



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

جامعة عمّار تليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : Génie Electrique

Mémoire de MASTER

Domain : Sciences et technologie.

Filière : Electrotechnique.

Option : Réseaux électriques.

Par: **BEDERINA IKRAM.**

BEN HASSINE HABIBA.

THEME

*Conception Optimisée des PSSs Neuronaux et Neuro-
Flous Auto-Ajustés*

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

ARIF SALEM

OMRANE MOHAMMED

CHETTIH Saliha

Prof.

M.C.A

Prof.

Président

Rapporteur

Examineur

Année Universitaire 2021/2022

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma mère ilham et à mon père Djelloul grâce à votre amour que je maintiens le courage et la motivation dans mes études et dans ma vie. C'est un moment de plaisir de vous dédier cet œuvre. Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi. je t'aime beaucoup

Mes frères et sœurs

Tahaa bdelwahed, Mohamed Belkbir, Wafa et Abir et mon ange Wissal Dieu repose son âme

Chers amis

Ikram, Soumia, Sara, Nada, Chaïma, Raounak, Manel, fatimaEzahra, khadidja Ferdaous et khaoula, wahiba, Hadil et Fatima

Je dédie aussi mon cher binôme

Ikram

Merci pour tous

Je suis tellement reconnaissant à

Laggoun Nasreddine et Amrane Mohamed el Amine

Pour votre aide, vos efforts et votre soutien moral toujours

Merci infiniment.

HABIBA

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail A ma mère et à mon père lamine
grâce à votre amour que je maintiens le courage et la motivation dans
mes études et dans ma vie. C'est un moment de plaisir de vous dédier
cet œuvre...merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.je t'aime
beaucoup*

Mes frères et sœurs

Lahcen, Khouloud, Douaa

Chers amis

Habiba, Fatima et Hadil

Je dédie aussi mon cher binôme

Habiba

Merci pour tous

Pour votre aide, vos efforts et votre soutien moral toujours

Merci infiniment.

IKRAM

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné tout au long de ces années scolaires.

Ce travail est le fruit de nombreuses épreuves et coopérations, et de la fatigue. Nous tenons à exprimer notre gratitude à tous nos professeurs qui ont contribué à notre formation tout au long de notre carrière scientifique et à toute personne qui nous a aidé de près ou de loin à réaliser ce travail, qui a croisé un chemin, en donnant du temps, de l'écoute, des conseils et de l'expérience pour nous permettre de progresser, mûrir, apprendre et mieux nous découvrir.

*Nous sommes très reconnaissantes à notre encadreur de mémoire, le Dr. **OMRANE Mohammed**, et nous tenons à lui exprimer nos sincères remerciements pour son aide continue tout au long de la préparation de ce travail. Et pour sa patience, ses conseils, son soutien moral et la confiance qu'il nous a accordés tout au long de ce mémoire.*

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à tous nos distingués professeurs et à tout le personnel enseignant et administratif sans exception, ainsi qu'à l'honorable jury qui a supervisé et évalué travail.

Enfin, nous remercions chaleureusement nos familles et nos amis pour le soutien, l'amour et la compréhension qu'ils nous ont témoignés tout au long de ce travail. Nous vous remercions du fond du cœur, votre soutien compte beaucoup pour nous.....

ملخص

هذا العمل يهدف لاقتراح حل لمشكل تكيف معاملات مثبتات الاستطاعة التي تستوجب تغييرها كلما تغيرت نقطة التشغيل وبصفة لحظية و المشكل الثاني عند حصول دارة قصيرة , فان بنية الشبكة الكهربائية كلها تتغير. وتصبح المعاملات المقترحة غير ملائمة للشبكة المكافئة. ومن بين الحلول المعروضة استخدام الذكاء الاصطناعي لتصميم الشبكات العصبونية والمنطق الضبابي لحل مشكل تكيف المعاملات لتغير نقطة التشغيل ولمعالجة الاشكال الثاني تم استخدام طريقة حساب الانحدار لانحراف السرعة.

الكلمات الدالة: التكيف – الشبكة العصبونية – الذكاء الاصطناعي – المنطق الضبابي.

ABSTRACT

This work in order to propose a solution to the problem of adapting the coefficients of power system stabilizers that requires change whenever the operating point changes in real time, the second problem is when a short circuit occurs, the structure of the entire power grid changes. The proposed transactions become unsuitable for the equivalent network. Among the solutions presented is the use of artificial intelligence to design neural networks and fuzzy logic to solve the problem of adapting coefficients to change the operating point. In order to treat the second figure, the gradient calculation method was used for the velocity deviation.

Keywords: Adaptation- Neural network- Artificial intelligence- Fuzzy logic.

RÉSUMÉ

Ce travail pour proposer une solution au problème d'adaptation des coefficients des stabilisateurs de puissance qu'il faut changer à chaque fois que le point de fonctionnement change en temps réel, et le deuxième problème est lorsqu'un court-circuit se produit, la structure de l'ensemble du réseau électrique changements. Les transactions proposées deviennent inadaptées au réseau équivalent. Parmi les solutions présentées figure l'utilisation de l'intelligence artificielle pour concevoir des réseaux de neurones et la logique floue résoudre le problème d'adaptation des coefficients pour modifier le point de fonctionnement. Pour traiter la deuxième problématique, la méthode de calcul du gradient a été utilisée pour la déviation de vitesse.

Mots clés : Adaptation - Réseau de neurones –L'intelligence artificiel- Logique floue.

SOMMAIRE

<i>Dédicace</i>	I
<i>Dédicace</i>	II
Remerciements.....	III
<i>ملخص</i>	IV
<i>ABSTRACT</i>	IV
<i>RÉsumÉ</i>	IV
Sommaire	V
<i>Liste des Figures.</i>	VII
<i>Liste des Tableaux</i>	IX
Liste des abréviations et symboles.....	X
Introduction générale	1
I. Chapitre 1 : stabilité des réseaux électriques.....	3
III.2 1 Introduction.....	3
III.2 2 Stabilité électrique	3
I.2. 1 Définition	3
I.2. 2 Problèmes de la stabilité des réseaux électriques.....	3
I.2. 3 Types de Stabilité.....	4
I.2.3. 2 Stabilité transitoire.....	5
I. 3 Causes d'instabilité	6
I. 4 Différents méthodes d'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique	6
I. 5 Stabilisateur de puissance PSSs (stabilisateur de système de puissance).....	6
I.5. 1 Rôle d'un PSS	7
I.5. 2 Classification des PSSs	7
I.5. 3 Classification des PSSs suivant leur structure interne	8
I. 6 Amélioration de la stabilité par les PSS	11
I. 7 Conclusion.....	12
II. Chapitre 2 : Conception des PSSs par les réseaux de Neurones.....	13
II. 1 Introduction.....	13
II. 2 Réseaux de neurones artificiels.....	13
II. 3 Theorie De La Logique Floue	17
II. 4 Optimisation De Pss Par Les Reseaux De Neurones Et Neuro-Floue	18
II. 5 Méthode du gradient pour l'adaptation des paramètres des PSS en temps réelle	20
II. 6 Conclusion.....	21
III. Chapitre 3 Conception, Résultats et Interprétation	22
III. 1 Introduction.....	22
III. 2 Optimisation des PSSs d'un système multimachine	22
III.2 1 Etapes de la conception du PSS	22
III.2 2 formulation du problème	23

III.2 3 Paramètres PSSGA.....	24
III.2 4 <i>PARAMETRES DU RESEAU DE NEURONES</i>	25
III. 3 PSSs auto-ajustés par un Contrôleur Floue.....	25
III.3 1 premier partie.....	27
III.3 2 Interprétation des résultats.....	32
III.3 3 Deuxieme partie.....	36
• Interprétation des résultats après un deuxième réglage.....	40
III.3 4 Conclusion.....	45
CONCLUSION GENERALE.....	46
Bibliographie.....	47
ANNEXE.....	50

LISTE DES FIGURES.

Figure I-1 : Classification des différents types de PSSs.	5
Figure I-2 : Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système d'excitation [9]....	7
Figure I-3: Structure d'un Stabilisateur de Puissance PID.....	9
Figure I-4: Modèle d'un PSS avance-retard [10].....	10
Figure II-1 : Réseau de neurones artificiel [16]	14
Figure II-2 : Neurone biologique	14
Figure II-3: Système d'inférence floue [6].....	17
Figure II-4: Principe de l'auto-ajustement des paramètres du PSS. [10].....	20
Figure III-1 : Organigramme des étapes de conception du PSS adaptatif	23
Figure III-2 : Structure d'un contrôleur à logique floue [10]......	26
Figure III-3 : Fuzzification des variables linguistiques du mécanisme d'auto-ajustement flou triangulaire.	26
Figure III-4: Fuzzification des variables linguistiques du mécanisme d'auto-ajustement flou Gaussienne	27
Figure III-5: Fuzzification des variables linguistiques du mécanisme d'auto-ajustement flou Bell	27
Figure III-6 :Déviations des vitesses des trois générateurs pour une faible charge	29
Figure III-7:Déviations des vitesses des trois générateurs pour une charge nominale	30
Figure III-8: Déviations des vitesses des trois générateurs pour une charge forte.....	31
Figure III-9: ISE*10 ⁻⁴ pour le générateur G 1.....	32
Figure III-10 : Premier Pic*10 ⁻³ pour le générateur G1	33
Figure III-11 : Temps d'atténuation pour les trois charges pour le générateur G1	33
Figure III-12 : ISE*10 ⁻⁴ pour le générateur G2.....	34
Figure III-13 : Premier Pic*10 ⁻³ pour le générateur G2.....	34
Figure III-14 : Temps d'atténuation pour les trois charges pour le générateur G2	34
Figure III-15 : ISE*10 ⁻⁴ pour le générateur G3.....	35
Figure III-16 : Premier Pic*10 ⁻³ pour le générateur G3.....	35
Figure III-17 :Temps d'atténuation pour les trois charges pour le générateur G3	36
Figure III-18 :Déviations des vitesses des trois générateurs dans le cas d'une charge faible.....	37
Figure III-19 : Déviations des vitesses des trois générateurs dans le cas d'une charge nominale.	38

Figure III-20 : Déviations des vitesses des trois générateurs dans le cas d'une charge forte.	39
Figure III-21 : ISE*10 ⁻⁴ pour le générateur G1 après un deuxième réglage.....	41
Figure III-22 :Premier Pic*10 ⁻³ pour le générateur G1 après un deuxième réglage ...	41
Figure III-23 : Temps d'atténuation pour les trois charges pour le générateur G1 après un deuxième réglage	41
Figure III-24 :ISE*10 ⁻⁴ pour le générateur G2 après un deuxième réglage.....	42
Figure III-25 :Premier Pic*10 ⁻³ pour le générateur G2 après un deuxième réglage	43
Figure III-26 : Temps d'atténuation pour les trois charges pour le générateur G2 après un deuxième réglage	43
Figure III-27 : ISE*10 ⁻⁴ pour le générateur G3 après un deuxième réglage.....	43
Figure III-28 : Premier Pic*10 ⁻³ pour le générateur G3 après un deuxième réglage ...	44
Figure III-29 : Temps d'atténuation pour les trois charges pour le générateur G3 après un deuxième réglage	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 ; Transition entre le neurone biologique et le neurone formel	15
Tableau II-2 : Comparaison entre la logique floue et les réseaux de neurone[10].	18
Tableau III-1 ; Paramètres du réseau de neurones	25
Tableau III-2 : Règles d'inférence floues des paramétrés à ajuster [10].....	27
Tableau III-3 ; Comparaisons des résultats de point de vu ISE et premier pic, temps d'atténuation pour le générateur n°1.	31
Tableau III-4 ; Comparaisons des résultats de point de vu ISE et premier pic, temps d'atténuation pour générateur n°2	31
Tableau III-5 ; Comparaisons des résultats de point de vu ISE et premier pic, temps d'atténuation pour générateur n°3.	32
Tableau III-6 ; Comparaisons des résultats après l'amélioration de point de vu ISE et premier pic, temps d'atténuation pour générateur n°1	39
Tableau III-7 ; Comparaisons des résultats après l'amélioration de point de vu ISE et premier pic, temps d'atténuation pour générateur n°2.	40
Tableau III-8 ; Comparaisons des résultats après l'amélioration de point de vu ISE et premier pic, temps d'atténuation pour générateur n°3.....	40

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES


Abréviation	Désignation
δ :	Angle du Rotor
μ :	Degré d'appartenance d'une Variable Floue
ω :	Vitesse Angulaire de Rotor En (Pu)
ω_0 :	Vitesse de Synchronisme (Vitesse de Base), En Rad/s Avec ($\omega_0 = 2\pi f$)
AVR	Régulateur de tension en anglais : (Automatic Voltage Regulator)
CLF	Contrôleur à Logique Floue
C_{PSS} :	C onventional P ower S ystem S tabilizer
E_{fd} :	Tension d'excitation
f :	Fréquence des Courants Alternatifs En (Hz)
FACTS:	F LEXIBLE A LTERNATING C URRENT T RANSMISSION S YSTEMS
GA	Algorithme Génétique (GA en Anglais)
ISE	I ntegral of S quare E rror
JB :	J eu de B arres
K :	Gain du PSS, Coefficient de Kapp (Caractéristique De La Machine Pu)
K_A	Gain de l'AVR
K_c	Gain du PSS
K_{pss} :	Gain du PSS (Pu)
PSS	Stabilisateur de puissance (en anglais : Power System Stabilizer)
RN	Réseau de Neurones
RNA :	R éseau de N eurone A daptative
S :	Opérateur de Laplace
T	Temps (S)
T₁, T₂	Constantes de temps d'avance de phase
T₁, T₂	Constantes de temps de retard de phase
T_e :	Couple Electrique
T_i, T_d, T₁ :	Constantes de Temps(S) (T2, T3, T4)
T_m :	Couple Mécanique
U :	Vecteur de Commande
V_{ref} :	Tension de Référence (Pu)
p	index du PSS.

INTRODUCTION GENERALE

Depuis de nombreuses années, malgré le grand développement des dispositifs de protection et de régulation, les réseaux électriques sont dans la plupart des cas souvent soumis à des perturbations et des fluctuations pour diverses raisons, car ces perturbations peuvent affecter la perte de stabilité du système et ainsi provoquer des dysfonctionnements importants. Le déséquilibre entre la production et la consommation d'électricité, nous rend incapables de stocker l'énergie électrique en grande quantité, c'est pourquoi l'énergie produite doit être consommée immédiatement, il doit toujours y avoir un équilibre entre la production et la consommation, c'est-à-dire que nous doit assurer la stabilité du réseau électrique, ce qui est très important pour la planification et l'exploitation des réseaux électriques, car tout déséquilibre est une situation qui conduit parfois à une défaillance de l'ensemble du réseau.

Puisque la stabilité est le facteur le plus important dans la maintenance du réseau électrique, et parce que les perturbations des réseaux électriques constituent un problème majeur qui affecte la stabilité de fonctionnement et la continuité de service. Pour cela, nous nous intéressons à l'analyse de la stabilité des réseaux électriques, en particulier la stabilité dynamique à l'aide de systèmes de réglage tels que le contrôleur PSS (stabilisateur du système d'alimentation) connu sous le nom (Power System Stabilizer) dans le but d'améliorer la stabilité, qui se sont avérés efficaces à cet égard. Une classe de PSS appelés PSS intelligents est importante pour sa fiabilité et son adaptabilité à différents environnements d'exploitation. Dans cette catégorie, on retrouve les PSS avec des paramètres optimisés par des techniques d'optimisation telles que les métaheuristiques de recherche locales, globales ou hybrides. L'inconvénient de ces techniques est qu'elles nécessitent beaucoup de temps de calcul, ce qui élimine leur utilisation en ligne..

En revanche, le seul inconvénient de ces PSSs est qu'ils n'offrent pas des performances optimales pour toutes les opérations. Ainsi d'autres types de PSS à paramètres adaptatifs dépendant du point de fonctionnement sont utilisés pour pallier les insuffisances des PSS à paramètres fixes. Ces PSS sont basés sur le réglage en temps réel de leurs paramètres à partir d'une base de données préconstruite, nous avons utilisé les nouvelles générations apparues ces dernières années, citons par exemple les réseaux de neurones ou la logique floue pour améliorer leurs capacités et afin d'obtenir les paramètres optimaux du PSS à tout instant.



Pour cela notre mémoire propose une optimisation des paramètres du PSS en utilisant de l'intelligence artificielle. C'est dans cet objectif que s'articule notre travail qui sera structurée en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on expose le problème de stabilité des réseaux électriques, en livrant des définitions et produisant des explications des méthodes d'analyse utilisées pour l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques. Par contre, à propos des PSSs, en énoncé des définitions, le rôle et ses classifications.

D'autre part, le deuxième chapitre, couvre des définitions et explications sur les deux techniques de l'intelligentes artificielle, logique floue et réseau de neurones, en présentant leurs types ainsi que de leurs applications. Ce dernier permet de bénéficier des avantages des deux techniques, la logique floue par sa capacité de représenter un comportement d'un système complexe sans le recours à un modèle mathématique détaillée en se basant sur l'expertise et la compréhension du système, et les réseaux de neurones artificiels par leurs capacités de rapprocher les fonctionnalités des systèmes par apprentissage.

Dans le troisième chapitre de ce travail, l'optimisation par les réseaux de neurones est appliquée pour déterminer les paramètres optimaux du contrôleur PSS qui sont destinés pour améliorer la stabilité des réseaux électriques. Le modèle d'étude est un système 9 nœuds et 3 générateurs. La simulation des modèles étudiés est faite sur le logiciel MATLAB/SIMULINK. Une discussion des résultats obtenus est faite.

Enfin, une dernière partie présente une conclusion générale de ce mémoire. Il discute la validité et la fiabilité d'une telle étude, montre ses contributions et limites et propose quelques perspectives sur le sujet d'avenir.

I. CHAPITRE1 : STABILITE DES RESEAUX ELECTRIQUES

III.2 1 Introduction

La stabilité est un problème déterminant dans les réseaux électriques depuis les années 1920, beaucoup de blackouts de grandes ampleurs provoqués par l'instabilité ont illustrés l'importance de ce problème. L'étude de la stabilité des réseaux électriques est définie comme étant la capacité d'un système, pour une condition initiale de fonctionnement, de rester dans un état d'équilibre après l'apparition d'une perturbation tout en gardant ses variables d'état dans les limites admissibles de sorte que son intégrité soit conservée [1].

Parmi les moyens qui aident à améliorer la stabilité du réseau, c'est l'utilisation des dispositifs appelés les PSSs qui sont l'organe de commande mis dans une boucle de régulation entre l'AVR et le générateur (système d'excitation) pour mettre à revenir le système à la stabilité « régime permanent ». Le problème d'oscillations électromécaniques est résolu en ajoutant au générateur un contrôleur spécifique PSS.

Dans ce chapitre, nous allons donner quelques définitions concernant la stabilité, et plus précisément la stabilité dynamique et montrerons trois types de stabilité du réseau électrique, puis nous montrerons les différentes manières qui permettent d'améliorer la stabilité du réseau (amélioration de la stabilité par PSS).

III.2 2 Stabilité électrique

1.2. 1 DEFINITION

D'une manière générale, la stabilité des réseaux est définie par leur capacité à rester à un point de fonctionnement stable après de petites [2]. Un système est stable s'il tend à continuer à fonctionner en régime normal (celui pour lequel il a été conçu) en régime établi, et s'il tend à revenir à son mode de fonctionnement après avoir été perturbé.

1.2. 2 PROBLEMES DE LA STABILITE DES RESEAUX ELECTRIQUES

La classification de la stabilité d'un réseau électrique est essentielle pour une analyse pratique significative et la résolution des problèmes de stabilité du système d'alimentation. Elle peut être classifiée selon [3]:

I.2.2.1 Stabilité de tension

La stabilité de la tension est la capacité d'un système électrique à maintenir une tension constante sur tous les bus du système après des perturbations dues à des conditions de fonctionnement initiales données. Cela dépend de la capacité à maintenir/rétablir l'équilibre entre la demande de charge et l'alimentation de la charge du système électrique [4].

I.2.2.2 Stabilité de fréquence

La stabilité de fréquence est la capacité d'un système électrique à maintenir une fréquence stable après des perturbations importantes du système, entraînant un déséquilibre important entre la production et la charge [4].

I.2.2.3 Stabilité angulaire aux petites perturbations

La stabilité angulaire (ou stabilité angulaire du rotor) implique la capacité d'un groupe de machines synchrones interconnectées à rester synchronisées dans des conditions normales de fonctionnement ou après des perturbations. En fonction de l'ampleur de la perturbation, nous nous référons à la stabilité angulaire en tant que petite perturbation ou stabilité transitoire. La stabilité transitoire angulaire implique la capacité à maintenir la synchronisation après des perturbations sévères. La réponse du système comprend de grands changements dans l'angle du rotor et est affectée par la relation non linéaire entre le couple et l'angle [5].

La figure I.1 expose les différents types de la stabilité dans les réseaux électriques en tenant compte de tous ces paramètres.

I.2.3 TYPES DE STABILITE

On définit trois types de stabilité

1. la limite de stabilité en régime permanent (statique).
2. la stabilité dynamique.
3. la stabilité transitoire.

I.2.3.1 Stabilité statique

Un réseau électrique est dit stable en mode statique si, après toute perturbation infiniment petite, le réseau électrique retrouve un état de fonctionnement synchrone identique ou infiniment proche du mode initial [20]. Dans ce cas, pour étudier le système, il est nécessaire d'évaluer la stabilité statique du réseau. Le système est instable si les contraintes

de fonctionnement ne sont pas respectées [6]. Cet état est appelé : l'état instable ou l'état d'urgence. Dans cette situation, on peut ramener tout le réseau à l'état normal grâce à des opérations de restauration [6].

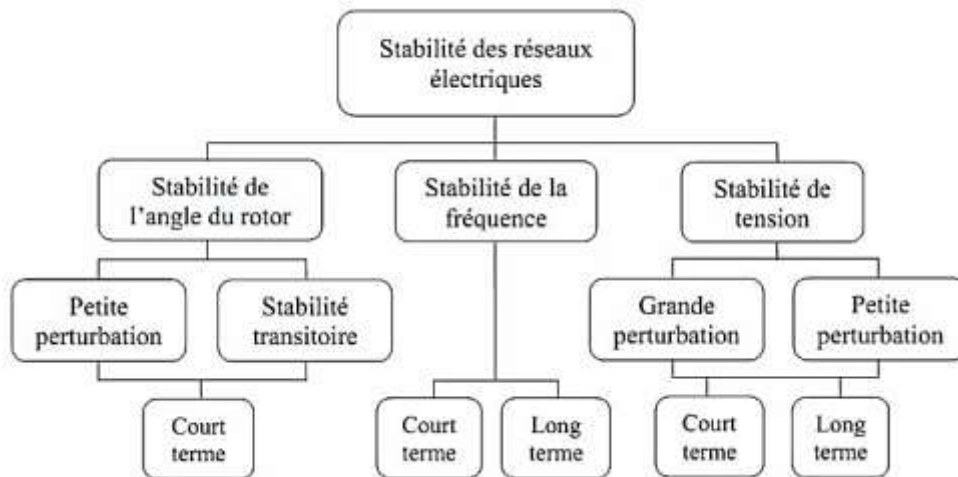


Figure I-1 : Classification des différents types de PSS.

I.2.3. 2 Stabilité transitoire

Lorsqu'il y a une perturbation majeure sur le réseau et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal après la perturbation, alors le réseau est dit transitoirement stable. Les perturbations majeures sont les courts-circuits. L'instabilité se présente généralement sous la forme d'une séparation angulaire périodique due à un couple de synchronisation insuffisant, qui apparaît comme une instabilité. Cependant, dans les grands systèmes de puissance, l'instabilité transitoire ne se produit pas toujours comme une instabilité dans la première oscillation qui peut être liée à un seul mode. Le mode d'oscillation lente et le modèle d'oscillation locale de la centrale conduisent à une grande déviation de l'angle du rotor avec dépassement de la limite de stabilité à la première oscillation [7].

I.2.3. 3 Stabilité dynamique

Il arrive que de petites oscillations apparaissent sur les signaux, à cause d'un changement dans la structure du réseau, dans les conditions d'exploitation, dans les systèmes d'excitation ou au niveau des charges. Ces oscillations peuvent aboutir à déstabiliser un alternateur, une partie ou tout le réseau. [8]. Si une perturbation mineure est effectuée sur le réseau, à partir d'un régime permanent stable, et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal en régime permanent, le réseau est dit dynamiquement stable. Pour

un réseau d'énergie électrique, on entend par perturbation mineure des manœuvres ou des opérations normales sur le réseau, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou des variations mineures de la charge [8].

I. 3 Causes d'instabilité

Les causes suivantes peuvent aggraver la situation du système qui pourra mener directement ou indirectement à un blackout :

Le court-circuit : un court-circuit provoque un déséquilibre important entre le couple moteur et le couple résistant.

La surcharge, la défaillance d'une protection.

Branchement d'une charge importante.

Génératrice de puissance importante mise hors service.

Variations momentanées de la charge.

I. 4 Différents méthodes d'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique

Les moyens cités ci-dessus sont certes efficaces mais présentent tout de même certains limitations telles que :

Temps de réaction élevé, et la génération d'harmoniques.

La stabilité d'un réseau électrique

Les dispositifs FACTS, compensation traditionnelles

Batteries de condensateurs et les inductances.

Les PSSs (stabilisateur de système d'alimentations).

I. 5 Stabilisateur de puissance PSSs (stabilisateur de système de puissance)

Le PSS est un régulateur d'excitation supplémentaire utilisé pour amortir les oscillations électromécaniques du générateur afin de protéger la ligne d'arbre et de stabiliser la grille. Il amortit également les oscillations d'angle de rotor de générateur, qui sont de plus grande gamme de fréquences dans le système de puissance.

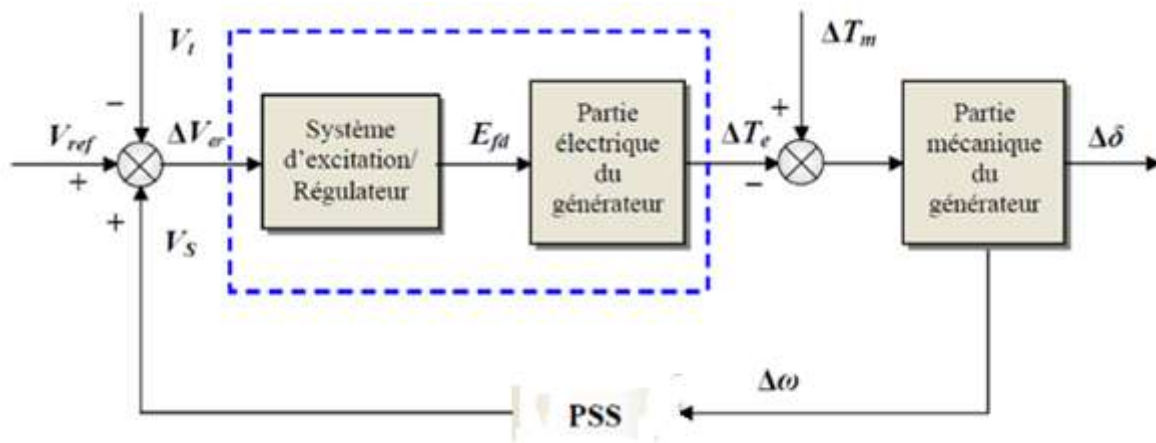


Figure I-2 : Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système d'excitation [9]

I.5.1 ROLE D'UN PSS

Le stabilisateur de système d'alimentation (PSS) désigne un système de contrôle électronique appliqué sur une unité de production qui aide à amortir les oscillations dynamiques sur un système d'alimentation. Le PSS détecte les variables du générateur, telles que la tension, le courant et la vitesse de l'arbre, traite ces informations et envoie des signaux de commande au régulateur de tension du générateur. La fonction du stabilisateur PSS est d'amortir les oscillations du rotor. Ces stabilisateurs de puissance sont un moyen efficace et économique d'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique. 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.

I.5.2 CLASSIFICATIONS DES PSSs

Plusieurs modèles de PSS ont été proposés avec différentes fonctions de transfert, voici une classification de ces dispositifs suivant leur conception technologique :

I.5.2.1 PSSs analogiques

On les appelle aussi les PSSs conventionnels (CPSS). Ce type de PSS est caractérisé par des paramètres fixes, son inconvénient c'est la dégradation de ces performances avec le changement du point de fonctionnement, car il ne peut pas s'adapter à toutes les situations [10].

I.5.2. 2 PSSs numériques

Les fonctions de transfert de base sont les mêmes que celle des PSSs de type analogique. La différence réside dans le fait que les paramètres de la fonction de transfert et/ou la sortie se calculent par des calculateurs. Beaucoup de méthodes numériques sont utilisées dans le but de concevoir un PSS numérique le plus performant possible. Le meilleur PSS est celui qui procure le meilleur degré de stabilité au système de puissance, et la meilleure atténuation des oscillations rotoriques lorsque les conditions de fonctionnement changent [10].

I.5. 3 CLASSIFICATION DES PSSS SUIVANT LEUR STRUCTURE INTERNE

I.5.3. 1 Différents Types de PSS

Parmi les structures classiques les plus utilisées, nous distinguons trois catégories de PSS :

- Avance retard de phase.
- Multi bande.
- Action PID (proportionnelle, intégratrice, dérivative)

Les plus utilisées sont :

- **PSS PID** (Proportionnel Intégral Dérivateur) qui a prouvé ses performances, vu sa simplicité et sa facilité de réalisation.
- **PSS à avance retard de phase** (Lead-Lag PSS) dont l'entrée est la variation de vitesse $\Delta\omega$ en général.

a) PSS PID

Un système asservi doit être suffisamment robuste pour garantir trois niveaux de performance :

- Stabilité
- Précision statique.
- Rapidité suffisante.

En général, la précision et la rapidité sont liées au gain proportionnel, mais trop de gain peut avoir un effet déstabilisant. D'autre part, une action intégrale assurera une bonne précision statique et une action dérivée peut garantir un temps de réponse correct. Ainsi, les contrôleurs PID peuvent être utilisés pour la stabilisation des systèmes de puissance. Ces contrôleurs à contre réaction dont la sortie est généralement basée sur l'erreur entre la

consigne définie par l'utilisateur et la variable mesurée, nécessite l'ajustement de leurs gains K_p , K_d et K_i pour satisfaire un certain critère optimal de la réponse du système [11].

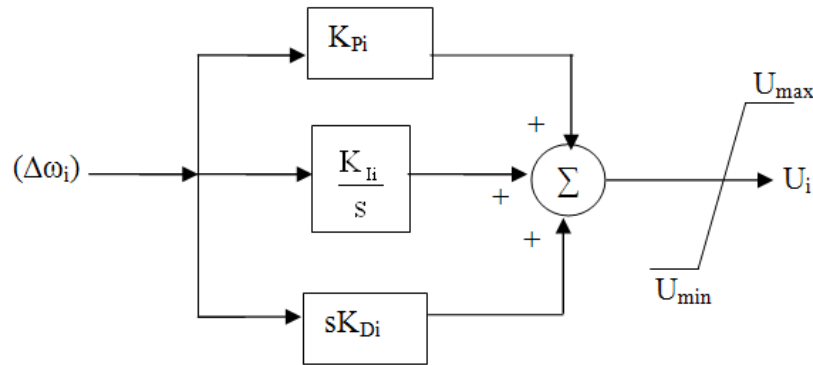


Figure I-3: Structure d'un Stabilisateur de Puissance PID

La structure d'un PSS PID peut être mise en équation comme suit :

$$\Delta U(t) = k_p \Delta \omega(t) + K_d \frac{d}{dt} \Delta \omega(t) \int \Delta \omega(t) dt \quad (1.1)$$

Maintenant en appliquant la transformation de Laplace on obtient :

$$\Delta U(s) = \left(K_p + K_{ds} + K_i \frac{1}{s} \right) \Delta \omega(s) \quad (1.2)$$

Avec :

K_P : gain du PSS

K_d : gain de PID

b) PSS à avance retard

Structure du C_{PSS} , où la vitesse du générateur est généralement utilisée comme signal d'entrée [21]. Le CPSS est mathématiquement formulé comme suit :

$$\Delta U_{pss}(s) = k_{PSS} \times \frac{ST\omega}{ST\omega+1} \left(\frac{1+ST1}{1+ST2} \right) \times \left(\frac{1+ST3}{1+ST4} \right) \Delta \omega \quad (1.3)$$

Où :

$\Delta \omega$ est l'écart de vitesse en (pu).

T_1, T_2, T_3, T_4 : Constantes de temps (s).

$T\omega$ Constante de temps du générateur (s).

Le PSS conventionnel est composé d'un filtre passe-haut et d'un compensateur dynamique et un gain [12]. Le signal de sortie U_{pss} est appliqué au système d'excitation en tant que signal d'entrée supplémentaire.

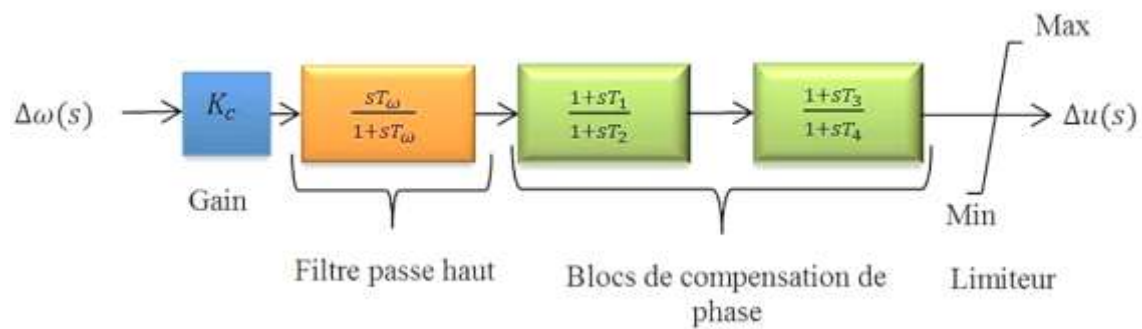


Figure I-4: Modèle d'un PSS avance-retard [10]

DIFFERENTS BLOCS DE PSS

- Filtre passe-haut "filtre washout"

Il élimine les oscillations à très basse fréquence (inférieure à 0.2 Hz) présentées dans le signal d'entrée. Il supprime également la composante continue de la vitesse (la composante DC correspondant au régime statique). Le PSS ne réagit donc que lorsqu'il y a des variations de vitesse. La constante de temps de ce filtre (T_ω doit être suffisamment grand pour permettre aux signaux, dont la fréquence est située dans la bande utile, d'être transmis sans atténuation. Mais, elle ne doit pas être trop grande pour éviter de mener à des variations indésirables de tension de générateur pendant les conditions d'ilotage. Généralement, T_ω varie de 1 à 20 secondes.

Une amélioration remarquable sur la stabilité de la première oscillation est obtenue avec une valeur T_ω fixée à 10 secondes [13]. Sa fonction de transfert est donnée par l'équation :

$$G_{\text{filtre}} = \frac{sT_\omega}{1+sT_\omega} \quad (1.4)$$

- Limiteur de PSS

Le PSS est conçu pour améliorer l'amortissement du système en cas de petites variations autour d'un point d'équilibre. Son objectif n'est pas de restaurer la stabilité du système aux perturbations sévères (la stabilité transitoire). Le PSS a parfois tendance à perturber le bon fonctionnement du régulateur de tension en le saturant lorsque ce dernier essaye de maintenir la tension lors des conditions transitoires. Ainsi, le PSS doit être équipé d'un limiteur afin de réduire son influence indésirable durant les phases transitoires [5]. Les valeurs minimales et maximales du limiteur s'étendent de ± 0.02 à 0.1 per-unit [14].

- Gain de PSS

Détermine la valeur de l'amortissement introduit par le PSS. Théoriquement, sa valeur (KPSS) doit correspondre à l'amortissement maximal. Généralement, KPSS varie généralement de 0.01 à 50 ou jusqu'au 100 [13].

- Bloc Avance-Retard de phase :

L'origine de l'amortissement négatif est associée au retard de phase introduit entre le couple électrique du générateur (ΔT_e) et l'entrée du système d'excitation (ΔU). Par conséquent, le rôle de ce bloc est de fournir l'avance de phase nécessaire pour compenser le retard de phase entre l'entrée de l'excitateur et le couple électrique. Pratiquement, un seul bloc de compensation est insuffisant pour garantir la stabilité du système [13]. Pour mieux garantir cette dernière, deux étages (au moins) de compensations de phase sont nécessaires [13]. La fonction de transfert de chaque étage est une simple combinaison de pole-zéro, les constantes de temps d'avance sont ($T1, T3$) et de retard sont ($T2, T4$). La gamme de chaque constante de temps s'étend généralement de 0.01 à 2 secondes. Mais pour des considérations de réalisation physique, les constantes de temps de retard ($T2, T4$) sont considérées fixes et généralement autour de la valeur de 0.05 secondes [13].

Sa fonction de transfert est donnée par l'équation :

$$G_S = \left(\frac{1+ST1}{1+ST2} \right) \times \left(\frac{1+ST3}{1+ST4} \right) \quad (1.5)$$

Avec $T1 > T2$

I. 6 Amélioration de la stabilité par les PSS

Les PSS sont des contrôleurs ajoutés à la boucle de régulation de l'excitation des alternateurs. Ils détectent toute variation dans la vitesse pour générer un signal amortisseur qui se traduit par un couple d'amortissement sur l'arbre du générateur [15]. Ces Stabilisateurs de puissance sont un moyen efficace et économique d'amélioration de la stabilité dynamique d'un système électrique. Pour atteindre son objectif le stabilisateur doit produire une composante du couple électrique en phase avec l'erreur de vitesse. Il est constitué d'un gain, d'un filtre passe-haut et d'un compensateur de phase. Le gain détermine le niveau d'amortissement du PSS. Le filtre passe-haut annule l'action de ce dernier à la vitesse nominale et permet ainsi au PSS de ne réagir qu'aux variations de vitesse. Le compensateur de phase fournit une avance de phase qui compense le retard de phase entre l'entrée de l'excitatrice et le couple électrique.

I. 7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur la stabilité du système électrique, ainsi que des différents phénomènes perturbateurs qui affectent sa stabilité. On outre, nous avons présenté les méthodes d'analyse et d'amélioration de cette stabilité. La deuxième partie, présente l'un des dispositifs clés utilisés pour remédier au problème d'instabilité qui est le stabilisateur de puissance (PSS). D'autre part, nous avons exposé les types de ces PSSs de point de vue structure.

Les PSSs conventionnels sont opérants pour améliorer la stabilité mais, pas très performants et non optimaux pour toutes les conditions de fonctionnement. Aujourd'hui, et afin d'obtenir les paramètres optimaux de ces PSSs on utilise les nouvelles générations apparues ces dernières années dites PSS intelligents, utilisant les réseaux de neurones et / ou la logique floue. Ces PSSs caractérisés par leurs rapidités et adaptabilités au point de fonctionnement ou en cas de perturbation.

II. CHAPITRE 2 : CONCEPTION DES PSSS PAR LES RESEAUX DE NEURONES

II. 1 Introduction

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des systèmes parallèles et distribués de traitement de l'information inspirés du fonctionnement du cerveau humain [6].

Nous avons constaté le PSS et son efficacité pour l'amélioration de la stabilité du réseau, mais cette performance est limitée par le non adaptatif à d'autres points de d'équilibres. Alors pour la conception d'un PSS adaptative, nous pouvons utiliser les réseaux de neurones et l'intelligence artificielle pour concevoir et créer une base de données de paramètres PSS optimisés, c'est-à-dire en d'autres termes de générer des paramètres optimisés des PSSs pour tout point de fonctionnement donné.

Dans ce présent chapitre, nous allons d'abord, donner un aperçu sur les réseaux de neurones, puis nous montrerons comment nous les utilisons pour optimiser les données des PSS pour construire un système de modification qui permet de générer des paramètres PSS. Pour un PSS adaptative optimisés pour tout point de fonctionnement donné nous combinerons deux techniques (réseaux de neurones et logique floue), nous verrons comment les RNA sont appliqués pour concevoir un PSS neuro-flou adaptatif ?

II. 2 Réseaux de neurones artificiels

II.2 1 Définition

Les RNA (**R**éseaux de **N**eurones **A**daptatifs) sont des réseaux massivement connectés en parallèle d'éléments simples (habituellement adaptatifs) et leur organisation hiérarchique. Ils sont sensés interagir avec les objets du monde réel de la même manière que les systèmes nerveux biologiques.

D'après cette définition, on peut dire qu'un RNA réalise une ou plusieurs fonctions algébriques de ses entrées. Par la composition des fonctions réalisées par chacune des neurones, on peut modéliser un RNA à l'aide d'un graphe orienté par l'interconnexion d'éléments simples (les neurones) et l'échange d'information via les connexions, tel que le calcul sera fait d'une manière distribué, parallèle et coopératif [1].

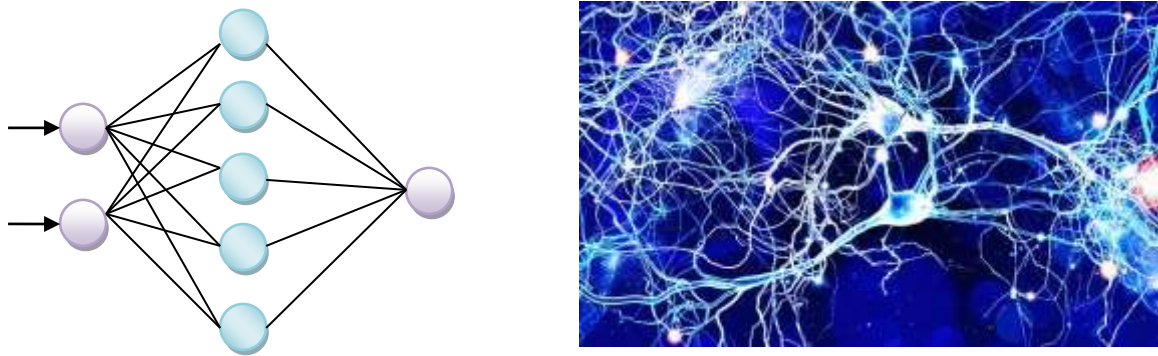


Figure II-1 : Réseau de neurones artificiel [16]

La figure II.1, illustre un RNA avec deux entrées et une sortie, les caractéristiques essentielles d'un réseau de neurones sont : son architecture (topologie), type d'interconnexion, choix de fonction de transfert et son mode d'apprentissage, cette topologie fait apparaître une certaine régularité de l'arrangement des neurones, cependant celui-ci peut être quelconque.

II.2.2 Fondement Biologique

Un neurone biologique est une cellule nerveuse capable de transmettre des informations à d'autres neurones au travers de ses différentes connexions (synapses). Il comprend à sa base une structure formée de ramifications, les dendrites, qui reçoivent des signaux électriques en provenance d'autres neurones.

Les neurones biologiques sont des cellules vivantes spécialisées dans le traitement des signaux. Ils sont reliés entre eux par des liaisons appelées axones jouant un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble. Ils conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée d'un autre neurone [17,18].

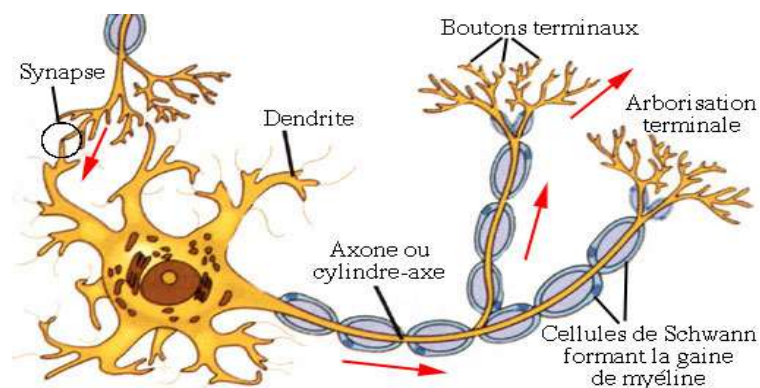


Figure II-2 : Neurone biologique [16]

La structure d'un neurone biologique, comme montré dans la Figure II.2., se compose de trois parties :

- **Somma** : ou cellule d'activité nerveuse, au centre du neurone.
- **Axone** : attaché au somma qui est électriquement actif, ce dernier conduit l'impulsion conduite par le neurone.
- **Dendrites** : électriquement passives, elles reçoivent les impulsions d'autres neurones.

II.2 3 Neurone Formel (Artificiel)

Le neurone formel représente la brique de base des RNA, c'est un automate dont le modèle s'inspire de celui d'un neurone biologique. Les premiers travaux datent de 1943 par MM. Mac Culloch et Pitts. Ils présentent un modèle assez simple pour le neurone et explorent les possibilités de ce modèle pour concevoir tous les réseaux de neurones [17].

Cette modélisation consiste à mettre en œuvre le système sous un aspect non pas biologique mais artificiel, cela suppose que d'après le principe biologique qu'on aura une correspondance pour chaque élément composant le neurone biologique, donc une modélisation pour chacun d'entre eux [17, 18, 19].

On pourra résumer cette modélisation par le tableau ci-dessous (tableau II.1), qui nous permettra de voir clairement la transition entre le neurone biologique et le neurone formel.

Tableau II-1 ; Transition entre le neurone biologique et le neurone formel

Neurone biologique	Neurone artificiel
Synapse	Poids de connexion
Axone	Signal d'entrée
Dendrite	Signal de sortie
Somma	Fonction d'activation

Le neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont. A chacune de ses entrées est associé un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones appartenant à un niveau situé en aval. Chaque connexion est associée par un poids.

II.2 4 Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est vraisemblablement la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux. Elle ne concerne cependant pas tous les modèles, mais les plus utilisés. L'apprentissage est une phase du développement du réseau de neurones durant laquelle on calcule les poids des neurones de telle manière que les sorties du réseau soient aussi proche que possible des sorties désirées [20,21].

II.2 5 But d'apprentissage

L'apprentissage RNA est une phase qui permet de déterminer ou de modifier les paramètres du réseau, afin d'adopter un comportement désiré, l'apprentissage a pour objectif l'amélioration des performances futures du réseau, sur la base d'une connaissance acquise au fur et à mesure des expériences passées [20].

On distingue trois familles d'apprentissage différentes en fonction de la nature des informations disponibles et du but recherché :

- Apprentissage supervisé pour lequel il est nécessaire de disposer d'un ensemble de couples de données (entrées du réseau ; sorties désirées correspondantes).
- Apprentissage semi-supervisé ou par renforcement pour lequel seule une mesure d'erreur qualitative est disponible.
- Apprentissage non supervisé pour lequel il n'y a pas de réponse désirée.

II.2 6 Algorithme d'apprentissage

L'apprentissage se traduit, dans la plupart des architectures, par une modification de l'efficacité synaptique qui s'effectue en changeant les valeurs des poids qui relient les neurones d'une couche à l'autre

Maintenant il existe plusieurs algorithmes, les plus efficaces et les plus utilisés sont ceux [20]:

- ✓ Quasi-newton.
- ✓ Levenberg-Marquardt.

II. 3 Theorie De La Logique Floue

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par ZADEH [20]. A côté d'un formalisme mathématique fort développé, nous préférons aborder la présentation de manière intuitive.

Concernant principalement les problèmes où les données ne peuvent être formulées de manière explicite, ainsi que des techniques de contrôle et de réglages, lorsque les moyens classiques atteignent leurs limites (exemples caméra, systèmes non linéaires, etc.).Et aussi pour les systèmes contrôlés par des experts humains.

- Diagnostic industriel.
- Commande floue.

II.3 1 Système d'inférence floue

La notion de règle floue permet de définir un système expert flou comme une extension d'un système expert classique, manipulant la proposition floue. [6] .Donc un système d'inférence floue (SIF) est formé de trois blocs comme l'indique la figure II.3. Le premier, bloc de fuzification transforme les valeurs numériques en degrés d'appartenance aux différents ensembles flous de la partition. Le second bloc est le moteur d'inférence, constitué de l'ensemble de règles. Enfin, le bloc de defuzzification permet, s'il nécessaire, d'inférer une valeur nette, à partir du résultat de l'agrégation des règles.

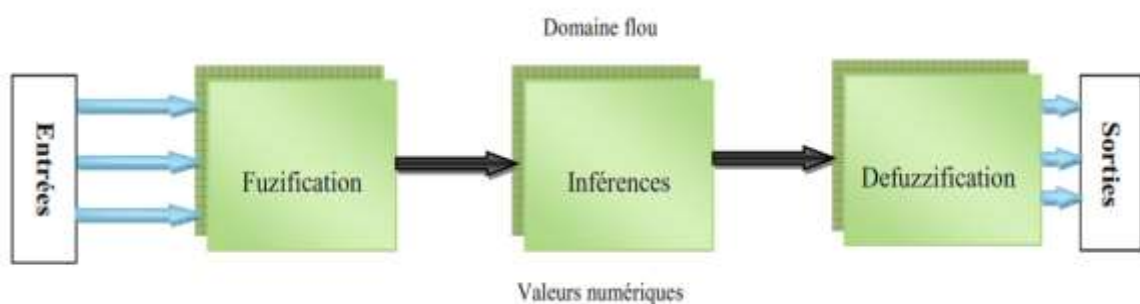


Figure II-3: Système d'inférence floue [6]

II.3 2 Avantages et inconvénients des réseaux de neurones et de la logique floue

Le tableau suivant regroupe les avantages et les inconvénients des réseaux de neurones et de la logique floue.

Tableau II-2 : Comparaison entre la logique floue et les réseaux de neurone [28].

Réseaux de neurone	Logique floue
Avantages	
<ul style="list-style-type: none"> • Le modèle mathématique non requis • Aucune connaissance basée sur les règles • Plusieurs algorithmes d'apprentissage sont disponibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Le modèle mathématique non requis • La connaissance antérieure sur les règles peut être utilisée • Une interprétation et implémentation simple
Inconvénients	
<ul style="list-style-type: none"> • Boite noire (manque de traçabilité) • L'adaptation aux environnements différents est difficile et le réapprentissage est souvent obligatoire (sauf pour RBF) • La connaissance antérieure ne peut pas être employée (apprentissage à partir de zéro) • Aucune garantie sur la convergence de l'apprentissage 	<ul style="list-style-type: none"> • Règles doivent être disponibles • Ne peut pas apprendre Adaptation difficile au changement de l'environnement • Aucune méthode formelle pour l'ajustement

II. 4 Optimisation De Pss Par Les Reseaux De Neurones Et Neuro-Floue

II.4 1 Définition de l'optimisation

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation où les variables définissant la fonction à optimiser sont introduites dans des contraintes, dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes [23].

II.4 2 Algorithmes d'optimisation

Les méthodes métaheuristiques sont dédiées à la recherche des solutions optimales à divers problèmes complexes parmi ces méthodes :

- Algorithmes génétiques.
- Méthode des essaims de particules.
- Algorithme PSO.
- Méthode du recuit simulé.
- Méthode de recherche taboue.

II.4 3 Optimisation des PSSs

Basé sur des études antérieures de [22], il a été constaté que l'utilisation d'un algorithme génétique est une solution possible pour optimisation des paramètres PSS pour un point de fonctionnement spécifique. Mais l'inconvénient de cette méthode est le temps de

calcul qui élimine toute possibilité de paramétrage en temps réel (on ligne). Ainsi, à partir de ce moment, nous nous sommes appuyés sur l'amélioration de ces résultats, mais de manière artificielle. Obtenir une conception PSS adaptative permettant de générer ses paramètres optimisation afin d'amortir correctement les oscillations électromécaniques des deux systèmes d'alimentation machine unique et multi a été étudiée, c'est-à-dire pour tout point de fonctionnement.

Dans le processus d'apprentissage à partir des PSSs, nous utilisons une base de données construites à l'aide d'un algorithme génétique. Les propriétés d'interpolation des réseaux de neurones peuvent ainsi être mises à profit, que les paramètres des PSS peuvent être adaptés à tout point de fonctionnement appartenant à l'espace d'apprentissage. De plus, le temps de calcul réduit offre la possibilité d'exécution en temps réel.

II.4 4 PSSs basés sur la logique floue

Le stabilisateur de système de puissance est utilisé pour améliorer le rendement du générateur synchrone. Cependant, il en résulte dans la mauvaise performance dans diverses conditions de chargement qui a mis en œuvre avec PSSs classiques. A cet effet, le besoin de logique floue PSS se pose. Le contrôleur flou utilisé dans stabilisateur système électro-énergétique est normalement deux entrées et une composante de sortie unique. Les deux entrées sont changement la vitesse angulaire et le taux de variation de la vitesse angulaire tandis que la sortie du contrôleur logique floue est un signal de tension. Les signaux de stabilisation sont calculés en utilisant les fonctions d'appartenance floue standard en fonction de ces variables [14].

II.4 5 PSSs auto-ajustés à base de réseaux de neurones

Nous utiliserons les capacités des réseaux de neurones de conservation et d'adaptabilité pour construire un PSS à réglage automatique en utilisant une base de données représentative des paramètres PSS optimisés générés dans l'espace d'optimisation du système.

Cette procédure permet la contrainte en temps réel ainsi que le réglage en ligne des paramètres PSS en fonction des conditions de fonctionnement du système. Ceci afin d'avoir une conception PSS adaptative où ses paramètres sont adaptés en fonction du point de fonctionnement du système [10].

II. 5 Méthode du gradient pour l'adaptation des paramètres des PSS en temps réelle

Diverses stratégies de contrôle et techniques d'optimisation ont été utilisées pour concevoir des PSS performants et robustes et ont trouvé leurs applications dans ce domaine. En effet, plusieurs approches ont été appliquées et de nombreux résultats utiles ont été publiés [10]. Même si les PSSs optimisées sont beaucoup plus robustes et performants qu'un PSS conventionnel (CPSSs), mais ils n'ont pas été aisés à mettre en œuvre.

Pour obtenir des bonnes performances, on utilise une procédure d'auto-ajustement proposée qui applique une adaptation en ligne des paramètres du (CPSSs).

L'ajustement en ligne des paramètres du PSS à chaque période d'échantillonnage est basé sur le gradient de vitesse pour le bon amortissement des oscillations rotoriques du générateur de puissance du mécanisme d'adaptation proposée est illustrée par la figure et décrites par l'ensemble d'équations [10].

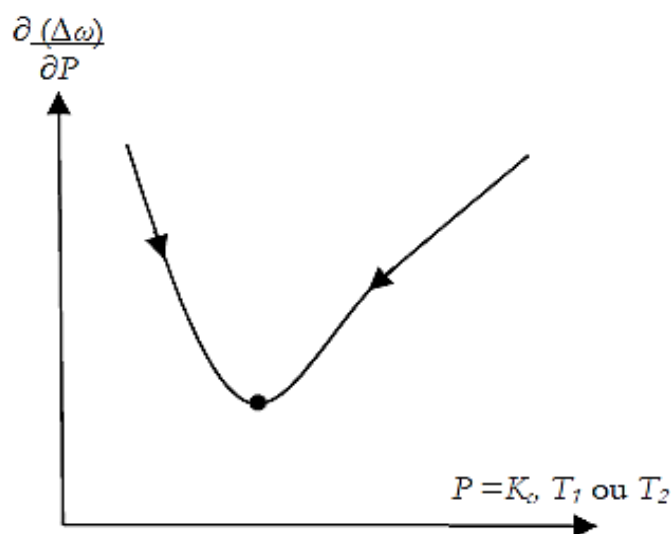


Figure II-4: Principe de l'auto-ajustement des paramètres du PSS [10]

À partir des paramètres d'un PSS initialement et globalement optimisé par une technique métaheuristique, la procédure proposée met à jour et en ligne les paramètres comme suit : [10]

$$\begin{cases} K_c(k+1) = K_c(k) - \alpha \frac{\partial(\Delta\omega)}{\partial K_c} \\ T_1(k+1) = T_1(k) - \beta \frac{\partial(\Delta\omega)}{\partial T_1} \\ T_2(k+1) = T_2(k) - \gamma \frac{\partial(\Delta\omega)}{\partial T_2} \end{cases} \quad 2: 1$$

II.5.1 ANALYSE DE SENSIBILITE

L'adéquation de la variation d'un paramètre donné du PSS en termes d'amortissement des oscillations rotorique est testée par l'analyse de sensibilité. Cette analyse est effectuée sur le système de puissance en boucle fermée pour voir le degré d'influence de chaque paramètre du PSS sur la sensibilité du système. [10]

I.5.1.1 L'indice de performance

Le degré de performance est choisi comme étant l'intégrale de l'erreur quadratique de vitesse. L'intégrale du carré de l'erreur(ICE) en anglais (ISE: Integral of Square Error):[10]

$$ISE = \int_{t=0}^{tf} \Delta\omega^2 dt \quad 2: 2$$

Avec :

tf : Le temps de simulation.

II. 6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une généralité sur les réseaux de neurones, et quelques méthodes d'optimisation des paramètres de PSS.

Nous allons dans le chapitre suivant présenter l'optimisation d'un PSS adaptatif pour plusieurs points de fonctionnement, pour le cas par de défaut ou pour toutes les variations journalières de charge.

III. CHAPITRE3 : CONCEPTION, RESULTAT ET INTERPRETATION

III. 1 Introduction

L'utilisation d'un algorithme génétique est une solution réalisable pour optimiser les paramètres PSS pour un point de fonctionnement donné. Cependant, nous avons noté que les résultats d'études antérieures ont fait sentir que cette méthode a un inconvénient, qui est le temps de calcul, ce qui écarte toute éventualité d'implantation en temps réel.

Dans ce chapitre, nous allons utiliser une autre méthode pour optimiser les paramètres du PSS pour tous les points de fonctionnement et donc pour des PSSs adaptatifs, performants robustes et fiables et aussi peuvent être utilisés en temps réel.

III. 2 Optimisation des PSSs d'un système multimachine

En premier lieu nous faisons usage de l'historique de la recherche nous avons utilisé la base de données du travail [10], qui détermine les paramètres optimaux des PSSs d'un système de puissance multimachine (9 nœuds et 3 générateurs), (voire l'annexe).

Pour le même système étudié, Il est trouvé qu'au point de vue économique, il suffit de placer des PSS au niveau des générateurs présentant des modes oscillatoires les plus défavorables (générateur 2 et 3). Ceci est déterminé par une analyse des facteurs de participation [10,3].

III.2 1 ETAPES DE CONCEPTION DU PSS

Pour la conception du PSS proposé nous avons suivi les étapes indiquées sur l'organigramme de la figure suivante.

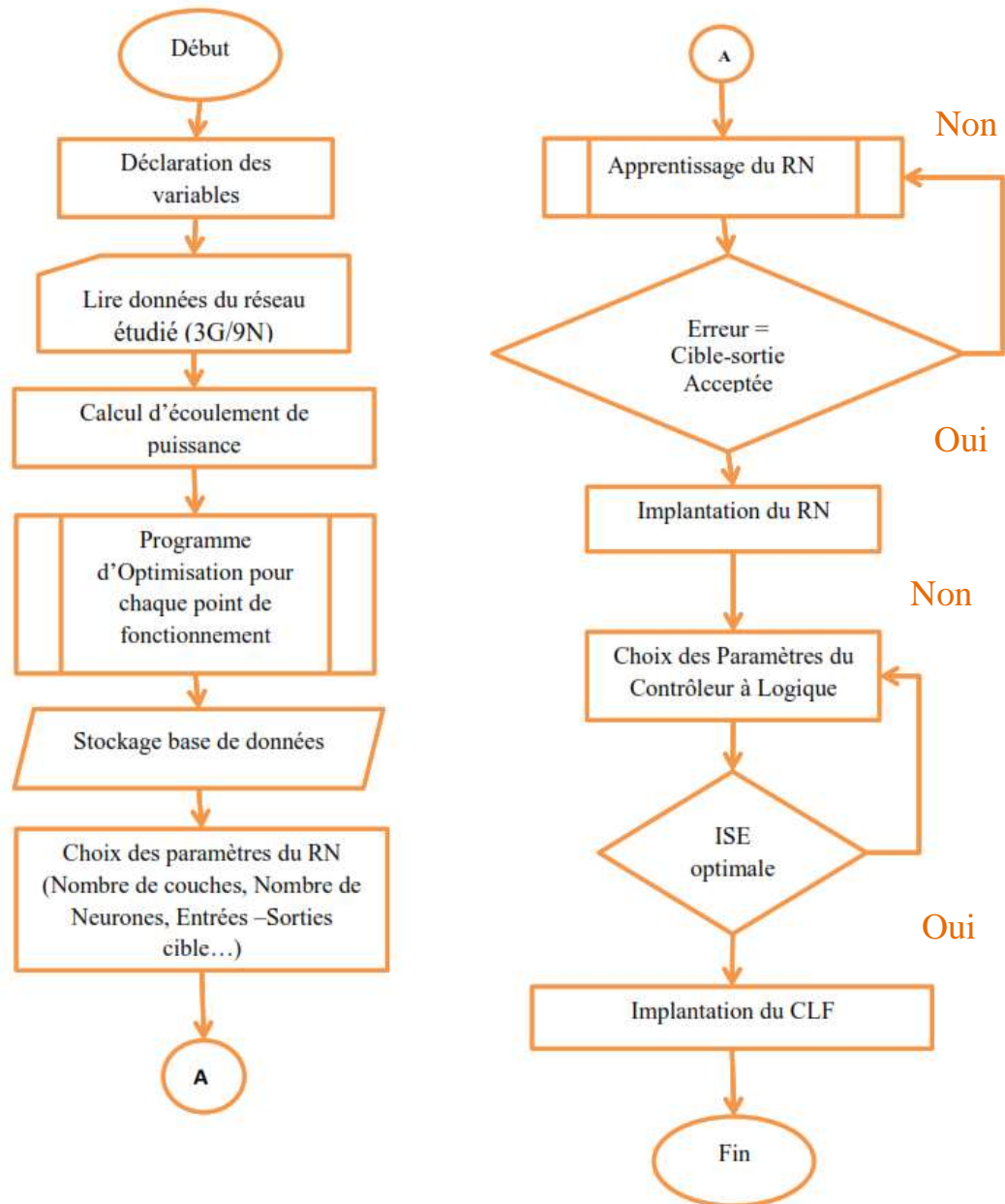


Figure III-1 Organigramme des étapes de conception du PSS adaptatif

III.2 2 FORMULATION DU PROBLEME

Pour arriver aux bons résultats des paramètres des PSSs optimisés il faut que les deux conditions suivantes soient réunies [24]

- Toutes les parties réelles des valeurs propres (de la matrice d'état du système) doivent être négatives.
- Le facteur d'amortissement doit être au maximum pour chaque point de fonctionnement.

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

Fonction objective :

$$\text{Maximiser } G(K_{Cp}, T_{1p}, T_{2p}) = \text{Min}(\text{Min}(\xi_k)) \text{ Pour tout } (k = 1, 2, \dots, n) \quad 3: 1$$

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

ξ_k : Vecteur des facteurs d'amortissement des points de fonctionnement.

p :index du PSS.

$$0.01 \leq K_{ci} \leq 50$$

$$0.01s \leq T_{1i} = T_2 \leq 2s$$

$$0.01s \leq T_{2i} = T_2 \leq 2s$$

$$K_{c1} = K_{c2} = K_{c3}; T_{11} = T_{12} = T_{13}; T_{21} = T_{22} = T_{23}$$

Les paramètres optimisés des PSSs dépendent du point de fonctionnement du système qui change avec la variation de la charge [10].

III.2 3 PARAMETRES PSSGA

L'ensemble des paramètres de PSSGA utilisé pour la recherche des Paramètres des deux PSSs à optimiser [10] :

Nombre de bits $nBits = 8$

Nombre d'individus $Nind = 32$

Probabilité de croisement $PCross = 0.9$

Nombre de points de croisement $Cross-points = 2$

Probabilité de mutation $PMut = 0.09$

Nombre d'itérations 294

Codage Binaire

La puissance active de la charge du nœud (5) $0.65 pu \leq PA \leq 2.4 pu$

La puissance active de la charge du nœud (6) $0.45 pu \leq PB \leq 2.4pu$ Avec un pas 0.3 pu

La puissance active de la charge du nœud (8) $0.5 pu \leq PC \leq 2.4 pu$

Les résultats obtenus de la base de générée par l'algorithme génétique sont présentées en annexe.

III.2 4 PARAMETRES DU RESEAU DE NEURONES

Le réseau de neurones adoptées doit générer les paramètres du PSS pour n'importe quel point avec une erreur acceptable, l'idéale la même valeur donné par l'AG (erreur=0). L'avantage du réseau de neurones, c'est qu'il génère ces paramètres en temps insignifiant simulant l'AG.

Les Paramètres du réseau de neurones sont :

Tableau III-1 ; Paramètres du réseau de neurones

Nombre de couches	2 couches
Nombre de neurone par couche	Couche 1 :135 neurones ; Couche 2 :1 neurone
Fonction d'apprentissage	Adaptwb (Adapt network with weight and bias learning rules)
Fonction de performance	MSE (mean squared error)
Entrée	P_A, P_B, P_C
Sortie	$K_{ci}, T_{1i}, T_{2i}, (i = 2,3)$

Remarque, pour arriver aux bons résultats, nous avons choisi un réseau pour chaque paramètre.

III. 3 PSSs auto-ajustés par un Contrôleur Floue

Un Contrôleur à Logique Floue (CLF) possède deux entrées (erreur de réglage e et sa variation Δe) et une sortie (signal de commande ΔP). Pour des raisons de commodité, les deux entrées et la sortie du CLF sont mises en échelle avec trois coefficients $K_e, K_{\Delta e}$ et $K_{\Delta P}$ nous allons utiliser le CLF de Mamdani schématisé par la figure III.2 en tant que mécanisme d'auto-ajustement des paramètres des PSSs(voir figure III.2) [10].

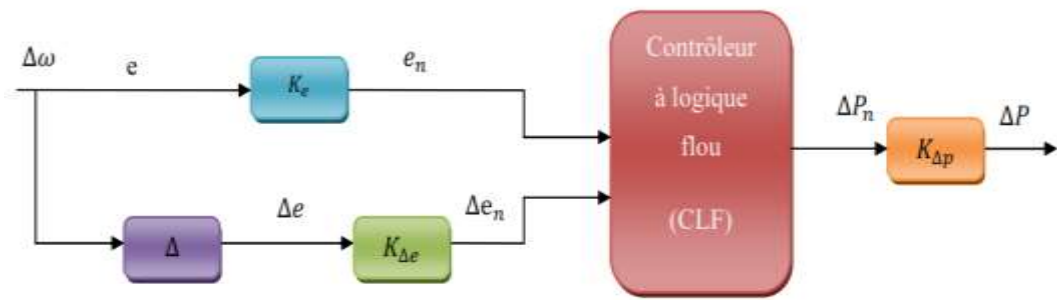
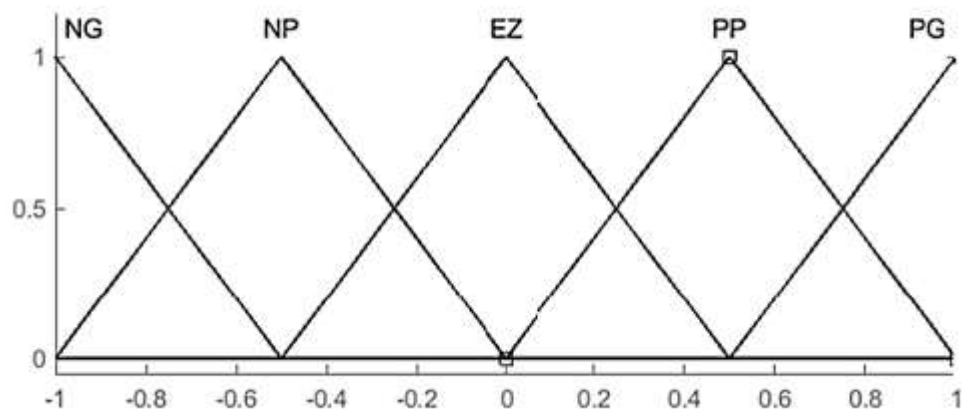


Figure III-2 : Structure d'un contrôleur à logique floue [10].

Les deux entrées de ce CLF (la déviation de la vitesse du générateur équipé d'un PSS et sa variation), et sa sortie (la variation du paramètre à auto-ajuster) sont fuzzifiées par cinq sous-ensembles flous de trois différentes fonctions (Triangulaire, Gaussienne, Bell) représenté dans les figure (III.3et III.4 et III.5)



s

Figure III-3 : Fuzzification des variables linguistiques du mécanisme d'auto-ajustement flou triangulaire.

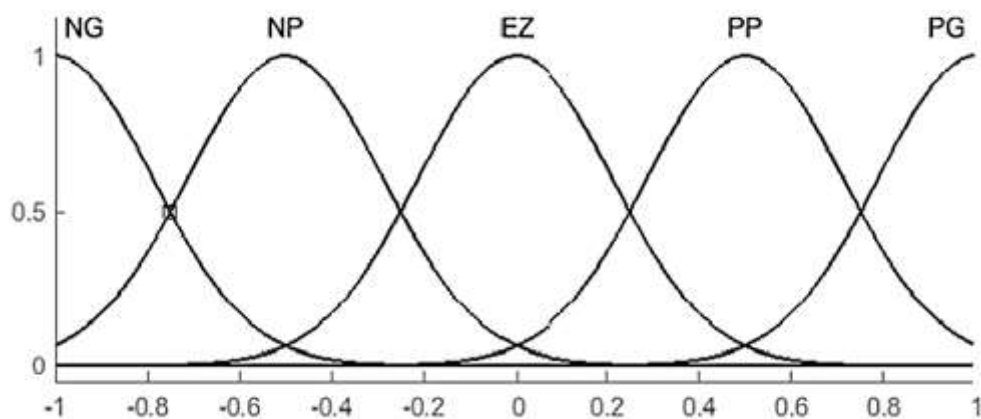


Figure III-4: Fuzzification des variables linguistiques du mécanisme d'auto-ajustement flou Gaussienne

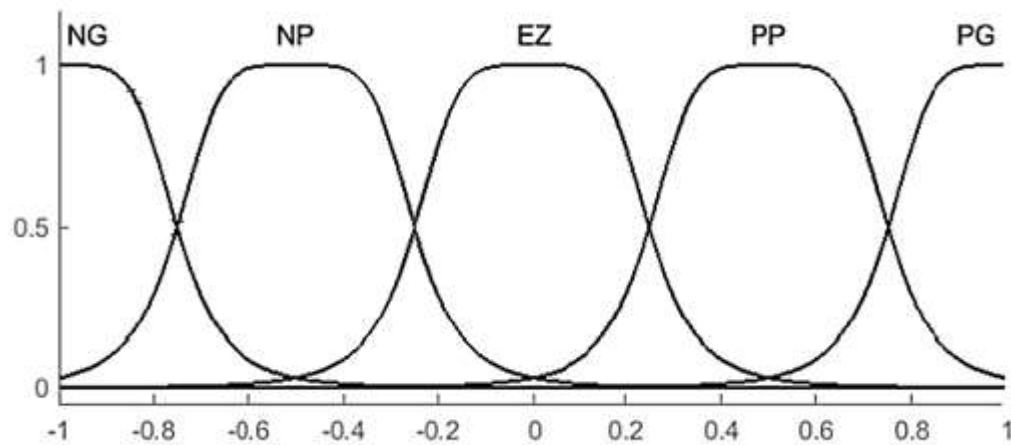


Figure III-5: Fuzzification des variables linguistiques du mécanisme d'auto-ajustement flou Bell

Ces cinq sous-ensembles flous sont :

NG : **N**égatif **G**rand, NP : **N**égatif **P**etit, EZ : **E**gale **Z**éro, PP : **P**ositif **P**etit, PG : **P**ositif **G**rand.

Pour ce CLF on a modulé la variation du paramètre à ajuster par les vingt-cinq Règles d'inférence floues résumées dans le tableau III-2.

Tableau III-2 : Règles d'inférence floues des paramètres à ajuster [10]

Δ_{en} \ e_n	NG	NP	EZ	PP	PG
NG	NG	NG	NP	NP	EZ
NP	NG	NP	NP	EZ	PP
EZ	NP	NP	EZ	PP	PP
PP	NP	EZ	PP	PP	PG
PG	EZ	PP	PP	PG	PG

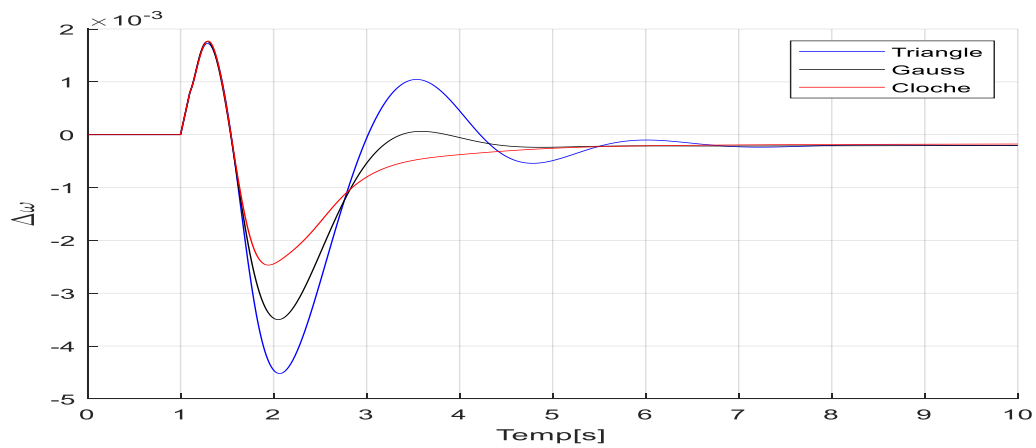
III.3 1 PREMIERE PARTIE

En premier lieu, nous allons choisir 3 fonctions d'appartenance, la fonction triangulaire choisie par [10], la fonction gaussienne et la fonction cloche (Bell). Pour faire la comparaison on a choisi les mêmes paramètres choisis par l'auteur [10]:

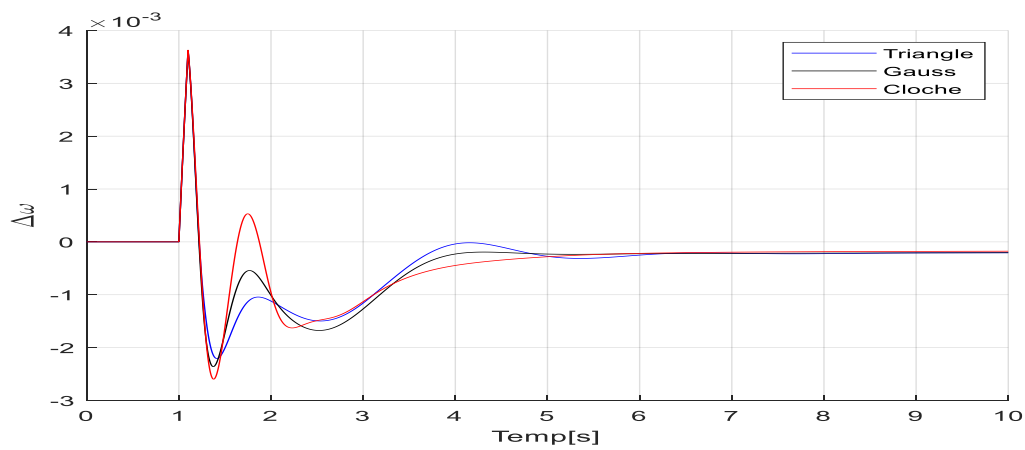
$$K_e = 10 \quad K_{\Delta e} = 0.01 \quad K_{\Delta p} = 15.$$

Le critère de performance dans ce cas est l'intégrale d'erreur quadratique ISE.

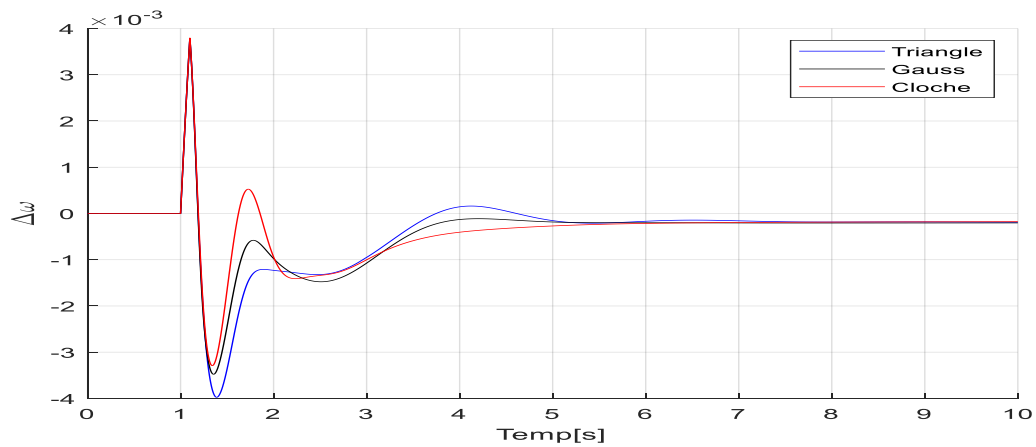
Les figures suivantes présentent les résultats obtenus des déviations des vitesses des trois générateurs du système pour les trois cas de charge (Faible, nominal et forte).



Générateurs n° 1

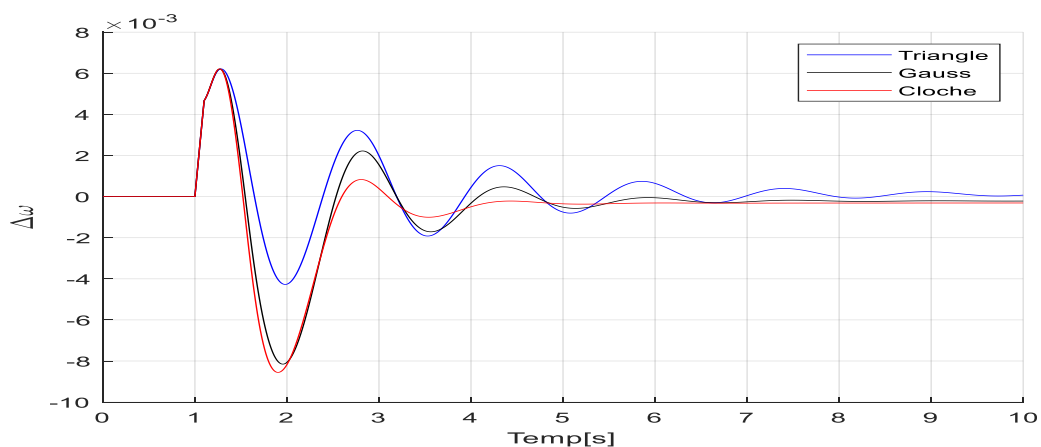


Générateurs n° 2

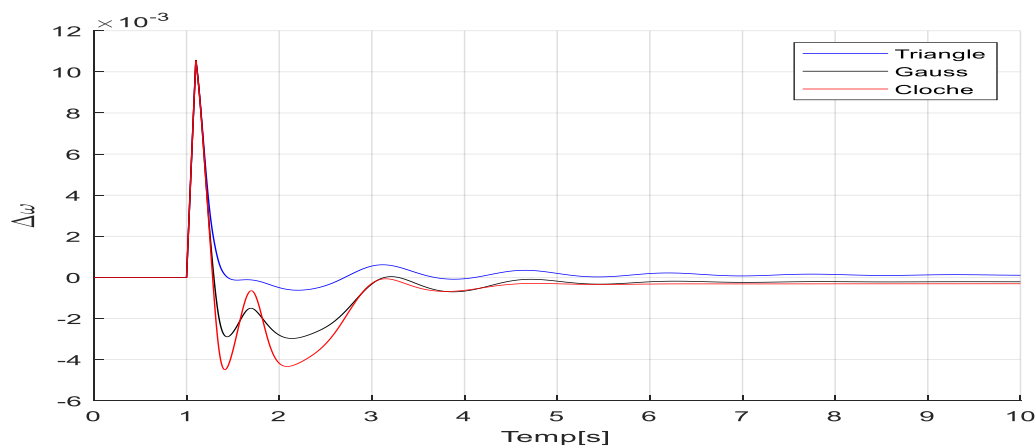


Générateurs n° 3

Figure III-6 Déviations des vitesses des trois générateurs pour une faible charge



Générateurs n° 1



Générateurs n° 2

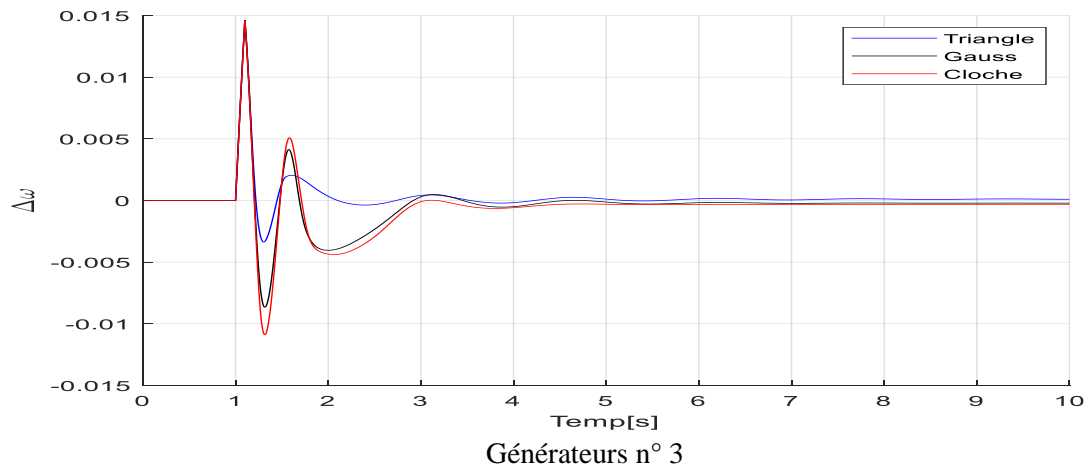
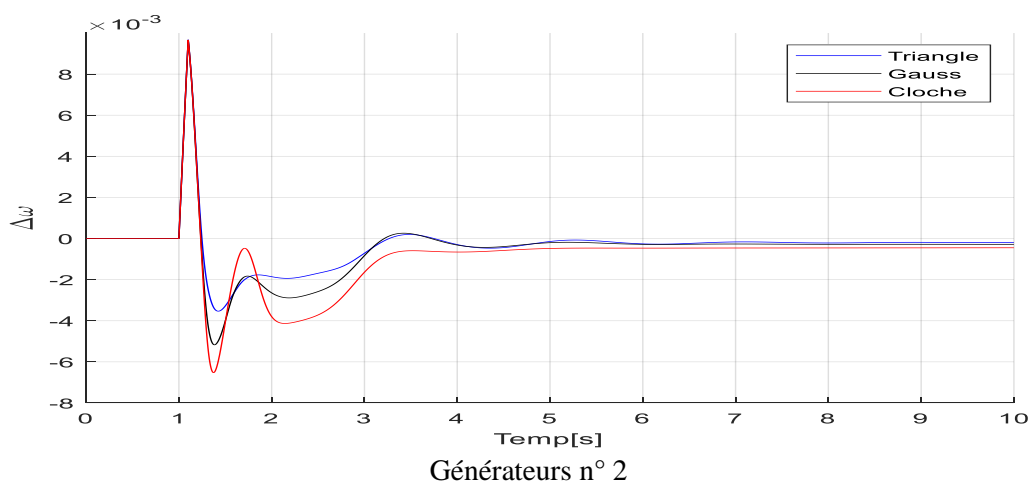
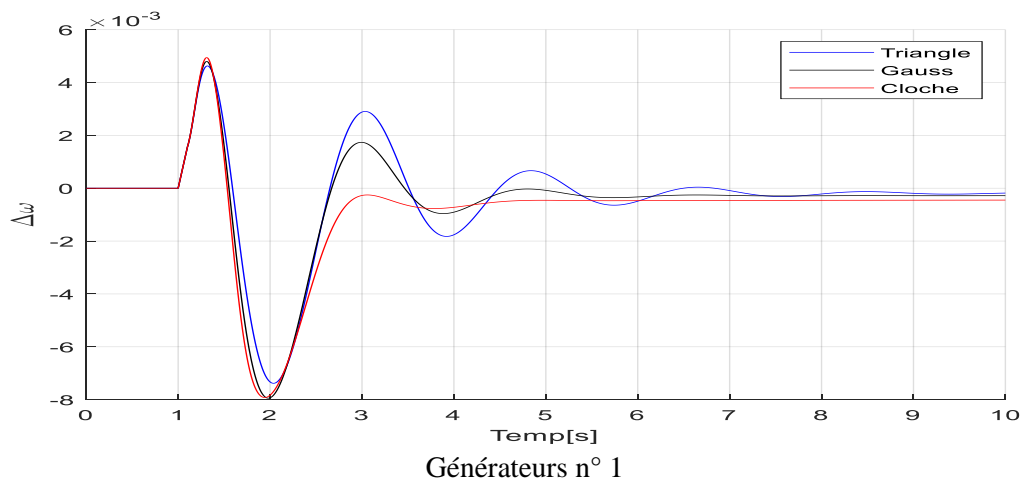


Figure III-7: Déviations des vitesses des trois générateurs pour une charge nominale



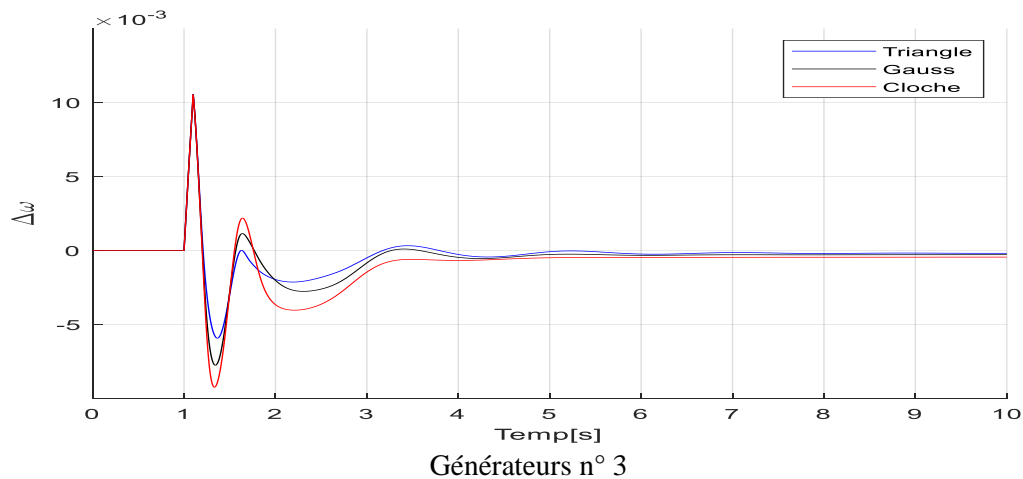


Figure III-8: Déviations des vitesses des trois générateurs pour une charge forte

Ci-dessous, nous effectuerons une étude comparative entre nos résultats obtenus de point de vu ISE et premier pic, temps d’atténuation.

Tableau III-3 ; Comparaisons des résultats de point de vu ISE et premier pic, temps d’atténuation pour le générateur n°1.

Type de charge fonction	Faible			Nominal			Forte		
	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d’atténuation (s)	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d’atténuation (s)	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d’atténuation (s)
Triangulaire	0.285	1.727	8.1	0.586	6.214	+10	0.73	4.627	+10
Gaussienne	0.21	1.763	4.8	1.053	6.208	6.6	0.88	4.796	5.5
Bell	0.17	1.773	5.2	1.246	6.216	4.3	1.14	4.933	4.2

Tableau III-4 ; Comparaisons des résultats de point de vu ISE et premier pic, temps d’atténuation pour générateur n°2

Type de charge Fonction	Faible			Nominal			Forte		
	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d’atténuation (s)	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d’atténuation (s)	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d’atténuation (s)
Triangulaire	0.285	3.614	6.5	0.586	10.55	8.7	0.73	9.66	8.3
Gaussienne	0.21	3.617	4.5	1.053	10.57	7	0.88	9.64	5.8
Bell	0.17	3.628	5.3	1.246	10.54	4.5	1.14	9.65	3.4

Tableau III-5 ; Comparaisons des résultats de point de vu ISE et premier pic, temps d'atténuation pour générateur n°3.

Type de charge La fonction	Faible			Nominal			Forte		
	ISE *10-4	Pic1 *10-3	Temps d'atténuation (s)	ISE *10-4	Pic1 *10-3	Temps d'atténuation (s)	ISE *10-4	Pic1 *10-3	Temps d'atténuation (s)
Triangulaire	0.285	3.784	7.6	0.586	14.61	8.6	0.73	10.54	7.3
Gaussienne	0.21	3.785	5.0	1.053	14.60	6.6	0.88	10.52	6.63
Bell	0.17	3.795	6.0	1.246	14.56	4.4	1.14	10.53	5

III.3 2 INTERPRETATION DES RESULTATS

Pour rendre les résultats obtenus plus visible et plus palpable, on va tracer les histogrammes pour chaque générateur et pour chaque critère d'analyse.

- *ANALYSE DES RESULTATS CONCERNANT LE GENERATEUR G1 :*

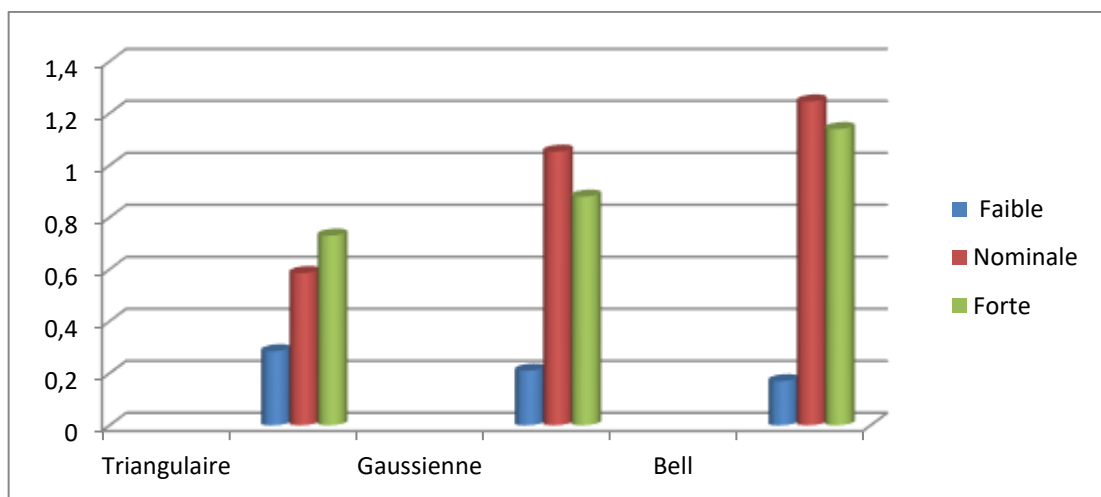


Figure III-9: ISE*10-4 pour le générateur G 1

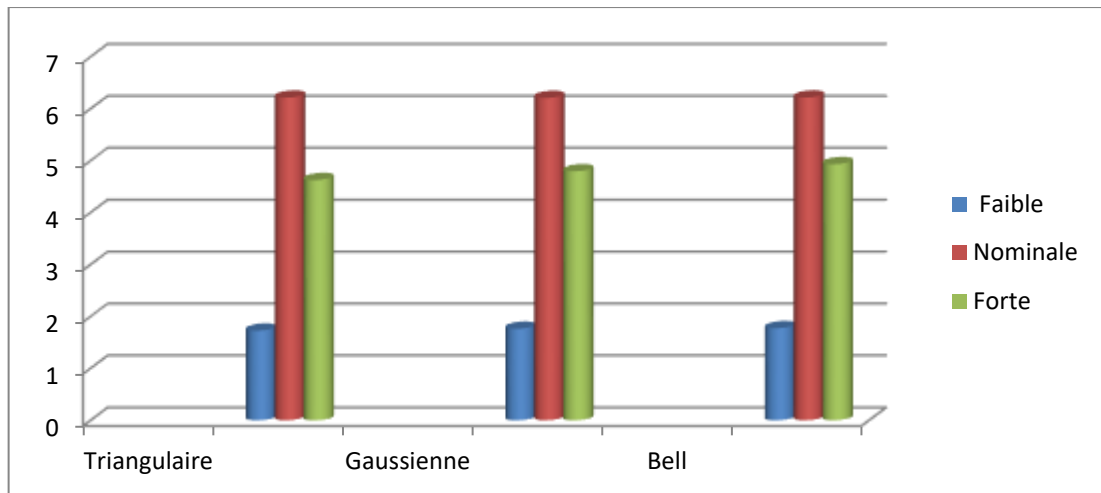


Figure III-10 : Premier Pic*10-3 pour le générateur G1

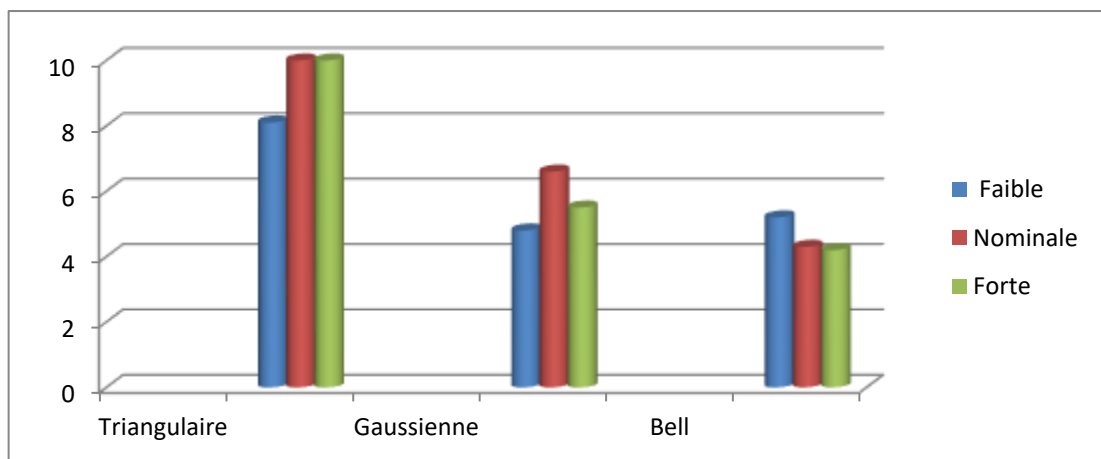


Figure III-11 ; Temps d'atténuation pour les trois charges pour le générateur G1

Pour les faibles charges on remarque que la fonction d'appartenance Bell donne des meilleurs résultats. Par-contre, la fonction triangulaire est concurrente pour les deux charges, nominale et forte.

Concernant le premier pic, il est clair que les résultats sont les mêmes, aucune amélioration ne peut être constatée, on peut l'expliquer par le fait que le PSS est en état transitoire n'agit pas immédiatement.

Par contre, à propos du temps d'atténuation, la fonction gaussienne l'améliore pour la charge faible, en circonstance la fonction Bell est meilleure pour les deux charges restantes.

ANALYSE DES RESULTATS CONCERNANT LE GENERATEUR G2

La comparaison des résultats concernant le générateur G2 on peut dire :

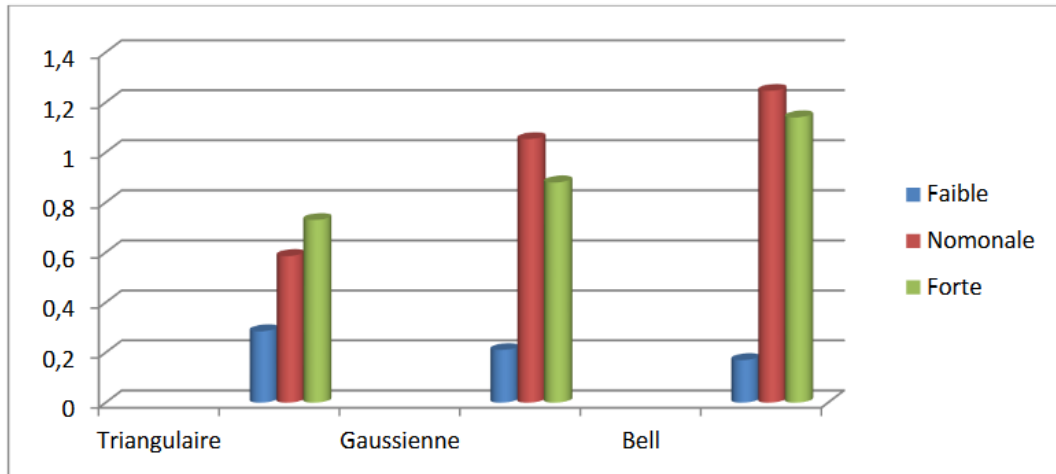


Figure III-12 ; ISE*10-4 pour le générateur G2

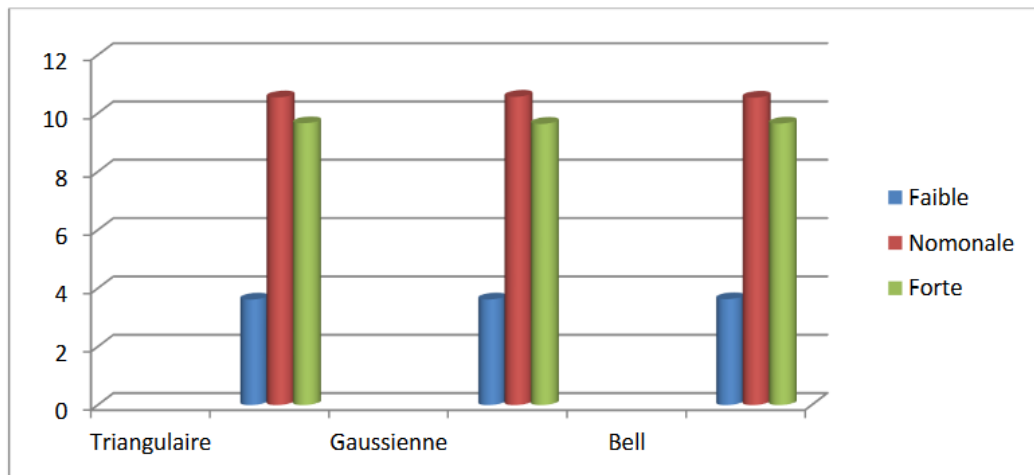


Figure III-13 ; Premier Pic*10-3 pour le générateur G2

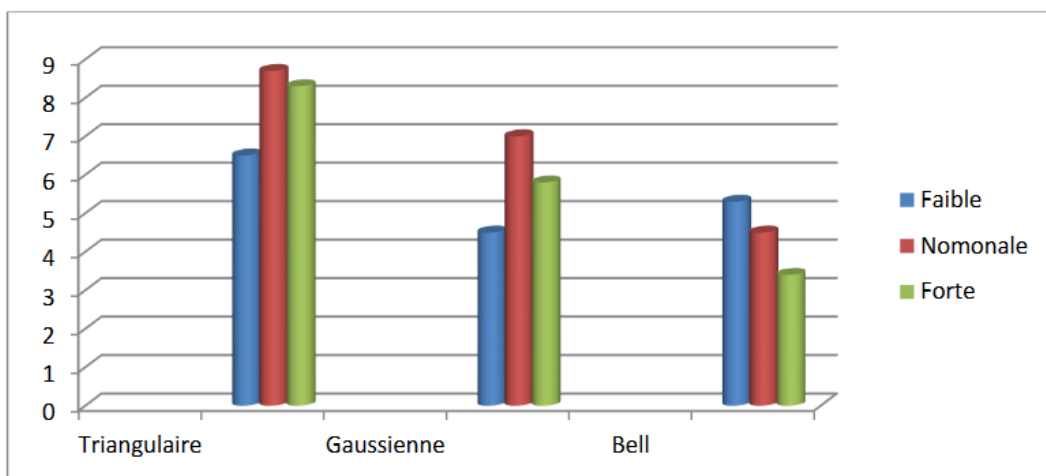


Figure III-14 ; Temps d'atténuation pour les trois charges pour le générateur G2

Pour l'ISE, il est clair que pour la charge faible le meilleur score est pour la fonction d'appartenance 'Bell', pour les deux charges, nominale et forte la fonction triangulaire est la plus compétitrice.

Les mêmes appréciations concernant le premier pic, il est clair qu'aucune réponse n'était prise par les PSSs.

Dans ce cas, on remarque que la fonction d'appartenance cloche donne les meilleurs résultats au point de vue temps d'atténuation.

ANALYSE DES RESULTATS CONCERNANT LE GENERATE G3

Le générateur G3 qui est le deuxième générateur au point de vue puissance

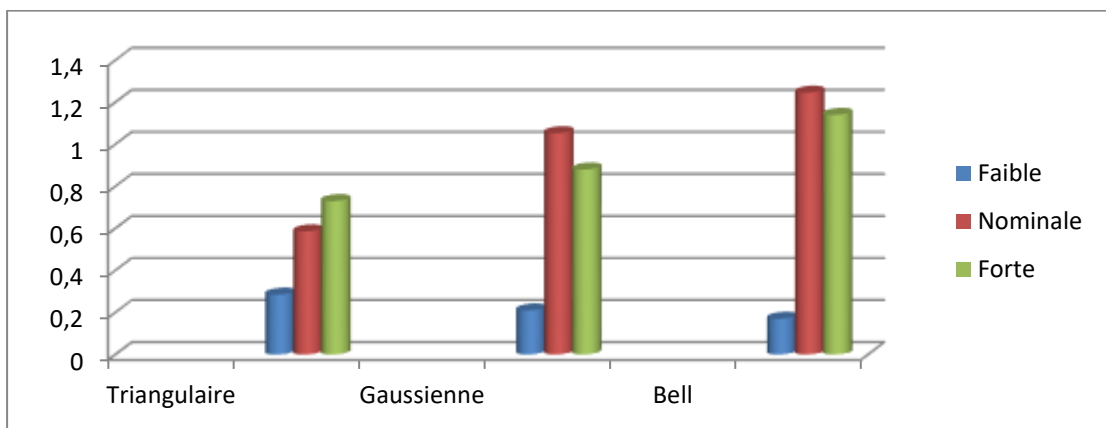


Figure III-15 ISE*10⁻⁴ pour le générateur G3

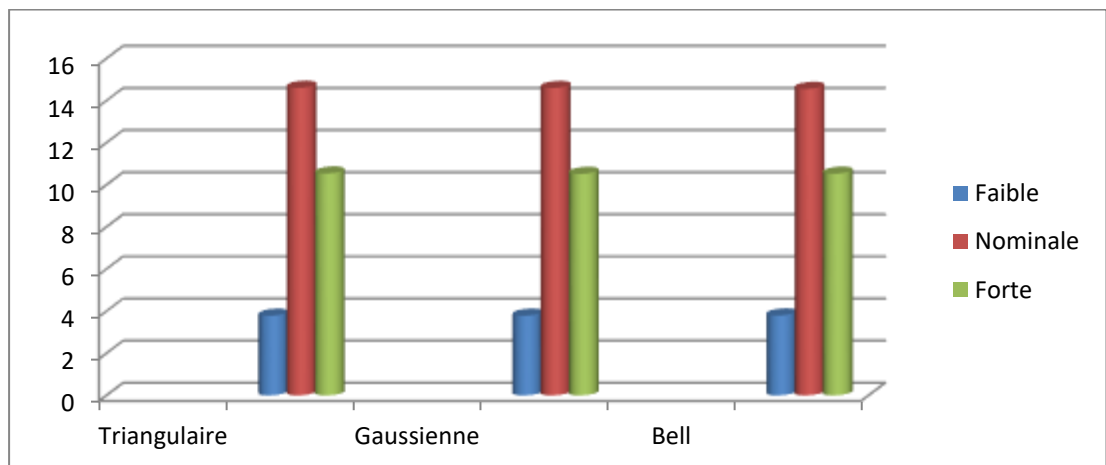


Figure III-16 Premier Pic*10⁻³ pour le générateur G3

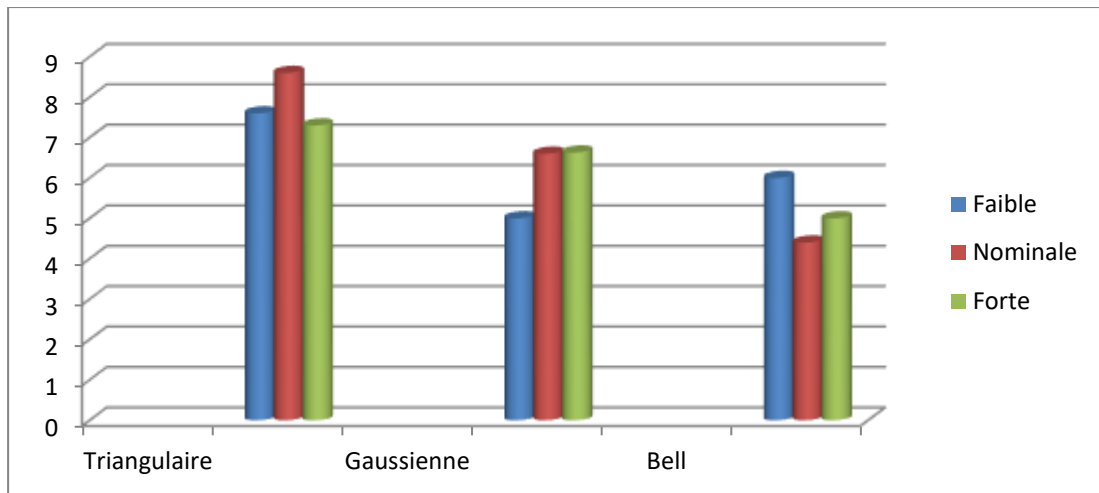


Figure III-17 ; Temps d'atténuation pour les trois charges pour le générateur G3

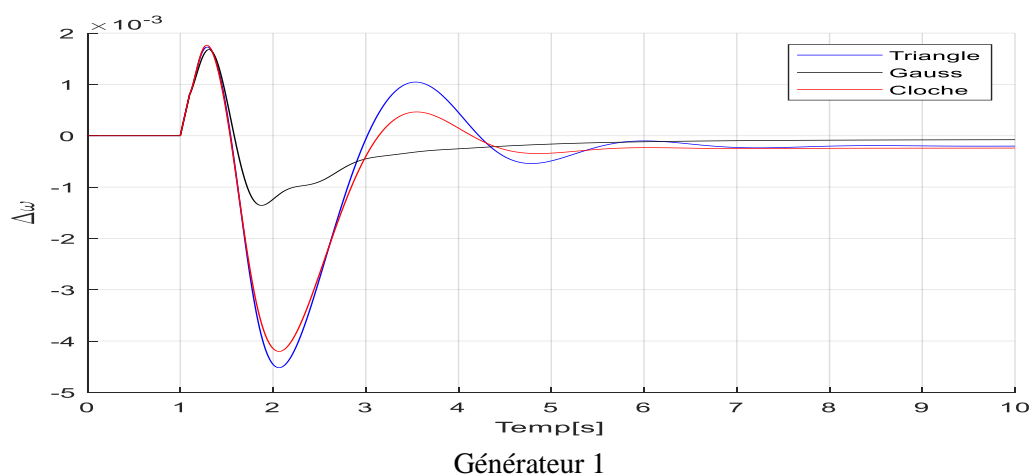
Pour le générateur 3, on remarque que pour le 1^{er} pic et le ISE les presque les mêmes résultats et les mêmes constatations obtenus, on peut l'expliquer par le fait que le générateur G2 et le générateur G3 ont des puissances voisines, et ils sont menu du même PSS au point de vu paramètres.

III.3 3 DEUXIEME PARTIE

On conclusion, il nous apparu qu'il faut faire un autre réglage pour les deux fonctions d'appartenance. Nous allons tenter de trouver des nouvelles valeurs pour l'amélioration du critère de performance. Après de nombreuses tentatives on a donc trouvée les résultats ci-dessous.

Gaussienne $K_e = 4.5$ $K_{\Delta e} = 0.02$ $K_{\Delta p} = 10$

Bell $K_e = 20$ $K_{\Delta e} = 0.02$ $K_{\Delta p} = 10$



Générateur 1

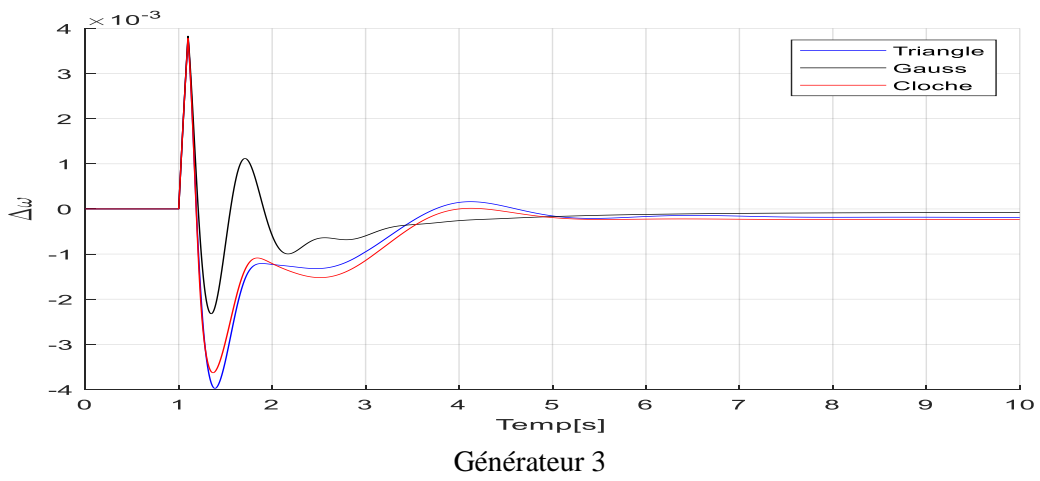
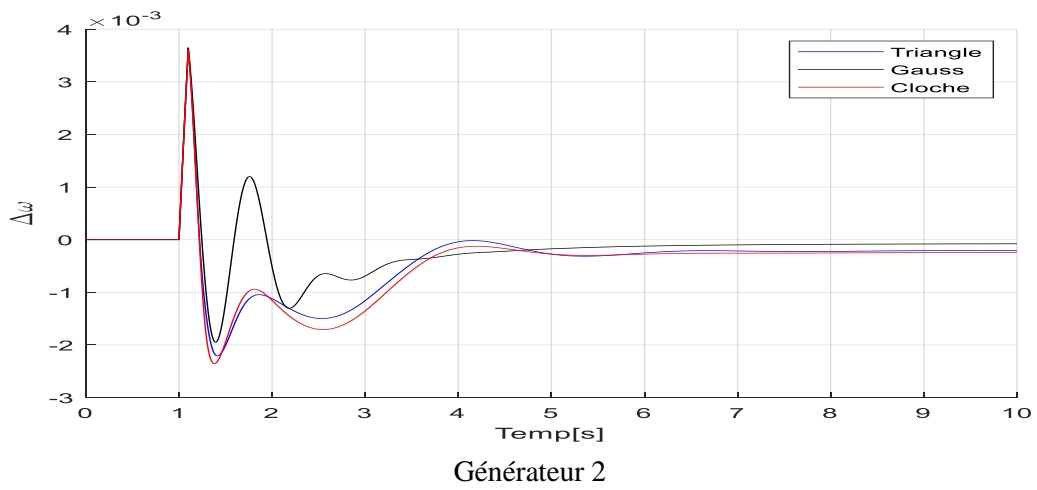
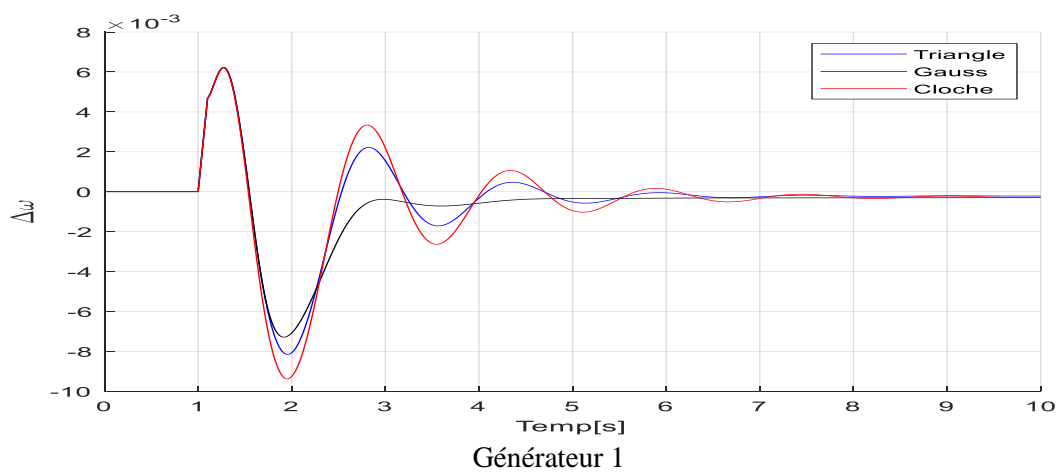


Figure III-18 ; Déviations des vitesses des trois générateurs dans le cas d'une charge faible.



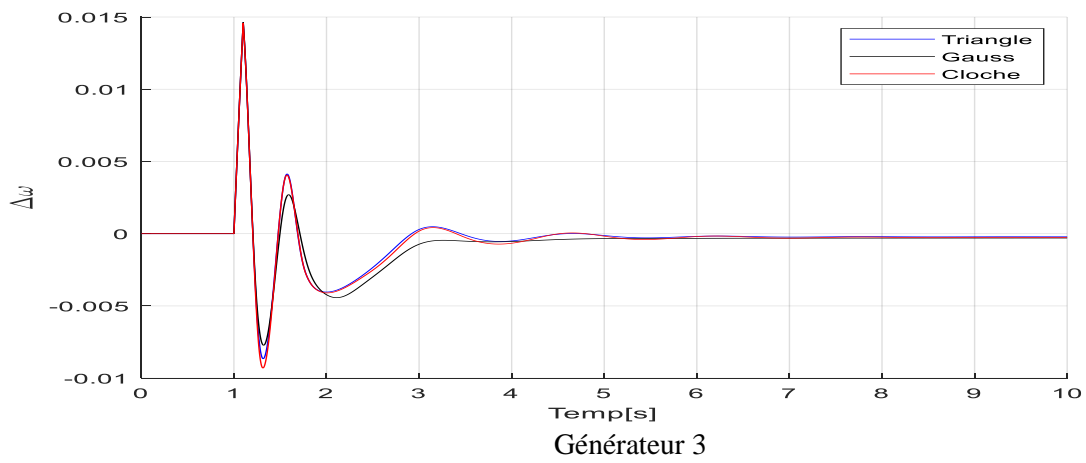
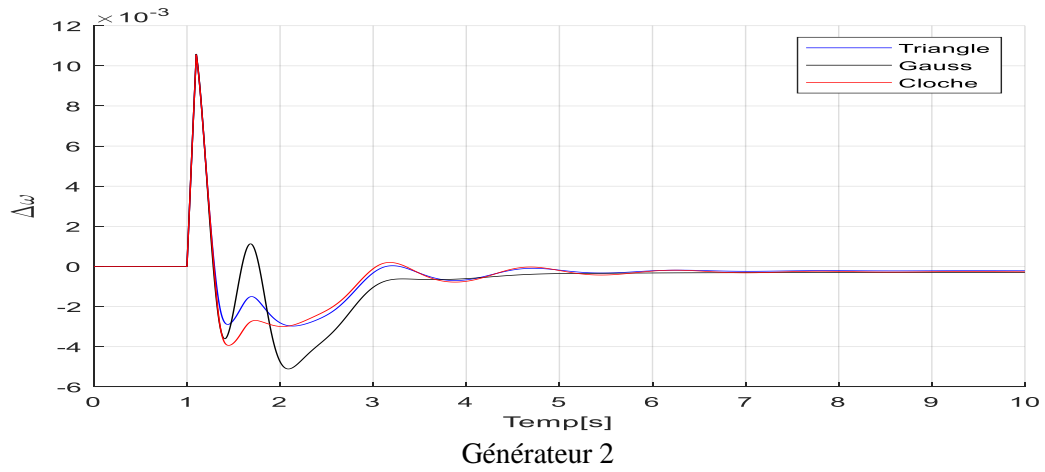
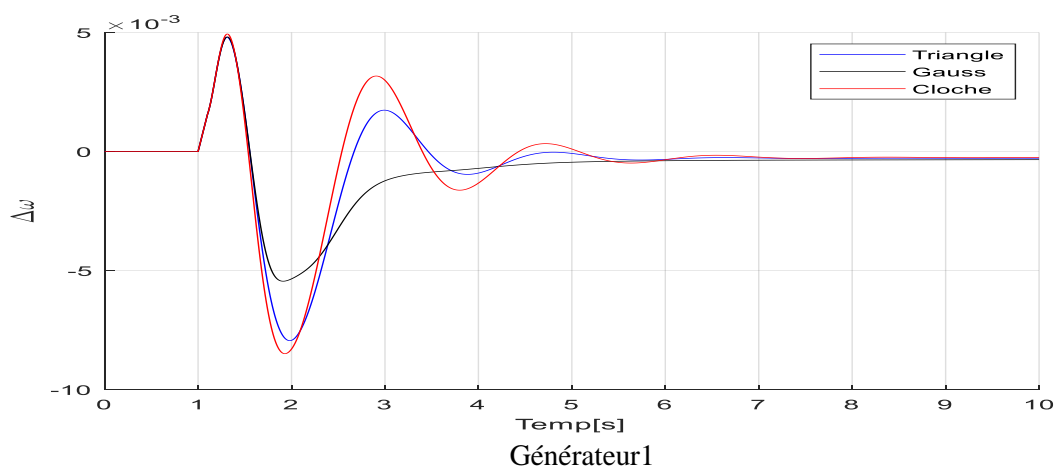


Figure III-19 ; Déviations des vitesses des trois générateurs dans le cas d'une charge nominale.



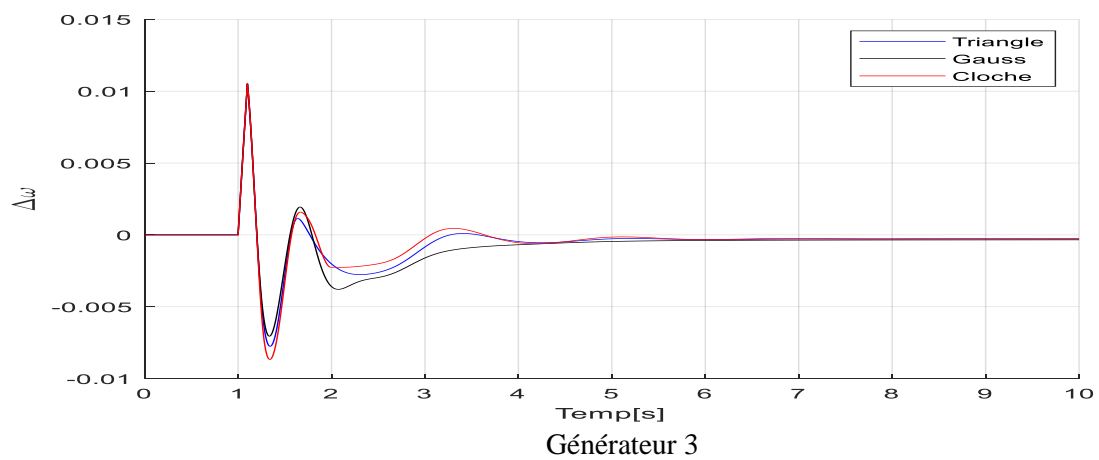
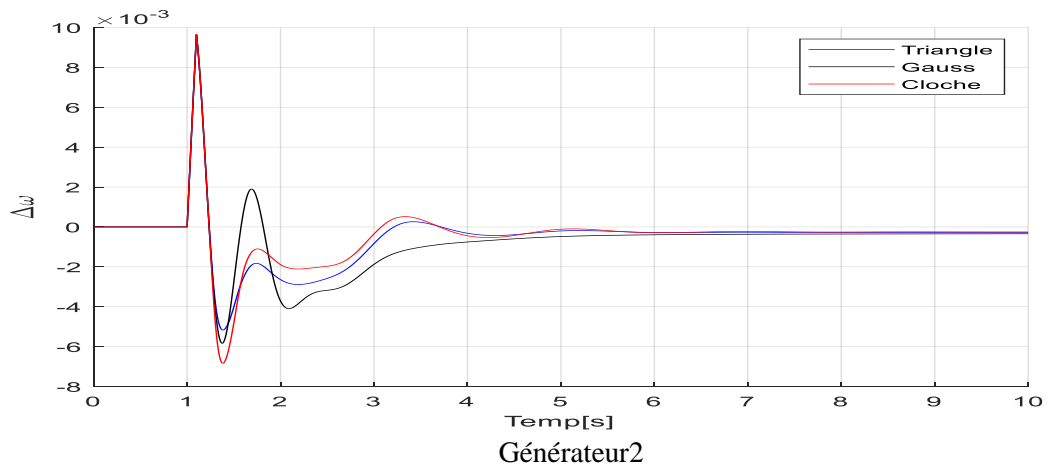


Figure III-20 ; Déviations des vitesses des trois générateurs dans le cas d'unecharge forte.

Tableau III-6 ; Comparaisons des résultats après l'amélioration de point de vu ISE et premier pic, temps d'atténuation pour générateur n°1

Type de charge fonction	Faible			Nominale			Forte		
	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d'atténuation (s)	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d'atténuation (s)	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d'atténuation (s)
Triangulaire	0.285	1.727	9	1.053	6.208	8.07	0.88	4.797	6.2
Gaussienne	0.084	1.679	5.5	1.098	6.231	4.6	0.85	4.815	5.6
Bell	0.273	1.789	5.7	1.243	6.205	9.5	0.95	4.936	7.3

Tableau III-7 ; Comparaisons des résultats après l'amélioration de point de vu ISE et premier pic, temps d'atténuation pour générateur n°2.

Type de charge fonction	Faible			Nominale			Forte		
	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d'atténuation (s)	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d'atténuation (s)	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d'atténuation (s)
Triangulaire	0.285	3.614	6.8	1.053	10.57	6.8	0.88	9.65	5.9
Gaussienne	0.084	3.609	5.8	1.098	10.58	3.1	0.85	9.62	5.4
Bell	0.273	3.609	6.0	1.243	10.55	8.3	0.95	9.64	7.6

Tableau III-8 ; Comparaisons des résultats après l'amélioration de point de vu ISE et premier pic, temps d'atténuation pour générateur n°3.

Type de charge fonction	Faible			Nominale			Forte		
	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d'atténuation (s)	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d'atténuation (s)	ISE*10 ⁻⁴	Pic1*10 ⁻³	Temps d'atténuation (s)
Triangulaire	0.285	3.78	7.3	1.053	14.46	6.5	0.88	9.65	6.2
Gaussienne	0.084	3.79	5.2	1.098	14.62	3.1	0.85	9.62	4.0
Bell	0.273	3.77	5.5	1.243	14.58	7.4	0.95	9.64	6.4

- **INTERPRETATION DES RESULTATS APRES UN DEUXIEME REGLAGE**

Sachant que le générateur G1 est n'est pas menu d'un PSS, mais il ne présente pas des oscillations rotoriques critiques comparativement aux deux autres. Rappelons que le critère de performance est toujours la minimisation de l'intégrale de l'erreur quadratique, à la lumière de cela, le choix des facteurs ont été choisies. Par contre, les deux autres critères, 1^{er} pic et temps d'atténuation ne sont que des conséquences des effets secondaires que nous voulons les analyser.

On se basant sur le critère ISE, on peut voir clairement que la fonction d'appartenance Gaussienne est très adéquate pour les faibles et les fortes charges. Par contre, pour la charge nominale les résultats sont presque les mêmes que la fonction le triangulaire. En outre, les résultats des pics donnent les mêmes aboutissements. D'autre part, il est claire que la fonction d'appartenance Gaussienne est la plus performantes au point de vu temps d'atténuation.

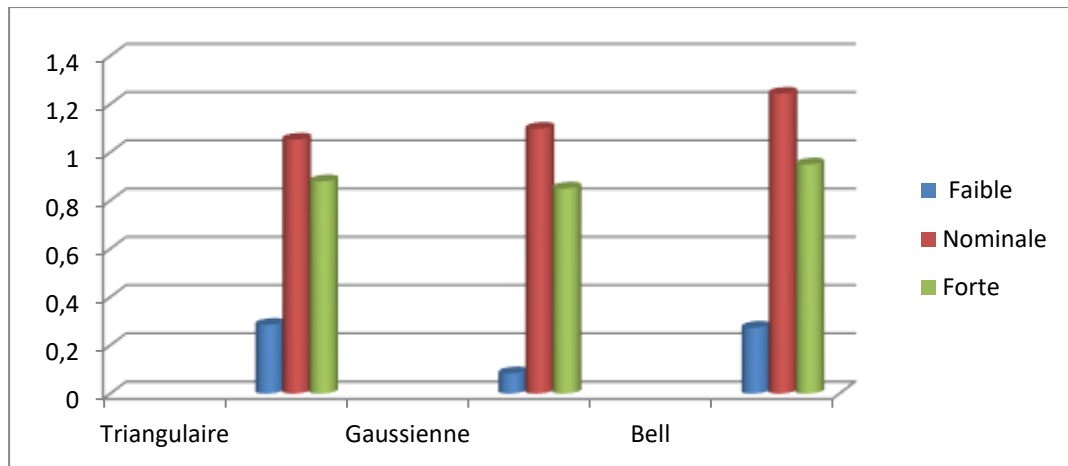


Figure III-21 ; ISE*10-4 pour le générateur G1 après un deuxième réglage

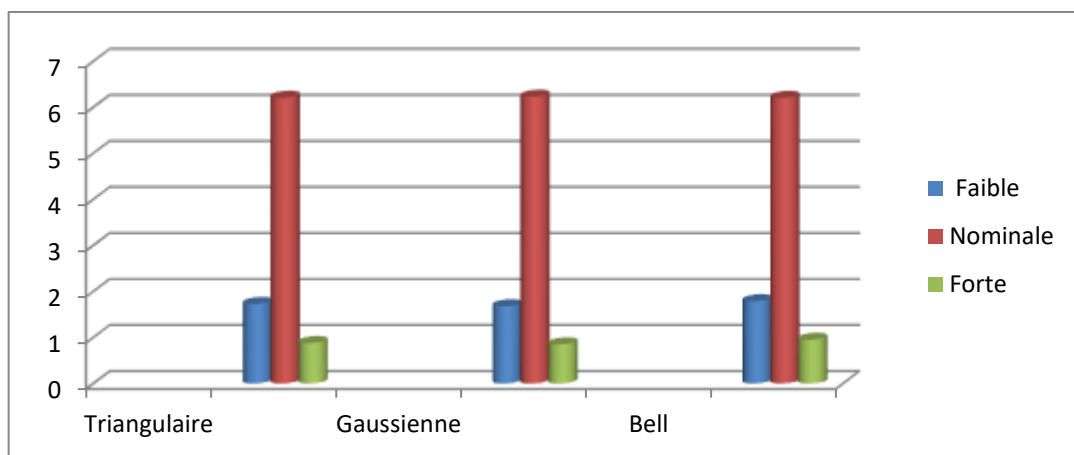


Figure III-22 ; Premier Pic*10-3 pour le générateur G1 après un deuxième réglage

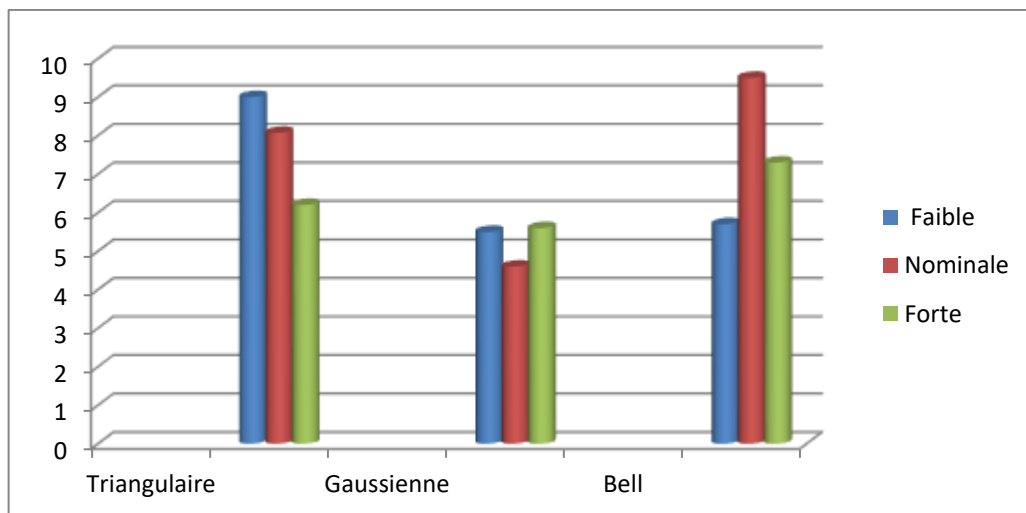


Figure III-23 ; 23Temps d'atténuation pour les trois charges pour le générateur G1 après un deuxième réglage

D'autre part, les critiques concernant le générateur G2, connaissant que le critère de performance ISE est très bien amélioré pour la faible charge par contre, pour la forte et la charge nominale il est observable que les performances sont presque les mêmes comparativement à celle de la fonction triangulaire. Les résultats confirment les mêmes opinions déjà livrés précédemment concernant le 1^{er} pic. Dans le cas du générateur G2, concernant le temps d'atténuation, il est clair que la fonction d'appartenance Gaussienne donne des résultats les plus appropriés par rapport aux autres fonctions.

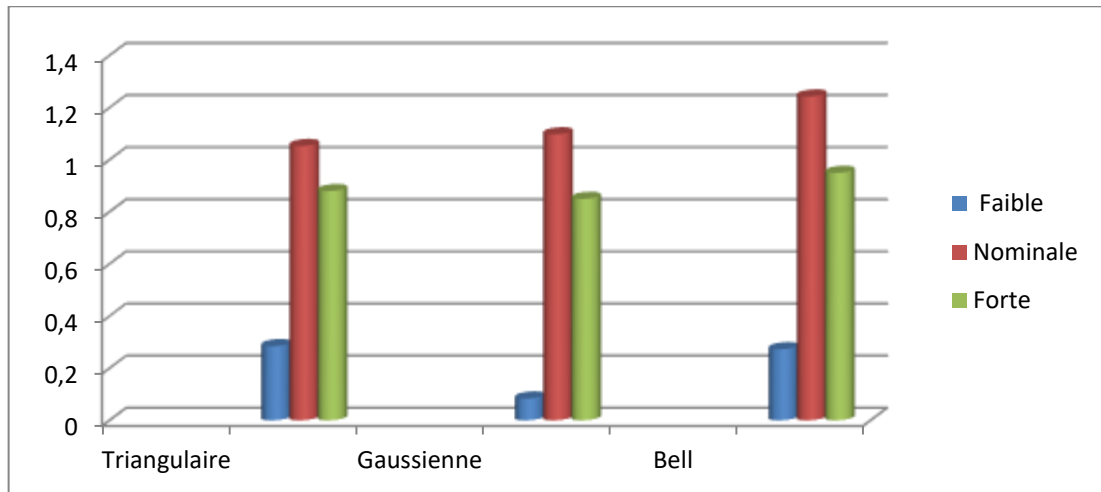


Figure III-24 ISE*10⁻⁴ pour le générateur G2 après un deuxième réglage

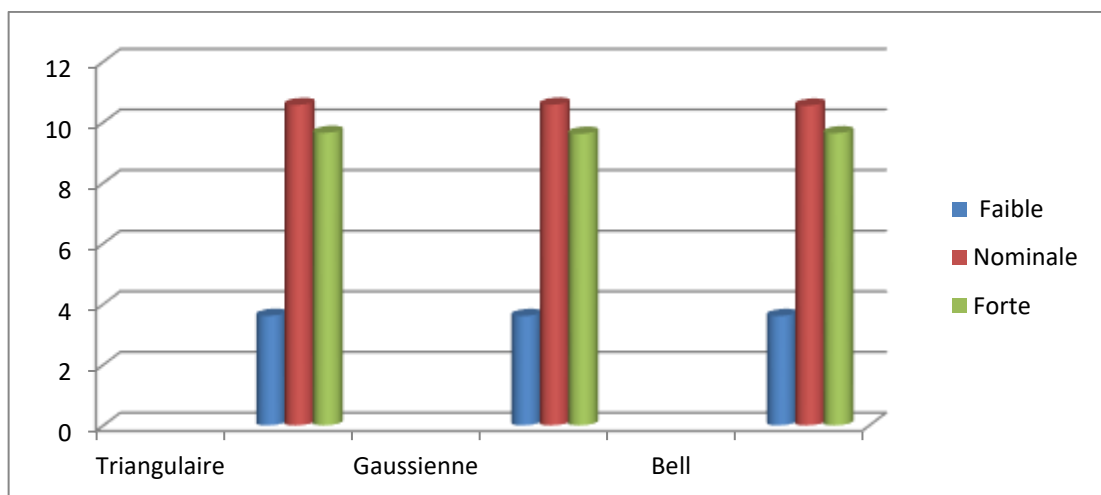


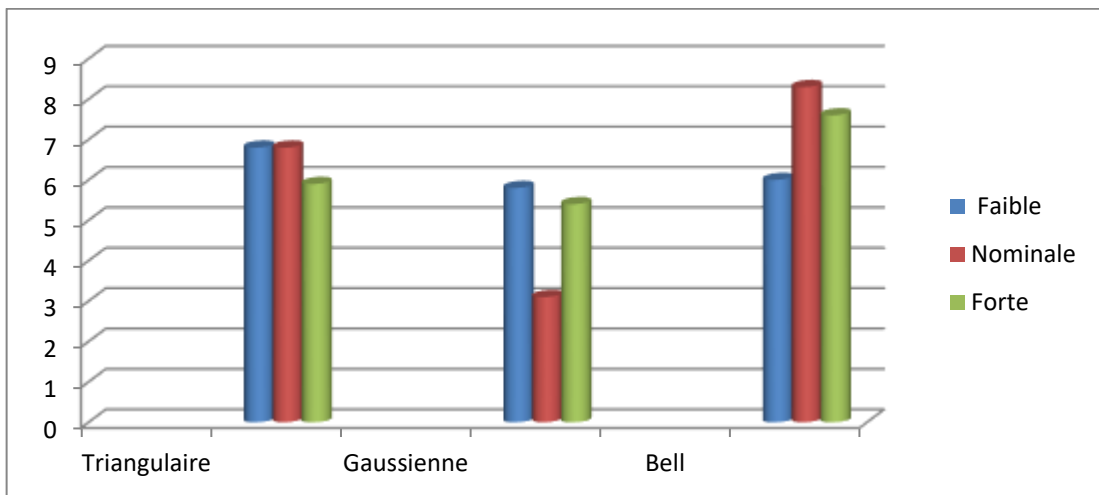
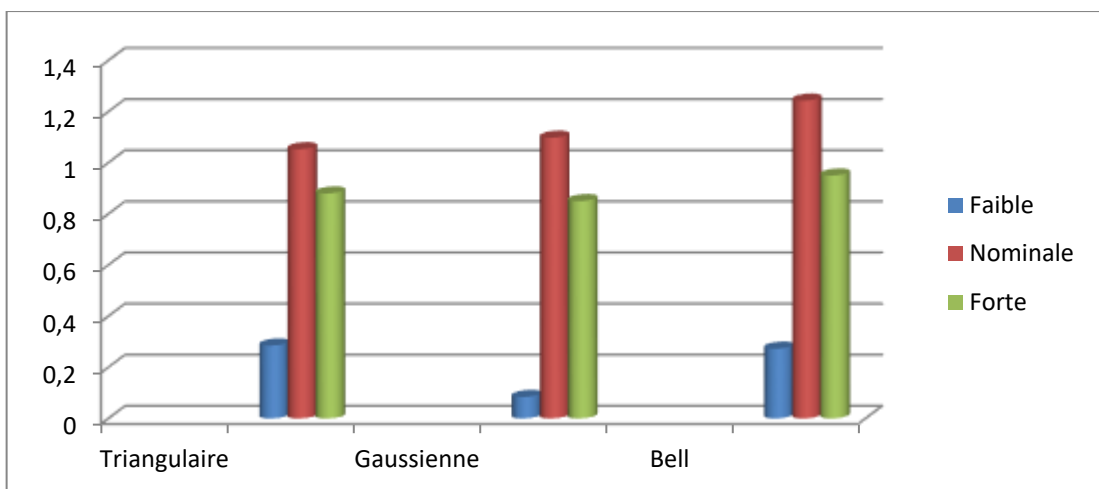
Figure III-25 Premier Pic* 10^{-3} pour le générateur G2après un deuxième réglage

Figure III-26 Temps d'atténuation pour les trois charges pour le générateur G2après un deuxième réglage

On revanche, les mêmes remarques concernant le générateur G3, peut être porté sur les résultats est les analyses du générateur G2.

Figure III-27 ISE* 10^{-4} pour le générateur G3après un deuxième réglage

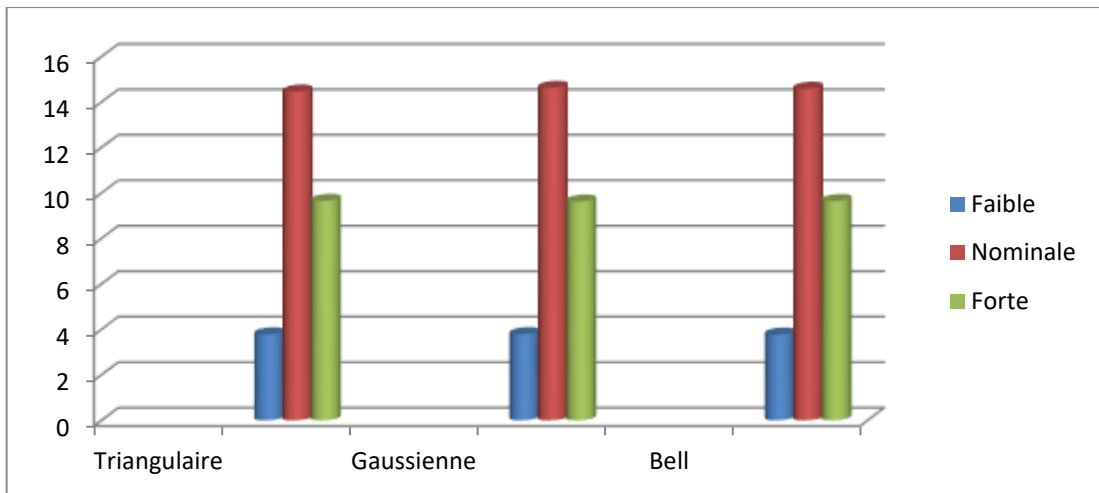


Figure III-28 Premier Pic*10⁻³ pour le générateur G3après un deuxième réglage

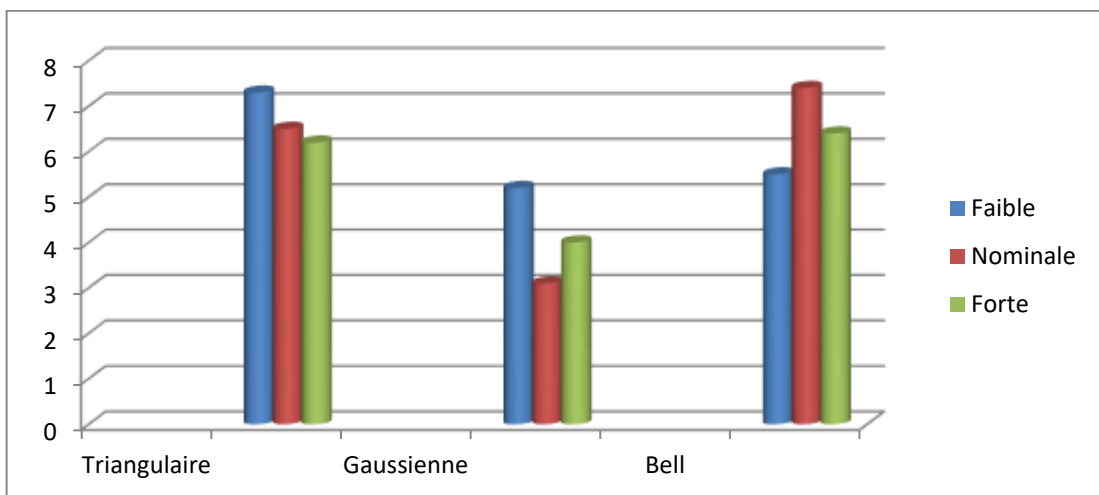


Figure III-29 : Temps d'atténuation pour les trois charges pour le générateur G3après un deuxième réglage

En générale, les résultats dynamiques montrent un bon amortissement des oscillations rotoriques et prouvent la bonne adaptabilité des paramètres des PSSs intelligents neuro-flou sur tous les cas de variation des charges du réseau et en court-circuit.

Le choix de la fonction d'appartenance et les paramètres de réglage ont une importance concluante lors de la conception du PSS.

III.3 4 CONCLUSION

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

CONCLUSION GENERALE

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

D'autre part, nous avons montré qu'il est possible de concevoir des PSSs intelligents grâce aux techniques de l'intelligence artificielle. Deux problèmes d'adaptations des paramètres du PSS ont été visés, le premier c'est l'adaptabilité avec le changement de la charge globale du réseau ceci est résolu par l'utilisation du réseau de neurone issu de l'algorithme génétique, par contre la deuxième difficulté d'adaptabilité lors des manœuvres (ouverture d'un sectionneur ou un disjoncteur ou un court-circuit) la topologie du réseau changeant, il est impossible de savoir le réseau équivalent à ce moment, pour y remédier à ce problème on a utilisé le gradient de la déviation de vitesse on minimise à tout moment l'erreur quadratique.

L'étude de conception de ce PSS nous a conduits à l'utilisation de la logique floue pour la variation du gain du PSS qui est le paramètre le plus influant, le choix de la fonction d'appartenance et le paramétrage des grandeurs de réglage est une étape décisive. Cette solution peut être utilisée pour l'ajustement en temps réel des paramètres de ces PSSs. Ce travail a été testé et validé sur un réseau de 3 machines 9 nœuds et l'analyse de la performance des PSSs a été effectuée lors d'une grande perturbation avec un défaut dans un temps précis.

On a pu améliorer les résultats en les comparant à ceux obtenus par la bibliographie [10] changeant la fonction d'appartenance et ces paramètres.

Ces travaux nous ont permis de faire connaissance et faire contact avec des nouvelles techniques telles que les réseaux de neurones et la logique floue.

Comme perspective, il est intéressant d'utiliser d'autres techniques telles que le neuro-flou, d'utiliser des fonctions multi objectives et validation sur d'autres réseaux de taille plus grande.

BIBLIOGRAPHIE

1. **K.Saoudi**, «"Stabilisateurs Intelligents Des Systèmes Electro-énergétique",Thèse de Doctorat,» université de Batna, Algerie, 2014.
2. **B.Boussahoua**, "Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique par les méthodes énergétiques,"Ecole Nationale Polytechnique Thèse de Magister, 2004.
3. **Kundur**, "Power System Stability and Control". New York: McGraw-Hill,, 1994.
4. **P.Kundur and & all**, IEEE/CIGRE joint Task Force on Stability Terms and Définition and Classification of Power System Stability",IEEE Transactions on power system, 2004 19(2) 1387-1401.
5. **B, PAL.B and Chaudhuri**.Robust Control in power system ,Springer Science + Busniess Media ,. INC 2005.
6. **R. mahdaoui.**' diagnostique indistruel par neuro-flou – APPL iccation a un système de production ‘ ’ . Université de Batna : s.n., 2008
7. **Sayed Mohammed.**" Amélioration de la stabilité transitoire et de l'amortissement des oscillations d'un réseau électrique à l'aide de SMES et de SSSC" thèse de doctorat ,l'institutue national polytechnique de grenbel . Mars 1992.
8. **B.Samira.**"amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un QSVC" mémoire de l'ingénieur d'état en électrotechnique,à université Hassiba Ben BoualiCHLEF . 2009.
9. **Canard, Jean François.**"Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de Destribution"thèse de doctorat , institue National polytechnique de GRENOBLE,. Décembre 2000.
10. **Med.Omrane.**"Conception des stabilisateurs de Puissance d'un Réseau

électrique Multi-machine ;Optimisation et Auto-Ajustement en temps Réel" Thèse de doctorat, université de LAGHOUAT. Laghouat : université Amar Telidji , 2018

11. **A.Boudraa.**"Etude et Application des PSSs Multibande pour un Systeme Multimachine" université de Amar telidji Laghouat . 2016
12. **B.Douidi.**Modélisation et stabilité en petit mouvement d'un réseau électrique Multi-machine , Mémoire de Magister , université Laghouat. 2009.
13. **H.Alkhatib.** "Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques : optimisation de la régulation par une methode métaheuristique"thèse de doctorat université Paul Cézanne d'aix-marseille,. 2008.
14. **G.Rogers** .power system Oscillation .kluwer Academicpublishers, Norwell, Massachusetts. 2000.
15. **Yao-Nan, YU.**"Electric power system Dynamics,Academic press ". 1983.
16. **www.google.com.** search. le réseau de neurone. [En ligne]
17. **C.Touzet.** Les Réseaux de Neurones Artificiels-Introduction au Connexionnisme",cours, exercices et travaux pratiques.juillet. 1992.
18. **A.M.Ibrahim.**"Fuzzy Logic for Embedded Systems Application",Elsevier Science USA,. 2004
19. **F.Sorin, L.Broussard et P.Roblin.** Régulation d'un processus industriel par réseaux de neurones ,Techniques de l'Ingénieur S7582
20. **A.ouali**"Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux électriques par les réseaux de neurones artificiels et les plans d'expériences ",université USTHB. 2008
21. **A.Abraham,** A.cerbal quotion of neuro fuzzy techniques-hype or hallelujah,school of computing and information technology,Victoria .Australia. 2000.

22. **Z.layachi**, "Thèse de Doctorat,," Etude et Commande Adaptative par les Techniques Intelligentes Des Systèmes Non linéaires Application aux Systèmes Photovoltaïques. université Mohamed KHIDER à Biskra : s.n., 2017.
23. **Rabah benabid**."Optimisation Multi objectifde la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Controle de la stabilité de tension des Réseaux Electriques" Mémoire de Magister à université Ammar telidji laghouat, 2007.
24. **A. andreoui**.On Power System Stabilizers: Genetic Algorithm Based Tuningand Economic Worth as ANCILLERY Services, " ; PhD Thesis,Chalmers Universityof Technology . GOTEBORG, SWEDEN : s.n., Chalmers University of Technology, 2004.

ANNEXE

Données de Réseau Étudié❖ *Paramètres des générateurs*

	Générateur 1	Générateur 2	Générateur 3
$S_{Base}(MVA)$	100	100	100
$VB(KV)$	-	-	-
$f(Hz)$	60	60	60
$Ra (pu)$	0	0	0
$Xd(Pu)$	0.1460	0.8958	1.3125
$X'd (pu)$	0.0608	0.1198	0.1813
$T'do(s)$	8.9600	6.0000	5.8900
$Xq (pu)$	0.0969	0.8645	1.2578
$H(s)$	23.64	6.400	3.01
$D(pu)$	9.6	2.5	1.0
Ka	20	20	20
$Ta(s)$	0.2	0.2	0.2
Efd_{min}	-10	-10	-10
Efd_{min}	10	10	10

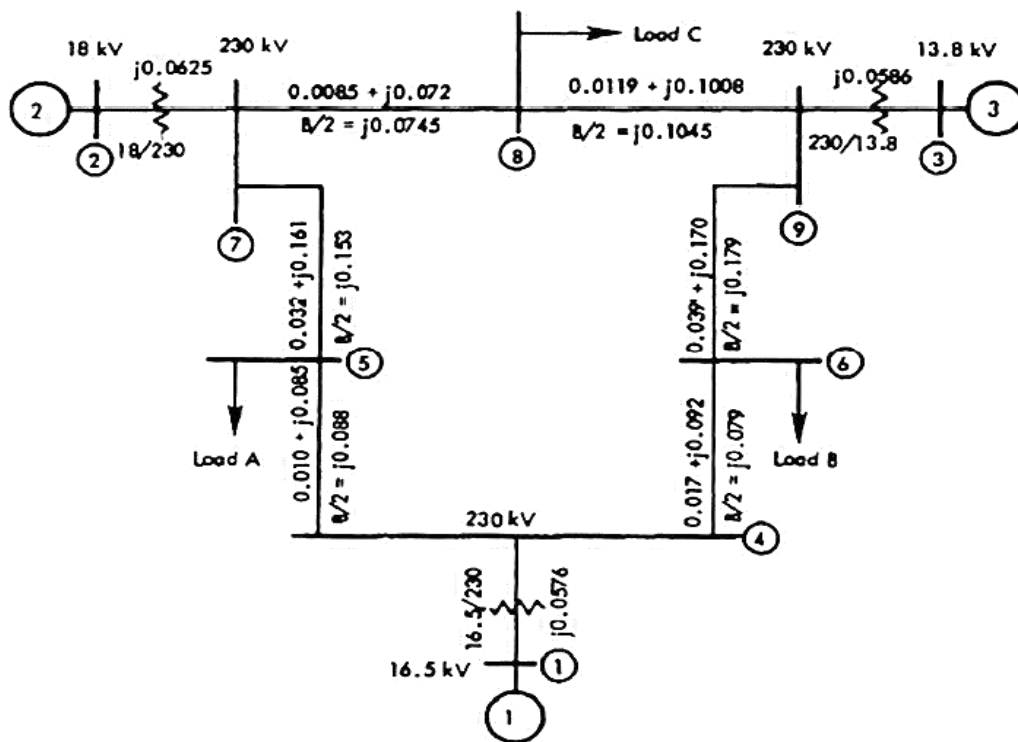
❖ *Paramètres des lignes*

Nœud de départ	Nœud d'arrivée	Résistance R (pu)	Réactance X (pu)	Susceptance B (pu)
1	4	0.0	0.0576	0.000
2	7	0.0	0.0625	0.000
3	9	0.0	0.0586	0.000
4	5	0.0100	0.0850	0.176
4	6	0.0170	0.0920	0.158
5	7	0.0320	0.1610	0.306
6	9	0.0390	0.1700	0.358
7	8	0.0085	0.0720	0.149
8	9	0.0119	0.1008	0.209

❖ Paramètre des nœuds

Nœud	V (pu)	ang(°)	Pg (pu)	Qg (pu)	Type
1	1.0400	0	0.0	0	1
2	1.0250	0	1.63	0	2
3	1.0250	0	0.85	0	2

Réseau étudié : Schéma unifilaire du système multi machine étudié par [10].



Paramètres des PSSs optimisés par l'algorithme génétique

Pour : $P_{c1} = 0.67$ (pu) jusqu'à 2.65 (pu) $P_{c2} = 0.58$ (pu) jusqu'à 0.45 (pu) $P_{c3} = 0.35$ (pu) jusqu'à 0.5 (pu)

Avec un pas de 2.4 on obtient la base de données suivante :

PG1	QG1	PG2	QG2	PG3	QG3	P25	P28	P36	P38	PA	PB	PC	KM2	TM11	TM21	KM3	TM12	TM22
0,67	- 0,14	0,58	- 0,27	0,35	- 0,34	0,28	0,30	0,15	0,20	0,65	0,45	0,50	47,26	0,27	0,03	28,36	0,15	0,03
0,67	- 0,12	0,76	- 0,20	0,47	- 0,28	0,28	0,48	0,15	0,32	0,65	0,45	0,80	41,16	0,27	0,03	21,64	0,16	0,03
0,67	- 0,10	0,94	- 0,12	0,59	- 0,22	0,28	0,66	0,15	0,44	0,65	0,45	1,10	47,12	0,26	0,03	15,78	0,16	0,03
0,68	- 0,07	1,12	- 0,03	0,71	- 0,15	0,28	0,84	0,15	0,56	0,65	0,45	1,40	52,31	0,26	0,03	12,64	0,18	0,03
0,68	- 0,05	1,30	0,07	0,83	- 0,07	0,28	1,02	0,15	0,68	0,65	0,45	1,70	45,60	0,27	0,03	8,82	0,22	0,02
0,69	- 0,02	1,48	0,18	0,95	0,01	0,28	1,20	0,15	0,80	0,65	0,45	2,00	39,63	0,27	0,03	7,16	0,25	0,02
0,70	0,02	1,66	0,30	1,07	0,10	0,28	1,38	0,15	0,92	0,65	0,45	2,30	43,03	0,26	0,03	9,08	0,26	0,02
0,87	- 0,06	0,58	- 0,25	0,46	- 0,29	0,28	0,30	0,26	0,20	0,65	0,75	0,50	36,00	0,27	0,03	29,52	0,17	0,04
0,87	- 0,04	0,76	- 0,18	0,58	- 0,24	0,28	0,48	0,26	0,32	0,65	0,75	0,80	71,43	0,28	0,03	25,19	0,17	0,03
0,88	- 0,01	0,94	- 0,10	0,70	- 0,17	0,28	0,66	0,26	0,44	0,65	0,75	1,10	54,22	0,27	0,03	19,01	0,17	0,03
0,88	0,01	1,12	- 0,01	0,82	- 0,10	0,28	0,84	0,26	0,56	0,65	0,75	1,40	54,08	0,26	0,03	14,33	0,17	0,03
0,89	0,04	1,30	0,10	0,94	- 0,02	0,28	1,02	0,26	0,68	0,65	0,75	1,70	45,17	0,27	0,03	10,74	0,18	0,03
0,89	0,07	1,48	0,21	1,06	0,06	0,28	1,20	0,26	0,80	0,65	0,75	2,00	49,85	0,26	0,03	8,20	0,21	0,02
0,90	0,11	1,66	0,33	1,18	0,16	0,28	1,38	0,26	0,92	0,65	0,75	2,30	31,41	0,27	0,03	8,17	0,26	0,02
1,08	0,04	0,58	- 0,23	0,56	- 0,24	0,28	0,30	0,36	0,20	0,65	1,05	0,50	26,77	0,30	0,03	27,50	0,18	0,03
1,08	0,06	0,76	- 0,15	0,68	- 0,18	0,28	0,48	0,36	0,32	0,65	1,05	0,80	33,87	0,27	0,03	26,72	0,20	0,03
1,08	0,09	0,94	- 0,07	0,80	- 0,11	0,28	0,66	0,36	0,44	0,65	1,05	1,10	44,46	0,27	0,03	24,03	0,20	0,03
1,08	0,11	1,12	0,02	0,92	- 0,04	0,28	0,84	0,36	0,56	0,65	1,05	1,40	69,26	0,27	0,03	18,04	0,20	0,03
1,09	0,14	1,30	0,12	1,04	0,04	0,28	1,02	0,36	0,68	0,65	1,05	1,70	58,61	0,26	0,03	13,47	0,19	0,03
1,10	0,17	1,48	0,23	1,16	0,13	0,28	1,20	0,36	0,80	0,65	1,05	2,00	35,55	0,26	0,03	9,49	0,19	0,03
1,11	0,21	1,66	0,36	1,28	0,22	0,28	1,38	0,36	0,92	0,65	1,05	2,30	27,05	0,26	0,03	7,62	0,23	0,02
1,28	0,15	0,58	- 0,20	0,66	- 0,18	0,28	0,30	0,46	0,20	0,65	1,35	0,50	55,00	0,29	0,03	25,37	0,17	0,03
1,28	0,17	0,76	- 0,13	0,78	- 0,12	0,28	0,48	0,46	0,32	0,65	1,35	0,80	40,11	0,28	0,03	25,79	0,20	0,03
1,29	0,20	0,94	- 0,04	0,90	- 0,05	0,28	0,66	0,46	0,44	0,65	1,35	1,10	37,59	0,27	0,03	25,03	0,22	0,03
1,29	0,23	1,12	0,05	1,02	0,02	0,28	0,84	0,46	0,56	0,65	1,35	1,40	41,52	0,27	0,03	22,86	0,23	0,03
1,30	0,26	1,30	0,15	1,14	0,11	0,28	1,02	0,46	0,68	0,65	1,35	1,70	50,96	0,26	0,03	16,70	0,22	0,03
1,30	0,29	1,48	0,26	1,26	0,20	0,28	1,20	0,46	0,80	0,65	1,35	2,00	45,83	0,26	0,03	12,18	0,21	0,03
1,31	0,33	1,66	0,39	1,38	0,29	0,28	1,38	0,46	0,92	0,65	1,35	2,30	50,58	0,27	0,03	8,61	0,22	0,03
1,49	0,28	0,58	- 0,17	0,76	- 0,11	0,28	0,30	0,56	0,20	0,65	1,65	0,50	48,26	0,29	0,03	23,68	0,17	0,03
1,50	0,30	0,76	- 0,09	0,88	- 0,05	0,28	0,48	0,56	0,32	0,65	1,65	0,80	48,58	0,28	0,03	26,87	0,18	0,03
1,50	0,33	0,94	- 0,01	1,00	0,02	0,28	0,66	0,56	0,44	0,65	1,65	1,10	58,36	0,27	0,03	24,95	0,21	0,03
1,50	0,36	1,12	0,08	1,12	0,10	0,28	0,84	0,56	0,56	0,65	1,65	1,40	60,86	0,26	0,03	25,37	0,25	0,03
1,51	0,39	1,30	0,18	1,24	0,18	0,28	1,02	0,56	0,68	0,65	1,65	1,70	37,52	0,26	0,03	18,82	0,27	0,03
1,52	0,42	1,48	0,30	1,36	0,27	0,28	1,20	0,56	0,80	0,65	1,65	2,00	42,94	0,27	0,03	14,98	0,24	0,03
1,52	0,46	1,66	0,42	1,48	0,37	0,28	1,38	0,56	0,92	0,65	1,65	2,30	44,35	0,25	0,03	12,48	0,24	0,03
1,71	0,42	0,58	- 0,14	0,86	- 0,04	0,28	0,30	0,66	0,20	0,65	1,95	0,50	44,91	0,31	0,03	25,76	0,18	0,02
1,71	0,45	0,76	- 0,06	0,98	0,03	0,28	0,48	0,66	0,32	0,65	1,95	0,80	41,27	0,30	0,03	28,14	0,19	0,03
1,71	0,47	0,94	0,02	1,10	0,10	0,28	0,66	0,66	0,44	0,65	1,95	1,10	42,60	0,28	0,03	26,96	0,21	0,03
1,72	0,50	1,12	0,12	1,22	0,18	0,28	0,84	0,66	0,56	0,65	1,95	1,40	42,12	0,27	0,03	25,08	0,24	0,03
1,72	0,53	1,30	0,22	1,34	0,27	0,28	1,02	0,66	0,68	0,65	1,95	1,70	50,12	0,27	0,03	21,30	0,28	0,03
1,73	0,57	1,48	0,34	1,46	0,36	0,28	1,20	0,66	0,80	0,65	1,95	2,00	41,19	0,27	0,03	17,24	0,28	0,03
1,74	0,61	1,66	0,46	1,58	0,46	0,28	1,38	0,66	0,92	0,65	1,95	2,30	41,55	0,27	0,03	17,30	0,27	0,03
1,93	0,59	0,58	- 0,10	0,97	0,05	0,28	0,30	0,77	0,20	0,65	2,25	0,50	46,43	0,31	0,03	28,03	0,20	0,02
1,93	0,61	0,76	- 0,02	1,09	0,12	0,28	0,48	0,77	0,32	0,65	2,25	0,80	56,69	0,29	0,03	32,90	0,21	0,02
1,93	0,64	0,94	0,06	1,21	0,19	0,28	0,66	0,77	0,44	0,65	2,25	1,10	48,92	0,26	0,03	29,56	0,23	0,02
1,94	0,67	1,12	0,16	1,33	0,27	0,28	0,84	0,77	0,56	0,65	2,25	1,40	43,42	0,26	0,03	25,71	0,25	0,02
1,94	0,70	1,30	0,26	1,45	0,36	0,28	1,02	0,77	0,68	0,65	2,25	1,70	55,41	0,27	0,03	23,63	0,27	0,03
1,95	0,74	1,48	0,38	1,57	0,46	0,28	1,20	0,77	0,80	0,65	2,25	2,00	39,58	0,26	0,03	18,57	0,28	0,03
1,96	0,78	1,66	0,51	1,69	0,56	0,28	1,38	0,77	0,92	0,65	2,25	2,30	41,78	0,27	0,03	19,97	0,29	0,03
0,84	- 0,04	0,72	- 0,21	0,35	- 0,32	0,42	0,30	0,15	0,20	0,95	0,45	0,50	43,12	0,27	0,03	26,48	0,15	0,03
0,84	- 0,02	0,90	- 0,14	0,47	- 0,26	0,42	0,48	0,15	0,32	0,95	0,45	0,80	44,83	0,27	0,03	20,68	0,16	0,03
0,85	0,01	1,08	- 0,05	0,59	- 0,19	0,42	0,66	0,15	0,44	0,95	0,45	1,10	42,06	0,26	0,03	14,80	0,16	0,03
0,85	0,03	1,26	0,04	0,71	- 0,12	0,42	0,84	0,15	0,56	0,95	0,45	1,40	50,30	0,26	0,03	11,37	0,18	0,03
0,86	0,06	1,44	0,14	0,83	- 0,05	0,42	1,02	0,15	0,68	0,95	0,45	1,70	54,80	0,26	0,03	7,67	0,22	0,03
0,86	0,09	1,62	0,26	0,95	0,04	0,42	1,20	0,15	0,80	0,95	0,45	2,00	31,94	0,26	0,03	6,76	0,25	0,02
0,87	0,13	1,80	0,38	1,07	0,13	0,42	1,38	0,15	0,92	0,95	0,45	2,30	33,13	0,27	0,03	8,70	0,26	0,02

1,02	0,10	1,03	-	0,07	0,47	-	0,23	0,55	0,48	0,15	0,32	1,25	0,45	0,80	31,89	0,26	0,03	19,99	0,16	0,03
1,02	0,13	1,21		0,02	0,59	-	0,16	0,55	0,66	0,15	0,44	1,25	0,45	1,10	57,24	0,26	0,03	13,69	0,16	0,03
1,03	0,15	1,39		0,11	0,71	-	0,09	0,55	0,84	0,15	0,56	1,25	0,45	1,40	58,31	0,27	0,03	10,09	0,18	0,03
1,03	0,18	1,57		0,22	0,83	-	0,01	0,55	1,02	0,15	0,68	1,25	0,45	1,70	49,09	0,26	0,03	6,62	0,22	0,03
1,04	0,22	1,75		0,34	0,95		0,07	0,55	1,20	0,15	0,80	1,25	0,45	2,00	42,14	0,27	0,03	6,40	0,24	0,02
1,05	0,25	1,93		0,47	1,07		0,17	0,55	1,38	0,15	0,92	1,25	0,45	2,30	40,75	0,26	0,03	8,18	0,26	0,02
1,22	0,17	0,85	-	0,13	0,46	-	0,24	0,55	0,30	0,26	0,20	1,25	0,75	0,50	48,98	0,27	0,03	27,15	0,16	0,03
1,22	0,20	1,03	-	0,05	0,58	-	0,18	0,55	0,48	0,26	0,32	1,25	0,75	0,80	59,78	0,27	0,03	23,81	0,17	0,03
1,23	0,22	1,21		0,04	0,70	-	0,11	0,55	0,66	0,26	0,44	1,25	0,75	1,10	41,26	0,26	0,03	17,52	0,17	0,03
1,23	0,25	1,39		0,14	0,82	-	0,04	0,55	0,84	0,26	0,56	1,25	0,75	1,40	48,16	0,26	0,03	12,25	0,17	0,03
1,24	0,28	1,57		0,25	0,94		0,04	0,55	1,02	0,26	0,68	1,25	0,75	1,70	51,18	0,27	0,03	8,74	0,18	0,03
1,24	0,31	1,75		0,36	1,06		0,13	0,55	1,20	0,26	0,80	1,25	0,75	2,00	50,11	0,26	0,03	7,70	0,21	0,03
1,25	0,35	1,93		0,49	1,18		0,22	0,55	1,38	0,26	0,92	1,25	0,75	2,30	41,51	0,28	0,03	7,37	0,25	0,02
1,42	0,28	0,85	-	0,10	0,56	-	0,18	0,55	0,30	0,36	0,20	1,25	1,05	0,50	37,09	0,27	0,03	26,26	0,19	0,03
1,43	0,31	1,03	-	0,02	0,68	-	0,12	0,55	0,48	0,36	0,32	1,25	1,05	0,80	39,42	0,26	0,03	25,62	0,19	0,03
1,43	0,33	1,21		0,07	0,80	-	0,05	0,55	0,66	0,36	0,44	1,25	1,05	1,10	38,58	0,27	0,03	23,08	0,19	0,03
1,43	0,36	1,39		0,17	0,92		0,02	0,55	0,84	0,36	0,56	1,25	1,05	1,40	50,07	0,26	0,03	16,32	0,19	0,03
1,44	0,39	1,57		0,27	1,04		0,10	0,55	1,02	0,36	0,68	1,25	1,05	1,70	28,93	0,27	0,03	12,24	0,18	0,03
1,45	0,43	1,75		0,39	1,16		0,19	0,55	1,20	0,36	0,80	1,25	1,05	2,00	34,51	0,26	0,03	9,60	0,19	0,03
1,46	0,46	1,93		0,52	1,28		0,29	0,55	1,38	0,36	0,92	1,25	1,05	2,30	46,31	0,26	0,03	7,55	0,23	0,03
1,63	0,40	0,85	-	0,07	0,66	-	0,12	0,55	0,30	0,46	0,20	1,25	1,35	0,50	50,71	0,26	0,03	25,59	0,19	0,03
1,63	0,43	1,03		0,01	0,78	-	0,06	0,55	0,48	0,46	0,32	1,25	1,35	0,80	50,93	0,27	0,03	24,66	0,20	0,03
1,64	0,45	1,21		0,10	0,90		0,01	0,55	0,66	0,46	0,44	1,25	1,35	1,10	53,41	0,26	0,03	24,44	0,22	0,03
1,64	0,48	1,39		0,20	1,02		0,09	0,55	0,84	0,46	0,56	1,25	1,35	1,40	63,00	0,27	0,03	21,10	0,22	0,03
1,65	0,52	1,57		0,30	1,14		0,17	0,55	1,02	0,46	0,68	1,25	1,35	1,70	65,19	0,26	0,03	16,11	0,21	0,03
1,65	0,55	1,75		0,42	1,26		0,26	0,55	1,20	0,46	0,80	1,25	1,35	2,00	38,34	0,27	0,03	13,32	0,20	0,03
1,66	0,59	1,93		0,56	1,38		0,36	0,55	1,38	0,46	0,92	1,25	1,35	2,30	38,09	0,26	0,03	10,76	0,22	0,03
1,84	0,54	0,85	-	0,04	0,76	-	0,05	0,55	0,30	0,56	0,20	1,25	1,65	0,50	50,56	0,27	0,03	25,64	0,19	0,03
1,85	0,57	1,03		0,04	0,88		0,02	0,55	0,48	0,56	0,32	1,25	1,65	0,80	42,82	0,28	0,03	25,89	0,20	0,03
1,85	0,59	1,21		0,13	1,00		0,09	0,55	0,66	0,56	0,44	1,25	1,65	1,10	47,98	0,27	0,03	24,09	0,22	0,03
1,85	0,62	1,39		0,23	1,12		0,17	0,55	0,84	0,56	0,56	1,25	1,65	1,40	40,70	0,26	0,03	24,52	0,25	0,03
1,86	0,66	1,57		0,34	1,24		0,25	0,55	1,02	0,56	0,68	1,25	1,65	1,70	46,15	0,26	0,03	18,69	0,25	0,03
1,87	0,69	1,75		0,46	1,36		0,34	0,55	1,20	0,56	0,80	1,25	1,65	2,00	49,85	0,26	0,03	16,34	0,23	0,03
1,87	0,74	1,93		0,60	1,48		0,45	0,55	1,38	0,56	0,92	1,25	1,65	2,30	39,41	0,27	0,03	15,53	0,24	0,03
2,06	0,70	0,85	-	0,00	0,86		0,03	0,55	0,30	0,66	0,20	1,25	1,95	0,50	48,64	0,26	0,03	28,24	0,20	0,02
2,06	0,72	1,03		0,08	0,98		0,10	0,55	0,48	0,66	0,32	1,25	1,95	0,80	48,24	0,26	0,03	28,44	0,21	0,02
2,06	0,75	1,21		0,17	1,10		0,17	0,55	0,66	0,66	0,44	1,25	1,95	1,10	40,98	0,28	0,03	25,43	0,22	0,03
2,07	0,79	1,39		0,27	1,22		0,25	0,55	0,84	0,66	0,56	1,25	1,95	1,40	48,72	0,26	0,03	24,69	0,25	0,03
2,07	0,82	1,57		0,38	1,34		0,34	0,55	1,02	0,66	0,68	1,25	1,95	1,70	39,88	0,26	0,03	21,56	0,27	0,03
2,08	0,86	1,75		0,50	1,46		0,43	0,55	1,20	0,66	0,80	1,25	1,95	2,00	36,28	0,26	0,03	18,19	0,27	0,03
2,09	0,90	1,93		0,64	1,58		0,54	0,55	1,38	0,66	0,92	1,25	1,95	2,30	36,71	0,27	0,03	18,69	0,27	0,03
2,28	0,88	0,85		0,04	0,97		0,12	0,55	0,30	0,77	0,20	1,25	2,25	0,50	51,39	0,30	0,03	28,76	0,21	0,02
2,28	0,91	1,03		0,12	1,09		0,19	0,55	0,48	0,77	0,32	1,25	2,25	0,80	49,32	0,27	0,03	31,39	0,22	0,02
2,28	0,94	1,21		0,21	1,21		0,27	0,55	0,66	0,77	0,44	1,25	2,25	1,10	43,77	0,26	0,03	28,31	0,24	0,02
2,29	0,97	1,39		0,31	1,33		0,35	0,55	0,84	0,77	0,56	1,25	2,25	1,40	42,10	0,26	0,03	25,15	0,25	0,02
2,29	1,01	1,57		0,43	1,45		0,44	0,55	1,02	0,77	0,68	1,25	2,25	1,70	48,16	0,26	0,03	22,26	0,27	0,03
2,30	1,05	1,75		0,55	1,57		0,54	0,55	1,20	0,77	0,80	1,25	2,25	2,00	48,57	0,27	0,03	17,76	0,28	0,03
2,31	1,09	1,93		0,69	1,69		0,65	0,55	1,38	0,77	0,92	1,25	2,25	2,30	40,62	0,26	0,03	18,40	0,28	0,03
1,20	0,21	0,98	-	0,08	0,35	-	0,25	0,68	0,30	0,15	0,20	1,55	0,45	0,50	43,89	0,27	0,03	24,10	0,15	0,03
1,20	0,23	1,16		0,01	0,47	-	0,19	0,68	0,48	0,15	0,32	1,55	0,45	0,80	39,43	0,27	0,03	19,34	0,16	0,03
1,20	0,26	1,34		0,10	0,59	-	0,13	0,68	0,66	0,15	0,44	1,55	0,45	1,10	39,73	0,26	0,03	12,46	0,17	0,03
1,21	0,29	1,52		0,20	0,71	-	0,06	0,68	0,84	0,15	0,56	1,55	0,45	1,40	41,11	0,26	0,03	8,95	0,18	0,03
1,21	0,32	1,70		0,31	0,83		0,02	0,68	1,02	0,15	0,68	1,55	0,45	1,70	27,36	0,27	0,03	5,77	0,22	0,03
1,22	0,35	1,88		0,43	0,95		0,11	0,68	1,20	0,15	0,80	1,55	0,45	2,00	32,31	0,26	0,03	6,14	0,24	0,03
1,23	0,39	2,06		0,56	1,07		0,20	0,68	1,38	0,15	0,92	1,55	0,45	2,30	33,89	0,26	0,03	7,61	0,26	0,02
1,40	0,31	0,98	-	0,05	0,46	-	0,20	0,68	0,30	0,26	0,20	1,55	0,75	0,50	49,25	0,27	0,03	26,56	0,16	0,03

1,39	0,44	1,65	0,29	0,71	-	0,02	0,81	0,84	0,15	0,56	1,85	0,45	1,40	37,53	0,28	0,03	8,17	0,19	0,03
1,39	0,47	1,83	0,41	0,83	-	0,06	0,81	1,02	0,15	0,68	1,85	0,45	1,70	46,99	0,26	0,03	5,29	0,22	0,03
1,40	0,51	2,01	0,53	0,95	-	0,15	0,81	1,20	0,15	0,80	1,85	0,45	2,00	40,45	0,27	0,03	6,17	0,24	0,03
1,41	0,55	2,19	0,67	1,07	-	0,25	0,81	1,38	0,15	0,92	1,85	0,45	2,30	34,22	0,26	0,03	7,33	0,26	0,03
1,58	0,46	1,11	0,03	0,46	-	0,17	0,81	0,30	0,26	0,20	1,85	0,75	0,50	42,46	0,26	0,03	26,39	0,17	0,03
1,58	0,49	1,29	0,12	0,58	-	0,10	0,81	0,48	0,26	0,32	1,85	0,75	0,80	46,74	0,26	0,03	23,16	0,17	0,03
1,58	0,51	1,47	0,21	0,70	-	0,04	0,81	0,66	0,26	0,44	1,85	0,75	1,10	43,22	0,26	0,03	15,71	0,17	0,03
1,59	0,54	1,65	0,32	0,82	-	0,04	0,81	0,84	0,26	0,56	1,85	0,75	1,40	41,06	0,27	0,03	11,19	0,18	0,03
1,59	0,58	1,83	0,43	0,94	-	0,12	0,81	1,02	0,26	0,68	1,85	0,75	1,70	38,44	0,26	0,03	8,08	0,18	0,03
1,60	0,61	2,01	0,56	1,06	-	0,21	0,81	1,20	0,26	0,80	1,85	0,75	2,00	36,71	0,27	0,03	8,23	0,21	0,03
1,61	0,66	2,19	0,70	1,18	-	0,31	0,81	1,38	0,26	0,92	1,85	0,75	2,30	46,66	0,26	0,03	7,88	0,25	0,03
1,78	0,58	1,11	0,06	0,56	-	0,11	0,81	0,30	0,36	0,20	1,85	1,05	0,50	49,47	0,27	0,03	26,44	0,21	0,03
1,79	0,61	1,29	0,15	0,68	-	0,04	0,81	0,48	0,36	0,32	1,85	1,05	0,80	47,21	0,27	0,03	25,08	0,19	0,03
1,79	0,63	1,47	0,24	0,80	-	0,02	0,81	0,66	0,36	0,44	1,85	1,05	1,10	32,74	0,26	0,03	21,69	0,19	0,03
1,79	0,67	1,65	0,35	0,92	-	0,10	0,81	0,84	0,36	0,56	1,85	1,05	1,40	42,32	0,27	0,03	16,00	0,19	0,03
1,80	0,70	1,83	0,46	1,04	-	0,18	0,81	1,02	0,36	0,68	1,85	1,05	1,70	42,97	0,26	0,03	13,00	0,18	0,03
1,81	0,74	2,01	0,59	1,16	-	0,28	0,81	1,20	0,36	0,80	1,85	1,05	2,00	42,40	0,26	0,03	11,20	0,19	0,03
1,82	0,78	2,19	0,73	1,28	-	0,38	0,81	1,38	0,36	0,92	1,85	1,05	2,30	31,10	0,26	0,03	10,15	0,23	0,03
1,99	0,71	1,11	0,09	0,66	-	0,04	0,81	0,30	0,46	0,20	1,85	1,35	0,50	36,97	0,26	0,03	26,59	0,21	0,03
1,99	0,74	1,29	0,18	0,78	-	0,02	0,81	0,48	0,46	0,32	1,85	1,35	0,80	55,73	0,26	0,03	24,17	0,22	0,03
2,00	0,77	1,47	0,27	0,90	-	0,09	0,81	0,66	0,46	0,44	1,85	1,35	1,10	30,40	0,27	0,03	23,83	0,22	0,03
2,00	0,80	1,65	0,38	1,02	-	0,17	0,81	0,84	0,46	0,56	1,85	1,35	1,40	37,40	0,26	0,03	20,72	0,22	0,03
2,01	0,84	1,83	0,50	1,14	-	0,26	0,81	1,02	0,46	0,68	1,85	1,35	1,70	35,29	0,27	0,03	17,48	0,20	0,03
2,02	0,88	2,01	0,63	1,26	-	0,35	0,81	1,20	0,46	0,80	1,85	1,35	2,00	51,72	0,27	0,03	15,23	0,19	0,03
2,02	0,92	2,19	0,77	1,38	-	0,45	0,81	1,38	0,46	0,92	1,85	1,35	2,30	49,10	0,26	0,03	14,71	0,22	0,03
2,20	0,87	1,11	0,13	0,76	-	0,03	0,81	0,30	0,56	0,20	1,85	1,65	0,50	44,10	0,27	0,03	27,46	0,21	0,03
2,21	0,89	1,29	0,21	0,88	-	0,10	0,81	0,48	0,56	0,32	1,85	1,65	0,80	51,55	0,27	0,03	24,63	0,22	0,03
2,21	0,93	1,47	0,31	1,00	-	0,17	0,81	0,66	0,56	0,44	1,85	1,65	1,10	52,35	0,26	0,03	23,72	0,23	0,03
2,21	0,96	1,65	0,42	1,12	-	0,25	0,81	0,84	0,56	0,56	1,85	1,65	1,40	45,73	0,26	0,03	24,44	0,25	0,03
2,22	1,00	1,83	0,54	1,24	-	0,34	0,81	1,02	0,56	0,68	1,85	1,65	1,70	47,02	0,26	0,03	19,62	0,24	0,03
2,23	1,04	2,01	0,67	1,36	-	0,43	0,81	1,20	0,56	0,80	1,85	1,65	2,00	37,42	0,27	0,03	17,65	0,23	0,03
2,24	1,08	2,19	0,81	1,48	-	0,54	0,81	1,38	0,56	0,92	1,85	1,65	2,30	38,54	0,26	0,03	17,94	0,24	0,03
2,42	1,04	1,11	0,17	0,86	-	0,11	0,81	0,30	0,66	0,20	1,85	1,95	0,50	42,77	0,27	0,03	28,50	0,22	0,03
2,42	1,07	1,29	0,25	0,98	-	0,18	0,81	0,48	0,66	0,32	1,85	1,95	0,80	51,54	0,28	0,03	26,56	0,23	0,03
2,43	1,10	1,47	0,35	1,10	-	0,26	0,81	0,66	0,66	0,44	1,85	1,95	1,10	56,75	0,26	0,03	24,63	0,24	0,03
2,43	1,14	1,65	0,46	1,22	-	0,34	0,81	0,84	0,66	0,56	1,85	1,95	1,40	46,47	0,26	0,03	24,45	0,26	0,03
2,44	1,17	1,83	0,58	1,34	-	0,43	0,81	1,02	0,66	0,68	1,85	1,95	1,70	45,92	0,26	0,03	21,35	0,27	0,03
2,44	1,22	2,01	0,71	1,46	-	0,53	0,81	1,20	0,66	0,80	1,85	1,95	2,00	32,95	0,27	0,03	18,54	0,27	0,03
2,45	1,26	2,19	0,86	1,58	-	0,64	0,81	1,38	0,66	0,92	1,85	1,95	2,30	47,50	0,27	0,03	18,77	0,26	0,03
2,64	1,24	1,11	0,21	0,97	-	0,21	0,81	0,30	0,77	0,20	1,85	2,25	0,50	50,07	0,26	0,03	27,57	0,22	0,02
2,64	1,27	1,29	0,30	1,09	-	0,28	0,81	0,48	0,77	0,32	1,85	2,25	0,80	50,48	0,26	0,03	27,13	0,23	0,03
2,65	1,30	1,47	0,40	1,21	-	0,36	0,81	0,66	0,77	0,44	1,85	2,25	1,10	41,17	0,26	0,03	28,13	0,25	0,02
2,65	1,34	1,65	0,51	1,33	-	0,44	0,81	0,84	0,77	0,56	1,85	2,25	1,40	47,22	0,27	0,03	24,26	0,26	0,03
2,66	1,38	1,83	0,63	1,45	-	0,54	0,81	1,02	0,77	0,68	1,85	2,25	1,70	36,49	0,27	0,03	18,66	0,27	0,03
2,67	1,43	2,01	0,76	1,57	-	0,64	0,81	1,20	0,77	0,80	1,85	2,25	2,00	32,88	0,27	0,03	15,55	0,27	0,02
2,68	1,48	2,19	0,91	1,69	-	0,75	0,81	1,38	0,77	0,92	1,85	2,25	2,30	26,97	0,28	0,03	16,26	0,28	0,02
1,56	0,52	1,24	0,10	0,35	-	0,18	0,94	0,30	0,15	0,20	2,15	0,45	0,50	29,06	0,27	0,03	24,06	0,16	0,03
1,56	0,55	1,42	0,19	0,47	-	0,11	0,94	0,48	0,15	0,32	2,15	0,45	0,80	41,65	0,26	0,03	18,01	0,17	0,03
1,57	0,58	1,60	0,29	0,59	-	0,05	0,94	0,66	0,15	0,44	2,15	0,45	1,10	45,24	0,25	0,03	11,05	0,18	0,03
1,57	0,61	1,78	0,40	0,71	-	0,03	0,94	0,84	0,15	0,56	2,15	0,45	1,40	36,39	0,26	0,03	8,04	0,19	0,03
1,58	0,64	1,96	0,52	0,83	-	0,11	0,94	1,02	0,15	0,68	2,15	0,45	1,70	37,65	0,26	0,03	5,51	0,22	0,03
1,58	0,68	2,14	0,65	0,95	-	0,20	0,94	1,20	0,15	0,80	2,15	0,45	2,00	36,30	0,27	0,03	6,73	0,24	0,03
1,59	0,72	2,32	0,79	1,07	-	0,30	0,94	1,38	0,15	0,92	2,15	0,45	2,30	39,67	0,27	0,03	7,74	0,25	0,03
1,76	0,63	1,24	0,13	0,46	-	0,12	0,94	0,30	0,26	0,20	2,15	0,75	0,50	42,95	0,27	0,03	26,78	0,17	0,03
1,76	0,66	1,42	0,22	0,58	-	0,06	0,94	0,48	0,26	0,32	2,15	0,75	0,80	43,57	0,27	0,03	23,00	0,17	0,03
1,77	0,69	1,60	0,32	0,70	-	0,01	0,94	0,66	0,26	0,44	2,15	0,75	1,10	42,71	0,26	0,03	15,64	0,18	0,03

❖ *Scénario de court-circuit (perturbation) appliqué au système multimachine :*

La perturbation appliquée au système multimachine est un court-circuit au nœud 4. À l'instant $t=1s$, on provoque un court-circuit triphasé pendant 90 ms puis on ouvre de la ligne 4-5 pendant 15 ms et ensuite on rétablit cette ligne. Le temps de simulation total est de 10 s[10].