhart observent également que les balances de PSO - avec l'insensibilité de taille - ont été vérifiées par leur étude.

V.4. 2. EXEMPLES D'APPLICATION

On considère l'exemple précédent

Maximiser

$$F_{obj}(x(1),x(2)) = (1-x(1))^2 \exp(-x(1)^2 - (x(2)+1)^2) - (x(1) - x(1)^3 - x(2)^5)\exp(-x(1)^2 - x(2)^2) \quad \text{(V.13)}$$

Objet $\quad 3 > x(1) \geq -3$

$\quad 3 > x(2) \geq -3$

On utilise cette fois l'optimisation par essaim particule pour calculer la valeur maximale de cette fonction avec les paramètres d'optimisation suivants :

- Nombre des particules = 10
- Nombre des itérations = 10
- C_1=0.02
- C_2=0.02

Pour effectuer l'optimisation par essaims particulaires on a élaboré un GUI (**G**raphical **U**ser **I**nterfaces) sous logiciel MATLAB, ce dernier permet de calculer et visualiser les opérations de l'optimisation par essaim particulaires.la solution du problème représenté sur figures V.15 ,16 et 17 suivantes :

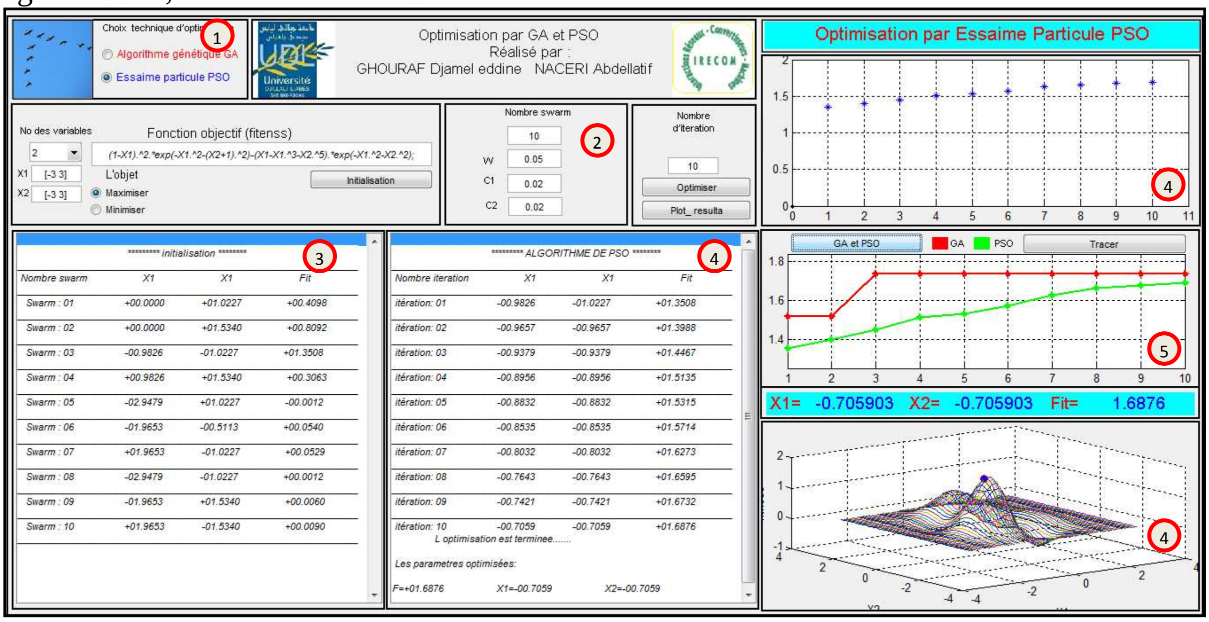


Figure V.15 exemples d'optimisation par essaims particulaires sous interface graphique

1 Choix de techniques d'optimisations (GA ou PSO)

2 Les paramètres d'optimisation.

3 Initialisation.

4 Résulta d'optimisation.

5 Etude comparative entre GA et PSO

********* Initialisation ********

Nombre swarm	X1	X2	Fit
Swarm : 01	+00.0000	+01.0227	+00.4098
Swarm : 02	+00.0000	+01.5340	+00.8092
Swarm : 03	- 00.9826	- 01.0227	+01.3508
Swarm : 04	+00.9826	+01.5340	+00.3063
Swarm : 05	- 02.9479	+01.0227	- 00.0012
Swarm : 06	- 01.9653	- 00.5113	+00.0540
Swarm : 07	+01.9653	- 01.0227	+00.0529
Swarm : 08	- 02.9479	- 01.0227	+00.0012
Swarm : 09	- 01.9653	+01.5340	+00.0060
Swarm : 10	+01.9653	- 01.5340	+00.0090

********* ALGORITHME DE PSO ********

Nombre itérations	X1	X2	Fit
Itération: 01	-00.9826	-01.0227	+01.3508
Itération: 02	-00.9657	-00.9657	+01.3988
Itération: 03	-00.9379	-00.9379	+01.4467
Itération: 04	-00.8956	-00.8956	+01.5135
Itération: 05	-00.8832	-00.8832	+01.5315
Itération: 06	-00.8535	-00.8535	+01.5714
Itération: 07	-00.8032	-00.8032	+01.6273
Itération: 08	-00.7643	-00.7643	+01.6595
Itération: 09	-00.7421	-00.7421	+01.6732
Itération: 10	-00.7059	-00.7059	+01.6876

L'optimisation est terminée.......
Les paramètres optimisés:
F=+01.6876 X1=-00.7059 X2=-00.7059

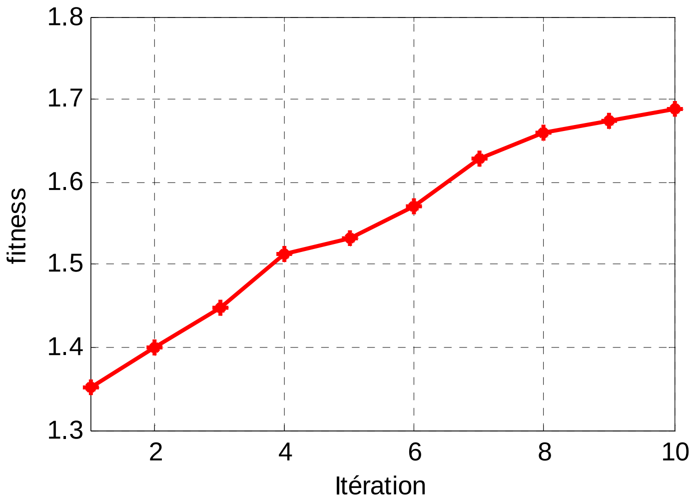


Figure V.16 Convergence de la fonction objective par PSO

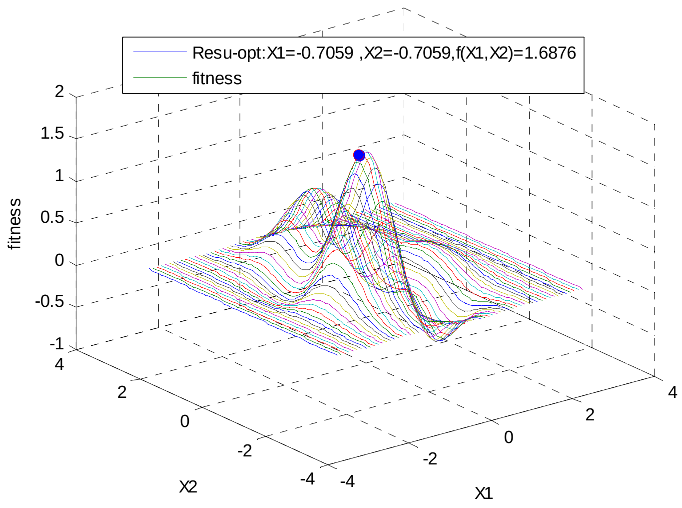


Figure V.17. Résultat d'optimisation par PSO d'exemple numérique

La même fonction minimisée par PSO implémenté sous GUI-MATLAB figure V.18 et V.19

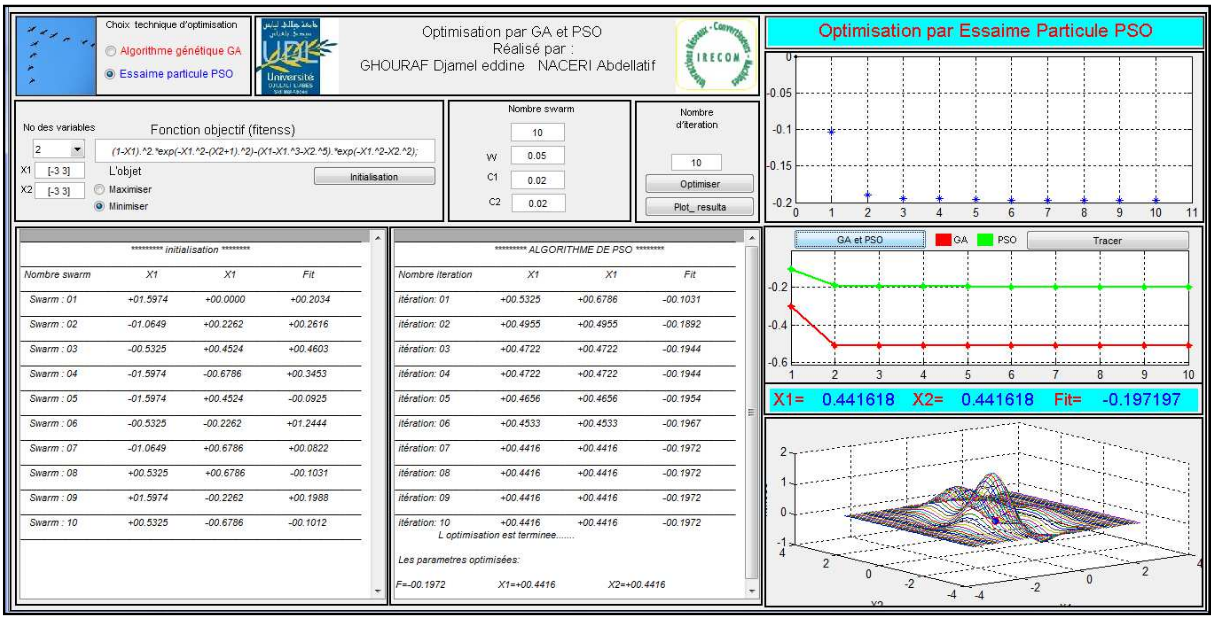


Figure V.18 minimisation de la fonction par PSO sous GUI-MATLAB

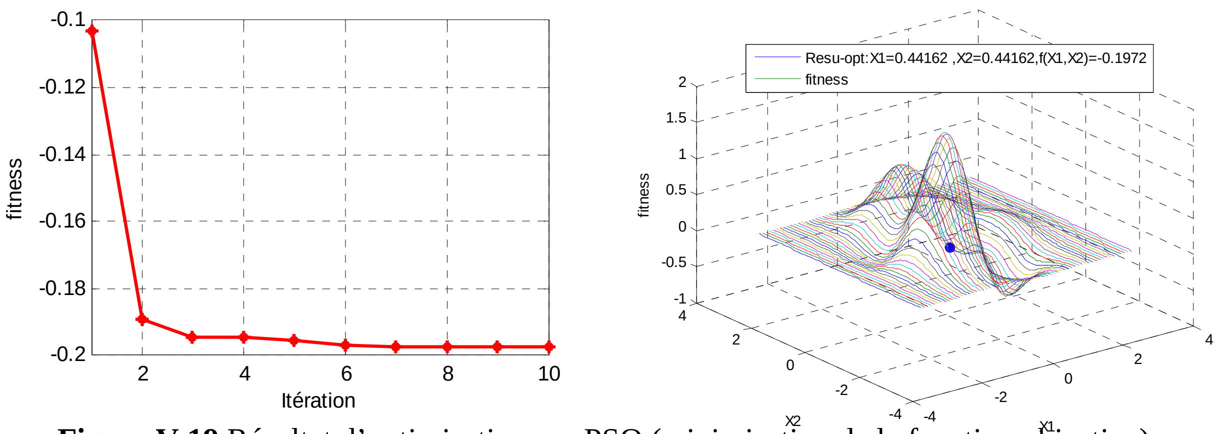


Figure V.19 Résultat d'optimisation par PSO (minimisation de la fonction objective)

V.5. Comparaison Entre PSO et les Algorithmes Genetiques

On fait une étude comparative entre les deux techniques d'optimisation : algorithmes génétiques GA et l'essaime particule PSO par l'optimisation les fonctions suivantes :

- Maximiser $F_{obj} = 4\sin(x) + x$
  Sujet à $0 > x \geq 30$

- Minimiser $F_{obj} = 4\sin(x) + x$
  Sujet à $0 > x \geq 30$

- Maximiser
  $F_{obj}(x(1), x(2)) = (1 - x(1))^2 \exp(-x(1)^2 - (x(2)+1)^2) - (x(1) - x(1)^3 - x(2)^5)\exp(-x(1)^2 - x(2)^2)$
  Objet $3 > x(1) \geq -3$
  $3 > x(2) \geq -3$

- Minimiser
  $F_{obj}(x(1), x(2)) = (1 - x(1))^2 \exp(-x(1)^2 - (x(2)+1)^2) - (x(1) - x(1)^3 - x(2)^5)\exp(-x(1)^2 - x(2)^2)$
  Objet $3 > x(1) \geq -3$
  $3 > x(2) \geq -3$

Les résultats d'optimisation de ces fonctions représentés respectivement dans les figures (V.20 à V.23)

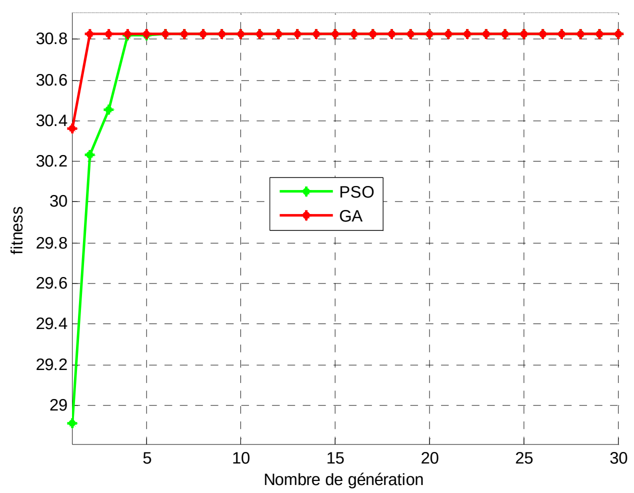


Figure V.20 Résultat d'optimisation de la fonction 1 par AG et PSO (maximisation de la fonction objective)

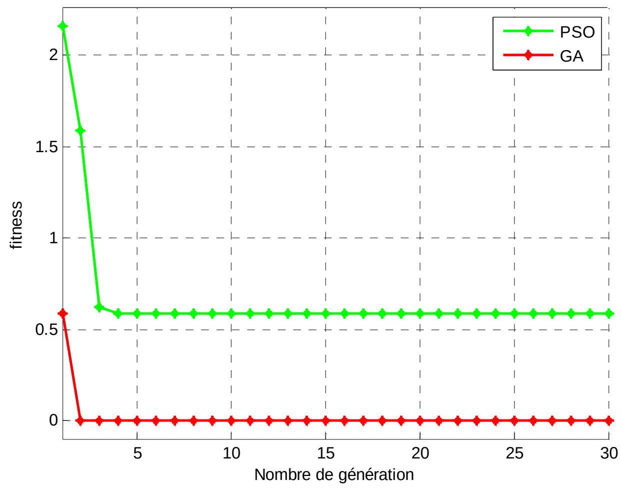


Figure V.21 Résultat d'optimisation de la fonction 1 par AG et PSO (minimisation de la fonction objective)

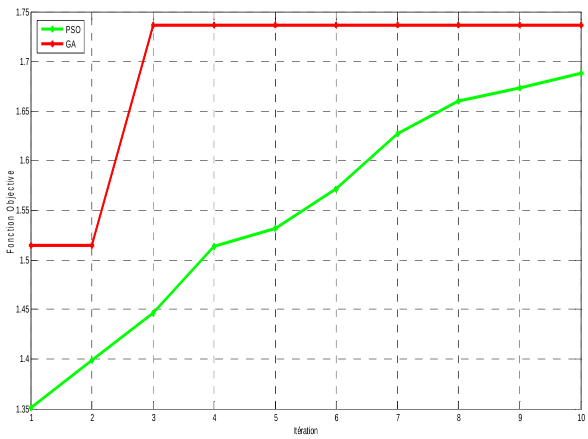


Figure V.22 Résultat d'optimisation de la fonction 2 par AG et PSO (minimisation de la fonction objective)

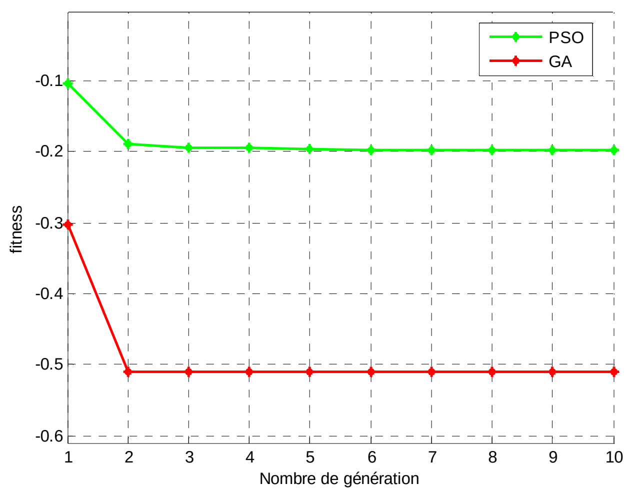


Figure V.23 Résultat d'optimisation de la fonction 2 par AG et PSO (minimisation de la fonction objective)

V.5.1.INTERPRETATION DES RESULTATS

L'algorithme PSO partage beaucoup de points communs avec l'algorithme génétique (AG). Les deux algorithmes commencent par une population d'individus générée aléatoirement, tout les deux ont des valeurs de fonction objective pour évaluer la population. Les deux algorithmes mettent à jours avec la population et cherchent l'optimum avec des techniques aléatoires. Les deux systèmes ne garantissent pas le succès. Elles ont également la mémoire, qui est importante pour l'algorithme. Comme les algorithmes génétiques, PSO est basé sur une population qui converge lentement vers une ou plusieurs solutions. Cependant, avec PSO, les particules sont préservées dans tout le processus entier; ils ne meurent pas. Le contraire à l'algorithme génétique, qui est basé sur la concurrence pour de meilleures chances de survie et de reproduction. PSO emploie un genre de coopération entre les particules, ceci est réalisé par l'échange des coordonnées des meilleures solutions qui ont été produites jusqu'à ce point.

PSO n'a traditionnellement aucun croisement entre les individus, n'a aucune mutation et les particules ne sont jamais substituées par d'autres individus pendant l'exécution. Au lieu de cela PSO raffine sa recherche en attirant les particules aux positions représentant les bonnes solutions.

Tableau V.1 étude comparative entre GA et PSO

	GA	PSO
Base	Nature	Nature
Principe	Algorithme	Algorithme
Individus	Oiseaux, insecte…..	Chromosome
sélection	Utilisable	Non utilisable
croisement	Utilisable	Non utilisable
mutation	Utilisable	Non utilisable
Nombre des individus générés pour chaque itération (exemple de 30 individus dans une population)	60 individus (30 individus de croisement et 30 individus de mutation)	30 individus
Temps d'excusions	Court	Moyenne

Les résultats d'optimisation ont étés dans la majorité des cas très satisfaisants et montre de la fiabilité de la technique d'optimisation proposée par l'algorithme génétique (GA)

Tableau V.2 Comparaison de résulta d'optimisation

Fonction	L'objet	GA	PSO
Fonction 1	Maximiser	2eme itération	5eme itération
	Minimiser	2eme itération	>> 30 itération
Fonction 2	Maximiser	3eme itération	>>10 itération
	Minimiser	2eme itération	>> 30 itération

V.6. CONCLUSION

Les algorithmes génétiques sont des méthodes d'optimisation globale basées sur des concepts de génétique et de sélection naturelle. Le composant principal des AGs est le gène qui se compose d'une chaîne de caractères (souvent binaire). Les gènes s'enchaînent et forment les chromosomes. Ces derniers forment les individus dans l'espace de recherche. Ainsi, les AGs travaillent sur une population d'individus, où chacun de ces derniers représente une solution possible pour le problème donné. Dans chaque itération de l'AG, la performance de chaque individu de la population courante est calculée. Les opérateurs de génétiques, sélection, croisement et mutation, sont appliqués successivement pour créer une nouvelle population jusqu'à l'approche rigoureuse de la solution optimale.

Les algorithmes génétiques offrent plusieurs avantages :

- Ils ne demandent pas d'informations *à priori* ou des propriétés particulières de la fonction objective du problème.
- Leurs performances par rapport aux algorithmes classiques sont bien remarquées lorsque par exemple les espaces de recherches sont importants.
- Outre leur facilité de programmation et de manipulation, ils sont facilement adaptables à tout type de problème d'optimisation.
- Ils peuvent être utilisés avec profit pour traiter des problèmes n'étant pas optimisables efficacement par des approches purement mathématiquement.

Par ailleurs, les algorithmes génétiques présentent certaines limites :

- Le temps de calcul est souvent important : ils nécessitent de nombreux calculs, en particulier au niveau de la fonction objective.
- Les paramètres de réglage (telles la taille de la population, la probabilité de croisement, …) sont parfois difficiles à déterminer. Or le succès de l'évolution en dépend et plusieurs essais sont donc nécessaires.

- Ils ne garantissent pas toujours la découverte de l'optimum global en un temps fini. En effet, lorsqu'une population évolue, il se peut que certains individus occupant à un instant une place importante au sein de cette population deviennent majoritaires. A ce moment, il se peut que la population converge vers cet individu en s'écartant ainsi d'individus plus intéressants et en s'éloignant de l'individu vers lequel on devrait converger.

Nous pouvons conclure que l'efficacité des AGs dépend d'un compromis entre deux objectives contradictoires : la rapidité et la précision. La rapidité est souvent mesurée en nombre d'évaluations de la fonction objective. Cette dernière représente la plupart du temps la partie la plus "gourmande" en temps de calcul. La précision se rapporte à la distance entre l'optimum trouvé par l'AG et l'optimum réel, du point de vue de la solution ou de la valeur. Bien souvent, un AG rapide est peu précis, et inversement.

Dans ce qui suit, nous allons utiliser cette interface réalisée dans le présent chapitre et les principales caractéristiques des AG's ainsi développés pour l'optimisation et l'adaptation paramétrique des stabilisateurs robustes PSS-H∞ avec d'autre GUI's MATLAB.

CHAPITRE VI

OPTIMISATION PAR L'ALGORITHMES GENETIQUES POUR L'ADAPTATION PARAMETRIQUE DES PSS-H∞ ROBUSTES

CHAPITRE VI

OPTIMISATION PAR LES ALGORITHMES GENETIQUES POUR L'ADAPTATION PARAMETRIQUE DES PSS-H∞ ROBUSTES

VI.1. INTRODUCTION

Comme toutes les techniques de commandes avancées le problème de variations incertaines ou stochastiques de système commandé pose un problème sérieux. Dans le système SMIB les paramètres des machines ne donnent pas lieu à des valeurs certaines et définitives. Ces variations correspondent à la dispersion constatée lors de la fabrication en nombre, aux évaluations des valeurs lors du fonctionnement ou aux méthodes utilisées pour l'identification des machines. Plusieurs phénomènes physiques provoquent des variations des paramètres de la machine synchrone puissante. Entre autres, une évaluation de température augmente les valeurs des résistances et les variations extérieur de réseau tous ces phénomènes vient s'ajouter l'effet de peau du aux fréquences des courants, le type de ventilation de la machine ainsi que l'erreur d'identification de ces de ces paramètres.

Le PSS est toujours considéré comme un moyen efficace pour l'amortissement des modes électromécaniques locaux, mais en même temps son rôle dans l'amortissement des modes interrégionaux reste toujours considéré comme faible. L'intégration des techniques de commande avances au stabilisateur de système de puissance améliore en façon générale le comportement de système, mais toujours ces techniques de commande besoin de la adaptation avec ces variations stochastiques par recalcule de contrôle correspond les niveaux conditions de fonctionnement.

Dans la littérature, différentes approches utilisant l'algorithme génétique (AG) ont été proposées pour le réglage de PSS et la adaptation la commande robuste H_∞ dans le système SMIB [1, 2]. L'avantage des AG par rapport aux autres techniques d'optimisation est leur indépendance par rapport à la complexité des problèmes. De plus, il travaille sur un ensemble de points (une population) et non sur un seul point. L'AG est donc une méthode d'optimisation globale.

Dans ce chapitre on va exploiter les deux techniques d'optimisation GA et POS pour adapter la commande robuste H_∞ avec les différents variations paramétriques électrique ou mécanique de système de puissance, l'étude proposée basée sur de méthode d'adaptation :

- Adaptation de la commande robuste H_∞ par l'optimisation de l'objet de commande (réglage des paramètres de PSS).

- Adaptation de la commande robuste H_∞ par le choix optimal des fonctions de pondération W_1, W_2, W_3 (problème de la synthèse de contrôleur robuste H_∞)

VI.2. ADAPTATION DE LA COMMANDE ROBUSTE H∞ A BASE DE PSS OPTIMISE PAR GA

VI.2.1 REGLAGE DES PARAMETRES DE PSS.

Le problème de la conception d'un PSS est de déterminer les valeurs de ses paramètres pour :

- augmenter l'amortissement des modes du système.
- assurer une stabilisation robuste.

La minimisation des risques probables des interactions défavorables et des effets négatifs sur les autres modes oscillatoires du système représente aussi un point critique important qui influence le réglage de PSSs. En outre, les valeurs des paramètres du PSS doivent être réglées sans entraîner d'effet négatif dans la restauration de la stabilité transitoire.

De nombreuses méthodes sont proposées dans la littérature pour le réglage des paramètres de PSS. Généralement, la plupart de ces méthodes sont basées sur l'analyse des valeurs propres du système.

VI.2.1 ANALYSE DU MODELE LINEAIRE.

VI.2.1 .1 INTRODUCTION.

L'analyse des valeurs propres et l'analyse modale du système de puissance linéarité sont des outils "puissants" pour étudier les propriétés dynamiques du système. L'évaluation précise de la fréquence des oscillations électromécaniques et de l'amortissement de ces oscillations peut être déterminée à partir de l'analyse des valeurs propres ; l'analyse modale permet quant à elle d'obtenir des informations supplémentaires plus approfondies telle la nature des modes (dominants ou non,…).

VI.2.1 .2 VALEURS PROPRES

Après avoir établi le modèle d'état linéaire correspondant à l'équation (1), la caractérisation de la stabilité du système peut se faire à partir de la matrice dynamique *A* et de ses valeurs propres (première méthode de Lyapunov). Considérons un système linéaire défini par le modèle d'état :

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}(s) &= A\Delta x(s) + B\Delta u(s) \\ \Delta y(s) &= C\Delta x(s) + D\Delta u(s) \end{aligned} \qquad \text{(VI.1)}$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces équations, nous obtenons l'ensemble d'équations suivant dans le domaine fréquentiel complexe :

$$\begin{aligned} s\Delta x(s) &= A\Delta x(s) + B\Delta u(s) \\ \Delta y(s) &= C\Delta x(s) + D\Delta u(s) \end{aligned} \qquad \text{(VI.2)}$$

La solution explicite de cet ensemble d'équations est donnée comme suit :

$$\Delta y(s) = C(sI - A)^{-1} + B\Delta u(s) + D\Delta u(s) \qquad \text{(VI.3)}$$

Où :

I est la matrice d'identité.

Ainsi, la réponse dynamique du système est déterminée par l'équation caractéristique de la matrice d'état A définie par :

$$\det(\lambda \bullet I - A) = 0 \qquad \text{(VI.4)}$$

Les valeurs λ qui satisfont l'équation précédente sont appelées les valeurs propres du système. Une valeur propre définit le mouvement du système lié à une fréquence propre.

Une valeur propre -un mode- est caractérisée par une fréquence d'oscillation et un amortissement. Elle est représentée généralement par le nombre complexe suivant :

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \qquad \text{(VI.5)}$$

Cette relation est équivalente à la relation définissant les valeurs propres d'un système du deuxième ordre [79]. Par suite :

$$\lambda = \omega_n \xi \pm j\omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \qquad \text{(VI.6)}$$

Où :

σ est la partie réelle de la valeur propre (abscisse de convergence).

ω est la pulsation propre d'oscillation (rad/s).

ω_n est la pulsation naturelle d'oscillation (rad/s).

ζ est le facteur d'amortissement d'oscillation.

Une matrice d'état de dimension $n \times n$ est associée à n valeurs propres.

L'analyse des valeurs propres permet d'obtenir tout d'abord la fréquence d'oscillation et le facteur d'amortissement.

La fréquence naturelle d'oscillation est donnée par la relation suivante :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \qquad \text{(VI.7)}$$

Le facteur d'amortissement détermine la décroissance de l'amplitude d'oscillation. Il est donné par :

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \qquad \text{(VI.8)}$$

Dans un modèle linéaire, la solution des équations linéaires du système décrit l'évolution exponentielle au cours du temps de la perturbation. Ainsi, cette solution peut être représentée par une combinaison de fonctions d'exponentielles $e^{\lambda it}$ représentant les caractéristiques temporelles associées à chaque valeur propre $\lambda_{i.}$ .Les constantes de temps $\tau = 1/|\sigma_i|$ caractérisent de façon générale l'amortissement du système.

L'interprétation physique des signaux correspondants aux fonctions de la forme $e^{\lambda it}$ est simple. Elle est illustrée par tableau VI.1 qui représente dans le plan complexe l'allure des variations de tels signaux en fonction du temps, suivant la position du point représentatif de λ_i.

Une valeur propre réelle correspond un mode non-oscillatoire. Si la valeur propre réelle est négative, les exponentielles apparaissant dans la réponse temporelle sont des fonctions décroissantes du temps. La rapidité de décroissance est liée à la constante de temps d'amortissement. Plus la valeur de l'abscisse de convergence σ est grande, plus la constante de temps est faible et l'amortissement rapide.

Par contre, si la valeur propre réelle est positive, le mode présente une instabilité apériodique.

En revanche, les valeurs propres complexes, en paires conjuguées, correspondent aux modes oscillatoires. Le mode oscillatoire peut être divergent, c.-à-d. instable, si la partie réelle de la valeur propre est positive, il est au contraire amorti, c.-à-d. stable, si la partie réelle est négative.

Cette analyse révèle qu'il est possible de déterminer la nature (stable ou instable) d'un système linéaire à partir d'une "inspection" de la position des pôles de la fonction de transfert du système dans le plan complexe. En outre, la connaissance de la position des pôles peut fournir des renseignements sur le comportement du système lors de régimes transitoires typiques tels que la réponse à une impulsion, à un échelon, … .

Des modes instables ou mal amortis peuvent être dominants : leurs contributions déterminent alors l'allure de la réponse temporelle globale du système.

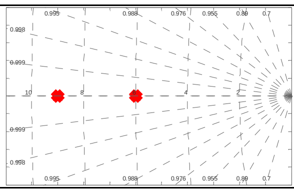
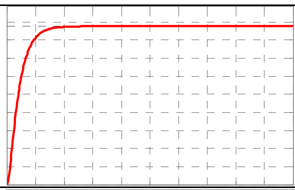
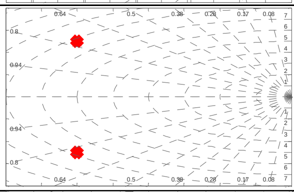
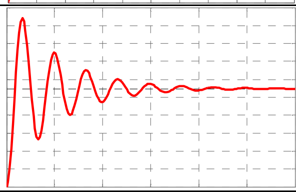
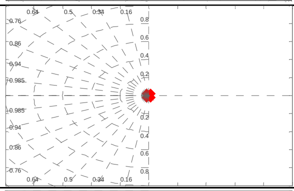
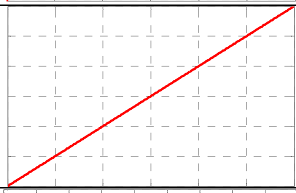
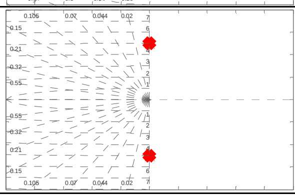
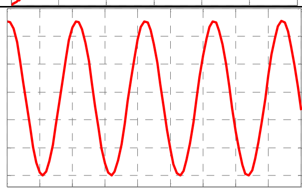
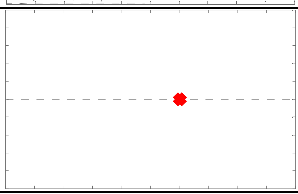
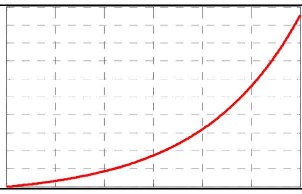
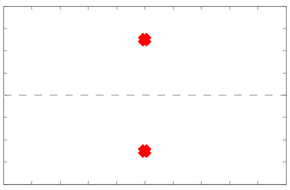
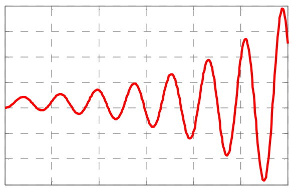
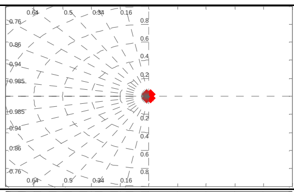
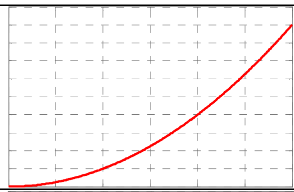
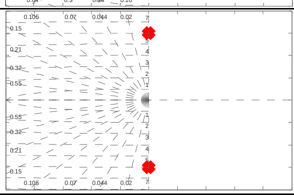
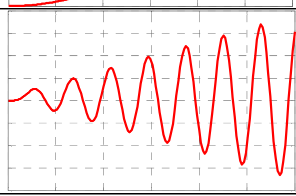
Dans les réseaux électriques, il est évidemment nécessaire que tous les modes du système soient stables c.-à-d. placés dans la partie gauche du plan complexe.

VI.2.1 .3 ANALYSE MODALE.

Comme nous l'avons vu, les valeurs propres du système déterminent les caractéristiques dynamiques du système (fréquences et facteurs d'amortissement) ainsi que l'état de stabilité du système.

L'analyse des vecteurs propres, qui découle de l'analyse des valeurs propres, peut aussi fournir d'autres informations importantes.

Tableau VI.1 Stabilité en fonction de la position des pôles du système en boucle fermée

Pôles	Lieu des racines	Lieu des racines	Propriété
tous réels négatifs			**stabilité asymptotique**
complexes à partie réelle négative			**stabilité asymptotique**
un seul pôle nul			**stabilité marginale**
une seule paire imaginaire			**stabilité marginale**
Au moins un réel positif			**instabilité**
Au moins une paire complexe à partie réelle positive			**instabilité**
pôles nuls multiples			**instabilité**
paires imaginaires multiples			**instabilité**

Lorsqu'une instabilité ou un mode mal amorti prend naissance dans un système de puissance, il est très intéressant d'examiner les points suivants [80] :

- les variables d'état liées aux modes dominants.
- les éléments du système permettant d'agir efficacement pour le stabiliser.
- les groupes cohérents de générateurs présentant des oscillations couplées.
- les signaux les plus efficaces à appliquer aux contrôleurs.
- les paramètres des contrôleurs réalisant un "meilleur" amortissement.

VI.2.1 .4 L'INFLUENCE DE ζ ET σ A LA STABILITE DU SYSTEME ASSERVI

Un facteur d'amortissement ζ important aboutit à une réponse dynamique bien amortie. Pour cela, toutes les valeurs propres doivent se trouver dans la zone gauche du plan complexe limité par deux demi-droites .Pour une valeur critique du facteur d'amortissement ζ_{cr} : on impose alors une marge de stabilité relative [81].

La partie réelle de la valeur propre σ détermine la rapidité de décroissance/croissance des exponentielles composant la réponse dynamique du système. Ainsi, σ très négatif aboutit à une réponse dynamique rapide. Pour cela, toutes les valeurs propres doivent se trouver dans la zone gauche du plan complexe limité par une verticale passant par une valeur critique de la partie réelle (σ_{cr}), figure VI.1. On définit ainsi la marge de stabilité absolue.

Lors du réglage des paramètres des PSS, il est souhaitable que ces deux critères soient pris en compte pour permettre une bonne régulation. La combinaison entre ces deux critères aboutit à une zone appelée zone de stabilité D, Figure VI.1. Le déplacement des valeurs propres dans cette zone garantit une performance robuste pour un grand nombre de points de fonctionnement.

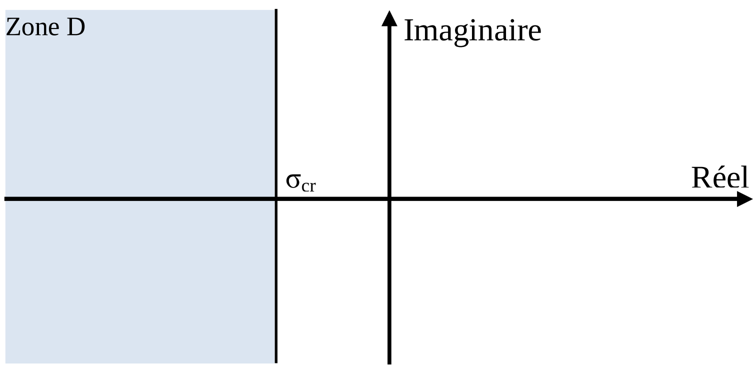


Figure VI.1. Zone de la stabilité D.

VI.2.2 CHOIX DE LA FONCTION OBJECTIVE

Le choix des fonctions objectives généralement basées sur les besoins de notre système commandé, dans cette section on va essayer d'étudier l'influence le choix de fonctions objectives sur les performances des systèmes de commande par une étude comparative entre deux fonctions objectives qui on a choisi pour répondre à notre besoins.

VI.2.2 .1 FONCTION MONO OBJECTIVE

Le but de l'utilisation de PSS est d'assurer un amortissement satisfaisant des oscillations et de garantir la stabilité globale du système pour différents points de fonctionnement

Pour répondre à ce but, nous avons utilisé une fonction mono objective doit minimiser les parties réelles des valeurs propres du système. Par conséquent, toutes les valeurs propres seront dans la zone D de stabilité.

Pour bien comprendre cette notion nous considérons deux système asservis de même partie imaginaire $\omega_{s1}= \omega_{s2}$ et de partie réel σ déférant :

- Système 1 : $P_{1,2}$=-6±6j
- Système 2 : $P_{1,2}$=-1±6j

La représentation des pôles des systèmes sur l'axe imaginaire et les réponses indicielles correspond chaque système illustré à la figure VI.2.

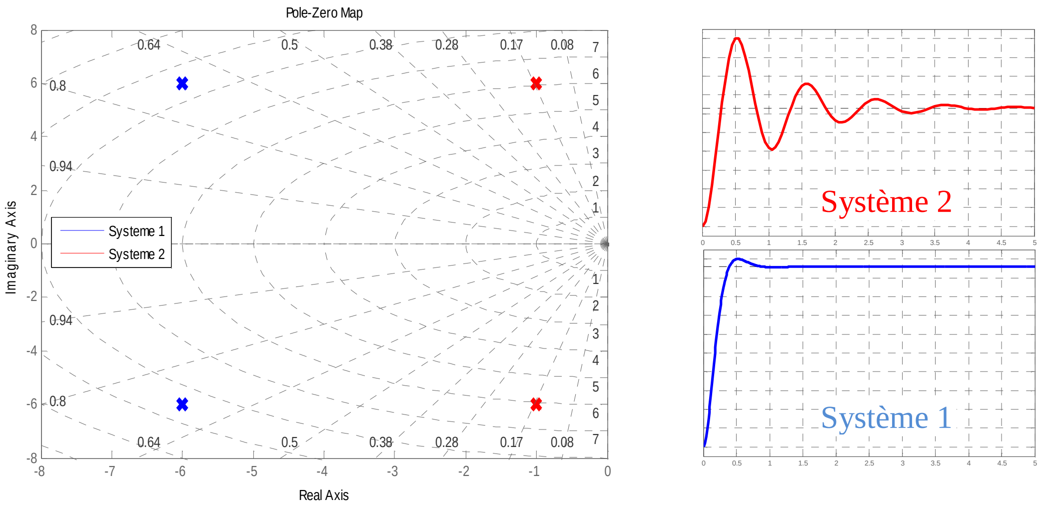


Figure VI.2. L'influence de σ au système asservi

D'apprit cette résultat on peut constater que la diminution de partie réel σ amélioré les performances dynamiques et la stabilité de système.

VI.2.2 .2 ETAPES DE CALCUL DE FONCTION MONO OBJECTIVE

Les étapes de calcul de cette fonction mono objective sont les suivantes :

1. Formuler le système linéaire en boucle ouverte (sans PSS).

2. Positionner le PSS avec leurs paramètres initialisés par l'AG à travers une population initiale.
3. Calculer les valeurs propres du système en boucle fermée Figure VI.3 et prendre uniquement les modes dominants: $\lambda = \sigma \pm j\omega$ (VI.9)

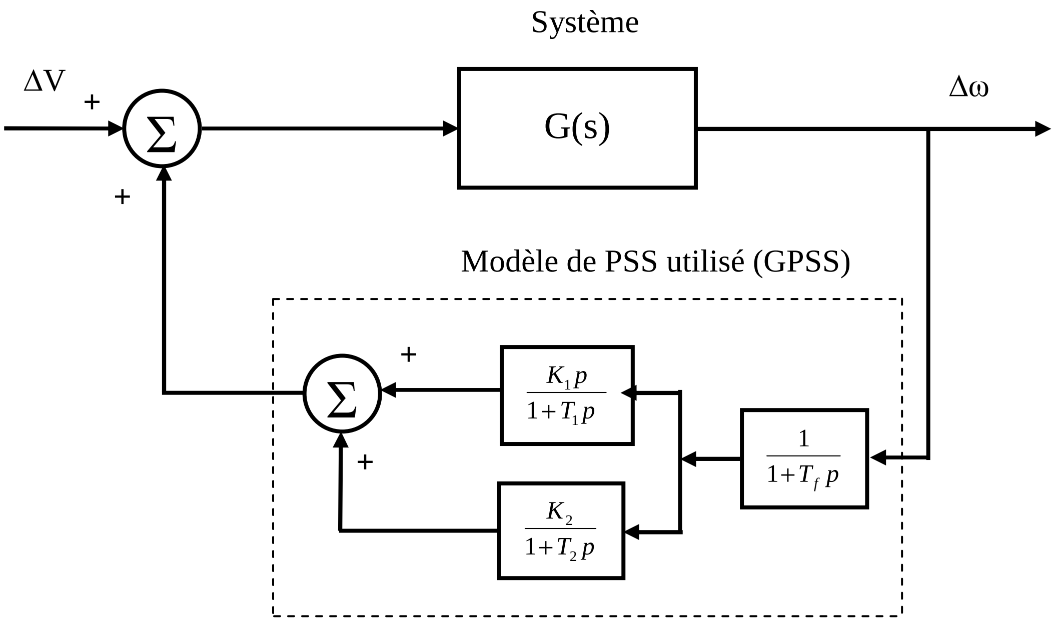


Figure VI. 3. L'ensemble (système-PSS) en boucle fermée.

Où : G(s) est la fonction de transfert du système entre le signal de référence ΔV du régulateur de tension de générateur, où le PSS doit être installé, et la variation de vitesse de rotor Δω. GPSS(s) est la fonction de transfert de PSS.

Les pôles de G(s) sont justement les valeurs propres du système linéarisé en boucle ouverte. La fonction de transfert du système entier en boucle fermée F(s) devient :

$$F(s) = \frac{G(s)}{1 - G(s)GPSS(s)} \quad \text{(VI.10)}$$

Les valeurs propres du système en boucle fermée sont les pôles de la fonction de transfert *F*(*s*) ; elles doivent satisfaire l'équation caractéristique suivante :

$$1 - G(s)GPSS(s) = 0 \quad \text{(VI.11)}$$

Avec

$$GPSS(s) = \frac{1}{1+T_f p}\left[\frac{K_1 p}{1+T_1 p} + \frac{K_2}{1+T_2 p}\right] \quad \text{(VI.12)}$$

Les paramètres optimisés de PSS sont : K_1, K_2, T_1, T_2 et T_f constant (T_f=0.039)

Avec

$$001 \leq K_1 \geq 07$$
$$001 \leq K_2 \geq 07 \quad \text{(VI.13)}$$

$$0.01\leq \; T_1 \; \geq 0.05$$
$$0.01\leq \; T_2 \; \geq 0.06$$

4. Trouver les parties réelles des valeurs propres du système (σ)
5. Déterminer la valeur la valeur minimale de (σ)
6. Renvoyer la valeur de cette fonction mono objective au programme de l'AG pour relancer une nouvelle génération.
   - Nombre d'individu : 120
   - Nombre de génération : 100
   - Probabilité de croisement : 0.7
   - Probabilité de mutation : 0.3

La Figure VI.4 donne 1'algorithme de synthèse des paramètres du PSS

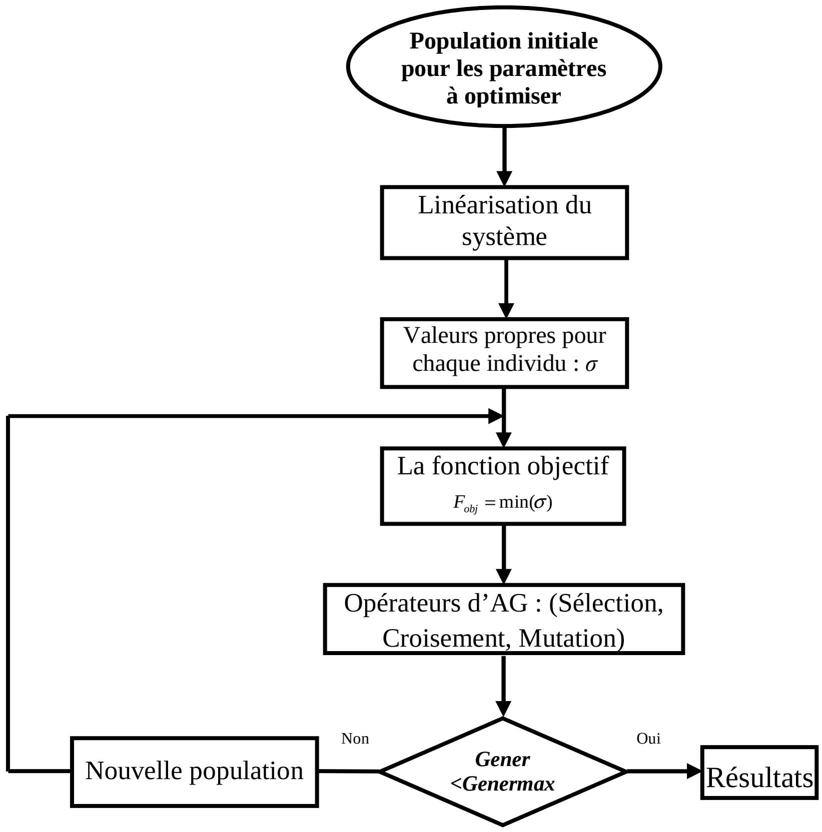


Figure VI.4. Organigramme de la fonction objective et du programme de l'AG.

VI.2.2 .3 RESULTATS D'OPTIMISATION

a. Population initiale.

Les AGs nécessitent une population initiale pour commencer le processus de recherche. La méthode appliquée fait générer aléatoirement un ensemble de solutions dans les contraintes proposées pour la population entière : c'est la méthode la plus commune.

b. Sélection.

Après génération de la population initiale, la performance de chaque individu est évaluée : la performance mesure la qualité de la solution probable pour comparer les différentes solutions. Nous avons pris la valeur associée à la fonction objective comme indice de performance.

Après calcul de cet indice pour chaque individu, le mécanisme de sélection est appliqué pour copier les individus sélectionnés. Les individus ayant des performances élevées ont plus de probabilité d'être reproduits dans la génération suivante.

c. Croisement.

Après l'étape de sélection, le croisement est appliqué. Dans cette étape, les individus sont regroupés aléatoirement par paire (parents). Le croisement se fait ensuite pour créer les enfants avec une probabilité *Pc*, sinon les parents ne changent pas. Cet opérateur sert à explorer des nouvelles régions dans l'espace de recherche. Le type de croisement le plus simple est le croisement seul point : nous l'avons appliqué dans cette étude.

d. Mutation.

Pour introduire une certaine diversification dans la population et éviter ainsi une convergence prématurée en un optimum local, l'opérateur de mutation est appliqué. Les bits subissent la mutation sont choisis aléatoirement avec une probabilité *Pm*.

Pour synthétiser les paramètres du PSS et visualiser les différentes étapes de l'algorithme génétique on a créé et élaboré un GUI (**G**raphical **U**ser **I**nterfaces) sous logiciel MATLAB, ce dernier permet de calculer et visualiser les opérations d'AG (Codage et initialisation, Evaluation, Sélection, Croisement et Mutation). On utilise **optimisation/GA/PSS/monoobjective**

1. Choix la méthode de régulation (sans optimisation ou avec optimisation (GA et PSO)).
2. Paramètres du système SMIB.
3. Paramètres de l'algorithme génétique.
4. Résultats de simulation après d'optimisation.
5. Résultats de simulation à chaque itération.
6. Valeur de σ à chaque itération.
7. Diagnostique du système SMIB étudié.
8. Les étapes de l'algorithme génétique.
9. Résultats d'optimisation.
10. Visualiser les résultats de simulation et d'optimisation.

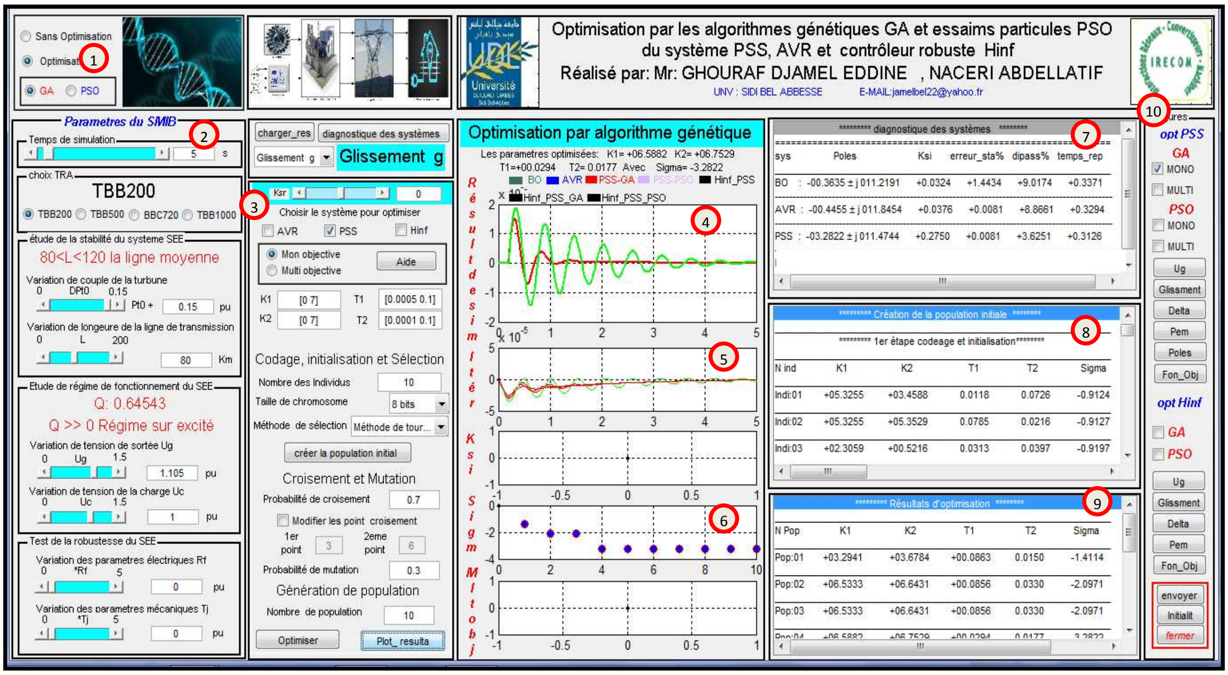


Figure VI.5. Synthèses des paramètres du PSS par l'algorithme génétique sous GUI-MATLAB

Exemple simple de résultat d'optimisation de 10 générations et 10 individus obtenus à l'aide d'interface graphique réalisé.

*********** Création de la population initiale **********

*********** 1er étape codage et initialisation**********

N ind	K1	K2	T1	T2	Segma
Individu:01	+05.3255	+03.4588	0.0118	0.0726	-0.9124
Individu:02	+05.3255	+05.3529	0.0785	0.0216	-0.9127
Individu:03	+02.3059	+00.5216	0.0313	0.0397	-0.9197
Individu:04	+06.6431	+02.7176	0.0633	0.0138	-0.9099
Individu:05	+06.4784	+00.6039	0.0064	0.0698	-0.9101
Individu:06	+00.2471	+02.9373	0.0169	0.0028	-0.5860
Individu:07	+00.4392	+05.4902	0.0559	0.0616	-0.5478
Individu:08	+03.6235	+02.0588	0.0528	0.0236	-0.9167
Individu:09	+06.8078	+01.0431	0.0906	0.0040	-0.9089
Individu:10	+05.4902	+04.5843	0.0988	0.0514	-0.9112

*********** 2eme étape Sélection **********

N ind	K1	K2	T1	T2	Segma
Individu:01	+05.3255	+05.3529	0.0785	0.0216	-00.9127
Individu:02	+02.3059	+00.5216	0.0313	0.0397	-00.9197
Individu:03	+02.3059	+00.5216	0.0313	0.0397	-00.9197
Individu:04	+06.4784	+00.6039	0.0064	0.0698	-00.9101
Individu:05	+06.4784	+00.6039	0.0064	0.0698	-00.9101
Individu:06	+00.2471	+02.9373	0.0169	0.0028	-00.5860
Individu:07	+03.6235	+02.0588	0.0528	0.0236	-00.9167
Individu:08	+03.6235	+02.0588	0.0528	0.0236	-00.9167
Individu:09	+05.4902	+04.5843	0.0988	0.0514	-00.9112
Individu:10	+02.3059	+00.5216	0.0313	0.0397	-00.9197

*********** 3eme étape Croisement **********

N ind	K1	K2	T1	T2	Segma
Individu:01	+05.8745	+05.7922	0.0801	0.0154	-00.9116
Individu:02	+01.7569	+00.0824	0.0298	0.0459	-00.9209
Individu:03	+02.9647	+00.6314	0.0313	0.0444	-00.9182
Individu:04	+05.8196	+00.4941	0.0064	0.0651	-00.9118
Individu:05	+05.4902	+01.1529	0.0173	0.0526	-00.9126
Individu:06	+01.2353	+02.3882	0.0060	0.0201	-00.9966
Individu:07	+03.6235	+02.0588	0.0528	0.0236	-00.9167
Individu:08	+03.6235	+02.0588	0.0528	0.0236	-00.9167
Individu:09	+05.8196	+04.0353	0.0801	0.0655	-00.9102
Individu:10	+01.9765	+01.0706	0.0501	0.0256	-00.9203

Pc	codage K1	codage K2	codage T1	codage T2	état de croisement
0.546	**1 1 0 1 0 1 1 0**	1 1 0 1 0 0 1 1	**1 1 0 0 1 1 0 0**	0 0 1 0 0 1 1 1	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
0.546	**0 1 0 0 0 0 0 0**	0 0 0 0 0 0 1 1	**0 1 0 0 1 0 1 1**	0 1 1 1 0 1 0 1	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
0.308	**0 1 1 0 1 1 0 0**	0 0 0 1 0 1 1 1	**0 1 0 0 1 1 1 1**	0 1 1 1 0 0 0 1	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
0.308	**1 1 0 1 0 1 0 0**	0 0 0 1 0 0 1 0	**0 0 0 0 1 1 1 1**	1 0 1 0 0 1 1 0	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
0.532	**1 1 0 0 1 0 0 0**	0 0 1 0 1 0 1 0	**0 0 1 0 1 0 1 1**	1 0 0 0 0 1 1 0	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
0.532	**0 0 1 0 1 1 0 1**	0 1 0 1 0 1 1 1	**0 0 0 0 1 1 1 0**	0 0 1 1 0 0 1 1	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
0.059	**1 0 0 0 0 1 0 0**	0 1 0 0 1 0 1 1	**1 0 0 0 0 1 1 0**	0 0 1 1 1 1 0 0	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
0.059	**1 0 0 0 0 1 0 0**	0 1 0 0 1 0 1 1	**1 0 0 0 0 1 1 0**	0 0 1 1 1 1 0 0	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
0.673	**1 1 0 1 0 1 0 0**	1 0 0 1 0 0 1 1	**1 1 0 0 1 1 0 0**	1 0 1 0 0 1 1 1	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
0.673	**0 1 0 0 1 0 0 0**	0 0 1 0 0 1 1 1	**0 1 1 1 1 1 1 1**	0 1 0 0 0 0 0 1	-----> Pc < PC: Il y a un croisement

*********** 4ème étape Mutation **********

Probabilités de mutation utilisées

0.74 0.16 0.720.940.800.040.460.720.250.890.780.170.330.590.320.710.310.470.190.460.130.860.240.830.360.830.090.920.270.150.790.93
0.78 0.91 0.920.790.870.980.970.430.240.830.910.690.520.140.820.300.290.350.920.350.810.750.450.130.760.660.110.090.880.580.440.40
0.85 0.21 0.020.611.000.630.700.600.830.930.850.500.670.290.570.260.520.190.710.220.280.320.490.330.400.820.470.530.630.980.610.83
0.02 0.76 0.390.681.000.400.610.840.370.320.490.910.010.830.980.630.670.630.860.590.680.190.910.620.520.760.920.160.560.370.260.05
0.41 0.06 0.390.620.750.210.140.800.610.580.330.040.880.510.120.610.900.200.670.170.420.420.870.360.870.320.040.680.810.860.540.13
0.13 0.36 0.310.290.980.970.090.660.520.960.720.520.530.460.740.160.530.000.810.680.490.030.550.650.410.780.230.740.290.710.020.99
0.91 0.05 0.680.010.970.060.140.380.700.680.760.290.850.230.910.640.570.850.680.320.720.590.140.780.190.870.700.850.230.090.310.39
0.74 0.16 0.340.540.730.640.440.140.320.500.320.160.310.100.700.990.230.970.080.450.080.490.750.010.560.660.420.450.710.080.500.97
0.26 0.28 0.760.880.050.130.020.190.940.830.520.590.410.140.110.640.650.150.350.830.680.900.000.270.770.580.420.460.990.030.230.11
0.24 0.65 0.550.180.960.890.950.380.980.140.660.520.860.540.850.620.130.830.750.030.840.810.250.000.920.730.410.500.750.810.880.73

Codage après mutation

Codage K1	codage K2	codage T1	codage T2
1 0 0 1 0 0 1 0	0 1 0 0 0 0 1 1	**1 1 1 0 0 1 1 0**	0 0 0 0 1 0 1 1
0 1 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 1 1 0	**1 1 0 0 1 0 1 0**	0 1 0 0 0 1 0 1
0 0 0 0 1 1 0 0	0 0 0 1 0 0 1 0	**0 0 0 1 0 1 1 1**	0 1 1 1 0 0 0 1
0 1 0 1 0 1 0 0	0 0 0 1 1 0 1 0	**0 0 0 0 1 0 1 1**	1 0 1 1 0 1 0 1
1 0 0 0 1 1 1 0	0 0 1 1 1 0 0 0	**0 1 1 1 1 0 1 1**	1 0 1 0 0 1 1 1
1 1 0 1 1 0 0 0	0 1 1 0 0 1 1 1	**1 1 1 0 1 1 0 0**	0 1 0 0 0 0 0 1
1 1 0 1 0 0 1 0	0 1 0 1 1 1 1 1	**1 0 0 0 0 1 0 0**	1 0 1 1 0 0 0 0
1 1 0 0 0 1 0 1	0 1 0 1 1 1 1 1	**0 0 1 0 1 1 1 1**	0 0 1 1 1 0 0 0
0 0 0 1 1 0 1 1	1 0 0 1 0 1 0 1	**1 0 0 0 1 1 1 1**	1 0 1 0 0 0 0 0
1 1 0 1 1 0 0 0	0 1 1 0 0 1 1 1	**1 1 1 0 1 1 0 0**	0 1 0 0 0 0 0 1

N ind	K1	K2	T1	T2	Segma
Individu:01	+04.0078	+01.8392	0.0902	0.0044	-00.9157
Individu:02	+01.7569	+03.6784	0.0793	0.0271	-00.9282
Individu:03	+00.3294	+00.4941	0.0095	0.0444	-00.5863
Individu:04	+02.3059	+00.7137	0.0048	0.0710	-00.9196
Individu:05	+03.8980	+01.5373	0.0485	0.0655	-00.9155

Individu:06	+05.2431	+02.3608	0.0294	0.0099	-00.9138
Individu:07	+05.7647	+02.6078	0.0520	0.0691	-00.9107
Individu:08	+03.2941	+03.6784	0.0863	0.0150	-1.41140
Individu:09	+00.7412	+04.0902	0.0563	0.0628	-00.6215
Individu:10	+05.9294	+02.8275	0.0926	0.0256	-00.9107

********* **Résultats d'optimisation** ********

N Pop	K1	K2	T1	T2	Segma
Population:01	+03.2941	+03.6784	+00.0863	0.0150	-1.4114
Population:02	+06.5333	+06.6431	+00.0856	0.0330	-2.0971
Population:03	+06.5333	+06.6431	+00.0856	0.0330	-2.0971
Population:04	+06.5882	+06.7529	+00.0294	0.0177	-3.2822
Population:05	+06.5882	+06.7529	+00.0294	0.0177	-3.2822
Population:06	+06.5882	+06.7529	+00.0294	0.0177	-3.2822
Population:07	+06.5882	+06.7529	+00.0294	0.0177	-3.2822
Population:08	+06.5882	+06.7529	+00.0294	0.0177	-3.2822
Population:09	+06.5882	+06.7529	+00.0294	0.0177	-3.2822
Population:10	+06.5882	+06.7529	+00.0294	0.0177	-3.2822

L optimisation est terminé.......
Les paramètres optimisés:
K1= +06.5882 K2= +06.7529 T1=+00.0294 T2= 0.0177 Segma= -3.2822

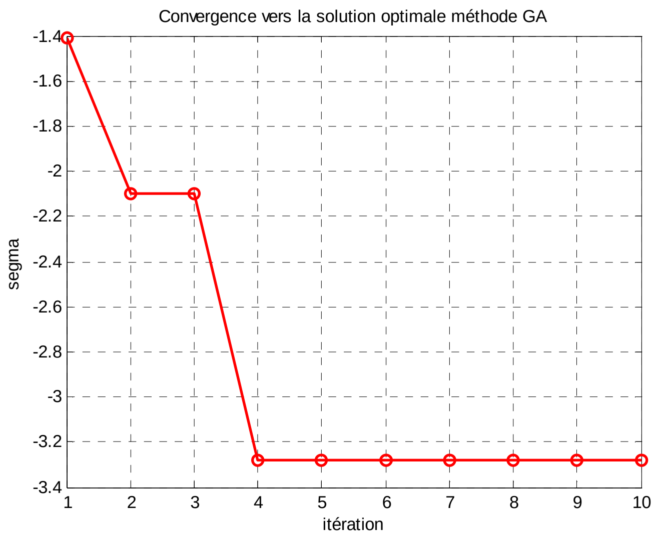


Figure VI.6.Résultat d'optimisation par GA de fonction mono objective

VI.2.2 .3 .1 ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE GA ET PSO

La même fonction objective optimisé par essaims particulaires PSO pour comparer avec les résultats de l'algorithme génétique GA. Dans l'interface graphique précédant on utilise **optimisation/PSO/PSS/monoobjective** pour calculer et visualiser les résultats d'optimisation par PSO

1. Paramètre des essaims particulaires.
2. Résultats d'optimisation (étude comparative entre GA et PSO).
3. Initialisation de PSO.
4. Résultats de l'optimisation.

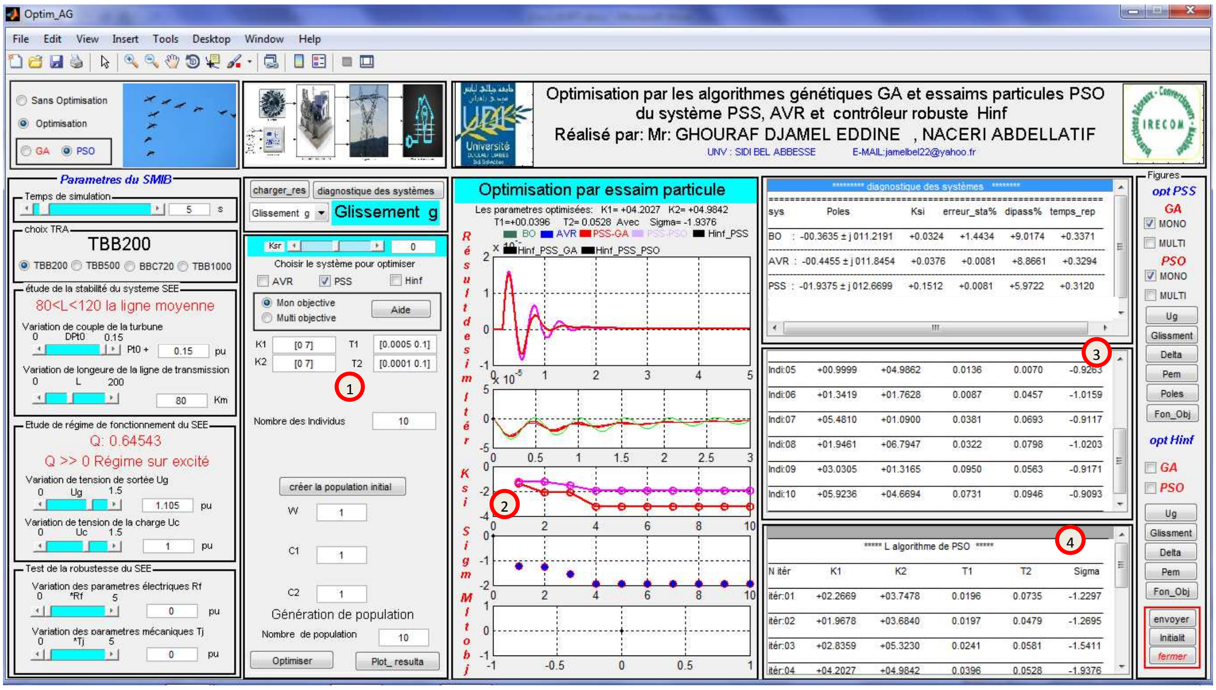


Figure VI.7.synthèses des paramètres du PSS par essaims particulaires sous GUI-MATLAB

Exemple simple de résultat d'optimisation de 10 générations et 10 individus obtenus à l'aide d'interface graphique réalisé.

*********** Initialisation PSO **********

N ind	K1	K2	T1	T2	Segma
Individu:01	+02.2669	+03.7478	0.0196	0.0735	-1.2297
Individu:02	+01.8199	+03.4169	0.0887	0.0380	-0.8399
Individu:03	+03.5118	+01.0559	0.0077	0.0258	-0.9175
Individu:04	+00.9394	+02.0283	0.0995	0.0431	-0.6079
Individu:05	+00.9999	+04.9862	0.0136	0.0070	-0.9263
Individu:06	+01.3419	+01.7628	0.0087	0.0457	-1.0159
Individu:07	+05.4810	+01.0900	0.0381	0.0693	-0.9117
Individu:08	+01.9461	+06.7947	0.0322	0.0798	-1.0203
Individu:09	+03.0305	+01.3165	0.0950	0.0563	-0.9171
Individu:10	+05.9236	+04.6694	0.0731	0.0946	-0.9093

******* L'algorithme de PSO *******

N Pop	K1	K2	T1	T2	Segma
Iteration:01	+02.2669	+03.7478	0.0196	0.0735	-1.2297
Iteration:02	+01.9678	+03.6840	0.0197	0.0479	-1.2695
Iteration:03	+02.8359	+05.3230	0.0241	0.0581	-1.5411
Iteration:04	+04.2027	+04.9842	0.0396	0.0528	-1.9376
Iteration:05	+04.2027	+04.9842	0.0396	0.0528	-1.9376
Iteration:06	+04.2027	+04.9842	0.0396	0.0528	-1.9376
Iteration:07	+04.2027	+04.9842	0.0396	0.0528	-1.9376
Iteration:08	+04.2027	+04.9842	0.0396	0.0528	-1.9376
Iteration:09	+04.2027	+04.9842	0.0396	0.0528	-1.9376
Iteration:10	+04.2027	+04.9842	0.0396	0.0528	-1.9376

L'optimisation est terminée.......
Les paramètres optimisés: K1= +04.2027 K2= +04.9842 T1=+00.0396 T2= 0.0528 Segma= -1.9376

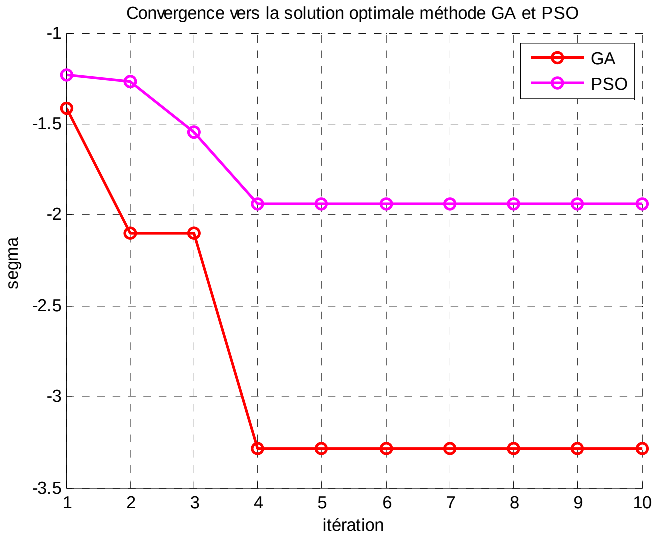


Figure VI.8.Résultat d'optimisation par GA et PSO de fonction mono objective

Les résultats d'optimisation obtenues montrent que l'AG (Segma= -3.2822) plus fiable en comparaison au PSO (Segma= -1.9376)

Pour vérifier ce résultat on a optimisé notre système avec 100 itérations et 70 individus, le résultat d'optimisation est représenté à la figure VI.9 suivante.

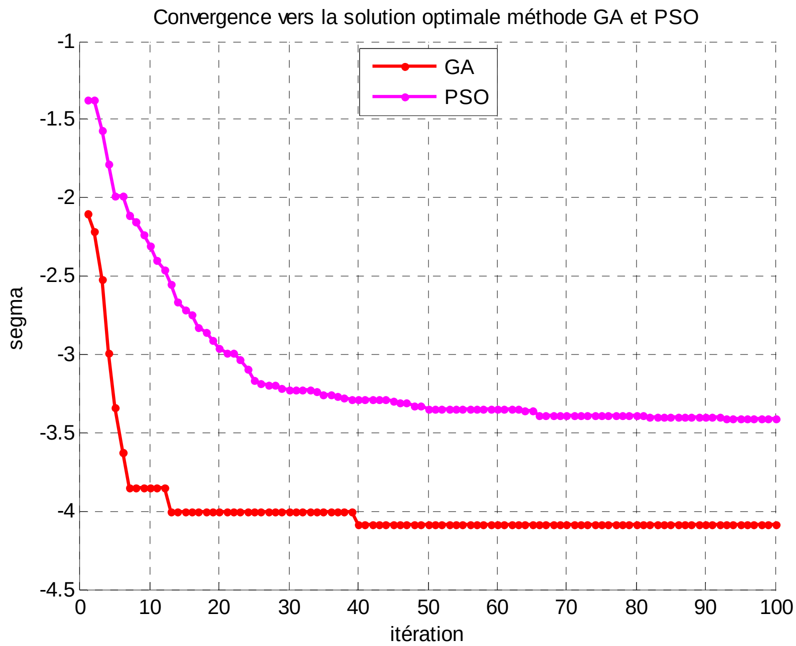


Figure VI.9. Evolution de la fonction multi objective par GA et PSO de la mono objective

- L'algorithme génétique GA:

K_1= +05.5412 K_2= +06.8471 T_1=+00.0614 T_2= 0.0025 Segma= -4.0841

- Essaims particulaires PSO :

K_1= +07.1168 K_2= +07.2654 T_1=+00.0277 T_2= 0.0436 Segma= -3.4097

D'après cette résultat on peut constater que :

- L'algorithme génétique GA plus performant que les essaims particulaires PSO avec une différence de 0.6744.
- Après 40 itérations l'AG trouve la solution optimale par contre PSO ne trouve pas son optimisation après 100 itérations.
- L'AG est très rapide et précise en comparaison au PSO.

VI.2.2 .3 .2 RESULTATS DE SIMULATION :

On fait optimiser les paramètres de PSS par l'algorithme génétique et essaims particulaires avec les différents modes de fonctionnement du système SMIB (régime nominal, régime sous excité et régime sur excité) et avec différentes configurations du réseau extérieur **(**ligne longue, ligne moyenne et ligne courte) et différentes type des turbo-alternateurs TBB 200, TBB 500, BBC 700 et TBB 1000 (voir annexe A).

On a effectué des perturbations par variation brusque du couple de la turbine à 15% de ΔT_m à l'instant t=1s et on test seulement la robustesse de système avec variations des paramètres électriques (majoration de 100% de R à l'instant t = 5 s).

Les paramètres de PSS (K_1, K_2, T_1 et T_2) optimisés par l'algorithme génétique et par essaims particulaires et les performances du comportement dynamique du système SMIB (σ: Partie réelle des pôles dominats, ε %: erreurs statiques en %, *d* %: dépassements en %, et t_s : temps d'établissements) sont représentés au tableau VI.2

Les courbes obtenues (Figure IV.10 à 13) nous donnent respectivement :

- La puissance électromagnétique (Pe).
- La tension terminale du Turbo Alternateur (Ug).
- L'angle interne 'delta' du TA entre la tension et la FEM.
- La variation de vitesse en terme de glissement ($\Delta\omega$).

Les résultats ci-après (Tableau VI.2.et figures IV.10. à 13), ont été obtenus par l'étude des performances dynamiques du système électro- énergétique étudié (type SMIB) dans les cas suivants:

- le contrôleur PSS (AVR-FA) optimisé par l'algorithme génétique.
- le contrôleur PSS (AVR-FA) optimisé par essaims particulaires.

Avec une ligne longue de longueur (L >120 km) et régime de fonctionnement de renvoie de la puissance réactive du réseau vers la machine (Q< 0) (régime sous excité) et différents types des Turbo – Alternateurs: TBB-200, TBB-500, BBC-720 et TBB-1000

Tableau VI.2.paramètres de PSS optimisés par l'algorithme génétique et essaims particulaires

TBB 200								
Régime	**algorithme génétique GA**				**essaims particulaires PSO**			
sur excité	K_1	K_2	T_1	T_2	K_1	K_2	T_1	T_2
	05.2157	06.3412	00.0091	0.0475	05.8831	06.4536	00.0367	0.0759
	σ	D%	ε	t_r	σ	D%	ε	t_r
	-3.2284	4.7240	0.0100	0.3023	-2.5594	5.1776	0.0100	0.3037
nominal	K_1	K_2	T_1	T_2	K_1	K_2	T_1	T_2
	05.0510	06.7255	00.0302	0.0146	03.7907	05.0131	00.0753	0.0293
	σ	D%	ε	t_r	σ	D%	ε	t_r
	-4.6783	4.8167	0.0131	0.2115	-2.4876	5.1291	0.0131	0.3079
sous excité	K_1	K_2	T_1	T_2	K_1	K_2	T_1	T_2
	02.6353	04.1725	00.0177	0.0420	02.1735	05.5354	00.0151	0.0674
	σ	D%	ε	t_r	σ	D%	ε	t_r
	-3.9728	4.1277	0.0141	0.3004	-02.965	4.6038	0.0141	0.3019
TBB 500								
Régime	**algorithme génétique GA**				**essaims particulaires PSO**			
sur excité	K_1	K_2	T_1	T_2	K_1	K_2	T_1	T_2
	04.7255	04.3137	00.0274	0.0600	03.9005	02.4449	00.0491	0.0259
	σ	D%	ε	t_r	σ	D%	ε	t_r
	-3.7175	4.4628	0.0129	0.3006	-03.192	4.8218	0.0130	0.3114
nominal	K_1	K_2	T_1	T_2	K_1	K_2	T_1	T_2
	04.8039	02.7647	00.0594	0.0252	04.6099	03.9847	00.0393	0.0556
	σ	D%	ε	t_r	σ	D%	ε	t_r
	-6.6824	4.6191	0.0195	0.2711	-5.4492	4.7351	0.0195	0.2804
sous excité	K_1	K_2	T_1	T_2	K_1	K_2	T_1	T_2
	01.9529	00.1412	00.0458	0.0052	02.0196	01.0644	00.0088	0.0295
	σ	D%	ε	t_r	σ	D%	ε	t_r
	-4.5238	4.0305	0.0234	0.2981	-4.2726	4.7322	0.0234	0.3027
BBC 720								
Régime	**algorithme génétique GA**				**essaims particulaires PSO**			
sur excité	K_1	K_2	T_1	T_2	K_1	K_2	T_1	T_2
	04.7059	02.8235	00.0270	0.0291	04.1472	06.3587	00.0396	0.0431
	σ	D%	ε	t_r	σ	D%	ε	t_r
	-03.551	4.9930	0.0118	0.3076	-03.084	5.0459	0.0118	0.3101
nominal	K_1	K_2	T_1	T_2	K_1	K_2	T_1	T_2
	05.0000	00.8039	00.0532	0.0189	04.5620	00.0864	00.0311	0.0382
	σ	D%	ε	t_r	σ	D%	ε	t_r
	-6.3536	4.0948	0.0189	0.2949	-5.9374	4.1937	0.0189	0.2995
sous excité	K_1	K_2	T_1	T_2	K_1	K_2	T_1	T_2
	01.6706	00.7922	00.0173	0.0549	01.3400	00.5358	00.0138	0.0381
	σ	D%	ε	t_r	σ	D%	ε	t_r
	-04.641	4.2434	0.0255	0.2968	-03.728	4.7443	0.0255	0.2968
TBB 1000								
Régime	**algorithme génétique GA**				**essaims particulaires PSO**			
sur excité	K_1	K_2	T_1	T_2	K_1	K_2	T_1	T_2
	04.8627	04.6078	00.0032	0.0518	04.1571	03.1583	00.0093	0.0528
	σ	D%	ε	t_r	σ	D%	ε	t_r
	-3.5732	4.8178	0.0145	0.3208	-3.1210	5.4824	0.0145	0.3218
nominal	K_1	K_2	T_1	T_2	K_1	K_2	T_1	T_2
	04.9216	01.4902	00.0290	0.0573	05.1459	00.8258	00.0196	0.0721
	σ	D%	ε	t_r	σ	D%	ε	t_r
	-5.7096	4.7939	0.0196	0.2917	-5.2283	5.1174	0.0196	0.2942
sous excité	K_1	K_2	T_1	T_2	K_1	K_2	T_1	T_2
	02.0000	01.7176	00.0329	0.0275	02.0424	00.5840	00.0279	0.0392
	σ	D%	ε	t_r	σ	D%	ε	t_r
	-4.8079	4.6334	0.0244	0.2929	-4.8127	4.6720	0.0245	0.2922

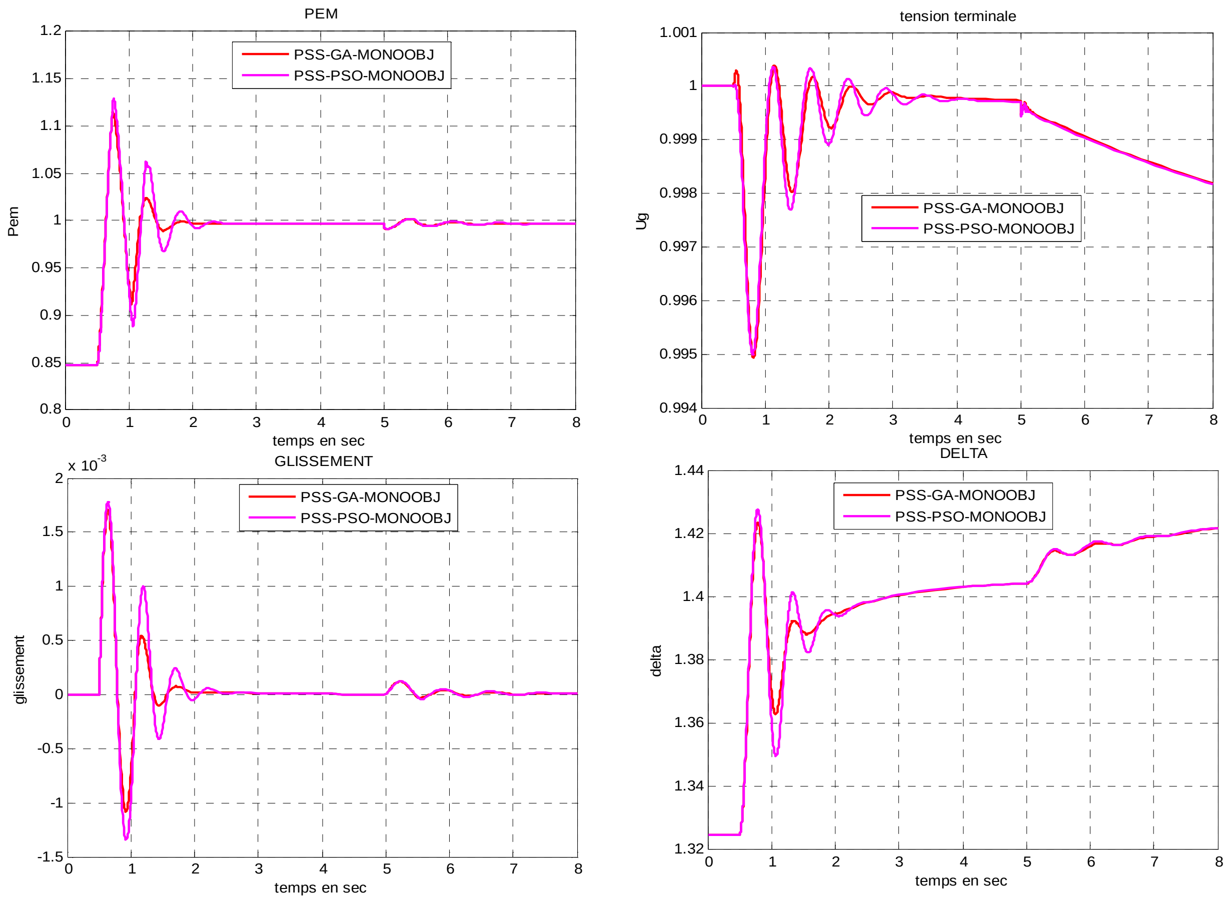


Figure VI.10.: GS TBB-200 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne longue

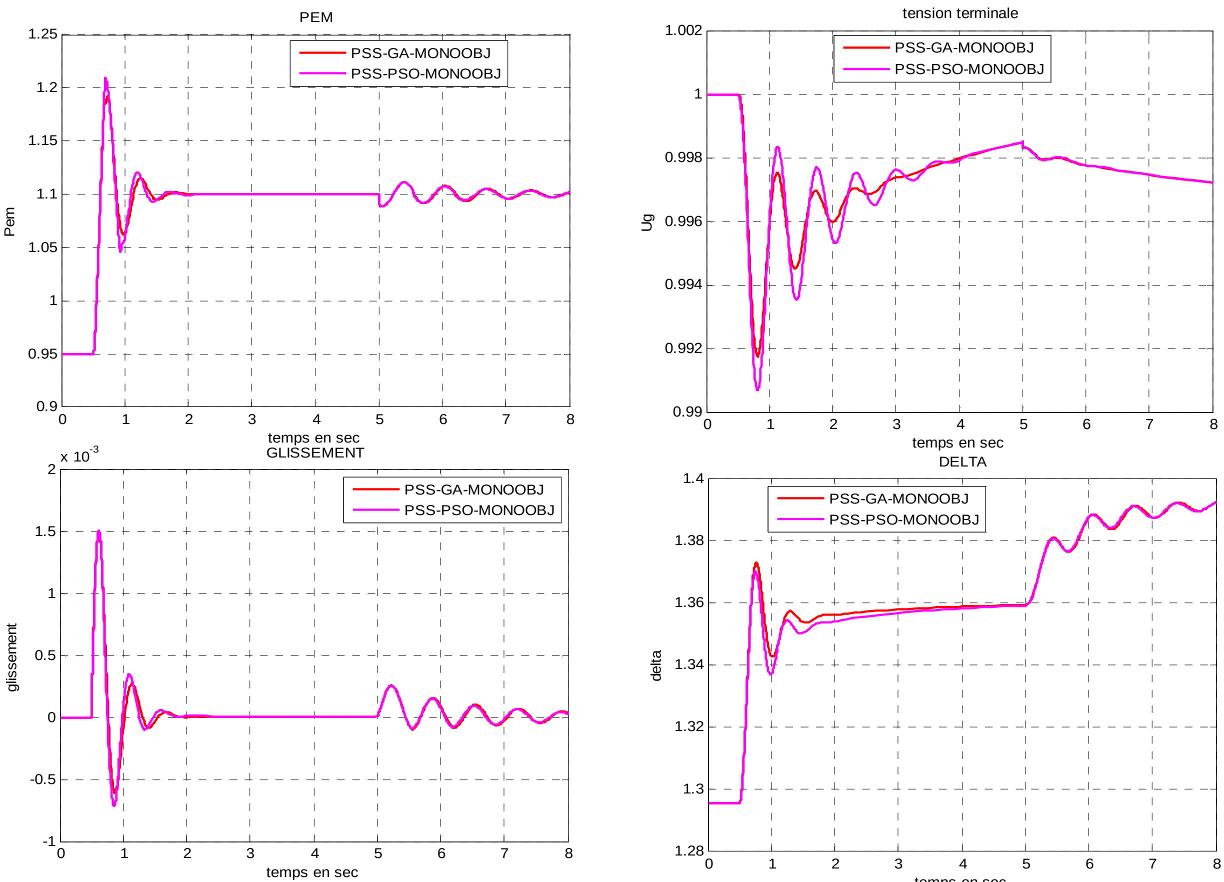


Figure IV.11 : GS TBB-500 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne longue

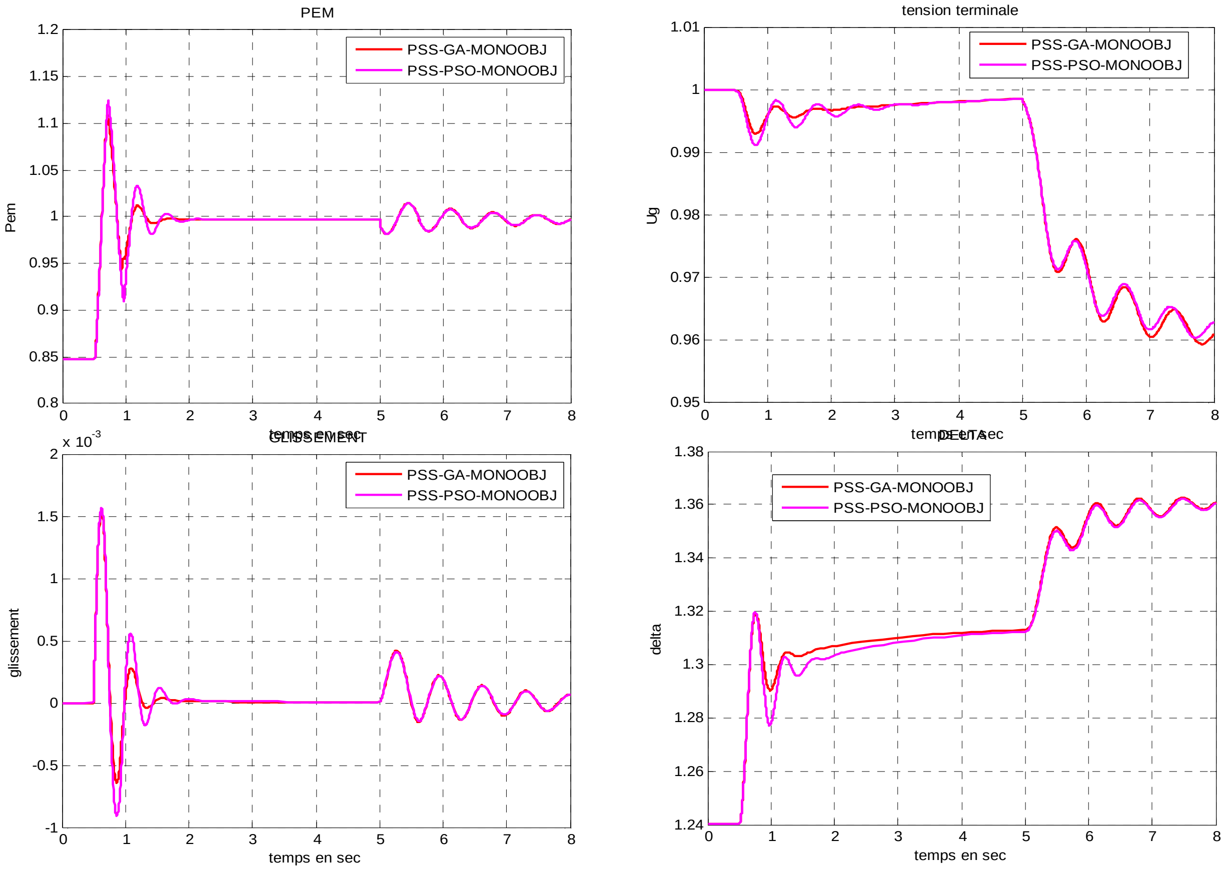


Figure IV.12 : GS BBC720 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne longue

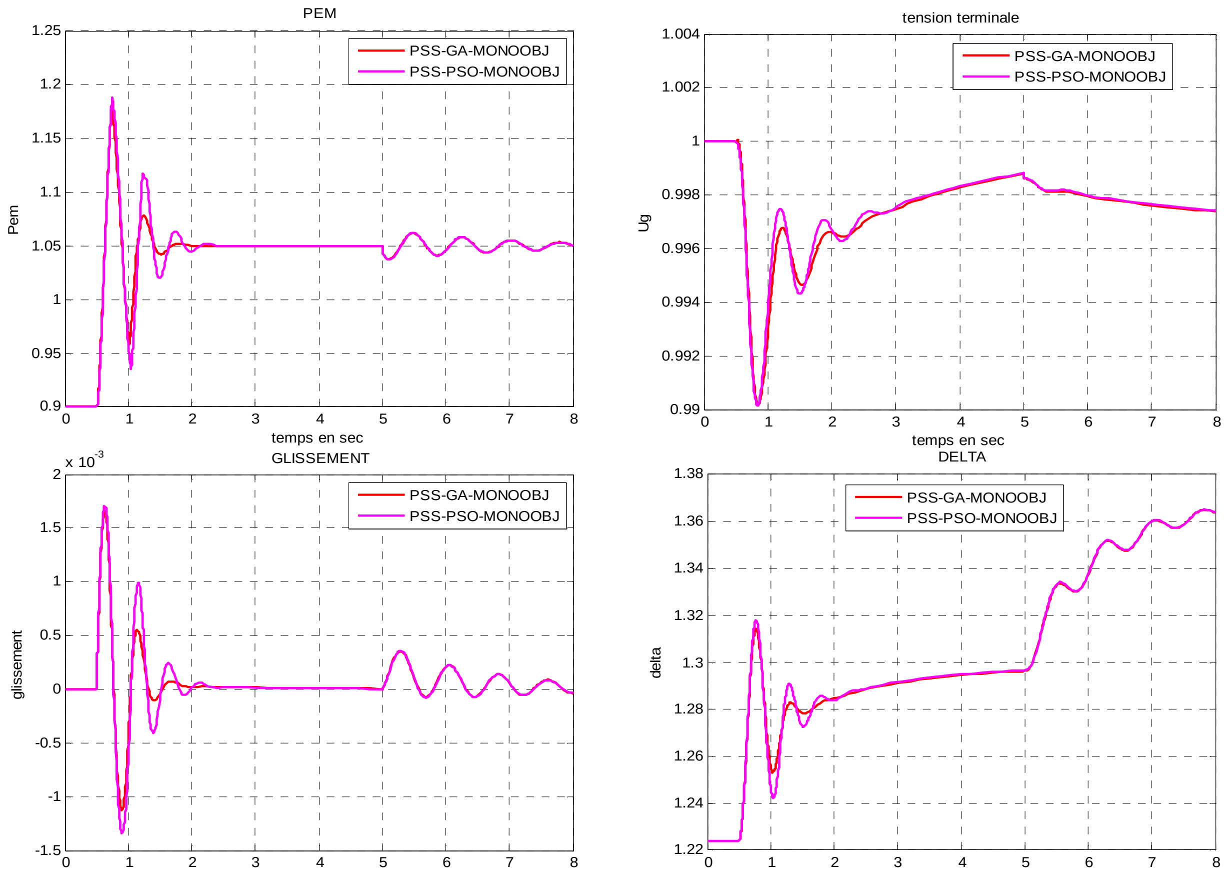


Figure IV.13 : GS TBB1000 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne longue

L'optimisation des paramètres de stabilisateur de système de puissance PSS donne au système SMIB des améliorations considérables au niveau de comportement dynamique de ce dernier :

- dépassement inferieur à 5% en régime le plus critique (régime sous excité avec ligne longue)
- temps de réponse très courte inferieur à 0.3 seconde
- erreur statique négligeable
- stabilité considérable σ inferieur a –2

Les performances dynamiques tableau VI.2 et les résultats de simulations Figure IV.10 à 13 obtenues par l'optimisation par l'algorithme génétique ou essaims particulaires des paramètres de PSS plus performent en comparaison avec les résultats de chapitre 3.Par contre la robustesse de système on remarque aucune amélioration.

Concernent l'optimisation par l'algorithme génétique, dans la majorité des résultats (tableau et figures) bien adapté avec le système SMIB par rapport l'utilisation de l'optimisation par les essaims particulaires.

VI.2.2 .4 FONCTION MULTI OBJECTIVE

Le système SMIB est stable avec l'utilisation de fonction mono objective mais elle contient d'inconvénient, si les deux facteurs σ et coefficient d'amortissement ζ sont minimaux simultanément. Le comportement dynamique d'un tel système dépend de la valeur des deux constantes σ et surtout de coefficient d'amortissement ζ (figure VI.14)

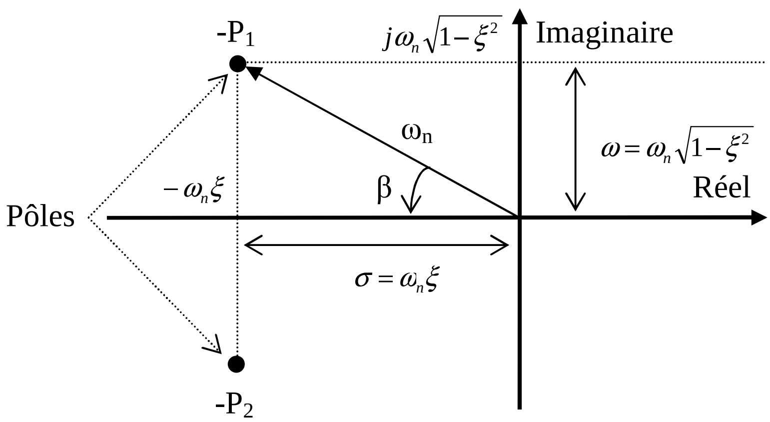


Figure VI.14. Relations entre les paramètres d'un système asservi dans le plan Complexe

Avec $\xi = \cos(\beta) = \dfrac{\zeta\omega_n}{\omega_n}$

si $\beta = 0 \rightarrow \cos(\beta) = 1 : \zeta = 1$ stabilité asymptotique

si $\beta = \dfrac{\pi}{2} \rightarrow \cos(\beta) = 0 : \zeta = 0$ stabilité marginale

On considéré deux système de même partie réel $\sigma_{s1}= \sigma_{s2}$ et de partie imaginaire déférant :

- Système 1 : $P_{1,2}$=-2±j avec coefficient d'amortissement ζ = 0.8944
- Système 2 : $P_{1,2}$=-2±8j avec coefficient d'amortissement ζ = 0.2425

La représentation des pôles des systèmes sur l'axe imaginaire et les réponses indicielles correspond chaque système illustre à la Figure VI.15.

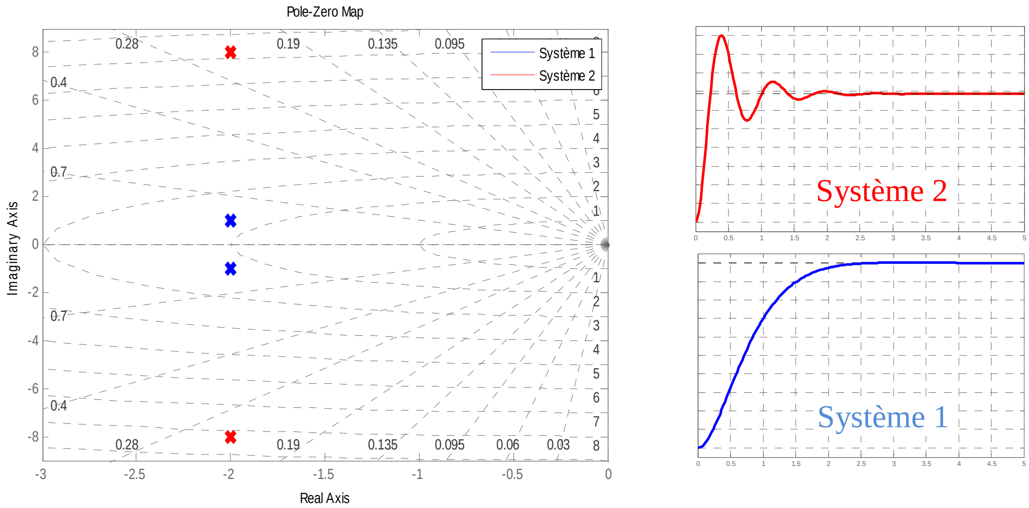


Figure VI.15.L'influence de coefficient d'amortissement ζ au système asservi

L'augmentation de coefficient d'amortissement ζ amélioré la stabilité de système

A base de ce résultat on a proposé une autre fonction objective composée par deux fonctions. Cette fonction multi objective doit maximiser la marge de stabilité en augmentant les facteurs d'amortissement tout en minimisant les parties réelles des valeurs propres du système.

$$\mathbf{F_{obj}=max\ (max(\zeta)-min(\sigma))} \quad \text{(VI.14)}$$

Remarque : pour un système stable σ toujours négative avec le signe mois nous donne une valeur positive grande plus la valeur de coefficient d'amortissement ζ entre 0 et 1.On doit maximiser l'ensemble de deux fonctions objectives

Les étapes de calcul de cette fonction multi objective sont les mêmes étapes qui définissent précédemment.

VI.2.2 .4 .1 Resultats d'Optimisation

La synthétiser des paramètres du PSS à basse de fonction multi objective a été implémenté sous interface graphique (Figure VI.16).On utilise **optimisation/GA/PSS/multiobjective**

1 Fonction multi objective.

2 Partie réel de pole σ.

3 Coefficient d'amortissement ζ.

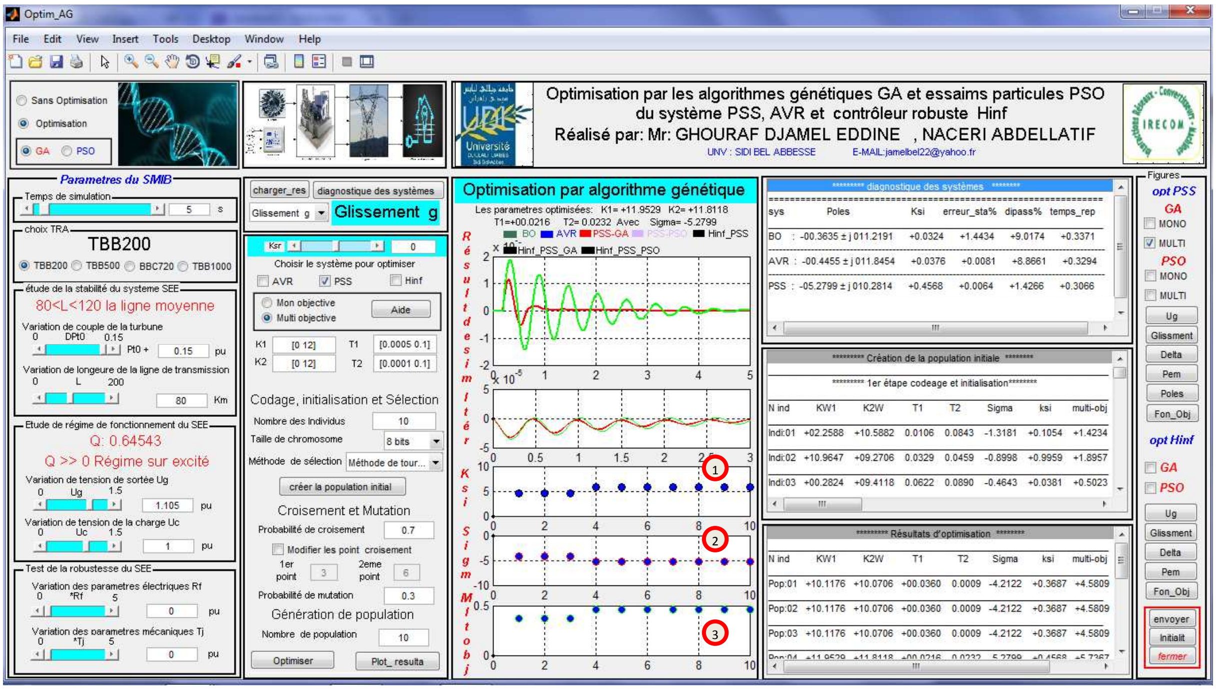


Figure VI.16.synthèses des paramètres du PSS par GA (multiobjective) sous GUI-MATLAB

Ci-après un exemple simple de résultat d'optimisation de 10 générations et 10 individus obtenus à l'aide d'interface graphique réalisé.

*********** Création de la population initiale **********

*********** 1er étape codage et initialisation**********

N ind	K1	K2	T1	T2	Segma	ksi	multi-obj
Individu:01	+02.2588	+10.5882	0.0106	0.0843	-1.3181	+0.1054	+1.4234
Individu:02	+10.9647	+09.2706	0.0329	0.0459	-0.8998	+0.9959	+1.8957
Individu:03	+00.2824	+09.4118	0.0622	0.0890	-0.4643	+0.0381	+0.5023
Individu:04	+02.0706	+08.0941	0.0473	0.0432	-1.1622	+0.0932	+1.2554
Individu:05	+09.1765	+07.8118	0.0711	0.0659	-0.9022	+0.9960	+1.8982
Individu:06	+05.9765	+11.4353	0.0602	0.0792	-1.4711	+0.1082	+1.5794
Individu:07	+00.5647	+03.6706	0.0294	0.0702	-0.6460	+0.0535	+0.6995
Individu:08	+02.6353	+02.4471	0.0906	0.0154	-0.9187	+0.9989	+1.9176
Individu:09	+03.8118	+02.5412	0.0501	0.0095	-0.9165	+0.9964	+1.9129
Individu:10	+05.9765	+11.1529	0.0828	0.0706	-1.2001	+0.0891	+1.2892

*********** 2eme étape Sélection **********

N ind	K1	K2	T1	T2	Segma	ksi	multi-obj
Individu:01	+10.9647	+09.2706	0.0329	0.0459	-00.8998	+0.9959	+1.8957
Individu:02	+10.9647	+09.2706	0.0329	0.0459	-00.8998	+0.9959	+1.8957
Individu:03	+02.0706	+08.0941	0.0473	0.0432	-01.1622	+0.0932	+1.2554
Individu:04	+09.1765	+07.8118	0.0711	0.0659	-00.9022	+0.9960	+1.8982
Individu:05	+09.1765	+07.8118	0.0711	0.0659	-00.9022	+0.9960	+1.8982
Individu:06	+05.9765	+11.4353	0.0602	0.0792	-01.4711	+0.1082	+1.5794
Individu:07	+02.6353	+02.4471	0.0906	0.0154	-00.9187	+0.9989	+1.9176
Individu:08	+02.6353	+02.4471	0.0906	0.0154	-00.9187	+0.9989	+1.9176
Individu:09	+03.8118	+02.5412	0.0501	0.0095	-00.9165	+0.9964	+1.9129
Individu:10	+02.6353	+02.4471	0.0906	0.0154	-00.9187	+0.9989	+1.9176

*********** 3eme étape Croisement **********

Etat de croisement

Pc = 0.267	**0 1 1 1 1 0 0 1** 0 0 1 1 0 1 1 0 **0 1 1 0 0 1 1 1** 0 0 1 0 0 1 0 0	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.267	**0 1 1 1 1 0 0 1** 0 0 1 1 0 1 1 0 **0 1 1 0 0 1 1 1** 0 0 1 0 0 1 0 0	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.521	**0 0 1 1 1 0 0 0** 0 0 1 1 0 1 0 0 **1 1 0 0 0 1 1 1** 0 0 1 0 0 1 1 1	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.521	**0 0 1 1 1 0 0 0** 0 0 1 1 0 1 0 0 **1 1 1 0 0 0 1 1** 0 0 1 0 0 1 1 1	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.766	**0 0 1 1 1 0 0 0** 0 0 1 1 0 1 0 0 **1 1 1 0 0 1 1 1** 0 0 1 0 0 1 1 1	-----> Pc > PC: pas de croisement...
Pc = 0.766	**1 1 0 0 0 0 1 1** 1 0 1 0 0 1 1 0 **1 0 1 1 0 1 0 1** 1 0 1 0 1 0 0 0	-----> Pc > PC: pas de croisement...
Pc = 0.571	**0 0 1 0 1 1 0 0** 1 0 1 0 1 1 0 0 **0 1 1 1 1 0 0 0** 0 1 1 0 1 1 1 0	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.571	**0 0 1 0 1 1 0 0** 1 0 1 0 1 1 0 0 **0 1 1 1 1 0 0 0** 0 1 1 0 1 1 1 0	-----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.765	**1 1 1 0 1 0 0 1** 1 1 0 0 0 1 0 1 **0 1 0 1 0 0 1 1** 0 1 1 1 0 1 0 1	-----> Pc > PC: pas de croisement...
Pc = 0.765	**1 1 1 0 1 0 0 1** 1 1 0 0 0 1 0 1 **0 1 0 1 0 0 1 1** 0 1 1 1 0 1 0 1	-----> Pc > PC: pas de croisement...

N ind	K1	K2	T1	T2	Segma	ksi	multi-obj
Individu:01	+10.9647	+09.2706	0.0329	0.0459	-00.8998	+0.9959	+1.8957
Individu:02	+10.9647	+09.2706	0.0329	0.0459	-00.8998	+0.9959	+1.8957
Individu:03	+02.0706	+08.0941	0.0473	0.0432	-01.1622	+0.0932	+1.2554
Individu:04	+09.1765	+07.8118	0.0711	0.0659	-00.9022	+0.9960	+1.8982
Individu:05	+09.1765	+07.8118	0.0711	0.0659	-00.9022	+0.9960	+1.8982
Individu:06	+05.9765	+11.4353	0.0602	0.0792	-01.4711	+0.1082	+1.5794
Individu:07	+02.6353	+02.4471	0.0906	0.0154	-00.9187	+0.9989	+1.9176
Individu:08	+02.6353	+02.4471	0.0906	0.0154	-00.9187	+0.9989	+1.9176
Individu:09	+05.6941	+02.5412	0.0407	0.0142	-00.9125	+0.9920	+1.9045
Individu:10	+00.7529	+02.4471	0.1000	0.0107	-00.6279	+0.0523	+0.6802

*********** 4eme étape Mutation **********

Probabilités de mutation utilisées

0.03 0.51 0.510.770.470.370.920.640.650.330.240.820.420.240.560.200.620.610.380.440.530.050.810.350.420.750.330.460.730.640.750.80
0.76 0.83 0.830.410.780.420.080.580.060.750.510.200.040.420.100.110.220.490.340.840.950.750.460.240.110.370.790.270.190.040.540.61
0.46 0.20 0.560.970.880.120.560.340.740.650.680.800.490.040.740.130.050.270.990.870.360.620.360.930.480.760.830.530.740.620.170.19
0.29 0.39 0.110.030.250.820.030.290.340.670.790.730.100.250.410.830.040.650.040.550.380.430.310.410.770.920.560.960.020.480.210.26
0.84 0.01 0.670.210.600.260.410.560.310.230.050.540.060.860.170.770.070.140.430.620.960.060.110.550.580.900.050.980.280.800.070.98
0.65 0.69 0.440.020.780.350.051.000.810.630.990.930.800.520.850.270.860.640.430.330.410.300.210.130.720.610.020.210.310.810.070.96
0.46 0.76 0.460.210.150.150.630.440.120.120.220.380.780.590.280.520.530.590.110.960.770.200.750.680.480.830.420.680.210.730.390.14
0.03 0.64 0.270.930.500.890.910.800.750.080.600.331.000.630.910.690.250.130.800.060.950.180.410.470.580.930.810.000.220.540.430.13
0.29 0.88 0.490.680.440.630.440.570.320.200.200.640.660.590.230.320.940.380.270.670.770.940.520.390.110.520.820.910.050.020.830.34
0.63 0.81 0.040.690.850.830.600.110.170.440.690.060.390.660.070.830.810.030.590.440.601.000.890.670.520.910.370.830.920.840.480.37

Codage après mutation

1 1 1 0 1 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 **1 1 0 1 0 0 1 0** 1 1 1 0 1 0 0 1
0 1 1 0 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 **0 1 0 1 0 1 1 1** 0 1 1 1 0 1 0 1
0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 **1 0 1 1 1 0 0 0** 0 1 1 0 1 1 0 1
1 0 0 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 1 0 0 **0 1 1 1 0 0 1 1** 1 0 0 0 0 0 1 0
0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 **0 0 0 1 0 1 0 1** 1 0 1 0 0 0 1 1
0 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 **1 0 0 1 1 0 1 0** 1 1 1 1 1 0 0 0
0 0 1 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 0 **1 1 0 0 0 0 1 1** 0 0 1 0 1 1 1 0
1 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0 1 0 0 **0 0 1 1 0 0 1 1** 0 0 1 1 1 1 1 0
1 1 1 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 **0 1 0 0 0 1 1 1** 1 0 1 0 1 0 0 0
0 0 1 1 0 0 0 1 1 0 1 0 0 1 1 0 **1 0 1 1 1 1 1 1** 0 0 0 1 1 0 1 1

N ind	K1	K2	T1	T2	Segma	ksi	multi-obj
Individu:01	+11.0588	+04.4235	0.0824	0.0914	-00.8944	+0.9811	+01.8755
Individu:02	+04.9412	+10.5412	0.0344	0.0459	-02.4718	+0.1902	+02.6619
Individu:03	+04.8941	+07.9529	0.0723	0.0428	-01.7022	+0.1293	+01.8315
Individu:04	+07.1059	+09.6000	0.0454	0.0510	-02.9609	+0.2143	+03.1752
Individu:05	+10.1176	+10.0706	0.0360	0.0009	-4.21220	+0.3687	+4.58090
Individu:06	+05.1294	+11.3882	0.0606	0.0973	-01.1078	+0.0833	+01.1911
Individu:07	+01.6941	+10.0706	0.0766	0.0181	-00.9218	+0.0746	+00.9964
Individu:08	+07.1529	+05.4588	0.0204	0.0244	-00.9094	+0.9958	+01.9052

Individu:09	+11.7176	+03.9529	0.0282	0.0659	-00.8965	+0.9798	+01.8763
Individu:10	+02.3059	+07.8118	0.0750	0.0107	-01.1738	+0.0952	+01.2690

*********** Résultats d'optimisation **********

N pob	K1	K2	T1	T2	Segma	ksi	multi-obj
Population:01	+10.1176	+10.0706	0.0360	0.0009	-4.2122	+0.3687	+4.5809
Population:02	+10.1176	+10.0706	0.0360	0.0009	-4.2122	+0.3687	+4.5809
Population:03	+10.1176	+10.0706	0.0360	0.0009	-4.2122	+0.3687	+4.5809
Population:04	+11.9529	+11.8118	0.0216	0.0232	-5.2799	+0.4568	+5.7367
Population:05	+11.9529	+11.8118	0.0216	0.0232	-5.2799	+0.4568	+5.7367
Population:06	+11.9529	+11.8118	0.0216	0.0232	-5.2799	+0.4568	+5.7367
Population:07	+11.9529	+11.8118	0.0216	0.0232	-5.2799	+0.4568	+5.7367
Population:08	+11.9529	+11.8118	0.0216	0.0232	-5.2799	+0.4568	+5.7367
Population:09	+11.9529	+11.8118	0.0216	0.0232	-5.2799	+0.4568	+5.7367
Population:10	+11.9529	+11.8118	0.0216	0.0232	-5.2799	+0.4568	+5.7367

L optimisation est terminé.......

Les paramètres optimisés:
K1= +11.9529 K2= +11.8118 T1=+00.0216 T2= 0.0232 Segma= -5.2799 Ksi= +0.4568 multi-obj =5.7367

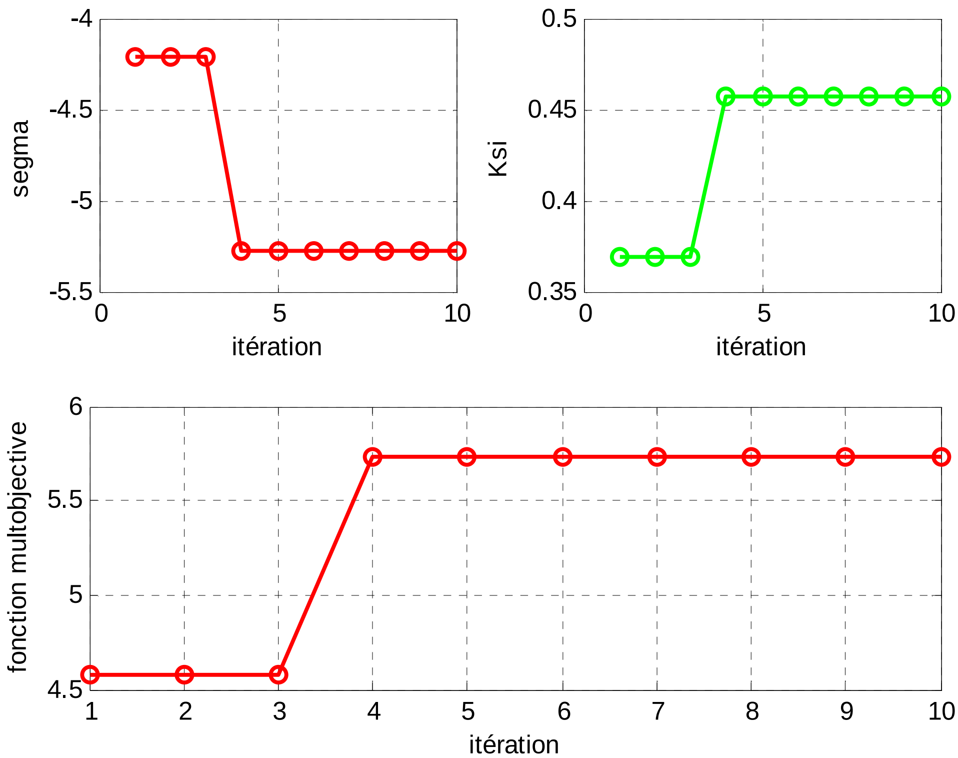


Figure VI.17.Résultat d'optimisation par GA de la fonction multi objective

VI.2.2 .4 .2 Étude Comparative Entre GA et PSO

La même fonction objective optimisé par essaims particulaires PSO pour comparer avec les résultats de l'algorithme génétique GA. Dans l'interface graphique précédant on utilise **optimisation/PSO/PSS/multiobjective** pour calculer et visualiser les résultats d'optimisation par PSO (figure VI.18)

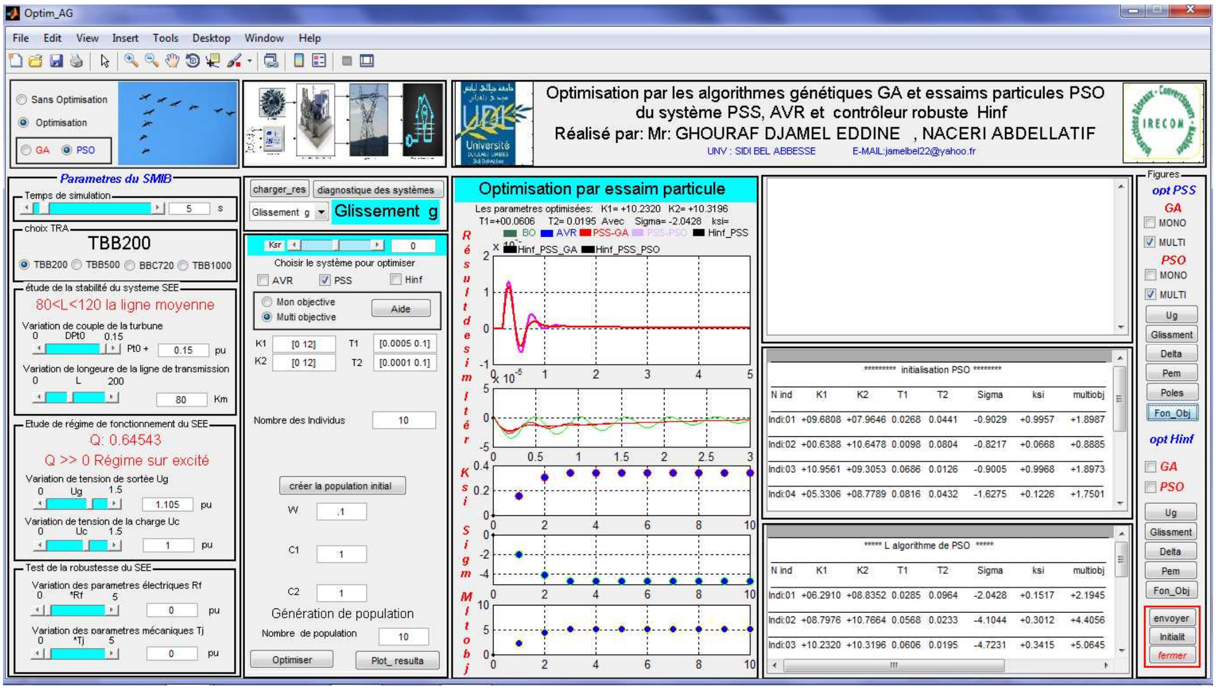


Figure VI.18.synthèses des paramètres du PSS par PSO multi objective sous GUI-MATLAB

*********** initialisation PSO **********

N ind	K1	K2	T1	T2	Segma	ksi	multi-obj
Individu:01	+09.6808	+07.9646	0.0268	0.0441	-0.9029	+0.9957	+1.8987
Individu:02	+00.6388	+10.6478	0.0098	0.0804	-0.8217	+0.0668	+0.8885
Individu:03	+10.9561	+09.3053	0.0686	0.0126	-0.9005	+0.9968	+1.8973
Individu:04	+05.3306	+08.7789	0.0816	0.0432	-1.6275	+0.1226	+1.7501
Individu:05	+06.2910	+08.8352	0.0285	0.0964	-2.0428	+0.1517	+2.1945
Individu:06	+01.9972	+09.8907	0.0077	0.0755	-1.2895	+0.1040	+1.3936
Individu:07	+07.6214	+07.1632	0.0062	0.0689	-0.9071	+0.9982	+1.9053
Individu:08	+08.1054	+05.5867	0.0723	0.0080	-0.9067	+0.9940	+1.9007
Individu:09	+07.6468	+06.0865	0.0152	0.0033	-0.9090	+0.9966	+1.9056
Individu:10	+03.6881	+08.7959	0.0277	0.0887	-1.4943	+0.1161	+1.6104

******* L algorithme de PSO *******

N itération	K1	K2	T1	T2	Segma	ksi	multi-obj
Itération:01	+06.2910	+08.8352	0.0285	0.0964	-2.0428	+0.1517	+2.1945
Itération:02	+08.7976	+10.7664	0.0568	0.0233	-4.1044	+0.3012	+4.4056
Itération:03	+10.2320	+10.3196	0.0606	0.0195	-4.7231	+0.3415	+5.0645
Itération:04	+10.2320	+10.3196	0.0606	0.0195	-4.7231	+0.3415	+5.0645
Itération:05	+10.2320	+10.3196	0.0606	0.0195	-4.7231	+0.3415	+5.0645
Itération:06	+10.2320	+10.3196	0.0606	0.0195	-4.7231	+0.3415	+5.0645
Itération:07	+10.2320	+10.3196	0.0606	0.0195	-4.7231	+0.3415	+5.0645
Itération:08	+10.2320	+10.3196	0.0606	0.0195	-4.7231	+0.3415	+5.0645
Itération:09	+10.2320	+10.3196	0.0606	0.0195	-4.7231	+0.3415	+5.0645
Itération:10	+10.2320	+10.3196	0.0606	0.0195	-4.7231	+0.3415	+5.0645

L optimisation est terminé.......
Les paramètres optimisés:

K1= +10.2320 K2= +10.3196 T1=+00.0606 T2= 0.0195 Segma= -2.0428 ksi= +0.1517 multiobj= +5.0645

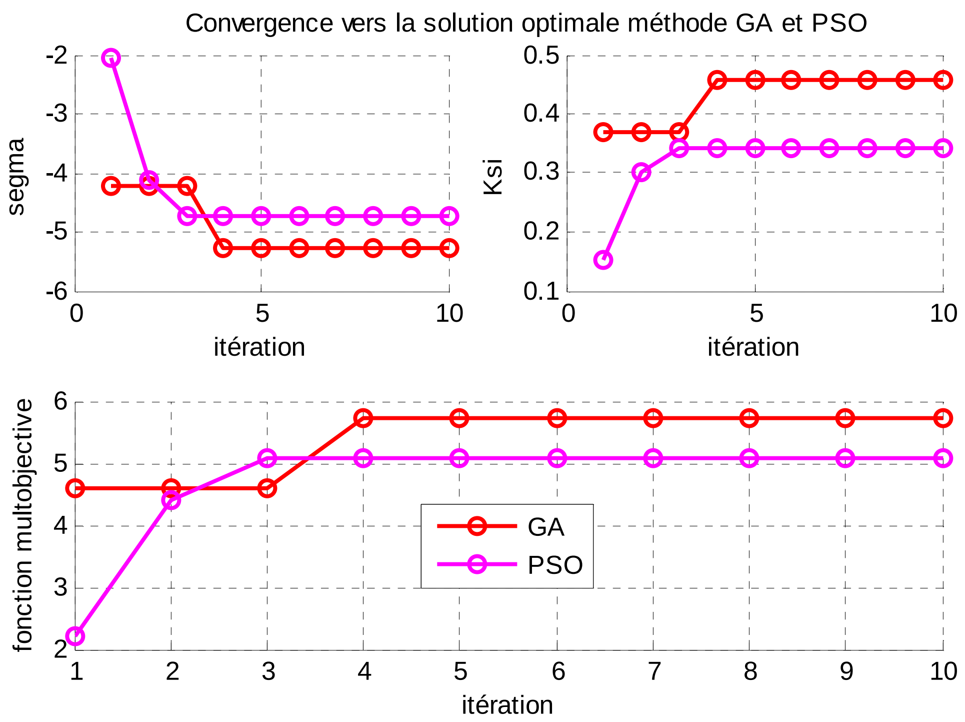


Figure VI.19.Résultats d'optimisation par GA et PSO de la fonction mono objective

Les résultats d'optimisation obtenues montrent que :

- Les deux techniques d'optimisation bien adaptées avec la fonction multi objective :
  - Maximiser le coefficient d'amortissement ζ.
  - Minimiser la partie réelle de pole σ.
  - Maximiser la fonction multi objective.
- L'AG est plus fiable que PSO

L'évolution de la fonction multi objective en fonction du nombre de générations 100 (figure V.20) ; la valeur finale atteinte pour la génération maximale prédéterminée de 100 itération est de GA=4.6973 et pour PSO=3.2937. Nous remarquons sur cette dernière qu'il y a un écart de 1.4036 entre les deux techniques.

La Figure VI.21 compare les valeurs propres critiques (modes oscillatoires) des deux cas du système SMIB : Le cas où le système est en boucle ouverte (sans PSS) et le cas où le PSS est optimisé par les AG. Ce dernier présente d'excellents résultats du point de vue stabilité en petit mouvement vu que les modes oscillatoires ont étés repoussés loin du côté gauche du plan complexe (système plus stable).

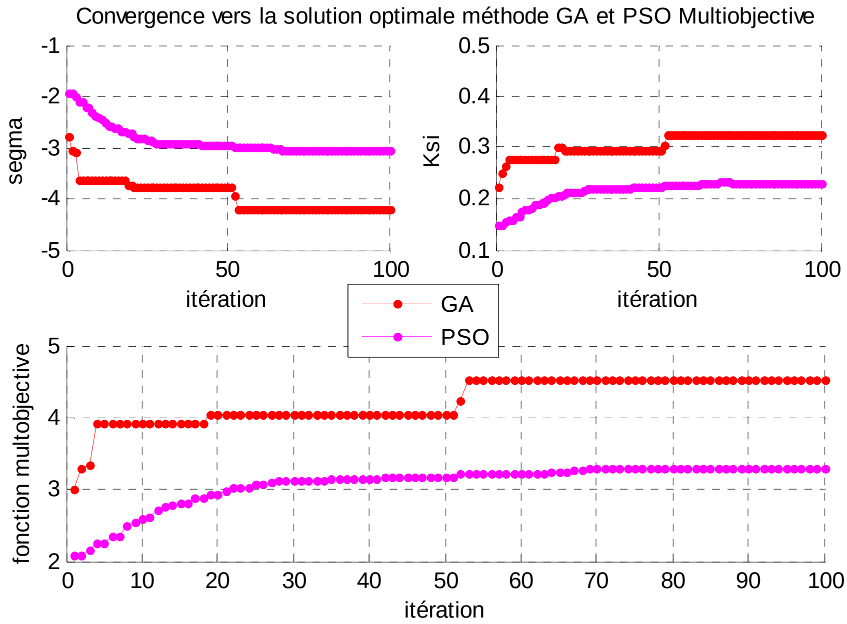


Figure VI.20. Evolution de la fonction multi objective par GA et PSO.

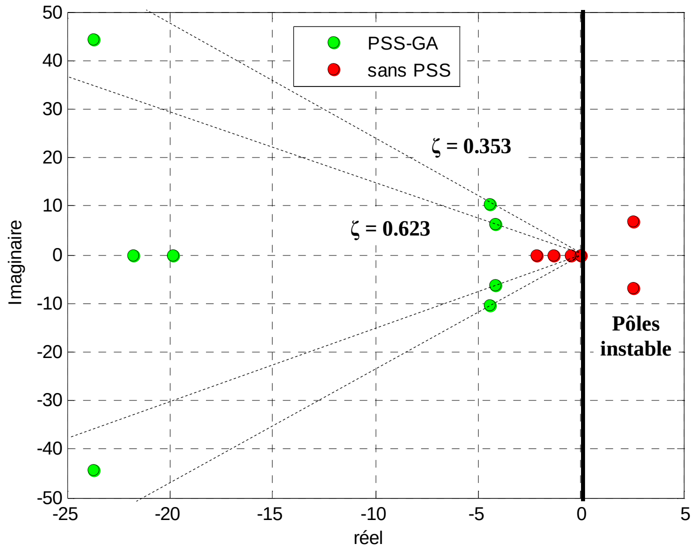


Figure VI.20. Tracé des valeurs propres critiques du système SMIB sur le plan complexe.

VI.2.2 .4 .3 RESULTATS DE SIMULATION :

Les résultats ci dessous (tableau VI.3 et figures VI.21 à VI.24) du système SMIB fonctionnent en régime sous excité et raccordé avec une ligne longue. On fait optimiser les paramètres de PSS par l'algorithme génétique et essaims particulaires.

Remarque : ce mode de fonctionnement c'est le mode le plus critique et défavorable.

Les paramètres de PSS (K_1, K_2, T_1 et T_2) optimisés par l'algorithme génétique et essaims particulaires sont représentés au tableau VI.3

Les courbes dans les figures (figures VI.21 à VI.24) donnent des exemples des résultats de simulation de notre système fonctionné en mode critique avec les paramètres optimisés par GA et PSO utilisent les deux fonctions objectives (multi et mono).

Tableau VI.3.paramètres de PSS optimisés par la fonction multi objective GA et PSO

TBB 200									
Algorithme génétique GA									
Régime	**K_1**	**K_2**	**T_1**	**T_2**	**Pôles**	ζ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	04.3647	06.2039	00.0294	0.0354	-5.9729 ± j 7.9196	0.6021	2.5042	0.0139	0.2028
nominal	05.7922	06.6706	00.0614	0.0189	-4.2363 ± j 6.4478	0.5491	2.9247	0.0023	0.2098
sous excité	05.7922	06.3686	00.0462	0.0013	-2.7460 ± j 6.6338	0.3825	4.3941	0.0110	0.2151
Essaims particulaires PSO									
Régime	**K_1**	**K_2**	**T_1**	**T_2**	**Pôles**	ζ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	04.3562	06.3870	00.0309	0.0416	-6.0989 ± j 8.8387	0.5679	3.6796	0.0139	0.2878
nominal	07.2520	07.4527	00.0207	0.0331	-3.9057 ± j 8.4649	0.4190	3.9207	0.0087	0.3084
sous excité	05.2003	06.3812	00.0750	0.0498	-2.3075 ± j 8.5888	0.2595	4.6191	0.0123	0.3032
TBB 500									
Algorithme génétique GA									
Régime	**K_1**	**K_2**	**T_1**	**T_2**	**Pôles**	ζ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	06.1216	02.5529	00.0481	0.0197	-5.2370 ± j 7.0515	0.5962	3.6879	0.0129	0.2021
nominal	06.5333	01.3176	00.0723	0.0087	-3.9853 ± j 8.7927	0.4128	3.9528	0.0008	0.2056
sous excité	03.4314	06.2039	00.0126	0.0303	-3.0771 ± j 8.0659	0.3564	3.7394	0.0131	0.2174
Essaims particulaires PSO									
Régime	**K_1**	**K_2**	**T_1**	**T_2**	**Pôles**	ζ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	02.7870	04.1083	00.0545	0.0409	-3.2214 ± j 8.1196	0.3688	4.5273	0.0141	0.2954
nominal	05.9281	06.9529	00.0675	0.0093	-2.9649 ± j 9.2504	0.3052	4.2953	0.0093	0.3088
sous excité	03.2623	04.4385	00.0328	0.0220	-2.9629 ± j 9.3839	0.3011	4.0057	0.0131	0.3256
BBC 720									
Algorithme génétique GA									
Régime	**K_1**	**K_2**	**T_1**	**T_2**	**Pôles**	ζ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	06.3137	00.3294	00.0442	0.0326	-4.8139 ± j 8.4926	0.4931	3.5568	0.0186	0.2300
nominal	06.6980	03.6784	00.0325	0.0385	-4.3054 ± j 8.1211	0.4522	3.5336	0.0200	0.2331
sous excité	04.0078	01.6471	00.0321	0.0436	-3.5418 ± j 8.1613	0.3981	3.9979	0.0178	0.2398
Essaims particulaires PSO									
Régime	**K_1**	**K_2**	**T_1**	**T_2**	**Pôles**	ζ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	06.1599	04.6944	00.0491	0.0205	-4.7821 ± j 8.4602	0.4921	4.6077	0.0186	0.3480
nominal	06.8091	03.5286	00.0283	0.0502	-3.8781 ± j 8.2924	0.4236	4.6449	0.0200	0.3555
sous excité	08.1621	01.9421	00.0225	0.0499	-3.4555 ± j 9.1159	0.3545	4.9099	0.0178	0.3757
TBB 1000									
Algorithme génétique GA									
Régime	**K_1**	**K_2**	**T_1**	**T_2**	**Pôles**	ζ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	06.0118	05.2157	00.0582	0.0216	-4.5763 ± j 09.9421	0.4181	3.0528	0.0122	0.3422
nominal	06.2314	03.8157	00.0188	0.0604	-3.9712 ± j 09.5040	0.3855	3.8934	0.0160	0.3438
sous excité	04.8863	04.2824	00.0606	0.0193	-3.8751 ± j 09.4972	0.3778	4.0778	0.0144	0.3449
Essaims particulaires PSO									
Régime	**K_1**	**K_2**	**T_1**	**T_2**	**Pôles**	ζ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	06.6430	02.2218	00.0182	0.0560	-4.8050 ± j 08.7901	0.4797	3.3283	0.0144	0.3438
nominal	06.1942	02.0608	00.0614	0.0243	-3.8852 ± j 08.2654	0.4254	3.9846	0.0160	0.3449
sous excité	03.6192	07.1699	00.0148	0.0566	-3.4774 ± j 09.4535	0.3452	4.3006	0.0144	0.3498

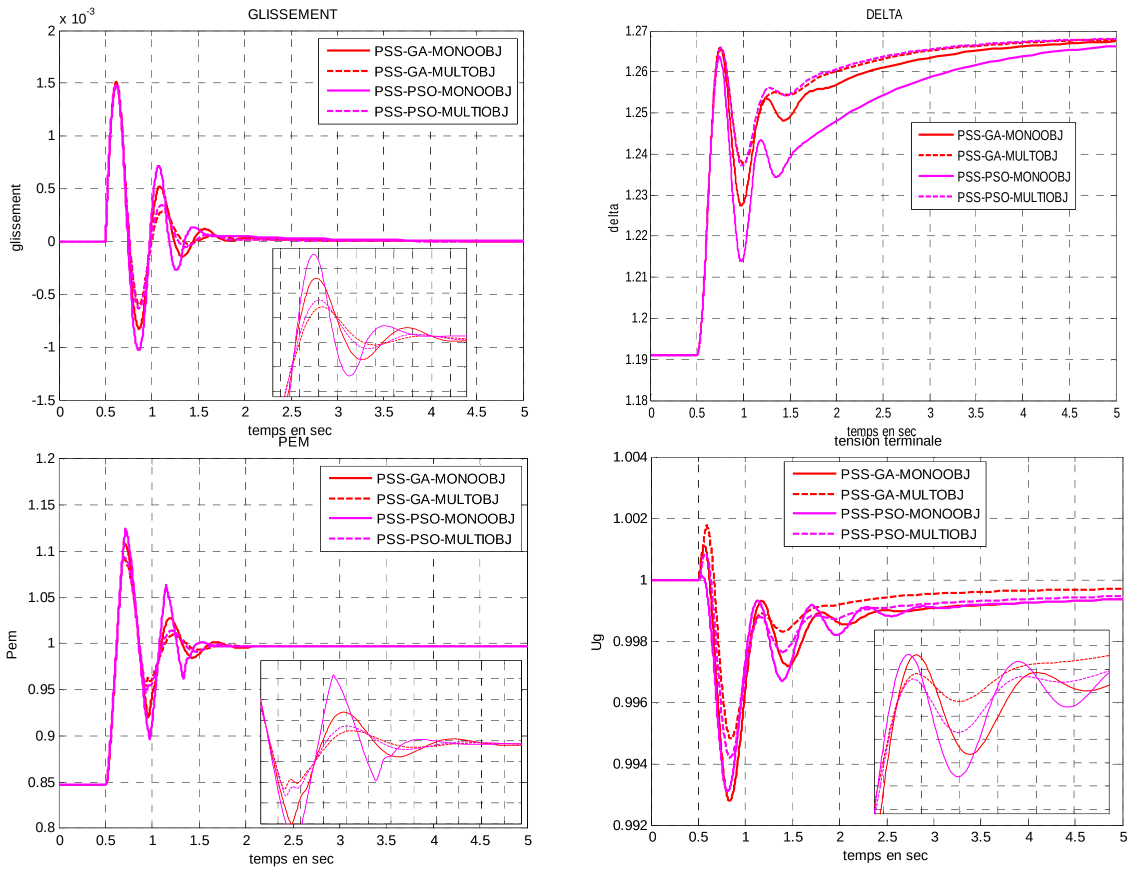


Figure VI.21: GS TBB200 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne longue

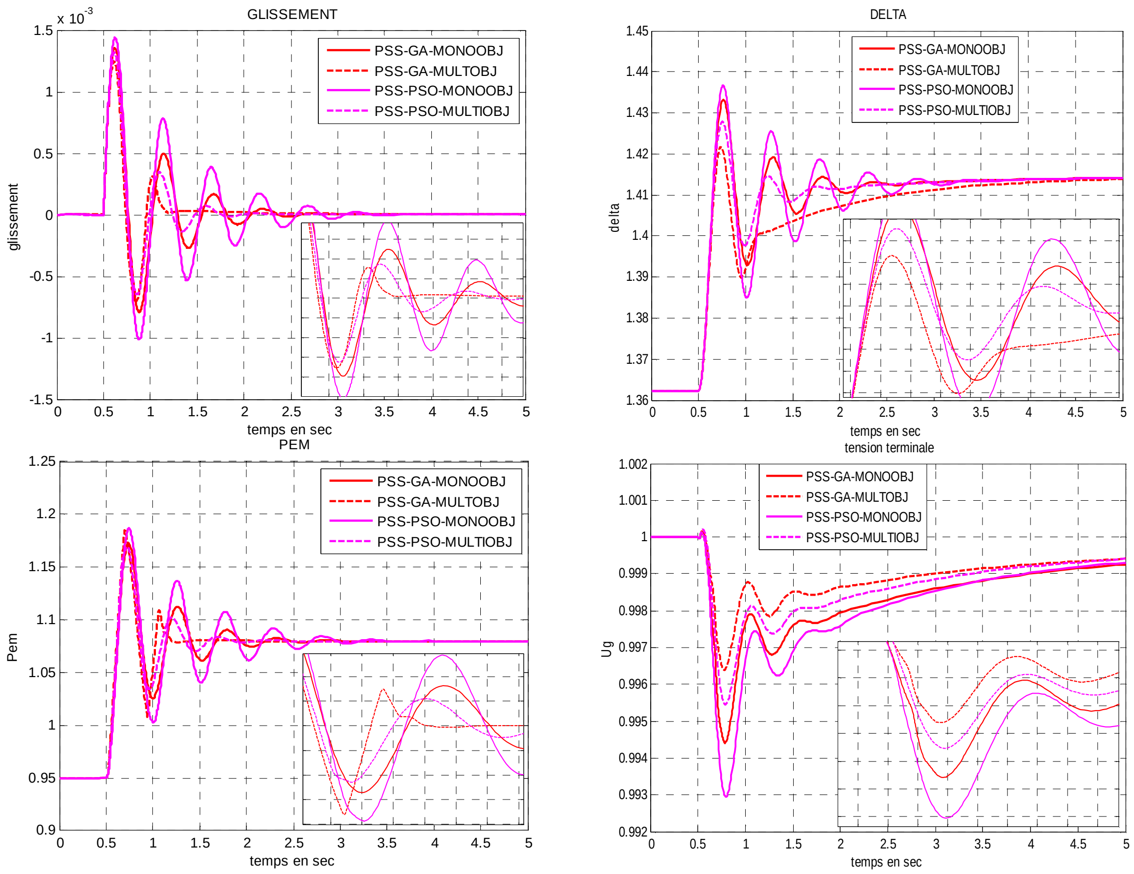


Figure VI.22: GS TBB 500 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne longue

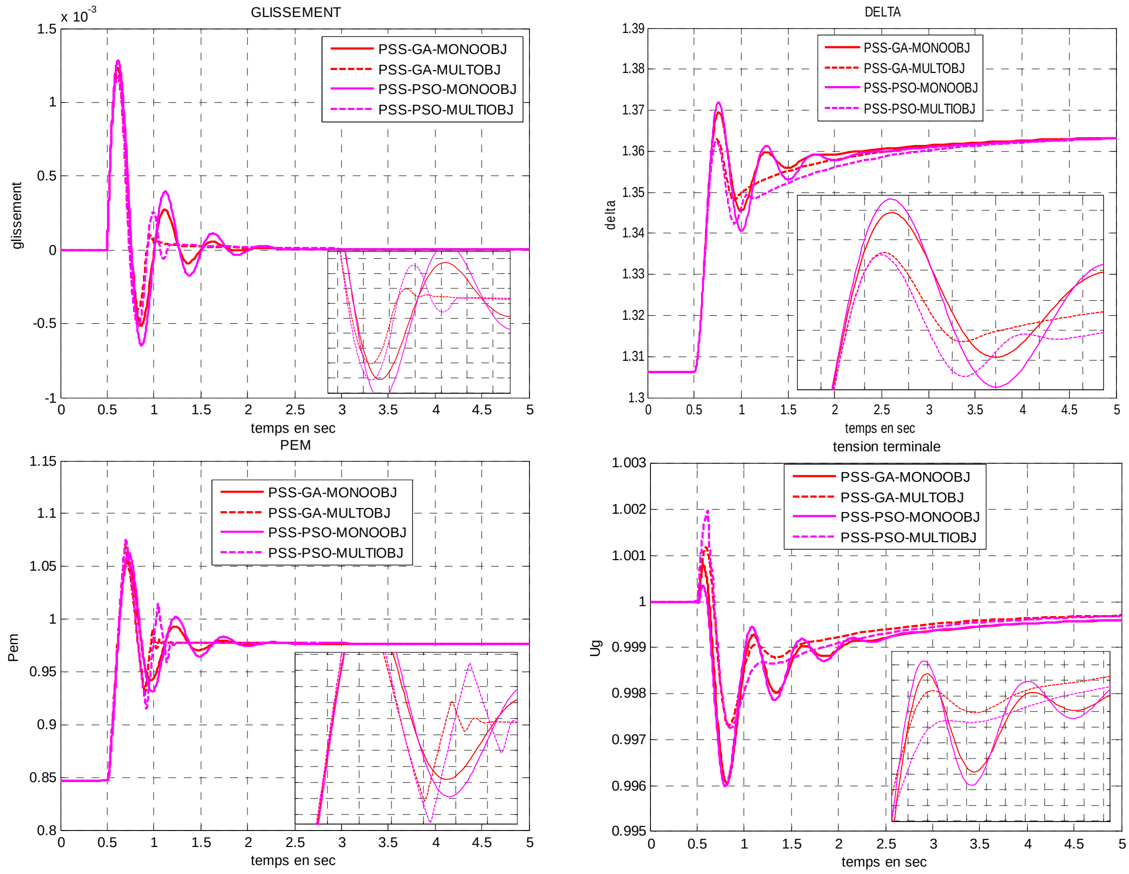


Figure VI.23: GS BBC 720 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne longue

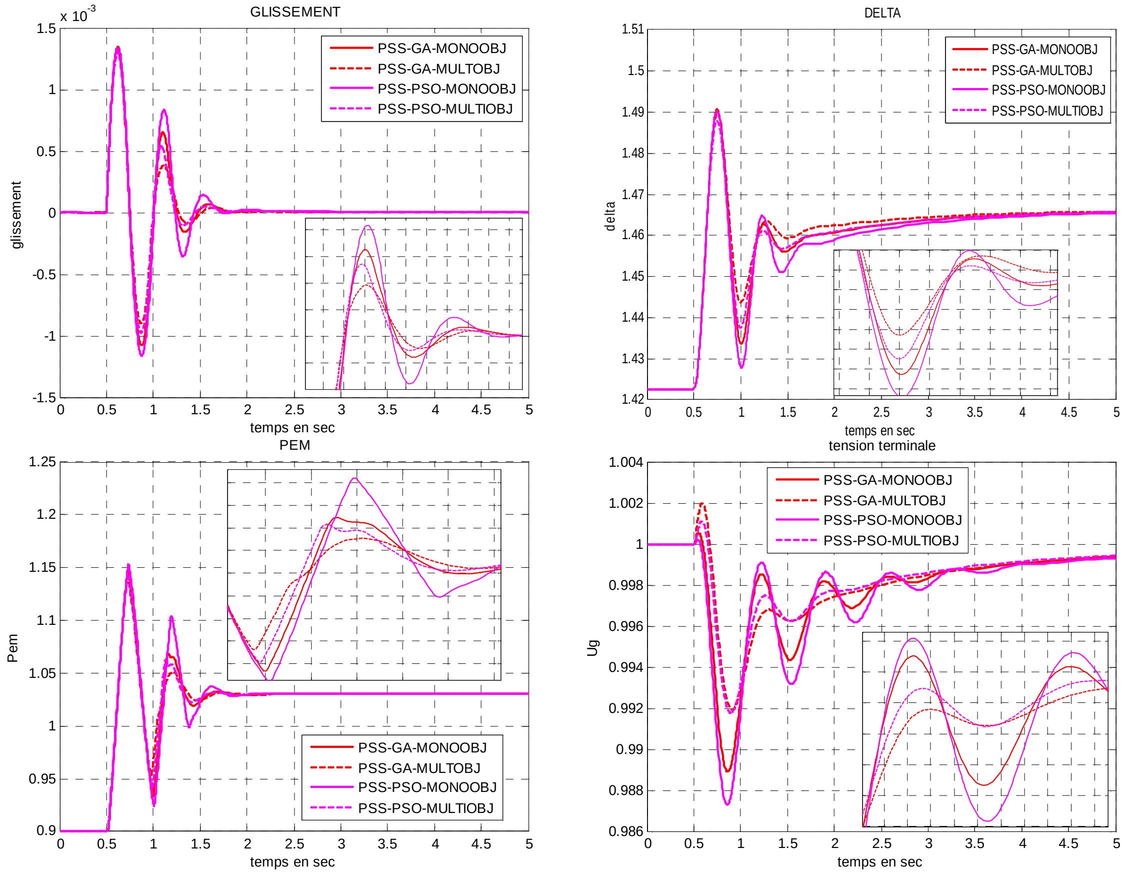


Figure VI.24: GS TBB1000 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne longue

Les résultats de simulation donnés par la figure 5.2, montrent l'efficacité de l'optimisation des algorithmes génétiques utilisant la fonction multi objective en comparaison avec mono objective. Le système avec PSS optimisé, après avoir été perturbé, retourne à son état d'équilibre initial au bout de 1 s. Cela signifie que les conditions établies au précédemment (fonction multi objective), c.-à-d. régler les paramètres du PSS afin d'avoir un maximum d'amortissement et minimum σ ont été satisfaites grâce aux algorithmes génétiques.

On peut constater aussi que technique d'optimisation utilisé GA nous donne une bonne résulta en comparaison avec PSO.

VI.2.3 INTEGRATION DE LA FONCTION MULTI OBJECTIVE A LA COMMANDE ROBUSTE H∞

On a vu dans le chapitre IV que la synthèse d'un contrôleur robuste H∞ basée sur l'objet de commande générateur synchrone et leur dispositif de régulation avec son optimisation (paramètres de PSS) joue un rôle très important pour l'adaptation la commande robuste H_∞ avec les différentes variations incertaines.

La procédure de la synthèse d'un contrôleur robuste adapté par l'algorithme génétique comporte deux étapes :

- Premier étape : l'optimisation des paramètres de l'objet de commande (paramètres de PSS), cette étape vue précédemment.
- deuxième étape : la synthèse de contrôleur robuste par l'algorithme de GLOVER-DOYL de l'objet optimisé par AG cette étape vue au chapitre VI.

L'algorithme de synthèse d'un contrôleur robuste adapté par l'algorithme génétique illustre dans l'organigramme de la figure VI.25 :

Les courbes des figures VI.26 nous donnent un exemple des résultats de simulation du système SMIB en régime critique (sous excité et une ligne de transmission longue) avec le contrôleur robuste H_∞ adapté par l'algorithme génétique (H_∞-PSS-GA) ces résultats ont étés comparé par l'optimisation par essaims particulaires (H_∞-PSS-PSO) et commande robuste H_∞ sans adaptation (H_∞-PSS).

Les résultats trouvées montrent des améliorations considérables au niveau de stabilité et la robustesse vis-à-vis aux variations incertains paramétriques (électrique ou mécanique) avec l'hybridation du stabilisateur robuste H_∞ optimisé par l'algorithme génétique (H_∞-PSS-GA) en comparaison avec le contrôleur robuste H_∞ sans adaptation.

Concernant des techniques d'optimisation utilisées on peut conclure que l'algorithme génétique est très efficace par rapport l'optimisation par les essaims particulaires et le contrôleur robuste H_∞ seul.

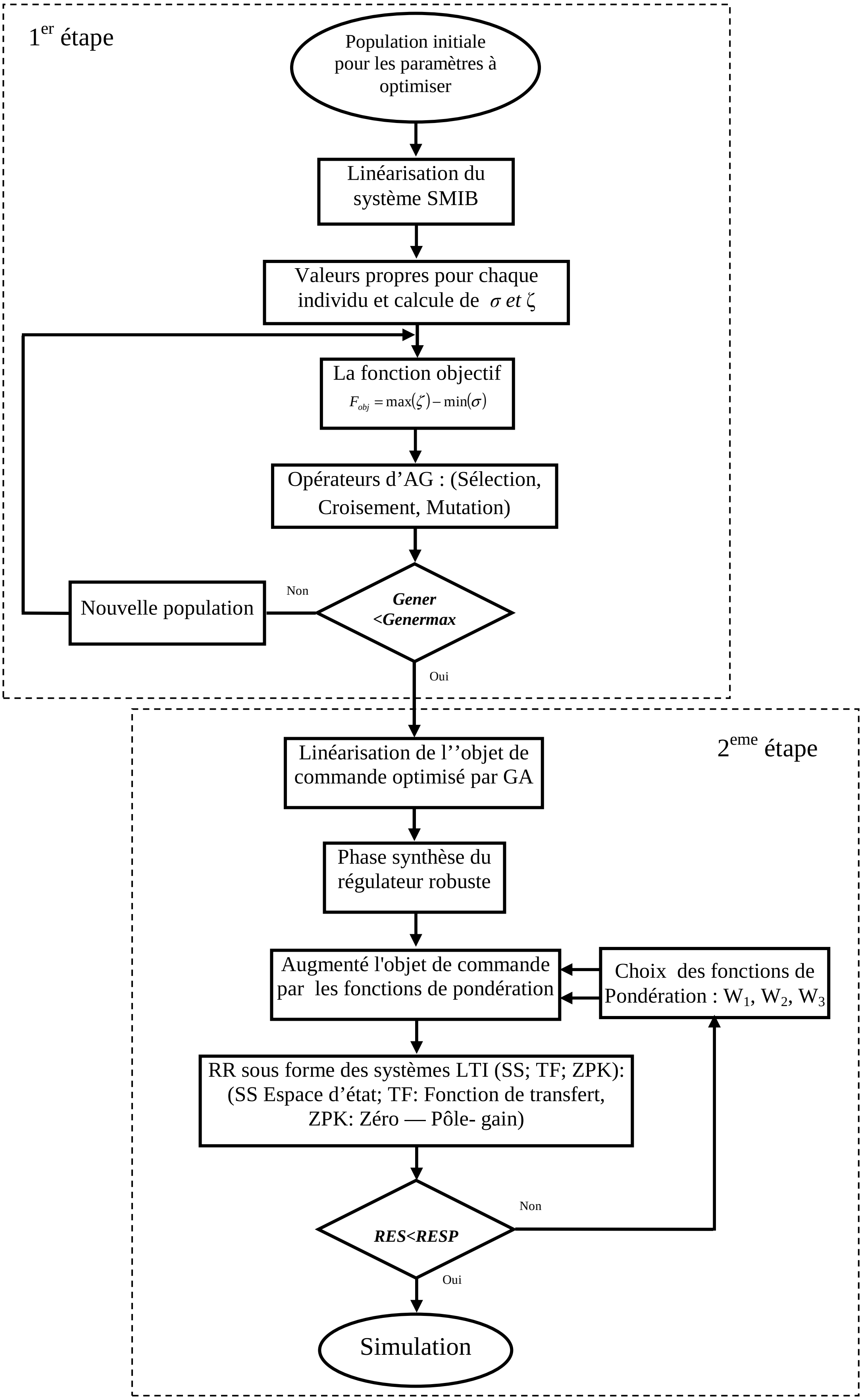


Figure VI.25: L'algorithme de synthèse d'un contrôleur robuste adapté par l'algorithme génétique

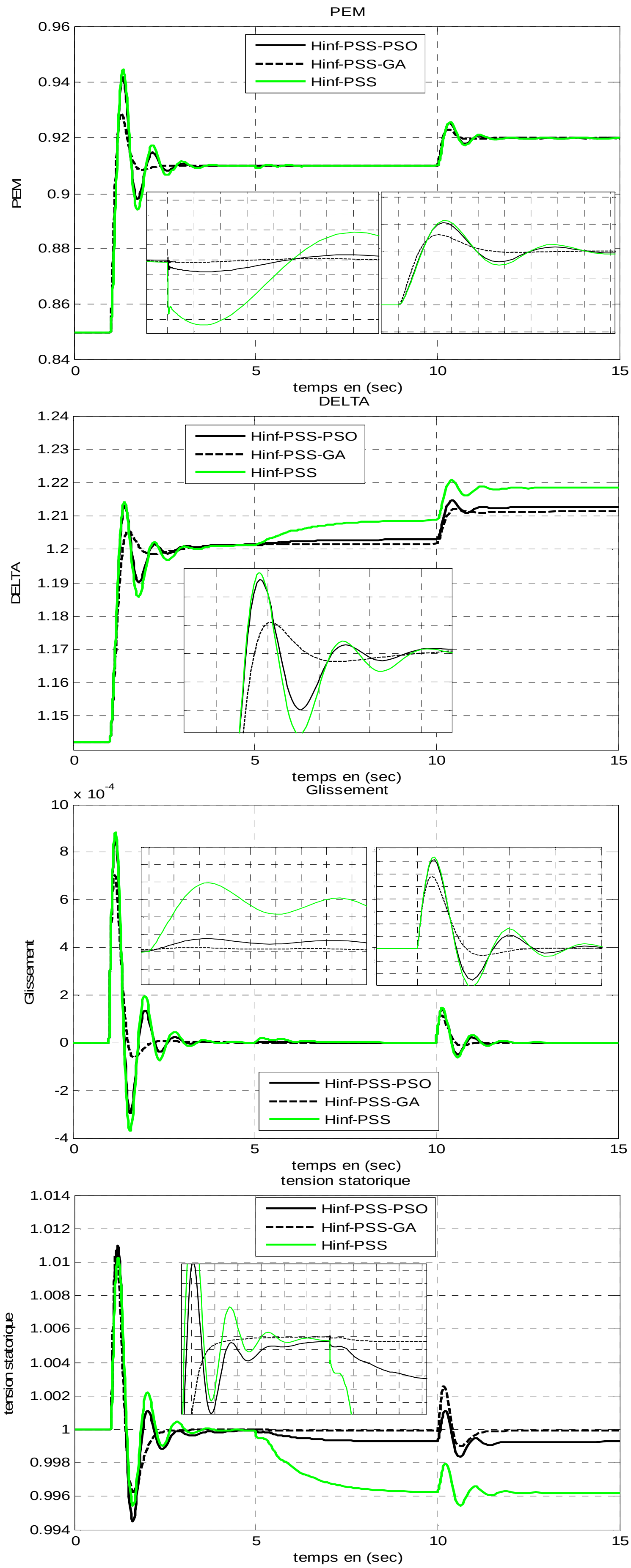


Figure VI.26: GS TBB 200 fonctionnant en régime sous excité raccordé avec une ligne longue

VI.3 Adaptation de la Commande Robuste H∞ par le Choix Optimal des Fonctions de Ponderation W_1, W_2, W_3

La première méthode d'adaptation de commande H_∞ basé sur l'optimisation de l'objet de commande donne un bon résultat mais le problème qui reste dans la synthèse de contrôleur robuste H_∞ : c'est comment choisir en façon optimale et plus rationnelle des fonctions de pondérations W_1, W_2, W_3 du contrôle robuste par l'hybridation ?

VI.3 .1 Synthese par l'Introduction des Fonctions de Ponderations

pour atteindre les objectives du cahier des charges, on peut introduire des pondérations sur les différents signaux, qui prendront la forme des filtres, qui permettent de modeler les différents transferts, S(s), KS(s),SG(s), KSG(s),et ainsi privilégier un domaine de fréquences particulier. Considérons à cette fin le schéma de la Figure VI.27, dans lequel l'erreur ε(s) est pondérée par le filtre $W_1(s)$, la commande u(s) par $W_2(s)$, et l'entrée de perturbation b(s) est la sortie d'un filtre $W_3(s)$.

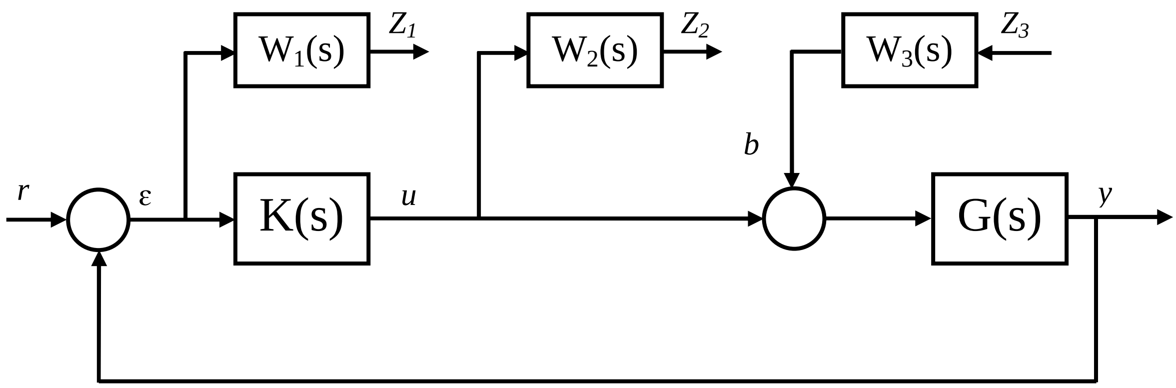


Figure VI.27: Mise en place des fonctions pondérations.

On considère et r(s) et $Z_3(s)$ (comme entrées) et $Z_1(s)$ et $Z_2(s)$ comme signaux à surveiller.
Ce système est alors représenté par la relation [82] :

$$\begin{bmatrix} e_1(s) \\ e_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1(s)S(s) & W_1(s)S(s)G(s)W_3(s) \\ W_1(s)K(s)S(s) & W_1(s)K(s)S(s)G(s)W_3(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(s) \\ Z_3(s) \end{bmatrix} \qquad \text{(VI.15)}$$

Pour résoudre Le problème H_∞ standard correspondant, on a recours à la méthode exposée dans le chapitre 4. Le problème H_∞ standard ainsi découlé est :

On détermine un nombre $\gamma > 0$, et le correcteur K(s) stabilisant le système bouclé et assurant:

$$\left\| \begin{matrix} W_1 S & W_1 SGW_3 \\ W_2 SK & W_2 SKGW_1 \end{matrix} \right\| < \gamma \qquad \text{(VI.16)}$$

L'avantage de considérer ce problème, plutôt que le problème plus simple (16) est que les filtres $W_1(s)$, $W_2(s)$ et $W_3(s)$ permettent de modeler les différents transferts: S(s), KS(s), SG(s), KSG(s). D'après la propriété de la norme H_∞, on a :

$$\|W_1 S\| \le \gamma \qquad \Leftrightarrow \qquad \forall\, \omega \in R \qquad |S(j\omega)| \le \frac{\gamma}{|W_1(j\omega)|} \qquad \text{(VI.17)}$$

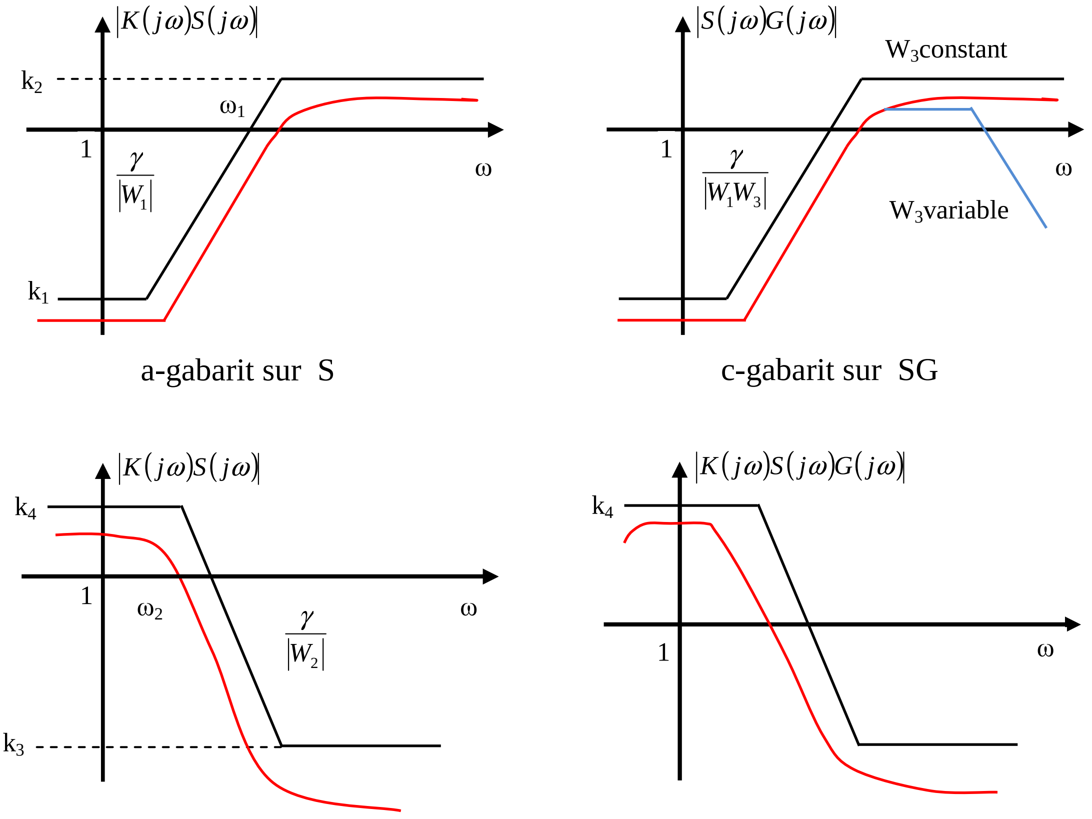
$$\|W_1 GSW_3\| \le \gamma \qquad \Leftrightarrow \qquad \forall\, \omega \in R \qquad |GS(j\omega)| \le \frac{\gamma}{|W_1 W_2(j\omega)|} \qquad \text{(VI.18)}$$

$$\|W_2 KS\| \le \gamma \qquad \Leftrightarrow \qquad \forall\, \omega \in R \qquad |KS(j\omega)| \le \frac{\gamma}{|W_2(j\omega)|} \qquad \text{(VI.19)}$$

$$\|W_1 KSGW_3\| \le \gamma \qquad \Leftrightarrow \qquad \forall\, \omega \in R \qquad |KSG(j\omega)| \le \frac{\gamma}{|W_2 W_3(j\omega)|} \qquad \text{(VI.20)}$$

D'après ces relations il est clair que la réponse fréquentielle des fonctions S(s), KS(s), SG(s), KSG(s) est contrainte par un gabarit qui dépend des filtres $W_1(s)$, $W_2(s)$ et $W_3(s)$ choisis. La Figure VI.28 montre l'allure typique que l'on choisit pour les différents gabarits.

- Le gabarit sur S(s) est fixé à une valeur k_1 faible en basses fréquences, pour assurer les objectives de précision. La pulsation ω_1 pour laquelle le gabarit coupe l'axe 0dB peut être interprétée comme la bande passante minimale souhaitée pour l'asservissement. La valeur k_2 du gabarit, en hautes fréquences limite le maximum de la réponse fréquentielle de S(s), ce qui impose une marge de module au moins égale à $1/k_2$. Enfin aucune contrainte n'est imposée à S(s) en hautes fréquences.
- La valeur k_3 du gabarit sur KS(s), ne lui impose aucune contrainte en basses fréquences, tandis que la valeur k_4 impose une contrainte en hautes fréquences, au-delà de la bande passante choisie pour l'asservissement, plus ou moins sévère suivant la valeur choisie pour ω_2.
- Le gabarit sur SG(s), dépend des deux filtres $W_1(s)$ et $W_3(s)$. Dans certain cas, il suffit de prendre $W_3(s)$ constant, ce qui permet de régler l'atténuation en basses fréquences. Mais $W_3(s)$ permet également de modifier le comportement de SG en moyennes fréquences, ce qui s'avère utile pour obtenir un comportement transitoire correct en réponse à une perturbation.
- Enfin le gabarit sur KSG(s), si les filtres $W_1(s)$, $W_2(s)$ et $W_3(s)$ ont été choisis d'après les considérations précédentes, sont évidemment déterminés. Mais dans certains cas, on peut préférer ajuster par $W_3(s)$ le gabarit sur KSG(s) plutôt que le gabarit sur SG(s), afin par exemple de satisfaire un gabarit d'atténuation assurant la robustesse de la stabilité aux dynamiques négligées.



a-gabarit sur S   c-gabarit sur SG

b-gabarit sur KS   d-gabarit sur KSG

Figure VI.28: Diagramme de Bode des gabarits fréquentiels.

VI.3 .2 Choix des Fonctions de Ponderations

La synthèse H_∞ est fréquentielle, donc toute spécification doit être imposée par l'intermédiaire d'un gabarit fréquentiel, ainsi les filtres auront le rôle de modeler les transferts en boucle fermée de l'asservissement. Bien que plusieurs techniques de choix des filtres aient été utilisées, elles restent souvent spécifiques à un système donné. On s'intéresse dans ce qui suit au choix des fonctions de pondération. Le choix de ces fonctions se fait naturellement à partir du cahier des charges. En effet, la plupart des spécifications peuvent être interprétées par des contraintes fréquentielles sur les transferts en boucle fermée. [84, 85, 86].

Néanmoins, il est important de noter que les transferts en boucle fermée ne sont pas indépendants entre eux et que pour un transfert donné le correcteur ne peut pas agir sur tout le domaine fréquentiel. Considérons les transferts S et T, on a quatre transferts qui apparaissent, mais on pondérera seulement trois transferts car S+T=1, et donc une fois que S (ou T) est fixé T (ou S) l'est aussi [87].

VI.3 .2.1 Choix de la Ponderation W_1:

Pour contraindre le module de la fonction de sensibilité S(s) par la pondération $W_1(s)$, que $W_1(s)$ est donnée sous la forme :

$$W_1(s)=\frac{T_2 s+1}{T_1 s+1} \tag{VI.21}$$

Avec T_1 et T_2 en fonction ω_c.

ω_c étant la fréquence de coupure souhaitée. Comme le régulateur K(s) est calculé de sorte que $|S(j\omega)|=\frac{\gamma}{|W_1(j\omega)|}$ le gain $G_0=|W_1(0)|$ permet donc de contraindre $|S(j\omega)|$ en basses fréquences $|S(0)|=\frac{1}{W_1(0)}$, permettant ainsi de réduire l'erreur statique. Comme la norme H de la fonction de sensibilité S(s) est égale à l'inverse de la marge de module, on peut donc contraindre S(s) en hautes fréquences par une borne supérieure telle que : $\|S\|_\infty=\frac{1}{G_\infty}$ (G_∞ est une borne supérieure sur la marge de module) permettant ainsi la stabilité du système bouclé.

VI.3 .2.2 Choix de la Ponderation W_2 :

La relation (19) montre que la fonction de pondération $W_2(s)$ intervient pour contraindre le module de KS(s) qui lie le bruit b(s) à la commande u (s). De plus, cette contrainte doit agir uniquement en basses fréquences, car on peut agir en hautes fréquences. Avec le correcteur K(s)(en haute fréquence on a : KS(s)≈ K(s)).

Contrairement à la pondération $W_1(s)$, la pondération $W_2(s)$, est déterminée de façon itérative. En effet, on cherche à limiter l'amplitude du signal de commande *u*(s), On peut choisir dans un premier temps $W_2(s)$, comme un gain afin de limiter la complexité du correcteur, on augmente progressivement le gain $|W_2(j\omega)|$ afin que la fonction de sensibilité S(s) suive au plus prés le gabarit $\frac{1}{|W_1(j\omega)|}$.

Enfin on introduit une atténuation en hautes fréquences sur le gabarit $\frac{1}{|W_2(j\omega)|}$, l'objective étant d'obliger le gain du correcteur à chuter dans cette région des fréquences afin de limiter la sensibilité au bruit ; mais on fait en sorte de ne pas augmenter de façon trop importante la valeur de γ. Il faut noter que $\frac{1}{W_2(j\omega)}$ est une fonction de transfert passe bas et on peut choisir la même structure que $W_1(s)$.

VI.3 .2.3 Choix de la Ponderation W_3 :

La pondération $W_3(s)$ agit sur le transfert $W_1GS(s)$ (équation 18) qui lie la perturbation en entrée du procédé b(s) et l'erreur ε(s) pondérée par). Le gabarit que doit satisfaire $|GS(j\omega)|$ est donc $\frac{1}{W_1W_3(j\omega)}$. Dans un premier temps on choisit $W_3(s)$ très faible (en d'autres termes, le calcul du correcteur tient compte de la référence *r*(s), mais ignore la perturbation b(s)), on augmente ensuite progressivement la valeur de $W_3(s)$ agissant ainsi en basses fréquences de SG(s), jusqu'à ce qu'un effet significatif apparaisse sur la valeur de γ ,en veillant toute fois à ce que celui-ci ne dépasse pas excessivement la valeur 1.

On abaissera finalement le gabarit $\frac{1}{W_1 W_3(j\omega)}$.

$W_3(s)$ est donnée sous forme :

$$W_3(s) = \gamma \frac{T_4 s + 1}{T_3 s + 1} \tag{VI.22}$$

γ : niveau d'optimisation.

VI.3 .3 CHOIX LA FONCTION OBJECTIVE

Le but d'utilisation du contrôleur d'excitation robuste PSS-H∞ est d'assurer primordiale la robustesse de stabilité du système SMIB. Cependant les fonctions de pondérations (W_1, W_2, W_3) jouent un rôle important dans la synthèse du stabilisateur PSS-H∞ par la méthode de loop shaping (figure VI.29), ces fonctions permettent de vérifier les spécifications du cahier des charges (marge de robustesse, rejet de perturbation et le bruit).L'intérêt de l'algorithme génétique est l'optimisation des ses fonctions de pondérations [87].

Comme le nom indiqué la commande robuste H∞ basé sur la réduire de la norme H∞ de la fonction de transfert $T_{zw,}$ cette norme est calculée en fonction de W_1,W_2,W_3 .

La fonction objective (fitness) utilisé en minimisant le plus grand possible la norme H∞ de la fonction de transfert T_{zw} par les fonctions de pondérations W_1,W_2,W_3 .

$$F_{Obj} = \min(\|T_{zw}\|_\infty) \tag{VI.23}$$

Avec **:**

$$\|T_{zw}\| = \begin{vmatrix} W_1^{-1} S \\ W_2^{-1} R \\ W_3^{-1} T \end{vmatrix} < \gamma \tag{VI.24}$$

La norme H_∞ est calculée par la relation suivante :

$$\|T_{zw}\|_\infty = \sup_\omega (T_{zw}(j\omega)) \tag{VI.25}$$

La sensibilité et sensibilité complémentaire donne par les équations suivants :

$$\frac{1}{\overline{\sigma}(S(j\omega))} \geq |W_1(j\omega)| \tag{VI.26}$$

$$\overline{\sigma}(T(j\omega)) \leq |W_3(j\omega)| \tag{VI.27}$$

Avec les modèles des fonctions de pondération utilisées :

$$W_1(s) = \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1} \tag{VI.28}$$

$$W_3(s) = \gamma \frac{T_4 s + 1}{T_3 s + 1} \tag{VI.29}$$

T_1, T_2, T_3, T_4 : périodes

S : Sensibilité

T : Sensibilité complémentaire

$W_{1,2,3}$: fonctions des pondérations

$\bar{\sigma}$: Valeur singulière maximale (les calcule des ces valeur voir Annexe E).

Les équations (26 et 27) donnent la notion de loop shaping [86] (formation de boucle) pour la synthèse d'un contrôleur robuste H∞, afin de satisfaire au compromis robustesse performance (Figure VI.29).

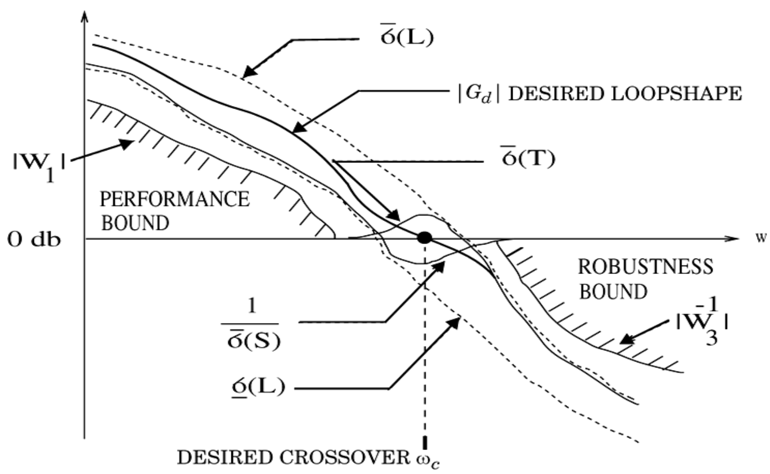


Figure VI.29: Spécifications de Loop shaping

Les étapes de calcul de cette fonction objective sont les suivantes :

1. Choix des fonctions de pondérations : W_1, W_2, W_3
2. augmenté l'objet de commande à partir des fonctions de pondérations
3. calculer La norme H_∞.
4. La fonction objective: $F_{Obj} = \min(\|T_{zw}\|_\infty)$
5. Renvoyer la valeur de cette fonction objective au programme de l'AG pour relancer une nouvelle génération.

L'adaptation du contrôleur robuste PSS-H_∞ est basée sur une sélection optimale des fonctions de pondérations en utilisant l'optimisation par GA, illustré par organigramme de la Figure VI.30.

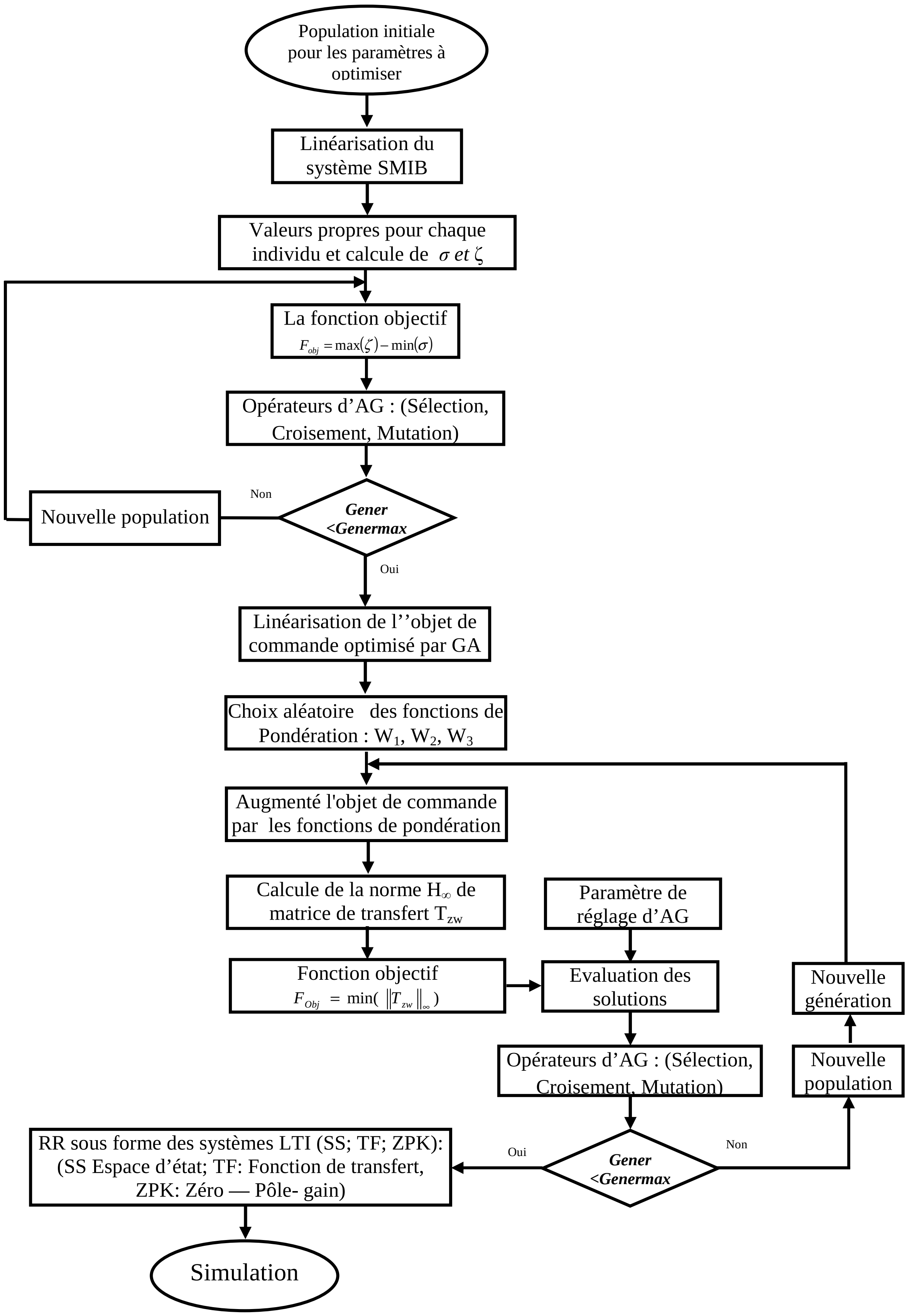


Figure VI.30: Organigramme de l'optimisation par AG des fonctions de pondérations de PSS-H_∞ par loop shping

VI.3 .3 .1Résultats d'optimisation

La méthode d'adaptation du contrôleur robuste PSS-H_∞ par loop shaping basé sur le choix optimal les fonctions de pondérations a été implémentée sous interface graphique développé (Figure VI.31).On utilise la fonction **optimisation/GA/Hinf :**

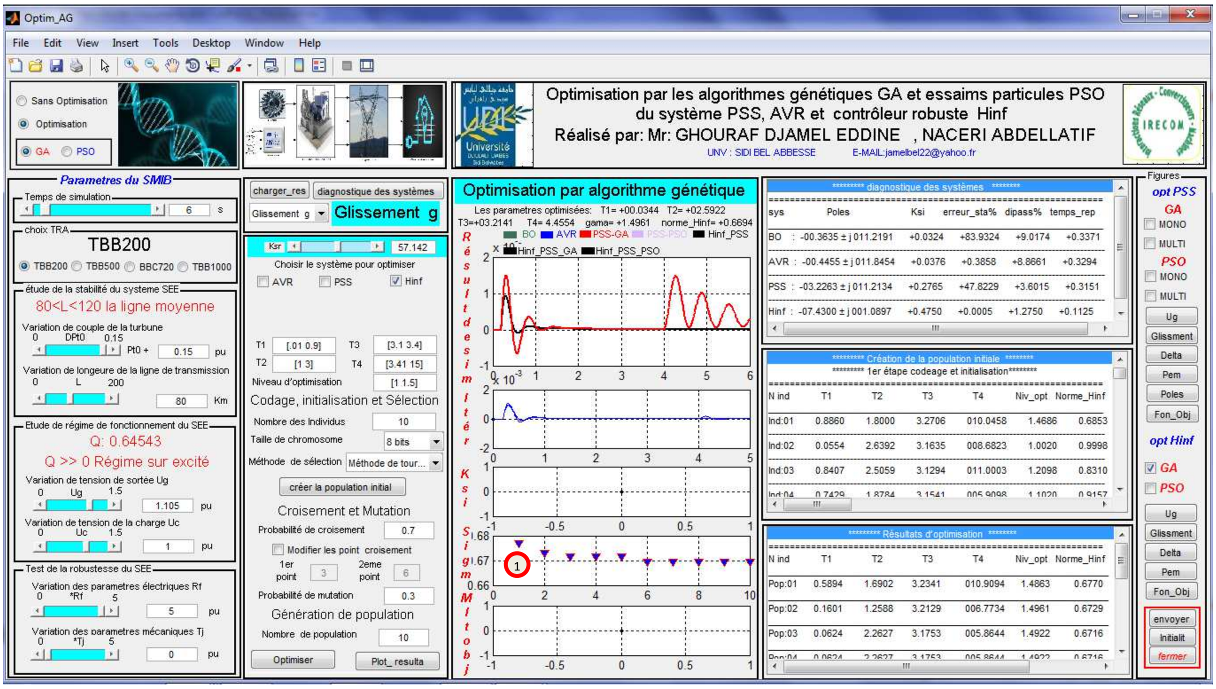


Figure VI.31: synthèses de la commande robuste H_∞ par GA sous GUI-MATLAB

1 Minimisation de la norme H_∞.

ci-après un exemple simple du résultat d'optimisation de 10 générations et 10 individus obtenus à l'aide d'interface graphique réalisé :

Probabilité de croisement : 0.7

Probabilité de mutation : 0.3

$0.1 \le T_1 \le 0.9$

$1 \le T_2 \le 3$

$3.1 \le T_3 \le 3.4$

$3.41 \le T_4 \le 15$

*********** Création de la population initiale **********

*********** 1er étape codage et initialisation**********

N ind	T1	T2	T3	T4	Niv_opt	Norme_Hinf
Individu:01	0.8860	1.8000	3.2706	010.0458	1.4686	0.6853
Individu:02	0.0554	2.6392	3.1635	008.6823	1.0020	0.9998
Individu:03	0.8407	2.5059	3.1294	011.0003	1.2098	0.8310
Individu:04	0.7429	1.8784	3.1541	005.9098	1.1020	0.9157
Individu:05	0.2159	1.4392	3.1235	004.3645	1.2471	0.8025

Individu:06	0.6138	1.2196	3.2541	012.2729	1.1706	0.8605
Individu:07	0.5300	1.1725	3.1447	005.2735	1.2451	0.8058
Individu:08	0.5440	1.2824	3.1729	008.0915	1.3843	0.7232
Individu:09	0.2159	2.7725	3.3482	009.7731	1.3627	0.7371
Individu:10	0.0414	1.3686	3.3706	007.5460	1.3804	0.7260

*********** 2eme étape Sélection ************

N ind	T1	T2	T3	T4	Niv_opt	Norme_Hinf
Individu:01	0.8860	1.8000	3.2706	010.0458	1.4686	0.6853
Individu:02	0.8407	2.5059	3.1294	011.0003	1.2098	0.8310
Individu:03	0.8407	2.5059	3.1294	011.0003	1.2098	0.8310
Individu:04	0.2159	1.4392	3.1235	004.3645	1.2471	0.8025
Individu:05	0.2159	1.4392	3.1235	004.3645	1.2471	0.8025
Individu:06	0.5300	1.1725	3.1447	005.2735	1.2451	0.8058
Individu:07	0.5440	1.2824	3.1729	008.0915	1.3843	0.7232
Individu:08	0.5440	1.2824	3.1729	008.0915	1.3843	0.7232
Individu:09	0.0414	1.3686	3.3706	007.5460	1.3804	0.7260
Individu:10	0.8860	1.8000	3.2706	010.0458	1.4686	0.6853

*********** 3eme étape Croisement ************

Etat de croissement

Pc = 0.311 **1 1 1 1 1 0 1 1** 0 1 1 0 0 1 1 0 **1 0 0 1 0 0 0 1** 1 0 0 1 0 0 1 0 **1 1 1 0 1 1 1 1** -----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.311 **1 1 1 0 1 1 1 0** 1 1 0 0 0 0 0 0 **0 0 0 1 1 0 0 1** 1 0 1 0 0 1 1 1 **0 1 1 0 1 0 1 1** -----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.974 **1 1 1 0 1 1 1 0** 1 1 0 0 0 0 0 0 **0 0 0 1 1 0 0 1** 1 0 1 0 0 1 1 1 **0 1 1 0 1 0 1 1** -----> Pc > PC: pas de croisement...
Pc = 0.974 **0 0 1 1 1 0 1 1** 0 0 1 1 1 0 0 0 **0 0 0 1 0 1 0 0** 0 0 0 1 0 1 0 1 **0 1 1 1 1 1 1 0** -----> Pc > PC: pas de croisement...
Pc = 0.314 **0 0 0 1 0 1 1 1** 0 0 0 1 0 1 0 0 **0 0 1 0 0 1 0 0** 0 0 1 0 1 0 0 1 **0 1 1 1 1 1 1 0** -----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.314 **1 0 1 1 1 0 0 1** 0 0 1 1 1 0 1 0 **0 0 0 1 0 1 1 0** 0 0 0 1 0 1 0 1 **0 1 1 1 1 1 0 1** -----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.043 **1 0 0 1 1 0 0 1** 0 0 1 0 0 1 0 0 **0 0 1 1 1 1 1 0** 0 1 1 0 0 1 1 1 **1 1 0 0 0 1 0 0** -----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.043 **1 0 0 1 1 0 0 1** 0 0 1 0 0 1 0 0 **0 0 1 1 1 1 1 0** 0 1 1 0 0 1 1 1 **1 1 0 0 0 1 0 0** -----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.237 **0 0 1 1 1 0 0 1** 0 0 1 0 0 1 1 1 **1 1 0 1 0 0 1 0** 0 1 0 1 0 0 1 1 **1 1 1 0 1 1 1 0** -----> Pc < PC: Il y a un croisement
Pc = 0.237 **1 1 0 0 1 0 1 1** 0 1 1 0 1 1 1 0 **1 0 1 0 0 1 0 1** 1 0 0 1 1 0 1 0 **1 1 0 0 0 0 1 1** -----> Pc < PC: Il y a un croisement

N ind	T1	T2	T3	T4	Niv_opt	Norme_Hinf
Individu:01	0.8860	1.8000	3.2706	010.0458	1.4686	0.6853
Individu:02	0.8407	2.5059	3.1294	011.0003	1.2098	0.8310
Individu:03	0.8407	2.5059	3.1294	011.0003	1.2098	0.8310
Individu:04	0.2159	1.4392	3.1235	004.3645	1.2471	0.8025
Individu:05	0.0903	1.1569	3.1424	005.2735	1.2471	0.8054
Individu:06	0.6557	1.4549	3.1259	004.3645	1.2451	0.8057
Individu:07	0.5440	1.2824	3.1729	008.0915	1.3843	0.7232
Individu:08	0.5440	1.2824	3.1729	008.0915	1.3843	0.7232
Individu:09	0.2089	1.3059	3.3471	007.1824	1.4667	0.6875
Individu:10	0.7185	1.8627	3.2941	010.4095	1.3824	0.7295

*********** 4eme étape Mutation ************

Probabilités de mutation utilisées

0.92	0.41	0.38	0.20	0.43	0.65	0.18	0.26	0.76	0.18	0.610.020.740.190.070.480.100.620.070.220.320.930.580.010.360.090.640.980.440.570.360.670.440.110.770.650.470.370.090.63
0.98	0.08	0.95	0.42	0.28	0.73	0.69	0.13	0.29	0.08	0.030.470.760.180.220.180.170.030.070.740.640.270.560.390.780.020.110.720.480.010.150.240.890.070.060.441.000.120.430.81
0.86	0.43	0.60	0.48	0.17	0.50	0.63	0.62	0.99	0.63	0.370.820.240.500.850.780.891.000.880.940.840.240.110.010.890.960.990.990.330.450.570.530.770.120.990.770.040.420.500.19
0.32	0.51	0.34	0.41	0.08	0.50	0.58	0.06	0.85	0.66	0.770.200.300.730.610.530.600.770.270.330.860.940.830.080.300.330.630.020.390.780.490.830.870.880.160.520.480.310.900.05
0.47	0.95	0.50	0.34	0.34	0.53	0.72	0.77	0.62	0.61	0.050.070.500.190.870.760.950.380.240.820.890.320.800.410.640.790.320.050.740.130.900.430.530.390.960.340.760.260.270.79
0.21	0.48	0.70	0.13	0.44	0.16	0.79	0.59	0.19	0.27	0.470.630.450.530.220.130.470.530.170.660.880.720.780.270.440.870.680.670.920.460.620.390.050.510.070.720.340.580.740.69
0.30	0.91	0.18	0.64	0.14	0.31	0.01	0.46	0.55	0.44	0.580.380.490.980.660.040.230.770.530.370.130.680.000.120.900.690.760.840.760.950.850.880.920.870.340.460.700.950.950.10
0.13	0.57	0.72	0.29	0.59	0.07	0.26	0.09	0.65	0.16	0.850.900.810.020.760.750.790.380.270.900.660.850.450.260.410.960.270.740.820.710.360.200.550.070.300.000.390.800.250.21
0.76	0.44	0.61	0.05	0.70	0.52	0.35	0.40	0.59	0.92	0.830.480.920.200.160.990.190.880.220.120.540.780.620.720.450.160.040.280.490.710.820.920.740.040.820.630.630.150.350.83
0.58	0.83	0.97	0.74	0.12	0.16	0.51	0.61	0.49	0.84	0.910.330.010.200.440.910.200.970.050.830.300.430.790.390.420.380.810.970.160.890.600.160.580.870.990.960.370.120.190.04

Codage après mutation

1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 **0 0 1 0 0 0 0 0** 1 1 0 1 0 0 1 0 **1 0 1 0 1 1 0 1**
1 0 1 0 0 1 1 1 0 0 1 0 0 1 1 1 **1 1 1 1 1 1 0 1** 1 1 0 0 0 0 0 0 **0 0 0 0 1 1 1 1**
1 1 1 0 0 1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 0 **0 0 0 1 1 1 1 0** 1 0 1 0 0 1 1 1 **0 0 1 0 0 0 1 0**

0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 **0 0 0 0 0 1 0 1** 0 0 1 1 1 0 0 1 **0 1 0 1 1 1 1 1**
0 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 1 1 0 0 **0 0 1 1 0 1 0 0** 0 0 0 0 0 0 0 1 **0 1 1 1 1 0 0 0**
0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 0 1 **0 0 1 1 0 1 1 1** 0 0 0 1 0 1 0 1 **1 1 0 1 1 1 0 1**
1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 **1 0 1 1 0 1 0 1** 0 1 1 0 0 1 1 1 **1 1 0 0 0 1 0 1**
0 0 0 0 1 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 **0 0 0 1 1 1 1 1** 0 1 0 0 0 1 1 0 **1 0 1 1 0 1 1 1**
0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 **0 1 1 0 0 0 1 0** 0 0 1 0 0 0 1 1 **1 0 1 0 1 0 1 0**
1 1 0 0 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 1 0 **0 0 0 0 0 1 0 1** 1 0 0 1 0 0 1 1 **1 1 0 0 0 1 0 0**

N ind	T1	T2	T3	T4	Niv_opt	Norme_Hinf
Individu:01	0.8197	1.3765	3.1376	012.9547	1.3392	0.7469
Individu:02	0.5929	1.3059	3.3976	012.1366	1.0294	0.9748
Individu:03	0.8127	2.5686	3.1353	011.0003	1.0667	0.9414
Individu:04	0.2159	1.0941	3.1612	003.4555	1.2353	0.8123
Individu:05	0.1147	1.0941	3.1059	006.0007	1.1863	0.8478
Individu:06	0.1671	2.9529	3.1647	004.3645	1.4333	0.7001
Individu:07	0.6347	1.2902	3.3129	008.0915	1.3863	0.7260
Individu:08	0.0589	1.7529	3.1365	006.5916	1.3588	0.7377
Individu:09	0.5894	1.6902	3.2341	010.9094	1.4863	0.6770
Individu:10	0.7045	1.7686	3.1059	010.0913	1.3843	0.7291

********* Résultats d'optimisation ********

N ind	T1	T2	T3	T4	Niv_opt	Norme_Hinf
Population:01	0.5894	1.6902	3.2341	010.9094	1.4863	0.6770
Population:02	0.1601	1.2588	3.2129	006.7734	1.4961	0.6729
Population:03	0.0624	2.2627	3.1753	005.8644	1.4922	0.6716
Population:04	0.0624	2.2627	3.1753	005.8644	1.4922	0.6716
Population:05	0.0624	2.2627	3.1753	005.8644	1.4922	0.6716
Population:06	0.0344	2.5922	3.2141	004.4554	1.4961	0.6694
Population:07	0.0344	2.5922	3.2141	004.4554	1.4961	0.6694
Population:08	0.0344	2.5922	3.2141	004.4554	1.4961	0.6694
Population:09	0.0344	2.5922	3.2141	004.4554	1.4961	0.6694
Population:10	0.0344	2.5922	3.2141	004.4554	1.4961	0.6694

L'optimisation est terminée.......
Les paramètres optimisés:
T1= +00.0344 T2= +02.5922 T3=+03.2141 T4= 4.4554 gama= +1.4961 norme_Hinf= +0.6694

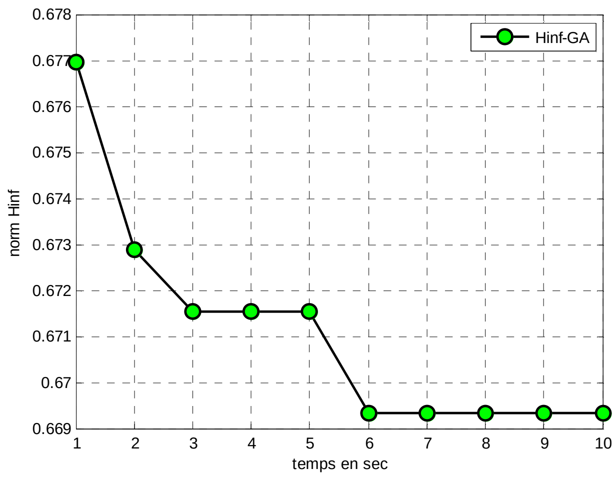


Figure VI.32: Résultat d'optimisation par GA des fonctions de pondérations

VI.3 .3 .2ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE GA ET PSO

La même fonction objective optimisée par essaims particulaires PSO pour comparer avec les résultats de l'algorithme génétique. Dans l'interface graphique suivant (figure VI.33) on utilise la fonction **optimisation/PSO/Hinf** pour calculer et visualiser les résultats d'optimisation par PSO

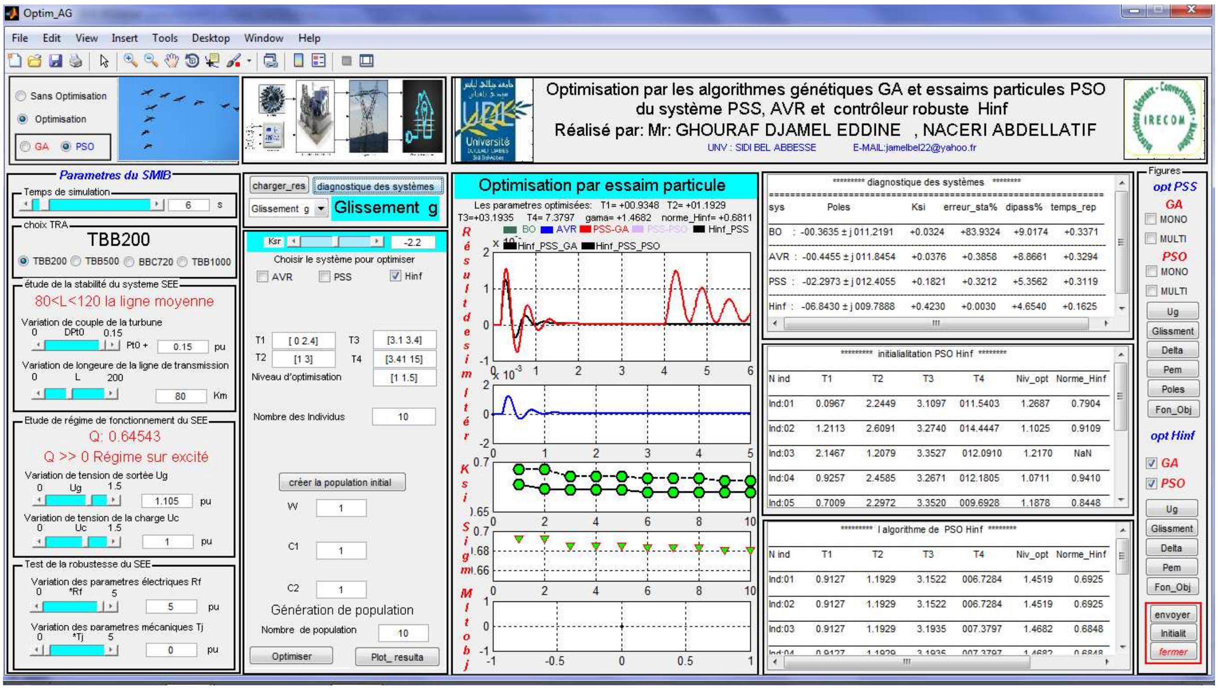


Figure VI.33: synthèse de stabilisateur robuste PSS-H_∞ par PSO sous GUI-MATLAB

*********** initialisation PSO Hinf **********

N ind	T1	T2	T3	T4	Niv_opt	Norme_Hinf
Individu:01	0.0967	2.2449	3.1097	011.5403	1.2687	0.7904
Individu:02	1.2113	2.6091	3.2740	014.4447	1.1025	0.9109
Individu:03	2.1467	1.2079	3.3527	012.0910	1.2170	NaN
Individu:04	0.9257	2.4585	3.2671	012.1805	1.0711	0.9410
Individu:05	0.7009	2.2972	3.3520	009.6928	1.1878	0.8448
Individu:06	0.5617	1.9493	3.1615	006.6791	1.3968	0.7176
Individu:07	0.4823	2.8658	3.2864	006.2481	1.4064	0.7172
Individu:08	0.9127	1.1929	3.1522	006.7284	1.4519	0.6925
Individu:09	1.4275	2.1982	3.1869	014.5727	1.2702	0.7971
Individu:10	0.6441	1.4671	3.1056	006.0838	1.4089	0.7114

*********** l algorithme de PSO Hinf **********

N itér	T1	T2	T3	T4	Niv_opt	Norme_Hinf
Itération:01	0.9127	1.1929	3.1522	006.7284	1.4519	0.6925
Itération:02	0.9127	1.1929	3.1522	006.7284	1.4519	0.6925
Itération:03	0.9127	1.1929	3.1935	007.3797	1.4682	0.6848
Itération:04	0.9127	1.1929	3.1935	007.3797	1.4682	0.6848
Itération:05	0.9127	1.1929	3.1935	007.3797	1.4682	0.6848
Itération:06	0.8935	1.1929	3.1935	007.3797	1.4682	0.6831
Itération:07	0.8935	1.1929	3.1935	007.3797	1.4682	0.6831
Itération:08	0.8935	1.1929	3.1935	007.3797	1.4682	0.6831
Itération:09	0.9348	1.1929	3.1935	007.3797	1.4682	0.6811

Itération:10	0.9348	1.1929	3.1935	007.3797	1.4682	0.6811

L'optimisation est terminée.......
Les paramètres optimisés:
T1= +00.9348 T2= +01.1929 T3=+03.1935 T4= 7.3797 gama= +1.4682 norme_Hinf= +0.6811

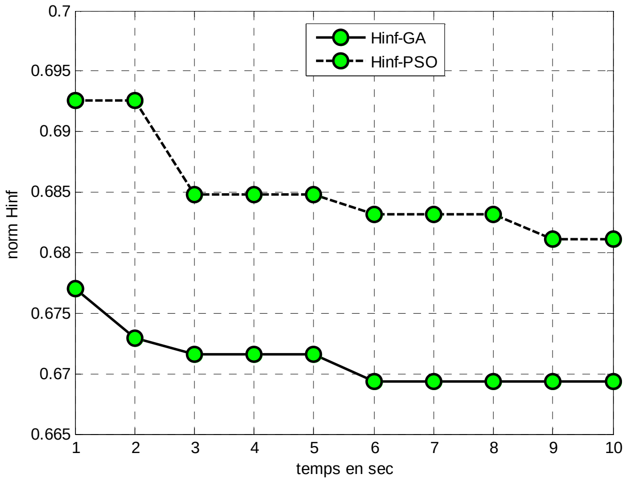


Figure VI.34: Résultats d'optimisation par GA et PSO des fonctions de pondérations

Les résultats d'optimisation obtenue montrent que l'AG (norme_Hinf= +0.6694) plus fiable à PSO (norme_Hinf= +0.6811)

Pour vérifier ce résultat on a optimisé notre système avec 100 itérations et 120 individus, la résulta d'optimisation représenté à la Figure VI.35

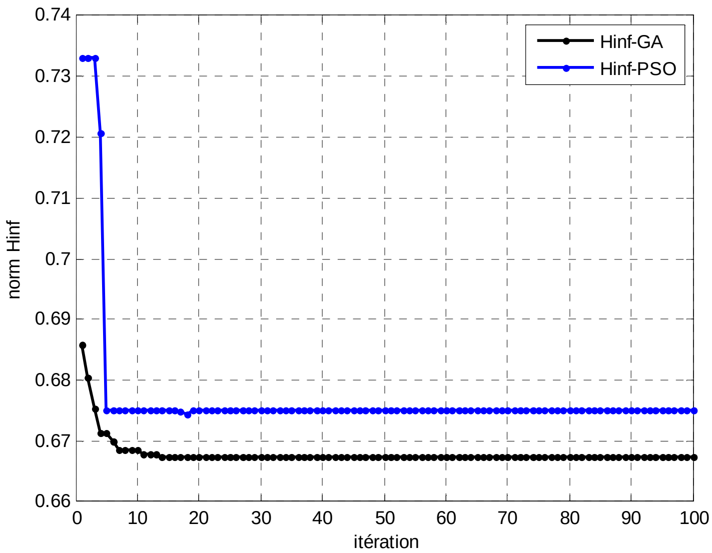


Figure VI.35: Résultats d'étude comparative avec 100 itérations entre GA et PSO de l'optimisation des fonctions de pondérations.

Les résultats des optimisations montrent l'efficacité de la technique d'optimisation par AG utilisé en comparaison avec PSO. La figure VI.36 représente la réponse fréquentielle (valeurs singulières) des fonctions de pondérations optimisées par GA.

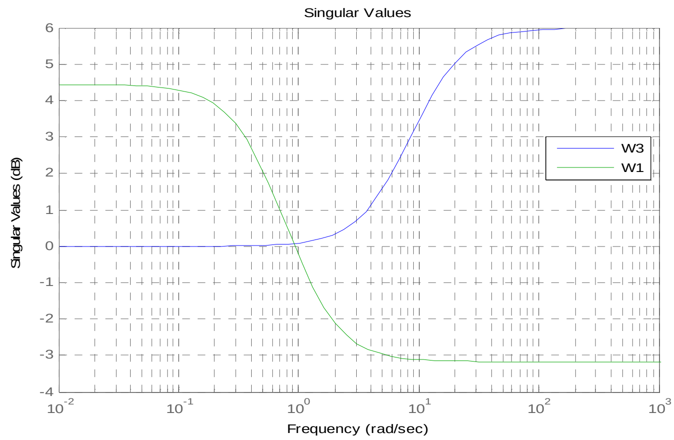


Figure VI.36: réponse fréquentielle des fonctions de pondération optimisées par GA

VI.3 .3 .3 RESULTATS DE SIMULATION :

Les résultats ci dessous (tableau VI.4 et figures VI.37 à VI.39) nous donnent un exemple des résultats de simulation obtenus par GUI MATLAB réalisé du système SMIB fonctionnant en régime sous excité et raccordé avec une ligne longue. On fait optimiser les fonctions de pondération du stabilisateur robuste PSS-H_∞ par l'algorithme génétique et par essaims particulaires.

Nous donnons dans le tableau VI.4 les paramètres optimisés et les performances dynamiques correspondent à chaque optimisation utilisée.

Les figures VI.37 à VI.39 présentent respectivement les courbes de l'angle interne 'delta', variation de vitesse, la puissance électromagnétique et tension terminale des GS. Avec l'optimisation des fonctions de pondération du stabilisateur robuste H_∞ par l'algorithme génétique PSS- H_∞-GA et essaims particulaires (PSS- H_∞-PSO).

On peut constater des très grandes améliorations (considérables) des performances du système avec le contrôleur PSS- H_∞-GA par l'optimisation des fonctions de pondérations en comparaison avec la première méthode l'adaptation par l'objet de commande.

Concernant les testes de robustesse nous remarquons une grand robustesse vis-à-vis des variations paramétriques électriques de système SMIB avec l'utilisation de contrôleur PSS-H_∞-GA, ces résultats revient à l'utilisation d'un contrôleur au niveau de l'excitation de la machine synchrone (électrique)

Par la suite les meilleurs résultats ont étés obtenus vis-à-vis ces testes de robustesse avec la deuxième méthode proposée (PSS- H_∞-GA) elle vérifie la fiabilité de notre contrôleur proposé avec des variations type stochastiques (figure VI.40). Les figures VI.38 et VI.39 nous donnent respectivement les résultats des tests de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques électriques et mécaniques.

Tableau VI.4:paramètres de PSS-H_∞ optimisés par l'algorithme génétique et essaims particulaires

BBC 720										
Algorithme génétique GA										
Régime	**T_1**	**T_2**	**T_3**	**T_4**	**γ**	**Norme H_∞**	σ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	00.1217	02.2157	03.2718	14.6364	1.4941	0.6715	-6.2903	1.2919	00	Rapid
nominal	00.2473	02.6471	03.2059	14.1819	1.5000	0.6721	-6.1585	1.9254	00	Rapid
sous excité	00.6522	02.8431	03.3706	11.5912	1.4510	0.6971	-5.3572	1.1998	00	Rapid
Essaims particulaires PSO										
Régime	**T_1**	**T_2**	**T_3**	**T_4**	**γ**	**Norme H_∞**	σ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	00.7788	01.5570	03.1581	12.3925	1.4908	0.6815	-5.3564	2.0259	00	Rapid
nominal	00.5560	02.2788	03.2595	7.3006	1.4539	0.6962	-5.1607	2.4746	00	Rapid
sous excité	00.5541	02.1030	03.1590	9.0057	1.4936	0.6901	-5.0253	2.7394	00	Rapid
TBB 1000										
Algorithme génétique GA										
Régime	**T_1**	**T_2**	**T_3**	**T_4**	**γ**	**Norme H_∞**	σ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	00.2753	01.0000	03.1282	11.4548	1.5000	0.6677	-6.8434	1.3074	00	Rapid
nominal	00.0309	01.8157	03.3329	8.6369	1.4980	0.6686	-6.7474	1.3472	00	Rapid
sous excité	00.5126	01.5569	03.1882	6.8188	1.5000	0.6700	-6.0281	1.7291	00	Rapid
Essaims particulaires PSO										
Régime	**T_1**	**T_2**	**T_3**	**T_4**	**γ**	**Norme H_∞**	σ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	00.7603	01.0957	03.1223	4.9822	1.4628	0.6753	-6.2266	2.0787	00	Rapid
nominal	00.0252	01.3559	03.1847	6.3912	1.4725	0.6802	-5.6234	2.1344	00	Rapid
sous excité	00.2901	02.5955	03.2738	7.4432	1.4761	0.6815	-5.4297	2.3576	00	Rapid
TBB200										
Algorithme génétique GA										
Régime	**T_1**	**T_2**	**T_3**	**T_4**	**γ**	**Norme H_∞**	σ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	00.5196	01.1412	03.2318	13.8637	1.4941	0.6719	-6.4189	1.2276	00	Rapid
nominal	00.6941	01.0627	03.1929	9.3186	1.4980	0.6678	-6.1881	1.9893	00	Rapid
sous excité	00.8127	01.8235	03.3424	03.3424	1.4941	0.6733	-6.1570	1.1411	00	Rapid
Essaims particulaires PSO										
Régime	**T_1**	**T_2**	**T_3**	**T_4**	**γ**	**Norme H_∞**	σ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	00.2649	02.0466	03.1492	12.5824	1.4572	0.6904	-5.5382	2.0981	00	Rapid
nominal	00.6066	01.7696	03.3168	8.4688	1.4541	0.6917	-5.3680	2.2707	00	Rapid
sous excité	00.0337	01.1891	03.2362	9.7890	1.4820	0.6762	-5.1570	2.3190	00	Rapid
TBB 500										
Algorithme génétique GA										
Régime	**T_1**	**T_2**	**T_3**	**T_4**	**γ**	**Norme H_∞**	σ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	00.8442	02.2471	03.3082	05.1826	1.4941	0.6745	-7.2330	1.3611	00	Rapid
nominal	00.5998	02.4667	03.2965	11.0458	1.4804	0.6837	-7.1178	1.7403	00	Rapid
sous excité	00.5126	02.1686	03.1941	13.1365	1.4961	0.6763	-7.0225	1.4972	00	Rapid
Essaims particulaires PSO										
Régime	**T_1**	**T_2**	**T_3**	**T_4**	**γ**	**Norme H_∞**	σ	**D%**	**ε**	**t_r**
Sur excité	00.4075	02.2931	03.1238	7.1804	1.4421	0.6998	-6.2754	2.9164	00	Rapid
nominal	00.3697	01.3413	03.1839	4.9764	1.4811	0.6763	-6.2542	2.6115	00	Rapid
sous excité	00.2735	01.9575	03.2190	12.4485	1.4333	0.6990	-5.4670	2.2729	00	Rapid

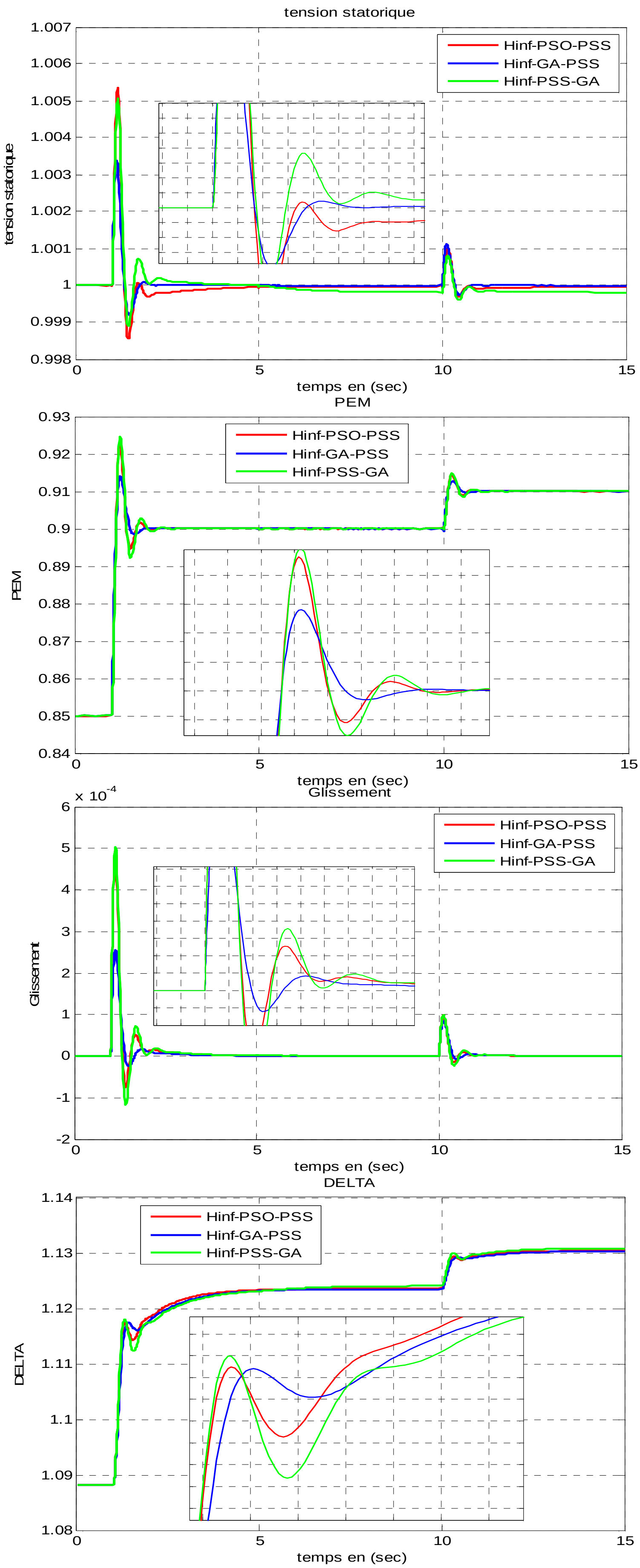


Figure VI.37: GS TBB1000 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne longue

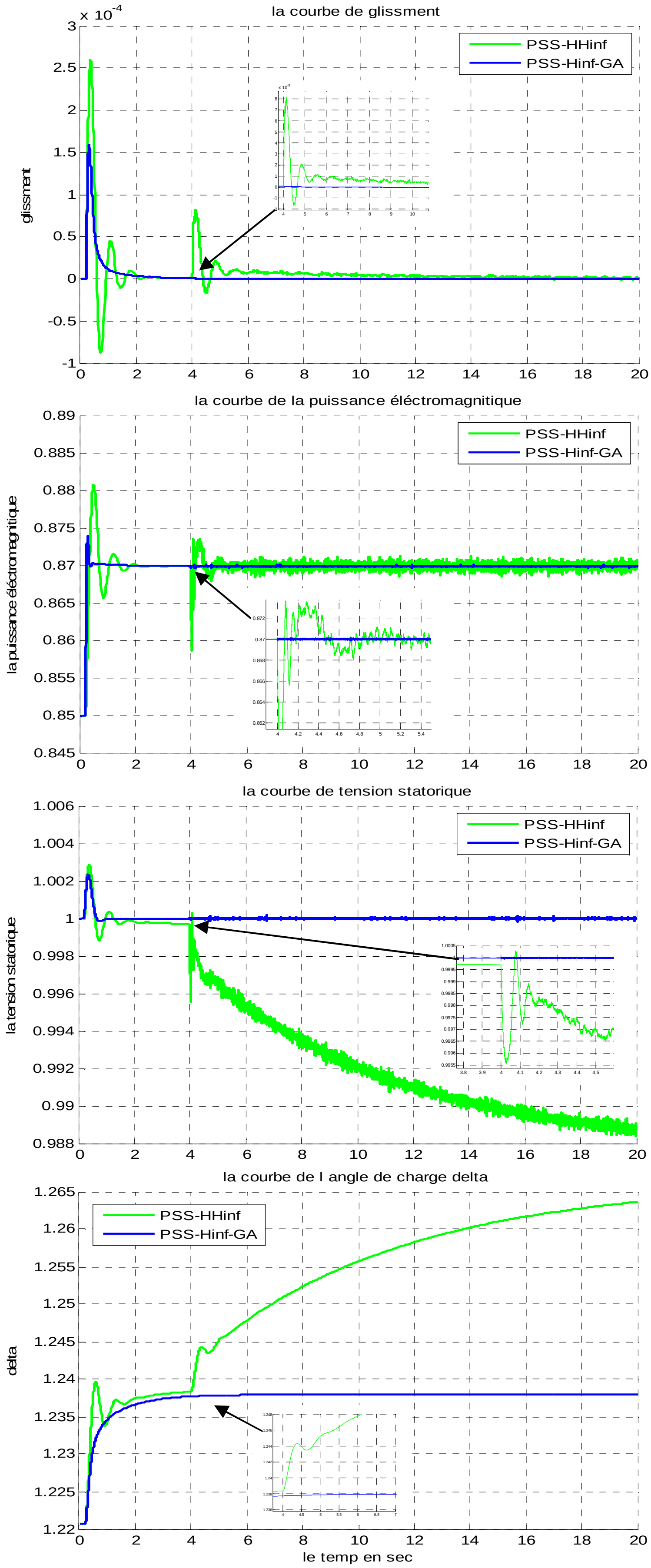


Figure VI.38: GS TBB1000 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne longue

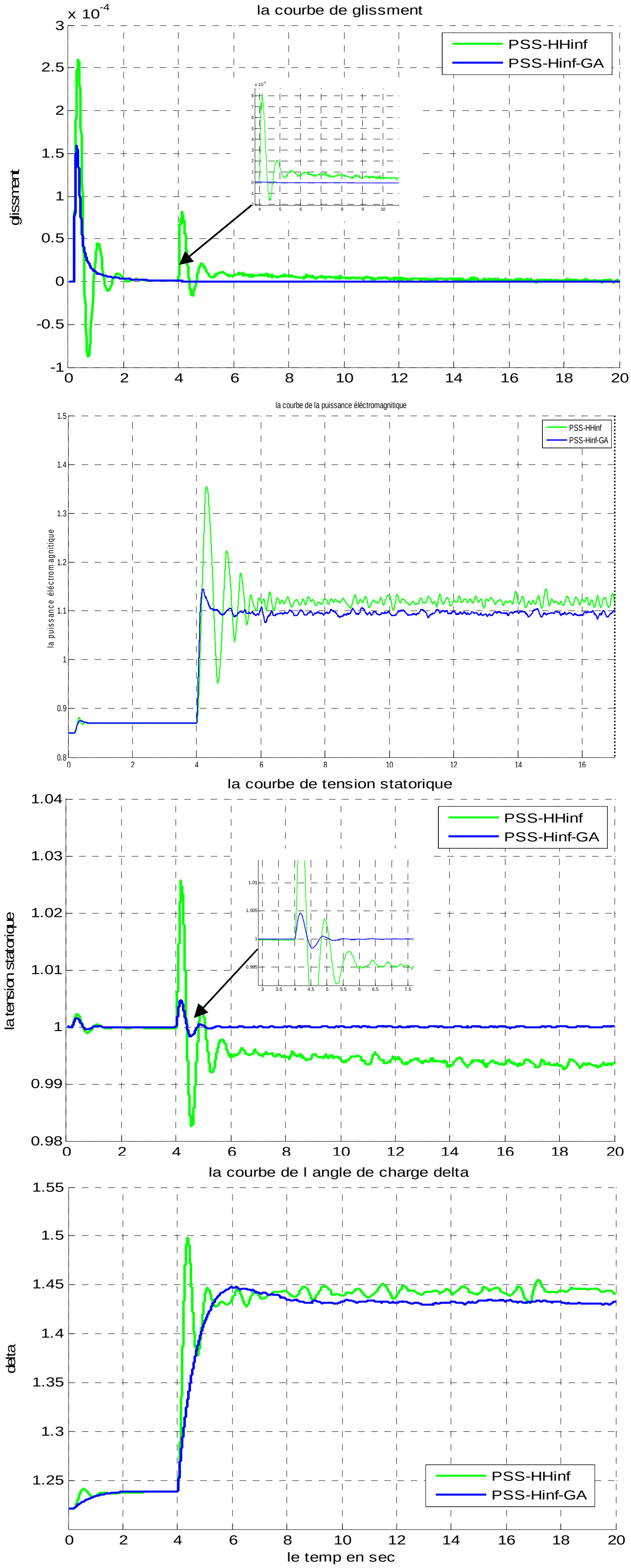


Figure VI.39: GS TBB1000 fonctionnant sous régime sous excité raccordé avec une ligne longue

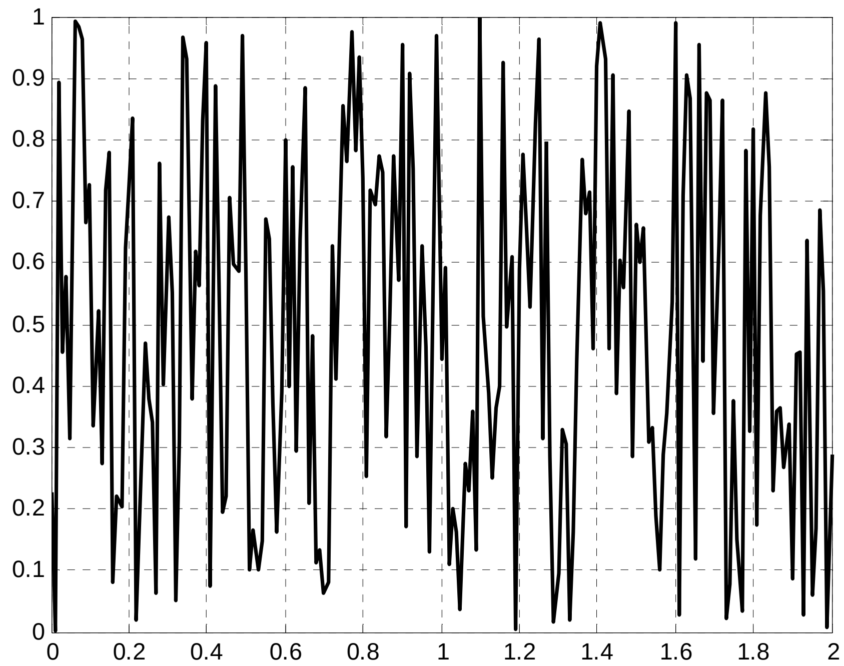


Figure VI.40 : Signale aléatoire utilisé dans le teste de robustesse.

L'injection d'un signal stochastique au système SIMB crée des grands changements de mode de fonctionnement de ce dernier. L'algorithme génétique est une méthode de recherche basée sur des opérations aléatoires, l'intégration de cette technique au contrôleur robuste H_∞ pour adaptation de système SIMB avec ces variations aléatoires nous donne des meilleurs résultats et montre que cette technique d'optimisation capable de adapter notre système avec les différentes variations qui influé sur le fonctionnement et rendement.

VI.4 CONCLUSION

Les algorithmes génétiques restent à nos jours les méthodes évolutionnaires les plus utilisés dans le domaine de la commande. Ils peuvent êtres exploités par exemple pour obtenir les valeurs optimisées des paramètres des régulateurs PID, LQG, H_∞. L'avantage des AG par rapport à d'autres techniques d'optimisation est leur indépendance par rapport à la complexité des systèmes. De plus, ils travaillent sur un ensemble de points (une population) et non sur un seul point. L'AG est donc une méthode d'optimisation globale.

L'utilisation de cette technique d'optimisation pour effectuer l'opération de synthèse des contrôleurs H∞ et les paramètres des régulateurs de la tension d'un générateur synchrone puissant pour l'adaptation paramétrique des stabilisateurs robustes PSS-H_∞ avec les différentes variations paramétriques électriques et mécanique.

Dans cette étude on a basé sur deux méthode d'adaptation : Adaptation de la commande robuste H_∞ par l'optimisation de l'objet de commande (réglage des paramètres de PSS) et l'adaptation de la commande robuste H_∞ par le choix optimal des fonctions de pondération W_1, W_2, W_3 (problème de la synthèse de contrôleur robuste H_∞), les deux méthodes généralement utilisées pour résoudre les problèmes de synthèse d'un optimale contrôleur robuste.

Dans la première méthode on a fait une étude comparative entre deux fonctions objectives : mono objective et multi objective pour étudier l'influence de choix de fonction objective sur les résultats d'optimisation, après avoir optimisé les paramètres de PSS on a synthétisé un stabilisateur robuste PSS-H_∞ à base de l'objet de commande optimisé, cette technique utilisé pour assurer la robustesse de stabilité du système SMIB.

Dans la deuxième méthode on a essayé résoudre le problème de la synthèse de la commande robuste H_∞ par le choix optimale des fonctions de pondérations, cette méthode basée sur la minimisation de la norme H_∞.

Les résultats d'optimisation par l'algorithme génétique GA et essaims particulaires PSO a l'aide d'interface graphique GUI et résultats simulation montrent des améliorations considérable dans les performances dynamique et la robustesse de la stabilité avec les différentes variations paramétriques et les contraintes stochastiques.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

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 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 ce travail est d'assurer une stabilité maximum avec la robustesse de stabilité à l'aide des stabilisateurs de puissance (PSS) généralement utilisés pour l'amortissement des modes électromécaniques locaux et un contrôleur robuste H_∞ basée à technique fréquentielle avancée. Pour ce faire, nous avons développé une méthode d'optimisation globale basée sur les algorithmes génétiques et une fonction multi objectif déterminée à partir de l'analyse des valeurs propres du système pour adapter et synthétiser un stabilisateur robuste PSS-H_∞. D'autre part la résolution de problème de la synthèse de contrôleur robuste H_∞ par le choix optimale des fonctions de pondérations par les algorithmes génétiques.

Notre travail à commencé par la stabilité des systèmes des puissances, ses différents types ainsi que les procédés permettant son amélioration. L'utilisation des Techniques de commandes classiques et commandes avancées a été également discutée. Nous avons également introduit les deux techniques d'optimisations que sont l'Algorithme Génétique et les Particules en Essaim en vue de leur application dans l'optimisation des ces techniques des commandes.

Après cela, on a présenté une étude descriptive et relativement détaillée de la machine synchrone puissante (Turbo -alternateur), et de ses dispositifs de commande d'excitation, pour ensuite lui établir un modèle mathématique assez fidèle. Cependant, l'élément essentiel dans notre travail, défini par le choix de type de modèle qui permette étudier stabilité de notre système pour cela on a fait une étude comparative en deux model : PARK et PARK-GARIOV, le teste de robustesse montre la fiabilité de modèle de PARK-GARIOV proposé.

Pour effectuer cette étude avec différents conditions de fonctionnement (Régimes / configurations) pour divers type des générateurs synchrone puissante (TBB-200, TBB-500, BBC-720 et TBB-1000) on a réalisé un code de calcul sous MATLAB et finalement à étudier une interface graphique 'GUI' permettant de faciliter les calculs lors de la commande d'une centrale de production d'énergie électrique lors des opérations d'analyse et de synthèse des régulateurs, avec résolution du compromis : précision résultats / rapidité de calcul. Les résultat de simulation obtenus, on peut constater que le système en BF avec l'AVR et en présence du stabilisateur de réseaux 'PSS' (AVR-FA) pour plusieurs types des générateurs synchrones puissants, donne des meilleures performances statiques et dynamiques en terme de stabilité dans la majorité des cas étudiés (régimes de fonctionnements de la station et configurations du réseau), et surtout dans le régime sous – excité (qui présente le cas le plus dangereux dans les stations de production d'énergie électrique).

Par conséquent, l'étude de la commande d'excitation du GSP avec le contrôleur conventionnel type PID (AVR-FA), lors des incertitudes paramétriques montre quelle est relativement robuste, mais très sensible aux variations des paramètres de la machine et surtout électriques (lors des régimes sous-excités).

Afin d'amélioré la robustesse de la stabilité et les performances dynamiques du système SMIB, et d'assurer beaucoup plus de fiabilité et de robustesse et on a introduit une étude comparative entre deux techniques de commande avances basées sur les techniques fréquentielles avancées : la commande robuste $H\infty$ basé sur la méthode de loop shaping et la commande Robuste H_2 basé sur le contrôle LQG (linéaire quadratique gaussienne) avec filtre de KALMEN. Les résultats de simulation obtenus montrent que Le contrôleur H_∞ PSS a donné des performances dynamiques meilleures, le système est plus stable et robuste (quelque soit le type d'incertitude paramétrique et le régime de fonctionnement de la station électrique), par rapport l'utilisation de la commande robuste H_2.

Les algorithmes génétiques restent à nos jours les méthodes évolutionnaires les plus utilisés dans le domaine de la commande. Ils peuvent êtres exploités par exemple pour obtenir les valeurs optimisées des paramètres des régulateurs PID, LQG, H_∞. L'avantage des AG par rapport à d'autres techniques d'optimisation est leur indépendance par rapport à la complexité des systèmes. De plus, ils travaillent sur un ensemble de points (une population) et non sur un seul point. L'AG est donc une méthode d'optimisation globale.

L'utilisation de cette technique d'optimisation pour effectuer l'opération de synthèse des contrôleurs $H\infty$ et les paramètres des régulateurs de la tension d'un générateur synchrone puissant pour l'adaptation paramétrique des stabilisateurs robustes PSS-H_∞ avec les différentes variations paramétriques électriques et mécanique.

Dans cette étude on a basé sur deux méthode d'adaptation : Adaptation de la commande robuste H_∞ par l'optimisation de l'objet de commande (réglage des paramètres de PSS) et l'adaptation de la commande robuste H_∞ par le choix optimal des fonctions de pondération W_1, W_2, W_3 (problème de la synthèse de contrôleur robuste H_∞), les deux méthodes généralement utilisées pour résoudre les problèmes de synthèse d'un optimale contrôleur robuste.

Dans la première méthode on a fait une étude comparative entre deux fonctions objectifs : mono objectif et multi objectif pour étudier l'influence de choix de fonction objectif sur les résultats d'optimisation, après avoir optimisé les paramètres de PSS on a synthétisé un stabilisateur robuste PSS-H_∞ à base de l'objet de commande optimisé, cette technique utilisé pour assurer la robustesse de stabilité du système SMIB.

Dans la deuxième méthode on a essayé résoudre le problème de la synthèse de la commande robuste H_∞ par le choix optimale des fonctions de pondérations, cette méthode basée sur la minimisation de la norme H_∞. Les résultats d'optimisation par l'algorithme génétique GA et essaime particule PSO a l'aide d'interface graphique GUI et résultats simulation montrent des améliorations considérable dans les performances dynamique et la robustesse de la stabilité avec les différentes variations paramétriques et les variations stochastique.

Dans les perspectives, on peut citer une stratégie intelligente permettant d'obtenir une commande robuste qui garantie le comportement correct du SEE même en cas de très fortes perturbations et en tenant compte des évolutions et de la dispersion statistique paramétriques et non- paramétriques du système garantissant la continuité de service sans interruption:

- Synthèse à deux degrés de libertés : dans cette approche, un degré de liberté du correcteur est utilisé pour la régulation et réalisé une rétroaction des sorties vers les entrées. Ensuite, le second degré de liberté du correcteur est synthétisé pour optimiser des critères de poursuite.
- Synthèse multi - objectif : Consiste à définir un problème d'optimisation multi – objectif avec contraintes d'inégalité qui correspond aux spécifications désirées. La résolution de ce problème d'optimisation nous donne le correcteur optimal recherché.

Comme perspective, il reste aussi beaucoup à faire sur les axes de recherches suivants :

- Les contrôleurs robustes H_∞-PSS ont étés étudiés seulement de point vue robustesse de stabilité, pour cela il faut effectuer d'autres études et recherches pour l'amélioration des caractéristiques techniques.
- La commande avancée (optimale, adaptative et robuste) des machines synchrones avec utilisation des modèles numériques (Eléments Finis, Différences Finis, Volume Finis…).
- Développer de nouvelles méthodes qui assurent simultanément les deux critères d'optimisation robuste des systèmes PSS (stabilisateurs mixte H_2/H_∞), puisque l'optimisation d'un seul critère ne donne pas facilement un correcteur satisfaisant pour un problème donné.

• L’élaboration d’autres systèmes d’apprentissages des contrôleurs d’excitations (techniques adaptatifs comme FMRLC par exemple), pour augmenter les performances de la commande (en poursuite et en régulation) ;

• Appliquer d’autres méthodes de résolution mathématiques pour la synthèse des stabilisateurs optimales robustes au lieu de la méthode de résolution des deux équations de RICCATI (par exemple essayer avec LMI : Linear Matrice Inequality), est comparer les résultats obtenus.

Enfin, étant donnée que la méthode utilisée est récente, nous souhaiterons que notre contribution aussi modeste qu’elle soit, servira comme référence pour d’autres études est sera l’ébauche pour d’autres travaux à ce sujet dans le futur.

ANNEXES

ANNEXES

Annexe A

Paramètres des turbogénérateurs d'étude (TBB200, TBB500, TBB1000 et BBC720)

Paramètres	***TBB-200***	***TBB-500***	***TBB-720***	***TBB-1000***	***Unités de mesures***
Puissance nominale	200	500	720	1000	MW
Facteur de puissance nom.	0.85	0.85	0.85	0.9	p.u.
X_d	2.56	1.869	2.67	2.35	p.u.
X_q	2.56	1.5	2.535	2.24	p.u.
X_s	0.222	0.194	0.22	0.32	p.u.
X_f	2.458	1.79	2.587	2.173	p.u.
X_{sf}	0.12	.115	0.137	0.143	p.u.
X_{sfd}	0.0996	0.063	0.1114	0.148	p.u.
X_{sf1q}	0.131	0.0407	0.944	0.263	p.u.
X_{sf2q}	0.9415	0.0407	0.104	0.104	p.u.
R_a	0.0055	0.0055	0.0055	0.005	p.u.
R_f	0.000844	0.000844	0.00176	0.00132	p.u.
R_{1d}	0.0481	0.0481	0.003688	0.002	p.u.
R_{1q}	0.061	0.061	0.00277	0.023	p.u.
R_{2q}	0.115	0.115	0.00277	0.023	p.u.

Annexe B

Paramètres des régulateurs AVR, et AVR-FA

1. paramètres de l'AVR :

Paramètres	***TBB-200***	***TBB-500***	***BBC-720***	***TBB-1000***
T1u	0.039	0.039	0.04	0.04
Te	0.04	0.04	0.04	0.04
K1ua	-7	-11	-7	-10
K0ua	-50	-15	-100	-15

2. paramètres de l'AVR-FA:

Paramètres	***TBB-200***	***TBB-500***	***BBC-720***	***TBB-1000***
T1u	0.039	0.039	0.04	0.04
Te	0.04	0.04	0.04	0.04
K1ua	-7	-11	-7	-10
K0ua	-50	-15	-100	-15
Tfc	0.07	0.07	0.07	0.07
T1ω	0.026	0.026	0.026	0.026
T0ω	1	1	1	1
K1ω	3	1	2	1
K0ω	5	2	3	2
Tif	0.03	0.03	0.03	0.03
Kif	-1	-1	-1.5	-1.5
Tuf	0.05	0.05	0.05	0.05
Kuf	1	1	1	1

Annexe C

Interface graphique de calcule et analyse des systèmes asservis

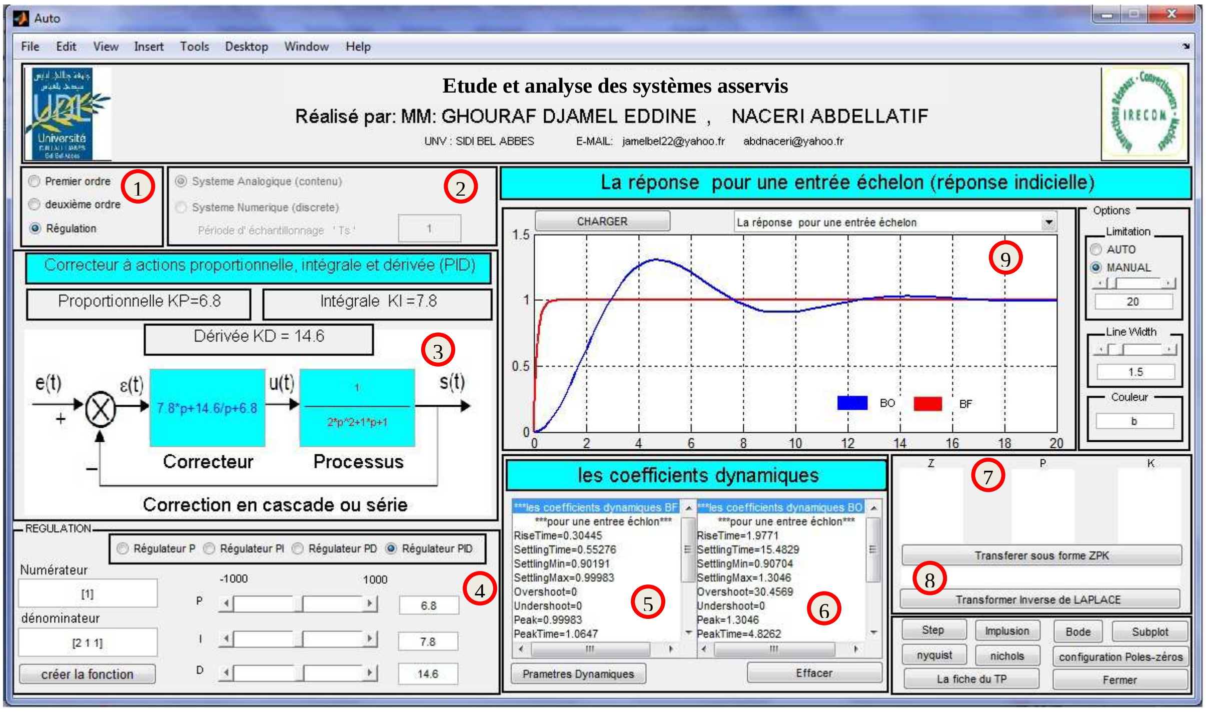
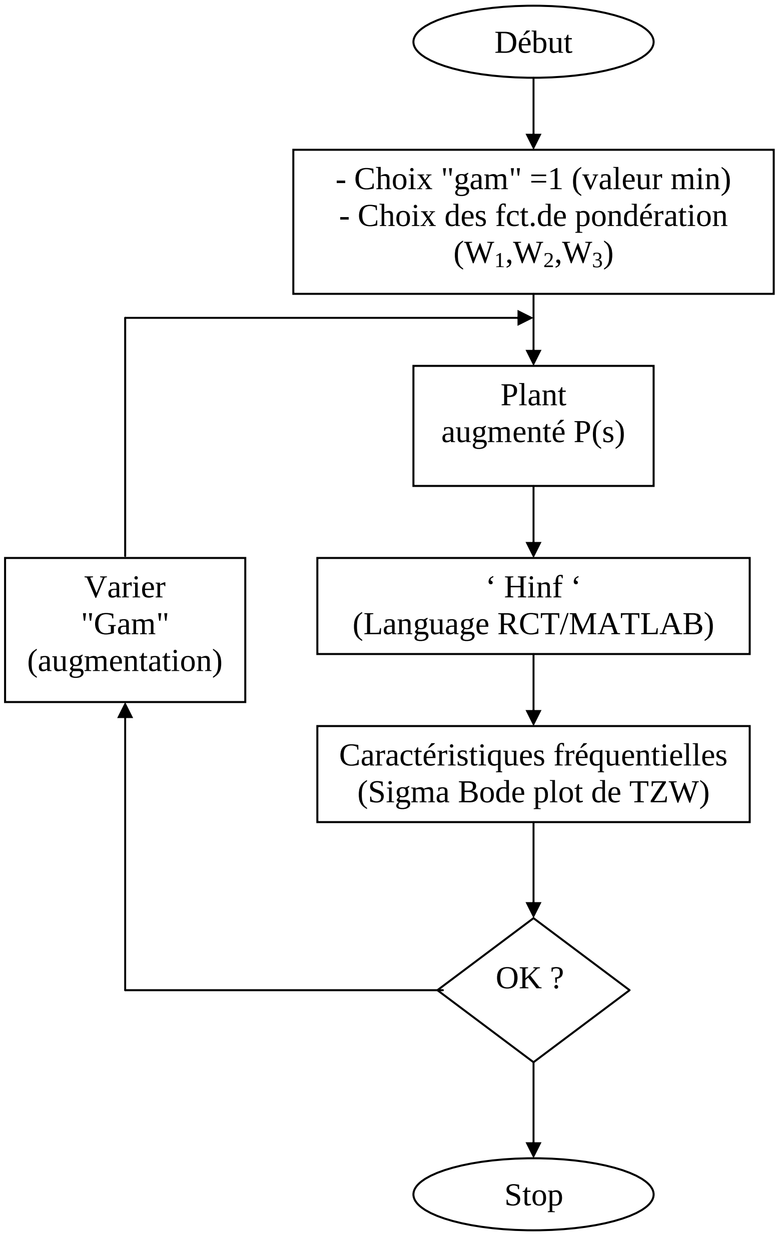


Figure III.14 : Etude et analyse des systèmes asservis sous interface graphique

1. Choix l'ordre de système asservi étudié.
2. Choix type de système asservi étudié (continue ou discret).
3. Schéma de régulation avec système et régulateur utilisé.
4. Choix type de régulateur utilisé (PID).
5. Calcule des paramètres de système en boucle ouverte.
6. Calcule des paramètres de système en boucle fermée.
7. Transfer de système sous forme Zéros-Pôles-Gain (ZPK).
8. Calcule la transformation de laplace de système.
9. Visualiser les résultats de simulation.

Annexe D

Procédure γ — itération



Annexe E

E-1 Normes "H_2, H_∞"

E-2 Valeur singulières

E-1. Normes "H2, H∞" :

Nous considérons le système suivant. Etant linéaire, causale, invariant dans le temps. Son modèle d'entrée sortie est d'écrit par équation de convolution suivant :

$Y = G \bullet U$

Ainsi : $Y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(t-\tau).U(\tau)d\tau$

Deux norme sont utilisées dans la commande optimale, la norme H_2, H_∞

Pour le cas monovariable on a :

La norme H_2 : $\|G_2\| = \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |G(j\omega)|^2 d\omega \right)^{1/2}$

La norme H_∞ : $\|G\|_\infty = \sup_\omega (G(j\omega))$

Pour le cas multi variable le deux normes d'une matrice de transfert stable sont définit comme suit :

$$\|G\|_\infty = \left(\frac{1}{2} trace[G(j\omega) * G(j\omega)]d\omega \right)^{1/2}$$

$$\|G\|_\infty = \sup \sigma_{\max}(G(j\omega))$$

E-2. Valeurs singulières :

Soit la matrice A C^{m*n}, de rang r, les valeurs singulières de A sont alors les racines carrés non négatives des valeurs de A* A, ou A*est la matrice adjointe de A (composé et conjugué). Ces valeurs singulières ont les propriétés suivantes :

Les valeurs singulières de A sont réelles.

On les ordonne : $\sigma_1 = \sigma\sigma.............\sigma_{11} = \sigma$

si r (rang de A) est inférieur à n, alors il y a n-r valeurs singulières nulles.

Le rang de A indique donc le nombre de valeurs singulières nulles de A.

Si A est de plein rang colonne (n=r) alors A* A est symétrique et définie.

E-2-1. Décomposition d'une matrice en valeurs singulières :

Si la matrice A C^{m*n}, il existe deux matrices unitaire U C^{m*n} et V C^{m*n} telles que

$UAV = \sum_{m*n}..................$

$UU^{'} = 1 \quad et \quad VV' = 1$

$\sum_{m*n}$ est de la forme :

$$\sum_{m*n} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ (\sum r) \\ 0 \\ (m-n)*r \end{bmatrix}$$

La matrice $\sum r$ est une matrice réelle diagonale qui comporte les valeurs singulières non nulles de A sur la diagonale.

E-2-2. Propriétés utiles des valeurs singulières :

$\overline{\sigma}(A) = \max[\sigma_1(A)] = \sigma_1$ et $\overline{\sigma}(A) = \max_{X \in C^n} \frac{\|AX\|}{\|A\|}$

$\overline{\sigma}(A) = \min_{l \leq n}[\sigma_1(A)] = \sigma_n$ et $\underline{\sigma}(A) = \min_{X \in C^n} \frac{\|AX\|}{\|A\|}$

$\underline{\sigma(A)} \leq |\lambda_1(A)| \leq \underline{\sigma(A)}$ Quelque soit $l \leq i \leq n$

Si A^{-1}existe, alors :

$\underline{\sigma_1}(A) = \frac{1}{\underline{\sigma_1}(A^{-1})}$

$\overline{\sigma}(\alpha A) = |\alpha| \overline{\sigma}(A) \frac{1}{\underline{\sigma_1}(A^{-1})} \quad \alpha \in C$

$\overline{\sigma}(A+B) \leq \overline{\sigma}(A) + \overline{\sigma}(B)$

$\overline{\sigma}(AB) \leq \overline{\sigma}(A) \overline{\sigma}(B)$

$\underline{\sigma}(A) - \overline{\sigma}(B) \leq \underline{\sigma}(A+B) \leq \underline{\sigma}(A) + \overline{\sigma}(B)$

$\sum_{i=1}^{n} \sigma_J^2(A)) = Trace(A*A)$

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

[1] P.M. Anderson, A.A. Fouad, ''Power System Control and Stability'' Second Edition, Wiley, p 672, 2003.

[2] M. Badis, ''Modelisation, Analyse et Commande des Grands Systemes Electriques Interconnectes'', These de Doctorat, Ecole Normale Superieure de Cachan, France, 2010.

[3] H.Chiang et al., "On Voltage Collapse in Electric Power Systems. ", IEEE Trans. PS, Vol5, No. 2, pp.601-611, 1989.

[4] W.R.Lachs and D. Sutanto, "Voltage Instability in Interconnected Power System: a Simulation Approach. ", IEEE Trans. PS, Vol.7, NO.2, pp.753-761, May 1992.

[5] D. J. Hill and P. A. Lof, "Analysis of Long-Term Voltage Stability", Proceedings of the 10th PSCC, Graz, p 1263, 1990.

[6] B.Gao et al., "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis. ", IEEE Trans. PS, Vol.7, NO.4, pp.1529-1542, November 1992.

[7] N. Yorino et al., "An Investigation of Voltage Instability Problems." IEEE Trans. PS, Vol.7 No.4, pp.600-611, November 1992.

[8] P.A. Lof et al. "Voltage Stability Indices for Stressed Power Systems." IEEE Trans. PS, Vol.8 No.1, pp.326-335, February 1993.

[9] NACERI A., ""Study and Application of the advanced methods of the robust H2 and H∞ control theory in the AVR-PSS systems of Synchronous machines', PhD Thesis, SPBSPU, Saint Petersburg, Russia, 2002 (In Russian).

[10] Abdel-Magid Y.L. and Abido M.A., ''Optimal Multiobjective Design of Robust Power System Stabilizers Using Genetic Algorithms'', IEEE Trans. Power System, vol. 18. n°. 3, pp. 1125- 1132, Aug. 2003.

[11] ''Overview of Power System Stability Concepts'', IEEE Trans. On Power Systems, pp. 1762-1768, 2003 http://ieeexplore.ieee.org/document/1267424/?reload=true&arnumber=126742

[12] Régnier J., ''Conception de systèmes hétérogènes en génie électrique par optimisation évolutionnaire multicritère'', Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.

[13] Singh R., ''A Novel Approach for Tuning of Power System Stabilizer Using Genetic Algorithm'', Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, July 2004.

[14] GHOURAF.D.E "Exploitation des techniques fréquentielles avancées dans le contrôle automatique d'excitation des machines synchrones" mémoire Magister électrotechnique université SBA, déc. 2010

[15] Hasan ALKHATIB '' Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques: Optimisation de la régulation par une méthode met heuristique '', Thèse doctorat d'état, Université Paul Cézanne Aix Marseille III, 2008.

[16] Kundur P et al., ''Definition and Classification of Power System Stability '', IEEE Trans. On Power Systems, vol. 19, n°. 2, pp.1387-1401, May 2004.

[17] Kundur P., ''Power System Stability and Control'', the EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill. Inc, p 1199,1994.

[18] Panda S. and Prasad Padhy N., ''Power system with PSSs and FACTS Controller: Modelling, Simulation and Simultaneous Tuning Employing Genetic Algorithm'', International Journal of Electrical, Computer and Systems Engineering, vol.1, n. 1, pp.9- 18, 2007.

[19] Basler M.J. and Schaefer, R.C., ''Understanding power system stability '', Proceedings of the 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 46-67, April 2005.

[20] Andersson G., ''Modeling and analysis of Electric Power Systems'', EEH Power Systems Laboratory, ETH, Zurich, p 185, http://www.eeh.ee.ethz.ch/fileadmin/user_upload/eeh/studies/courses/modelling_and_analysis_of_power_networks/Documents/PSA_skript12.pdf .

[21] G. Scorletti ''Introduction à la commande multivariable des systèmes : méthodes de synthèse fréquentielle H∞'', cours automatique, Université de Caen/Basse Normandie, p 212, 2007.

[22] R. Findeisen and F. Allgower, '' An introduction to nonlinear model predictive control'', In 21st Benelux Meeting on Systems and Control, Veldhoven, pp1-23, 2002.

[23] D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao and P. O. M. Scokaert, ''Constrained model predictive control: stability and optimality'', Automatica, Vol (36): pp 789-814, 2000.

[24] J.H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, p 228, 1975.

[25] Baghli. L, ‘’Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, réseaux de neurones et des algorithmes génétiques’’, PhD Thesis, université de Nancy, Janvier 1999.

[26] Abdel-Madjid Y. L., Abido M. A., Al-Baiyat S. and Mantawy A. H., “ Simultaneous Stabiliszation of multi-machine power system via genetic algorithms.”, IEEE-Transactions-on-Power-Systems., vol. 14, N 04, pp. 1428-39, Nov 1999.

[27] Farag W. A., Quintana V. H. and Lambert-Torres G., “ Enhacing the transient stability of multi-machine power systems using intelligent techniques.”, Bulk-Power-Systems-Dynamics-and-Control-IV-Restructuring- Symposium-Proceedings, Nat. Tech. Univ. Athens. Athens, Greece, pp. 17- 25, 1998.

[28] Taranto G. N. and Falcão D.M., “Robust decentralized control design using genetic algorithms in power system damping control.”, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 1, pp 1-6, January 1998.

[29] Hasanovic. A and Felialchi. A, ‘’Genetic Algorithm Based Inter-Area Oscillation Damping Controller Design MATLAB’’, Proc. IEEE Power Eng, Vol 3, N 3,pp 1136-1141, 2002.

[30] Kennedy. J. and Eberhart. R. C., ‘’Particle swarm optimization’’. Proceedings of the IEEE conference on Neural Networks, IV, 1995, pp. 1942-1948, Piscataway, NJ.

[31] Kennedy J. and Eberhart R., ‘’Swarm Intelligence’’, San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers, p 512, 2000.

[32] Clerc. M, Kennedy. J, ‘’ the particle swarm: explosion stability and convergence in a multi-dimensional complex space’’, IEEE Transactions on Evolutionary Computation 6(1), pp. 58-73, 2002.

[33] Abido. M. A, “Particle Swarm Optimization for Multimachine Power System Stabilizer Design”, Proc. of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 2001

[34] Yang, C., Sim on, D.: ‘’A new particle swarm optimization technique’’,18th International Conference on Systems Engineering (ICSEng 2005), pp. 164–169,2005.

[35] H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama et Y. Nakanishi, “ A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage stability ”, IEEE International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP’99), Rio de Janeiro, April 4-8, 1999.

[36] S.K.Rautraya , S.Choudhurya , S.Mishraa , P.K.Routa ‘’A Particle Swarm Optimization Based Approach For Power System Transient Stability Enhancement With TCSC’’ 2nd International Conference on Communication, Computing & Security 2012.

[37] Leonard L. Grigsby ''Power System Stability and control'' The Electric Power Engineering Handbook, 2nd edition, CRC Press, Talyor & Francis Group, LLC, p 352 2006.

[38] P Kundur, M Klein, GJ Rogers, MS Zywno '' Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability'' IEEE Transactions on Power Systems Vol 4 (2), 614-626, 1989.

[39] Lamya Abdeljalil '' modélisation dynamique et commande des alternateurs couples dans un réseau électrique embarque '', Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, Novembre 2006.

[40] Liva Falisoa Rafanotsimiva ''Etude de commandes non linéaires pour réseaux électriques - Application a un système SMIB'' Thèse de Doctorat université d'Antseranana école supérieure polytechnique, 2013

[41] Y. Gou, D. J. Hill and Y. Wang, ''Global transient stability and voltage regulation for power systems'', IEEE transactions on power systems, vol.16, N°4, 2001.

[42] M. Galaz, R. Ortega, A. S. Bazanella and A. M. Stankovic, ''an energy shaping approach to the design of excitation control of synchronous generators'', Automatica, Vol 39, N 1, pp 111–119, 2003.

[43] Anthony MASURE ''Relations Hommes-Machines'', cours 2011. http://www.anthonymasure.com/content/06-cours/01-2011-relations-hommes-machines/Anthony-Masure-Cours-Relations-Hommes-Machines-2011-Sujet.pdf.

[44] Gérard Blanchet, Maurice Charbit ''Compléments `a l'utilisation de Matlab : Eléments du langage, interfaces graphiques, structures de données, extensions .mex '' http://perso.telecom-paristech.fr/~blanchet/DOCUMENTS/docMATLAB.pdf

[45] The Math Works Inc., '' Getting Started with Control System Toolbox'', 2000-2002. http://prof.usb.ve/ahoyo/Documentos/cst_matlab.pdf

[46] M. SOFONOV, D. J. LMBEER, R. Y. CHIANG ''Simplifying the H∞ PSS theory via loop shifting matrix pencil and descriptor concept'', int. J. Of control, vol. 50, N2 , pp 2467-2488,1994.

[47] D. M. McFarlane and K. Glover. ''A loop shaping design procedure using H∞''. IEEE Trans. Aut. Control, vol 37(6), June 1992.

[48] R. Asgharian ''Asymptomatic approach to performance weights selection in design of robust H∞PSS using genetic algorithms '', IEEE trans. on EC, vol 11, No 21, pp.111-117, September 1996.

[49] LA. GROUZDEV, A.A. STARODEBSEV, S.M. OUSTINOV ‘’Conditions d'application des meilleurs amortissements des processus transitoires dans les systèmes énergétiques avec optimisation numérique des paramètres du régulateur AVR-FA’’ Energie -N°ll-pp.21-25, 1990.

[50] Songzhe Zhu ‘’Analyzing Dynamic Performance of Power Systems Over Parameter Space Using Normal Forms of Vector Fields’’ IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 16, NO. 3, 2001.

[51] Doyle J.C., Glover K. ‘’ Robust and optimal control. Englewood Cliffs’’, NJ: Prentice Hall, 1996.

[52] P. P. DEMELLO, C. CONCORDIA ‘’Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control’’, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 88, No.4, pp. 1989-2002, 1969.

[53] Goldberg D.E., ‘’Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning’’, Addison-Wesley, p 372, 1989.

[54] L. Jourdan, ‘’ Méta heuristiques pour l’Extraction de Connaissances : Application à la Génomique’’, Thèse de Doctorat, USTL, Lille 1, 2003.

[55] Osman I.H. and Laporte G., ‘’ Metaheuristics: a bibliography ‘’, Annals of Operations Research Vol 63 N 03, pp 513-623, 1996.

[56] F. Glover, ‘’ Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence’’, Computers and Operations Research, Vol 13 N 01, pp 533-549, 1986.

[57] Kennedy, J. and Eberhart, R. C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm. Proceedings of the World Multiconference on Systemics,Cybernetics and Informatics 1997, Piscataway,pp. 4104-4109, 1997

[58] Hongesombut K. and Mitani Y., ‘’ Implementation of Advanced Genetic Algorithm to Modern Power System Stabilization Control ‘’, IEEE PES, Power Systems Conference & Exposition, vol. 2, pp. 1050-1055, Oct. 2004.

[59] Barnier N. and Brisset P., ‘’ Optimisation par algorithme génétique sous contraintes’’, Technique et science informatiques, vol. 18, n°. 1, pp. 1-29, 1999.

[60] Negnevitsky M., ‘’Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems’’, Addison Wesley,Harlow, England, p 435, 2002.

[61] Chipperfield A., Fleming P., Pohlheim H. and Fonsca C., ‘’ Genetic Algorithm Toolbox User’s Guide’’, Department of Automatic Control System Eng, University of Sheffield, UK.1994.

http://www.pohlheim.com/Papers/tr_gatbx12/ChipperfieldFlemingPohlheimFonseca_tr_GATbx_v12.pdf

[62] Mitchell M., ‘’ an Introduction to Genetic Algorithms’’, the MIT Press, Massachusetts, p 209, 1998.

[63] Hongesombut K., Dechanupaprittha S., Mitani Y. and Ngamroo I., ‘’ Robust power system stabilizer tuning based on multiobjective design using hierarchical and parallel micro genetic algorithm’’, 15th Power Systems Computation Conference: PSCC, pp. 1-7 , Belgium, Aug. 2005.

[64] C. Darwin, ‘’ On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favored Races in the Struggle for Life ’’, Disponible sur http://www.literature.org/authors/darwincharles/the-origin-of-species/

[65] T. Blickle and L. Thiele, ‘’A Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithms’’, TIK-Report Nr. 11 (Version 2), Switzerland, December 1995.

[66] Pohlheim H., GEATbx: ‘’ Genetic and Evolutionary Algorithm Toolbox for use with MATLAB’’, Version 3.7, November 2005. www.geatbx.com/docu/index.html.

[67] C.A. Coello, ‘’ An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multiobjective Optimization in Engineering Design’’, Ph.D. Dissertation, Department of Computer Science, Tulane University, 1996.

[68] S. Luke, ‘’ Issues in Scaling Genetic Programming: Breeding Strategies, Tree Generation, and Code Bloat’’, Ph.D. Dissertation, Department of Computer Science, University of Maryland, 2000.

[69] M. Srinivas and L.M. Patnaik, ‘’ Genetic Algorithms: A Survey ’’ , IEEE Computer, Vol. 24, No. 6, pp. 17-26, June 1994.

[70] I. Lerman et F. Ngouenet, ‘’ Algorithmes Génétiques Séquentiels et Parallèles pour une Représentation Affine des Proximités’’, Projet REPCO, Rapport de recherche n° 2570, INRIA Rennes, 1995.

[71] Do Bomfim A.L.B., G.N. Taranto and Falcao D.M., ‘’ Simultaneous Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms’’, IEEE Trans. On Power Systems, Vo1.15, n°.1, pp.163-169, Feb 2000.

[72] Angeline P.J., ‘’ Evolutionary Optimization versus Particle Swarm Optimization: Philosophy and Performance Differences’’, Proc. of the 7thConf. On Evolutionary Programming, vol. VII, pp. 601-610, March 1998.

[73] Clerc, M. and Kennedy, J ’’The Particle Swarm : Explosion, Stability, and Convergence in a Multi-Dimensional Complex Space’’, In Proceedings of the IEEE Transactions on Evolutionary Computation, volume VI, pp 58–73, 2002.

[74] Hu, X., Eberhart, R., and Shi, Y. ‘’Swarm Intelligence for Permutation Optimization: A Case Study of n-Queens Problem’’ Proceedings of the IEEE, 2003.

[75] Kennedy, J. ‘’ Small Worlds and Mega-Minds: Effects of Neighborhood Topology on Particle Swarm Performance’’, In IEEE Congress on Evolutionary Computation, vol 03, pp 1932–1938, 1999.

[76] Suganthan, P. ‘’ Particle Swarm Optimizer with Neighborhood Operator’’. In IEEE Congress on Evolutionary Computation, volume 3, pages 1958–1961, 1999.

[77] Van den Bergh, F. ‘’ An Analysis of Particle Swarm Optimizers’’, PhD thesis, Department of Computer Science, University of Pretoria, 2002.

[78] Millonas, M. M. ‘’Swarms, phase transitions, and collective intelligence ’’, In C. G. Langton, Ed., Artificial Life III. Addison Wesley, Reading, MA, p 488, 1995.

[79] Brogan W.L, et al, ‘’ Control Systems, The Electric Engineering Handbook’’, CRC Press LLC, Boca Raton, p 453, 2000.

[80] K. GLOVER, J.C. DOYLE, P.P. KHARGONEKAR, B.A. FRANCIS “State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems”, IEEE Trans. On A.C, vol.34, № 8, pp.834-847, 1989.

[81] Hongesombut K., Mitani Y. and Tsuji K., ‘’An Automated Approach to Optimize Power System Damping Controllers Using Hierarchical Genetic Algorithms ‘’ , Proc. of Intelligent System Application to Power Systems, pp.3-8, June 2001.

[82] Kwakernaak H. “Robust control and H∞ optimization, Tutorial paper”, Automatica, vol. 29, № 2, pp. 201-207, June 1994.

[83] DUC G. FONT S. ‘’ Commande H∞ et μ-Analyse ‘’, Editions HERMES, Paris, p 121, 1999.

[84] FONT S. ‘’ Méthodologie pour Prendre en Compte la Robustesse des Systèmes Asservis: Optimisation H∞ et Approche Symbolique de la Forme Standard’’, Thèse de doctorat, Université Paris XI. Orsay. 1995.

[85] FRANCIS B.A. ‘’A Course in H∞ Control Theory’’, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, p 153, 1987.

[86] S. Font. ‘’ Méthodologie pour prendre en compte la robustesse des syst ´ emes asservis : optimisation ` H∞ et approche symbolique de la forme standard’’. PhD thesis, Universite Paris XI Orsay, France, 1995.

[87] CHEN, S.—MALIK, O. P, ’’ H∞ Optimisation- Based Power System Stabilizer Design’’, IEE Proc. Gener. Trans. Distr. 142 No. 2, 179-184, 1995.

ملخص : الاستقرار و المتانة يعتبران شرطين أساسيين لنجاعة و استمرار إنتاج الطاقة الكهربائية هذه الأخيرة التي هي نتاج لعمل سلسلة من الأنظمة المتراكبة وذات تركيبة رياضية جد معقدة و تدعى بالأنظمة الطاقوية .كون هذه الأنظمة مركبة في ظروف بيئية معقدة فهي معرضة لجملة من التغيرات الفجائية التي تأثر بشكل مباشر على عمل هذه الأنظمة وبالتالي استقرار الإنتاج الطاقوي . مثبتات الاستقرار في الأنظمة الطاقوية PSS تلعب دورا كبيرا في تحسين استقرار الأنظمة الطاقوية و لكن في مجال شروط عمل معينة , لحل مشكلة متانة استقرار الأنظمة الطاقوية قمنا بتطبيق تقنيات التحكم الاهتزازية المتقدمة H∞ مدعمة بتقنيات التحسين عن طريق الخوارزمية الجينية التي تعتميد أساسا على توليف التحكم المتين لمسايرة مختلف التغيرات الطارئة. الدراسة مطبقة لتحكم ألي للإثارة في المولدات عالية القدرة. الدراسة المقترحة اعتمدت على شقين :الشق الاول توليف التحكم المتين عن طريق ضبط مثالي لأبعاد مثبتات الاستقرار في الأنظمة الطاقوية و الذي يعتبر كونه موضوع التحكم , الشق الثاني يعتمد على توليف التحكم المتين عن طريق ايجاد مثالي لمعادلات الموازنةW_3,W_2,W_1 والتي تعتبر المشكل الوحيد في تركيب المتحكم المتين.نتائج المحاكات أثبتت نجاعة الدراسة وخاصة في ضمان متانة الاستقرار في شروط عمل ومتغيرات جد معقدة. كون هذا العمل يحتاج الى اسهاب في الدراسة قمنا بانجازه تحت واجهة رسومية و التي سمحت لنا باختزال مجموعة من المعوقات بالإضافة إلى سرعة ودقة النتائج المحصلة.

كلمات مفتاحيه : الماكينات التزامنية , أنظمة التحكم الأوتوماتيكي للإشارة , معدل كلاسيكي نوع PID, التحكم المتين , تقنيات التواتر المتقدمة H∞ GUI-MATLAB, معادلات الموازنة , التحسين عن طريق الخوارزميات الجينية. , الاستقرارية والمتانة , أنظمة كهروطاقوية

Résumé : La stabilité et la robustesse sont considérées comme des conditions essentielles pour la fiabilité et la continuité de la production d'énergie électrique ce dernier produit par une série des systèmes avec des modèles mathématiques très complexes c'est le système de puissance. Du fait que ces systèmes installés dans des conditions environnementales complexes ils sont exposés à une incertitude qui peut influencer directement sur le leurs fonctionnement et donc sur la stabilité de la production d'énergie. Le Stabilisateur de système de puissance PSS jeux un rôle important dans l'amélioration de cette stabilité, mais dans certaines conditions de fonctionnement dégradé sont inefficace, donc pour résoudre le problème de la robustesse de la stabilité nous avons exploité les techniques de commande fréquentielles avancées (H_2 et H_∞), et par la suite l'optimisation commandes robustes synthétisés (fonctions de pondérations) par des méthodes non déterministes et notamment l'algorithme génétique 'AG', permettant l'adaptation paramétriques et l'application d'une commande plus robuste appliquée à l'excitation des machines synchrones puissants, sous différentes conditions de fonctionnement de la station électrique et problèmes incertains. L'étude proposée est basée sur deux volets : l'adaptation de la commande robuste par l'optimisation des paramètres du PSS qui considéré comme l'objet de commande, et la deuxième c'est l'adaptation de la commande robuste par l'optimisation de ces fonctions de pondérations (W_1 W_2 W_3), qui constitue l'étape le plus décisif. Les résultats de simulation (avec des tests de robustesses vis-à-vis des variations paramétriques de la machine), montrent une amélioration considérable des performances dynamiques et une grande robustesse de stabilité de contrôleur robuste H∞ adapté par ces Algorithme génétique. Notre travail est réalisé à l'aide des interfaces GUI développés sous logiciel MATLAB.

Mots-clés Générateurs synchrones puissants, AVR-PSS, PID, commande robuste H∞, fonctions de pondérations, système électro-énergétique, Algorithmes génétiques, GUI-MATLAB, stabilité et robustesse.

Abstract: stability and robustness are considered essential requirements for friability and continuity of electrical energy production this latter produced by a series of systems with very complex mathematical models called power system. Since these systems installed in complex environmental conditions they are exposed to a variation uncertainty which affected directly in the operation of these systems and therefore the stability of the energy production power system stabilizer PSS plays an important role in improving the stability of power systems, But in certain operating conditions, To solve the problem of robust stability of power systems we performed advanced frequency control H∞ supported by the optimization techniques by the GA genetic algorithm for adapting the robust H ∞ control applied to the automatic control excitation of powerful synchronous machines with different uncertainties variations. The proposed study is based on a two pronged: adaptation of robust control by the PSS parameters optimization this latter considered that control object and the second adaptation of the robust control by optimizing W_1 W_2 W_3 weighting functions. The computer simulation results by analyzing stability with robustness tests against model uncertainty and stochastic external disturbances, applied on electrics and/or mechanics machine parameters, have proved good static and dynamics performances, by improving stability of system responses almost insensitive to large parameters variations, and an excellent robustness with the advanced robust H_∞ controller optimized by genetic algorithms. This present study was performed and implemented under our graphical user interface (GUI) realized and developed under MATLAB Software, easy for exploiting and very powerful to apply another simple or hybrid evolutionary optimization techniques.

Keywords: powerful synchronous generators, AVR-PSS, PID, H∞ robust control, weightings functions; power system, Genetic Algorithms, GUI-MATLAB, stability and robustness.