



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Telidji- Laghouat

- ▶ Faculté : Technologie
- ▶ Département : Electrotechnique
- ▶ Option : Réseaux électriques

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

Abdelali Salah Eddine

Lakas Yahia

THEME

Etude et analyse de l'influence des éoliennes dans un réseau électrique

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
ARIF Salem	Professeur	Président
CHETTIH Saliha	Professeur	Examinatrice
OMRANE Mohammed	MCA	Rapporteur
BOUCHIBA Oumelkheir	MCB	Co- Rapporteur

2022/2023

Remerciements

C'est avec un grand plaisir que nous consacrons ces quelques lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire. Nous remercions sincèrement le professeur ARIF Salem, pour le grand honneur d'avoir accepté de présider le jury de soutenance. Nous tenons à rendre un grand hommage à notre encadreur, le Dr. Omrane Mohammed, ainsi qu'au Dr. Oumelkhier BOUCHIBA et notre professeur CHETTIH Saliha, qui ont suivi de près ce projet avec le sérieux et la compétence qui les caractérisent. Qu'ils trouvent ici l'expression de nos profondes gratitudes pour l'intérêt qu'ils n'ont jamais cessé de porter au projet, pour leur disponibilité et pour le soutien qu'ils m'ont prodigué.

Dédicace

Je dédie ce mémoire

À l'âme de mon père,

Qui m'a encouragé à terminer mon cursus universitaire

À la lumière de mes jours, la source de mes efforts

La flamme de mon cœur, Ma mère que j'adore

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé

Qui étaient toujours à mes cotes,

Tous ceux qui m'ont donné la force de continuer

Lakas Yahia

Dédicace

Je dédie ce mémoire

À ma très chère maman, une amie et une confidente qui m'a soutenue dans mes choix et a su toujours m'encourager, quelles que soient les difficultés que j'ai pu rencontrer tout au long de mon cursus, ainsi qu'à mon père.

À ma sœur Zahia,

À mes frères, Mohamed et Brahim,

À toutes mes cousines, cousin (haloub adop.)

À mes amis, ceux de toujours,

Et à T. Halima.

Je ne manque pas l'occasion de remercier particulièrement mes tantes Kheira et Atika de m'avoir procuré l'aide dont j'avais besoin.

Je dédie ce mémoire à tous ceux qui ont contribué de près et de loin

À ma réussite dans mes études.

Abdelali Salah Eddine

ملخص

في هذا العمل، حاولنا تحليل السلوك الديناميكي لشبكة متعددة المولدات مكونة من منطقتين، حيث نقوم في كل مرة بزيادة معدل مشاركة مصدر الطاقة الناتج من توربينات الرياح. في الواقع، تم تجهيز جميع المولدات بمثبت الطاقة (PSS)، وهذه المثبتات مختلفة التركيب منها متعددة النطاقات، المتأخر والمتقدم وكذا PSS الذي مدخله تغير الاستطاعة، ويتم اختبار كل نوع من أنواع PSS لكل حالة من حالات معدل المشاركة.

أظهرت نتائج حساب المحاكاة بوضوح ان الذبذبات الكهرو ميكانيكية تتضخم مع الإدخال المتزايد لمصدر الطاقة المتجددة. علاوة على ذلك، وجد ان مثبتات الطاقة تعمل بشكل مختلف باختلاف نوعها من أجل إعادة النظام إلى توازنه.

الكلمات المفتاحية: الاستقرار الديناميكي، توربينات الرياح، مثبت الاستطاعة، ماكينة لا تزامنية بتغذية مزدوجة، معدل الاختراق.

Abstract

In this work, an attempt was made to analyze the dynamic behavior of a two-area multi-machine network, each time increasing the participation rate of renewable energy source. All the generators are equipped with a power system stabilizer (PSS), of which there are several types : multi-band, lead-lag and power variation PSS. Each type of PSS is tested for each participation rate.

The results of the simulation calculations show that the electromechanical oscillations amplify with increasing insertion of the renewable energy source. In addition, the PSSs act differently to bring the system back to equilibrium.

Key words: Dynamic Stability, Wind Turbines, PSS, MADA, Penetration Rate.

Résumé

Dans ce travail, on a tenté d'analyser le comportement dynamique d'un réseau multi-machines à deux zones, ceci en augmentant chaque fois le taux de participation d'une source à énergie renouvelable. En effet, tous les générateurs sont dotés d'un stabilisateur de puissance PSS (power system stabilizer), ces stabilisateurs sont de plusieurs types à savoir le multi-band, le lead-lag et un PSS à variation de puissance, chaque type de PSS est testé pour chaque taux de participation.

Les résultats de calculs par simulation ont visiblement marqué les oscillations électromécaniques qui s'amplifient avec l'insertion croissante de la source à énergie renouvelable. De plus, les PSSs agissent différemment afin de ramener le système à son équilibre.

Mots clés : Stabilité Dynamique, Eoliennes, PSS, MADA, Taux de Pénétration.

Table des matières

Résumé	V
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : Production et transport de l'énergie éolienne	
I.1. Introduction	3
I.2. Historique de l'énergie éolienne dans le monde	3
I.3. Énergie éolienne dans le monde.....	4
I.4. Système éolien	4
I.5. Principaux composants d'une éolienne.....	5
I.6. Différents types d'éoliennes	7
I.7. Conversion d'énergie éolienne.....	8
I.7.1. Conversion Cinétique – Mécanique	8
I.7.2. Conversion Mécanique – Electrique	9
I.7.2.1. Systèmes non couplés au réseau alternatif.....	9
I.7.2.2. Systèmes couplés au réseau alternatif.....	9
I.8. Système de production et transport d'énergie électrique	12
I.9. Conclusion.....	13
Chapitre II Concept de la stabilité dans les réseaux électriques	
II.1. Introduction.....	14
II.2. Modélisation des différents éléments du réseau électrique.....	14
II.2.1. Modèle du générateur	14
II.2.2. Système de transmission de l'énergie (lignes, transformateur)	15
II.2.2.1. Lignes.....	15
II.2.2.2. Transformateur.....	16
II.3. Charge.....	16
II.4. Modélisation du système éolien.....	17
II.4.1. Modèle de la turbine éolienne.....	17

II.4.2. Modélisation de multiplicateur	19
II.4.3. Modélisation de la connexion Onduleur – Réseau	20
II.5. Exigence de la stabilité	21
II.6. Stabilité des réseaux électriques	22
II.7. Types de stabilité.....	22
II.7.1. Classification de la stabilité d’un système électro-énergétique	22
II.7.1.1. Stabilité statique (de tension).....	22
II.7.1.2. Stabilité dynamique (de fréquence)	22
II.7.1.3. Stabilité transitoire (de l’angle)	22
II.8. Classification de la stabilité de réseau d’énergie électrique	23
II.9. Stabilité angulaire	23
II.9.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations (en petits signaux)	24
II.9.2. Stabilité angulaire aux grandes perturbations.....	24
II.10. Stabilité de la tension.....	25
II.10.1. Stabilité de la tension aux grandes perturbations.....	25
II.10.2. Stabilité de la tension aux petites perturbations.....	25
II.11. Stabilité de fréquence.....	26
II.12. Causes d’instabilité	27
II.13. Amélioration de la stabilité	27
II.13.1. Amélioration de la stabilité par les techniques classiques	27
II.13.2. Amélioration de la stabilité par les techniques modernes.....	28
II.14. Conclusion	28
 Chapitre III Simulation et résultats	
III.1 Introduction	30
III.2 Simulation et conclusions.....	30
III.3 Applications et étude de cas par MATLAB/Simulink	31
III.3.1 Description du système.....	31

III.4 Amortissement des oscillatoires inter-régions :	34
III.5 Résultat de simulation :	34
III.5.1 Analyse des résultats :	41
III.6 Conclusion.....	43
CONCLUSION GENERALE	44
Bibliographie	45

Liste des figures

Figure I. 1 : Principaux composants d'une éolienne.	5
Figure I. 2: Les éléments consécutifs de la nacelle.	7
Figure I. 3: Conversion de l'énergie cinétique du vent.	8
Figure I.4:Aérogénérateur à base d'une génératrice asynchrone à cage	9
Figure I.5 : Système éolien à base d'une machine synchrone.	10
Figure I.6:Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable	10
Figure I. 7:Contrôle de glissement par l'énergie dissipée. Error! Bookmark not defined.	
Figure I.8: Structures de Transfert de la puissance rotorique sur le réseau.	12
Figure I.9: Structure de base d'un réseau d'énergie électrique.	13
Figure II. 1: Représentation simplifié d'une machine synchrone.	15
Figure II. 2:Modèle en π des lignes.	15
Figure II. 3:Modèle simplifié du transformateur.	16
Figure II. 4:Modèle d'une charge électrique.	17
Figure II. 5:Eolienne basée sur une MADA connectée au réseau	17
Figure II. 6:Turbine éolienne	18
Figure II. 7:Modèle d'éolienne avec un contrôle de vitesse	19
Figure II. 8: Schéma bloc de processus d'injection	20
Figure II. 9:Classification des différents types de la stabilité de système de puissance	23
Figure II. 10:Variation d'angle de rotor	24
Figure II. 11:Perturbations de tension dans les réseaux	26
Figure III. 1 : Système multi-machine étudié par MATLAB-SIMULINK.	32
Figure III. 2: Représentation schématique des deux régions du système étudié.	32
Figure III. 3: Intégration d'une éolienne dans area 1.	33
Figure III. 4:Choix de PSSs	34
Figure III. 5:Exemple mécanique analogue aux oscillations inter-régions.	34

Figure III. 6: oscillations électromécaniques pour 10% taux de pénétration.	36
Figure III. 7: oscillations électromécaniques pour 15% taux de pénétration.	37
Figure III. 8: oscillations électromécaniques pour 20% taux de pénétration.	38
Figure III. 9: oscillations électromécaniques pour 25% taux de pénétration.	39
Figure III. 10: oscillations électromécaniques pour 30% taux de pénétration.	40
Figure III. 11: Effet de taux de pénétration dans G1 avec PSS type 2.	42

Liste des tableaux

Tableau III. 1 : Caractéristiques de l'éolienne.	33
Tableau III.2: comparaison entre la performance des PSSs par rapport à l'intégration.	43

Liste des abréviations :

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation

PSS: Power System Stabilizer

MPPT: Maximum Power Point Tracking

FACTS: Flexible Alternating Current Transmission System

HVDC: High Voltage Direct Current

MAS: Machine Asynchrone

MS: Machine synchrone

GRT : gestionnaire du réseau de transport

GRD : gestionnaire du réseau de distribution

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'avancement de l'humanité dépend de l'énergie. Compte tenu de la croissance de la population mondiale et de l'augmentation rapide de la consommation depuis la période industrielle, sa demande manquera de l'élément le plus crucial. En fait, même si l'énergie est abordable maintenant, il est possible qu'elle ne le soit plus demain. Afin de planifier l'avenir, de nombreuses sources d'énergie doivent être prises en compte ainsi que les facteurs économiques, politiques et environnementaux. S'orienter vers un véritable coût de l'énergie qui intègre les externalités actuelles est crucial en particulier. L'étude et le développement mondiaux des énergies renouvelables ont été relancés par la crise pétrolière. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne se distingue comme étant dans une situation favorable, non pas comme un substitut aux sources traditionnelles mais comme une source d'énergie qui complète d'autres sources.

Les chercheurs en génie électrique se sont penchés sur des recherches visant à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie, en raison de la présence croissante des éoliennes dans le domaine de la production énergétique.

La variabilité et l'incertitude, sont les caractéristiques principales du vent. Par conséquent, il est essentiel d'évaluer l'impact de l'intégration des fermes éoliennes dans les réseaux électriques, en particulier en ce qui concerne leur stabilité dynamique et dans des conséquences critiques ou suite à une perturbation. Les générateurs liés aux éoliennes les plus utilisés dans ce contexte sont les machines à induction.

Dans ce contexte, cette étude a pour but de modéliser l'effet de la participation de la production éolienne, en vue de l'étude du comportement des réseaux électriques en présence d'un défaut symétrique provenant du réseau. Nos objectifs sont :

- Etude et modélisation des systèmes éoliens
- Intégration de ces systèmes éoliens dans le réseau électrique où les conditions de couplage sont nécessaires.
- Enfin, étude et analyse de la stabilité dynamique des réseaux électriques où le système éolien est intégré avant un défaut symétrique (court-circuit triphasé).
- Analyser l'impact du taux d'intégration de l'énergie éolienne sur le réseau électrique.
- Evaluer les performances du système électrique en termes de stabilité.
- Tester la réaction du PSS (Power System Stabilizer) en cas de court-circuit dans le réseau électrique.

C'est pour quoi on a divisé notre mémoire en trois chapitres :

INTRODUCTION GENERALE

Le premier chapitre présente les systèmes de productions éolienne,

Le second chapitre résume les modèles des éléments constituant un réseau électrique, le modèle du système éolien, et passe à identifier les réseaux électriques, et la stabilité aux réseaux électriques.

Le dernier chapitre expose le système électrique étudié, siège à plusieurs scénarios de taux de participation à la production des éoliennes. Les résultats des simulations effectuées sont exposés et discutés.

Ce mémoire et terminé par une conclusion générale

Chapitre I

Production et transport de l'énergie
éolienne

I.1. Introduction

L'énergie est essentielle à la vie et au développement économique, car elle est nécessaire à la fabrication des biens et aux déplacements. Sa consommation a considérablement augmenté ces dernières décennies, ce qui pose deux problèmes préoccupants : l'augmentation de l'effet de serre et l'épuisement des réserves d'énergie fossile. Par conséquent, l'énergie renouvelable, en particulier l'énergie éolienne, a été considérée comme une solution attrayante. L'objectif de cette étude est d'examiner cette forme d'énergie.

Ce chapitre vise à présenter le contexte dans lequel s'inscrit l'étude menée dans ce travail. Tout d'abord, il présente les différents types d'énergies renouvelables, ainsi que quelques chiffres mondiaux, Ensuite, les notions fondamentales du fonctionnement d'un système éolien et les équations associées sont rappelées.

I.2. Historique de l'énergie éolienne dans le monde

- Antiquité : Les premières utilisations documentées de l'énergie éolienne remontent à l'Antiquité. Les civilisations anciennes, notamment les Perses, les Chinois et les Égyptiens, utilisaient des moulins à vent pour mouliner le grain et pomper l'eau.
- Moyen Âge : Pendant le Moyen Âge, les moulins à vent ont joué un rôle crucial dans l'Europe médiévale. Les moulins à vent étaient utilisés pour diverses tâches, notamment le broyage du grain, la production d'huile, la production de papier, etc. Ces moulins à vent étaient généralement de conception horizontale avec des ailes en toile.
- 19e siècle : Le 19e siècle a été marqué par des avancées technologiques importantes dans le domaine de l'énergie éolienne. En 1887, Charles F. Brush a construit la première éolienne géante de 17 mètres de haut pour alimenter les résidences en électricité à Cleveland, aux États-Unis. Plus tard, en 1891, l'inventeur danois Poul la Cour a développé une éolienne avec une dynamo pour produire de l'électricité.
- 20e siècle : Au cours du 20e siècle, l'énergie éolienne a connu des périodes d'intérêt croissant et de déclin. Au début du siècle, les éoliennes ont été utilisées pour fournir de l'électricité dans les zones rurales éloignées et les régions côtières. Cependant, avec l'essor des combustibles fossiles, l'intérêt pour l'énergie éolienne a diminué.
- Fin du 20e siècle à aujourd'hui : À partir des années 1970, l'énergie éolienne a fait un retour significatif en raison des préoccupations croissantes concernant les émissions de gaz à effet de serre et le changement climatique. Les avancées technologiques ont permis de développer des éoliennes plus efficaces et de plus grande taille. Les parcs

Chapitre I : Production et transport de l'énergie éolienne

éoliens ont commencé à se développer à travers le monde, notamment en Europe, aux États-Unis et en Asie.

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable mature et largement utilisée dans de nombreux pays. Elle contribue de manière significative à la production d'électricité et à la transition vers des systèmes énergétiques plus durables et respectueux de l'environnement. Les investissements continus dans la recherche et le développement permettent d'améliorer encore l'efficacité et la rentabilité des éoliennes, ouvrant la voie à une utilisation accrue de l'énergie éolienne dans le futur [4].

I.3. Énergie éolienne dans le monde

La capacité installée mondiale de l'énergie éolienne était d'environ 743 GW.

La Chine était le pays leader en termes de capacité éolienne installée, avec plus de 280 GW, suivie des États-Unis, de l'Allemagne et de l'Inde.

L'énergie éolienne représentait une part significative de la production d'électricité dans plusieurs pays, notamment le Danemark, où elle couvrait plus de 50% de la consommation électrique, et le Portugal, où elle atteignait près de 25%.

L'Europe était la région avec la plus grande capacité éolienne installée, représentant environ 50% de la capacité mondiale.

I.4. Système éolien

L'énergie éolienne est produite par la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Les éoliennes sont des machines qui utilisent les pales pour capter le vent, ce qui entraîne la rotation d'un rotor relié à un générateur électrique. Le générateur produit alors de l'électricité qui est envoyée dans le réseau électrique.

Les éoliennes peuvent être de différentes tailles et puissances, en fonction de leur usage et de la force du vent disponible sur le site. Les plus grandes éoliennes atteignent maintenant des hauteurs de plusieurs dizaines de mètres et peuvent produire plusieurs mégawatts d'électricité [5].

L'énergie éolienne présente de nombreux avantages, notamment en termes de production d'électricité propre et renouvelable, de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de diminution de la dépendance aux énergies fossiles. De plus, les coûts de production de l'énergie éolienne ont considérablement baissé ces dernières années, ce qui la rend de plus en plus compétitive par rapport aux énergies fossiles.

Chapitre I : Production et transport de l'énergie éolienne

Cependant, l'énergie éolienne présente également des défis techniques et économiques. Tout d'abord, la production d'énergie éolienne est intermittente et dépendante de la force du vent, ce qui nécessite la mise en place de moyens de stockage pour assurer la continuité de l'approvisionnement électrique. De plus, la construction et l'installation des éoliennes peuvent avoir un impact environnemental important, notamment sur la faune et la flore locales, et les coûts initiaux de construction peuvent être élevés. Enfin, la production d'énergie éolienne dépend de la disponibilité de sites venteux, ce qui peut limiter le déploiement de cette technologie dans certaines régions.

I.5. Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :
(Figure I.1)

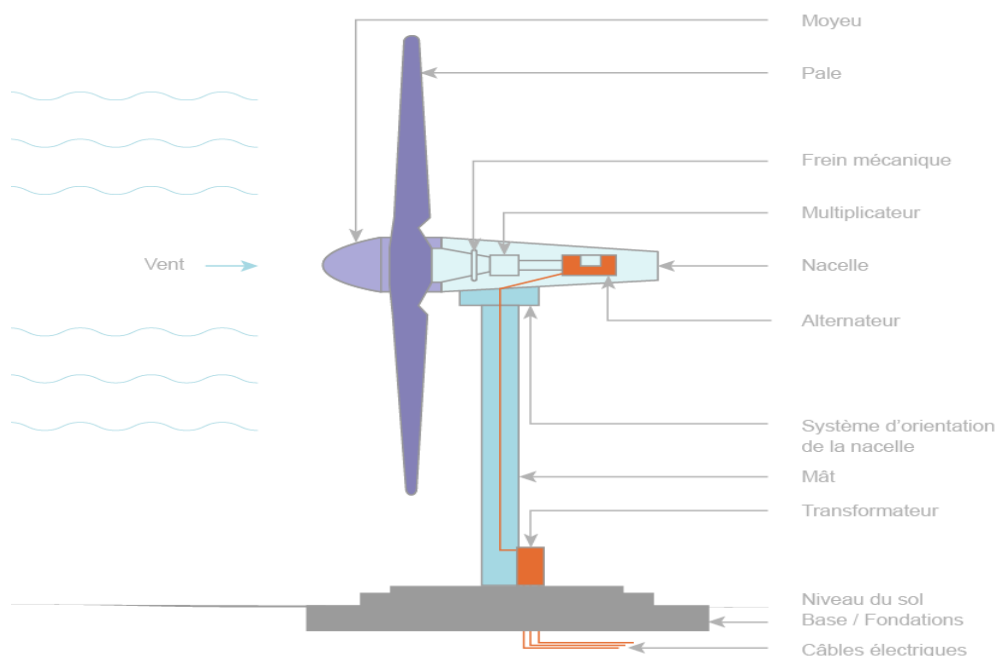


Figure I. 1 : Principaux composants d'une éolienne [5].

- La tour : En règle générale, il est préférable que la structure utilisée, qu'il s'agisse d'un tube d'acier ou éventuellement d'un treillis métallique, soit élevée afin de minimiser les perturbations à proximité du sol.
- Le rotor : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3. Le rotor est fixé à l'arbre principal par des boulons. Le grand rotor est constitué de trois pales qui captent le vent. Le vent fait tourner le rotor lorsqu'il y a assez d'énergie.

Chapitre I : Production et transport de l'énergie éolienne

La nacelle : La nacelle englobe tous les composants mécaniques qui permettent de connecter le rotor éolien au générateur électrique. Les éléments constitutifs de la nacelle sont les suivants : (**Figure I. 1**)

- Arbre principal : Le mouvement du vent entraîne la rotation de la girouette, qui transmet l'information sur la direction du vent au système de commande. Ensuite, le système de commande demande au moteur d'orientation de positionner le rotor de manière à le faire face au vent.
- Système de commande : Le système de commande, qui est un ordinateur, assure le contrôle des divers composants de l'éolienne. Parmi ses fonctions, il oriente la nacelle dans la direction du vent et déclenche le démarrage du rotor lorsque l'anémomètre détecte une force de vent adéquate.
- Multiplicateur : Le rotor effectue environ 22 tours par minute, cependant, la génératrice doit fonctionner à environ 1 500 tours par minute. Le multiplicateur est donc utilisé pour augmenter la vitesse de rotation de 22 tours à 1 500 tours.
- Couronne du système d'orientation : La grande couronne d'orientation est installée sur la tour de l'éolienne. Le moteur d'orientation entraîne la grande couronne dentée à l'aide de sa roue dentée, ce qui permet d'orienter la nacelle et le rotor par rapport à la direction du vent.
- Génératrice : La génératrice génère de l'électricité lorsqu'elle tourne. Les câbles électriques conduisent ensuite le courant à travers la tour.
- Frein mécanique : Le frein mécanique est activé lorsqu'une éolienne nécessite des réparations ou de la maintenance. Son rôle est d'empêcher le rotor de démarrer brusquement, assurant ainsi la sécurité des opérations.
- Anémomètre ou girouette : L'anémomètre mesure la vitesse du vent. Il informe continuellement le système de commande de la vitesse du vent.

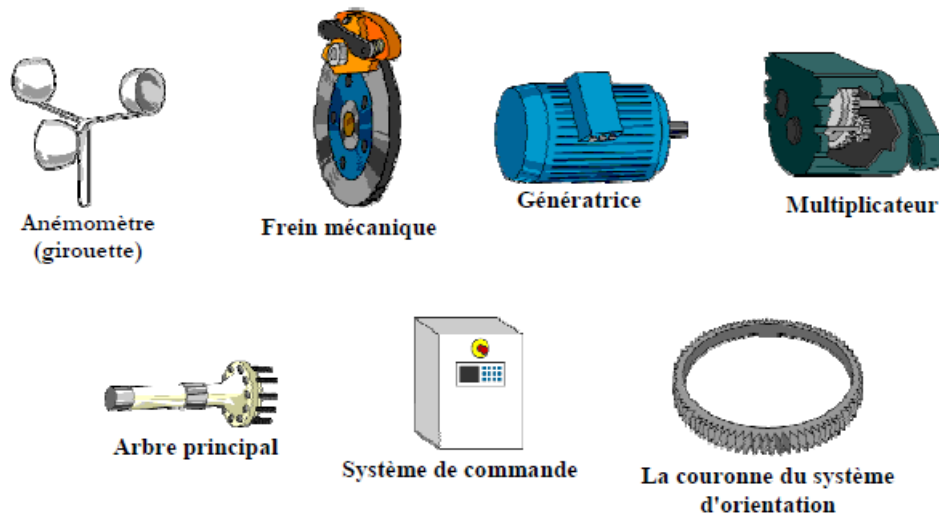


Figure I. 2: Les éléments consécutifs de la nacelle.

I.6. Différents types d'éoliennes

Il existe plusieurs types d'éoliennes [6], chacun ayant des caractéristiques et des applications spécifiques. Voici une brève description des principaux types d'éoliennes :

- **Éoliennes horizontales à axe de rotation** : ces éoliennes sont les plus courantes et sont utilisées pour produire de l'électricité en grand nombre. Leur rotor est orienté dans le sens du vent et la rotation se fait autour d'un axe horizontal.
- **Éoliennes verticales à axe de rotation** : ces éoliennes ont un rotor en forme de cylindre ou de type hélice qui tourne autour d'un axe vertical. Elles sont souvent utilisées pour des applications de petite taille, telles que l'alimentation en électricité de maisons individuelles.
- **Éoliennes offshore** : ces éoliennes sont installées en mer, souvent à de grandes profondeurs, pour profiter des vents plus forts et plus constants. Elles peuvent être de type horizontal ou vertical.
- **Éoliennes à vitesse variable** : ces éoliennes ajustent la vitesse de rotation du rotor en fonction de la force du vent, ce qui leur permet de produire de l'électricité plus efficacement.
- **Éoliennes à vitesse fixe** : ces éoliennes ont une vitesse de rotation fixe, ce qui les rend plus simples et moins coûteuses à produire et à entretenir.
- **Éoliennes à axe de rotation multiple** : ces éoliennes ont plusieurs rotors qui tournent autour d'un même axe, ce qui leur permet de produire plus d'électricité avec un encombrement au sol réduit.

Chapitre I : Production et transport de l'énergie éolienne

Chaque type d'éolienne présente des avantages et des inconvénients, et le choix dépendra des conditions du site, des besoins en énergie et des contraintes économiques et techniques.

I.7. Conversion d'énergie éolienne

Un système de conversion d'énergie éolienne, quel que soit sa technologie, convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique au niveau de la turbine.
- Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique au niveau de la génératrice.

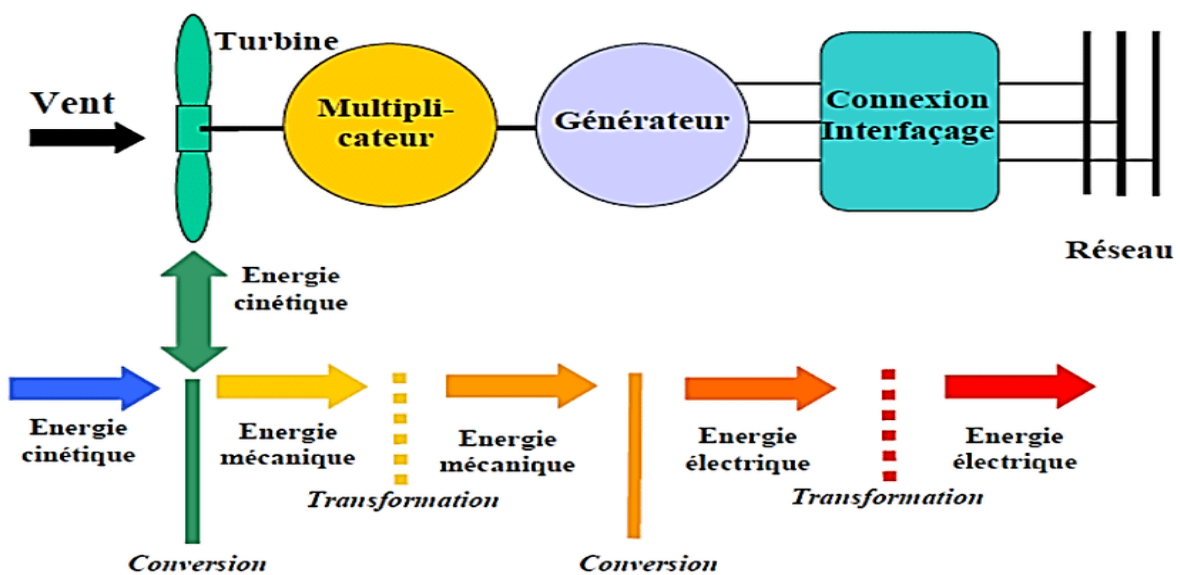


Figure I. 3: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.7.1. Conversion Cinétique – Mécanique

Les pales de l'éolienne balayent le champ des vitesses du vent qui varie dans le temps et autour du disque rotorique, modifiant ainsi localement la pression et la vitesse de l'air. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active de la voilure, on peut calculer la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active de l'éolienne. Il paraît évident que plus la partie de l'énergie cinétique du vent captée par l'éolienne est grande, plus petite sera la vitesse du vent sortant par l'autre côté de l'éolienne.

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible présente un maximum défini par la limite de Betz : Elle stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de $16/27$ (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent.

I.7.2. Conversion Mécanique – Electrique

Il existe plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système éolien qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir :

- Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge.
- L'implantation sur terre ferme (Onshore) ou en mer (Offshore).
- Et principalement le couplage au réseau électrique ou non (mode autonome).

I.7.2.1. Systèmes non couplés au réseau alternatif

Pour les réseaux de petite puissance en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou plusieurs groupes électrogènes, souvent de diesel. Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et auto amorcée par des condensateurs [4].

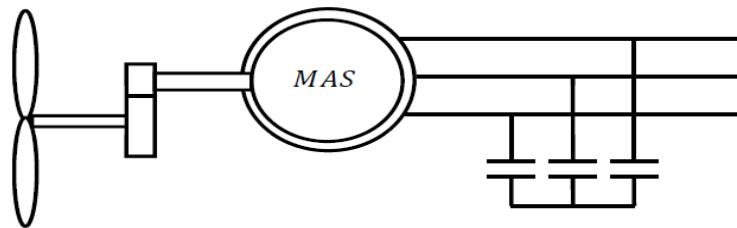


Figure I.4: Aérogénérateur à base d'une génératrice asynchrone à cage [4].

I.7.2.2. Systèmes couplés au réseau alternatif

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes.

a- Systèmes à base de la machine synchrone

La machine synchrone est le type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien (notamment ceux de 500 kW à plus de 2 MW) sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement

connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (**Figure I.5**).

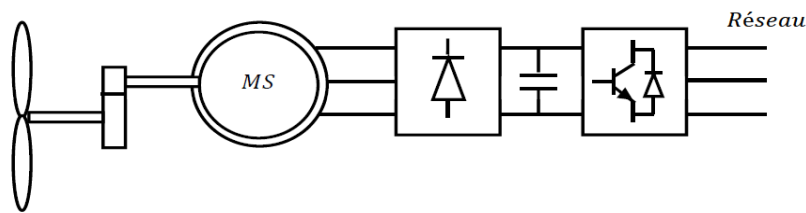


Figure I.5 : Système éolien à base d'une machine synchrone.

b- Systèmes à base de la machine asynchrone à cage

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. De plus, la connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Dans les années 90, les danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction d'un convertisseur de puissance entre la machine et le réseau, malgré son prix élevé, permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence de réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant.

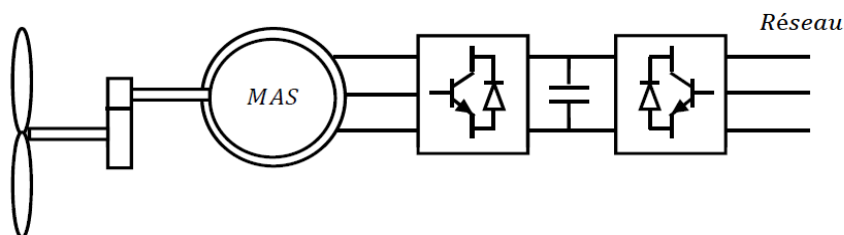


Figure I.6: Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable [4].

c- Systèmes à base de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo-synchrone : le stator est connecté au réseau possédant une tension et une fréquence fixes, alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence. Ces machines sont un peu plus complexes que

les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, et leur robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage.

Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice dans les systèmes éoliens de forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice [4].

Plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentation avec leurs dispositifs de réglage de la vitesse à travers le contrôle de glissement sont envisageables.

d- Contrôle de glissement par dissipation de l'énergie rotorique

Le glissement peut être rendu variable par extraction d'une fraction de puissance au circuit rotorique et dissipation dans une résistance en utilisant un redresseur alimentant un hacheur commandé (Figure I.7). Plus la pulsation rotorique est proche de la pulsation de synchronisme, plus la puissance extraite par le rotor est importante. Vu la taille de la résistance (située au circuit rotorique), cette configuration permet uniquement des faibles variations de vitesse avec un glissement maximum qui ne dépasse pas 10 %. L'inconvénient de ce principe c'est que la puissance dissipée dans la résistance diminue le rendement du système de conversion.

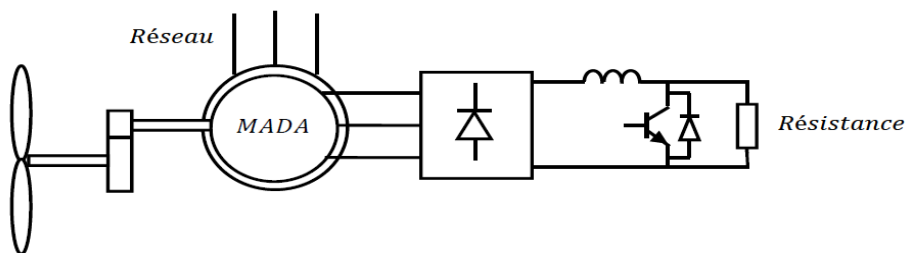


Figure I. 7: Contrôle de glissement par l'énergie dissipée [4].

e- Transfert de la puissance rotorique sur le réseau

Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système. On peut utiliser pour cette récupération un système statique de conversion d'énergie constitué par un convertisseur de puissance [4]. Ce convertisseur est dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique (soit environ 25 % de la puissance nominale) pour un

glissement maximal correspondant à la puissance statorique nominale. Pratiquement, plusieurs solutions sont envisageables (**Figure I.8**) (a), (b), (c), et (d).

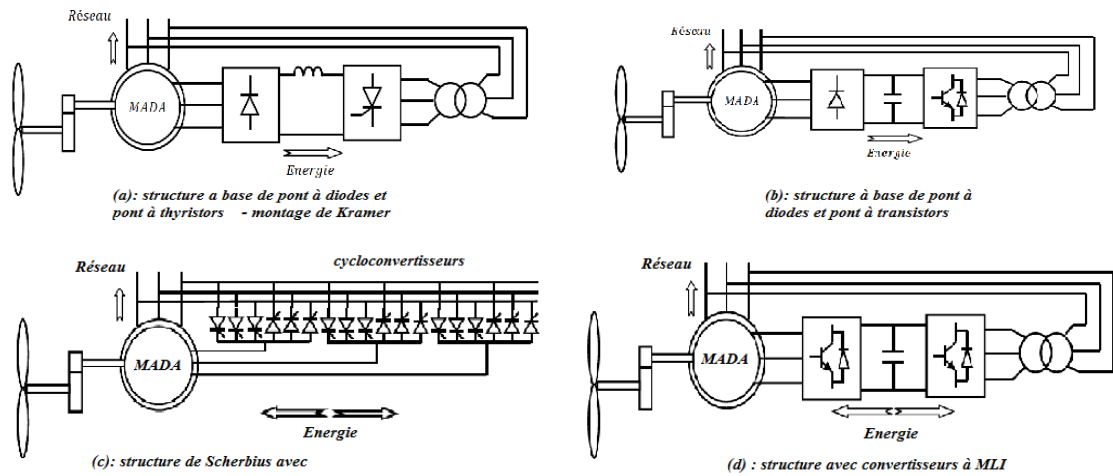


Figure I.8: Structures de Transfert de la puissance rotorique sur le réseau [4].

I.8. Système de production et transport d'énergie électrique

Le réseau électrique est soumis à des contraintes techniques et économiques importantes, notamment en termes de gestion de l'équilibre entre l'offre et la demande, de la qualité de l'électricité, de la sécurité du réseau et de la rentabilité de l'ensemble du système. Ces contraintes sont renforcées par l'intégration croissante des énergies renouvelables intermittentes, comme l'énergie éolienne, dans le réseau électrique. C'est un système complexe d'infrastructures et de technologies qui permettent de transporter l'électricité de la production jusqu'aux consommateurs finaux. Il est composé de plusieurs éléments :

- **Centrales électriques :** ce sont les installations de production d'électricité, qu'elles soient nucléaires, thermiques, hydrauliques, éoliennes, solaires, etc.
- **Réseau de transport :** il s'agit d'un ensemble de lignes électriques à haute tension qui transportent l'électricité produite vers les différents points de consommation. Le réseau de transport est géré par le gestionnaire du réseau de transport (GRT).
- **Réseau de distribution :** c'est un réseau de lignes électriques à moyenne tension qui transporte l'électricité du réseau de transport vers les transformateurs de quartier, qui abaissent la tension de l'électricité jusqu'à la tension de consommation. Le réseau de distribution est géré par le gestionnaire du réseau de distribution (GRD).
- **Transformateurs :** ils permettent de modifier la tension de l'électricité pour la rendre compatible avec les besoins des consommateurs.

Chapitre I : Production et transport de l'énergie éolienne

- **Compteurs** : ils mesurent la consommation d'électricité de chaque client et permettent de facturer l'électricité consommée.
- **Clients** : ce sont les utilisateurs finaux de l'électricité, qu'ils soient des ménages, des entreprises, des administrations, etc.

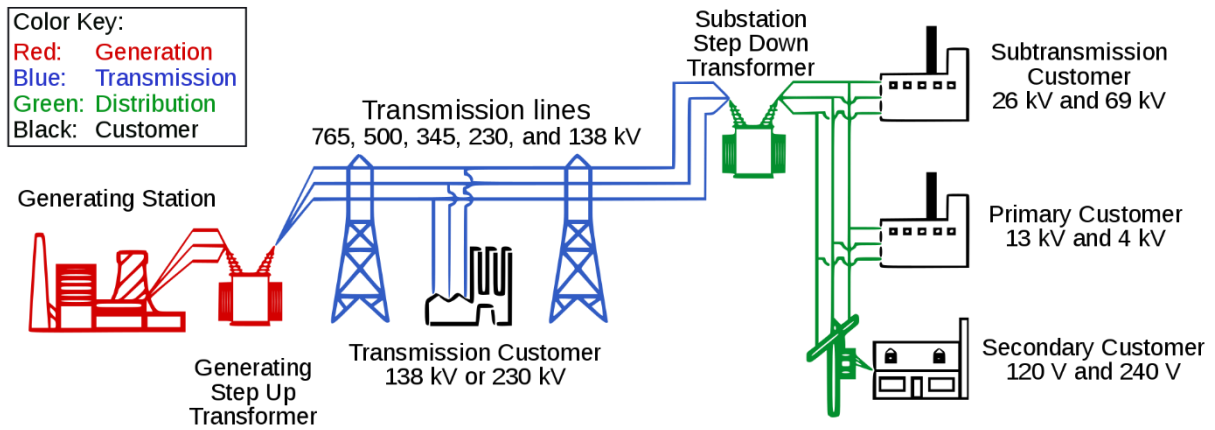


Figure I.9: Structure de base d'un réseau d'énergie électrique.

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les aspects généraux de l'énergie éolienne, son histoire et son évolution, ainsi qu'un aperçu des différents types d'éoliennes de plus, nous avons examiné en détail la machine à double alimentation MADA, son principe de fonctionnement et tout en mettant en évidence les avantages et les inconvénients spécifiques de cette machine.

Chapitre II

Concept de la stabilité dans les réseaux
électriques

II.1. Introduction

Une éolienne a pour fonction de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses composants sont conçus de manière à maximiser cette conversion énergétique. L'augmentation du nombre d'éoliennes a incité les chercheurs en génie électrique à mener des études afin d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie produite.

Pour valider notre étude théorique de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, il est nécessaire de simuler le processus. Pour cela, il est essentiel de modéliser la chaîne étudiée. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation de la chaîne de conversion globale.

II.2. Modélisation des différents éléments du réseau électrique

Le réseau électrique est composé de plusieurs éléments essentiels pour le fonctionnement de l'électricité, tels que des générateurs, des lignes de transport et de distribution, des transformateurs, ainsi qu'un ensemble de consommateurs qui constituent les charges du réseau. De plus, le réseau comprend également des dispositifs de protection et de réglage, tels que le réglage de la tension et le réglage de la fréquence. En gros, le système électrique global se divise en trois sous-systèmes :

- Machine de production (générateur)
- Système de transmission d'énergie (lignes, transformateurs)
- Utilisation (consommateurs)

II.2.1. Modèle du générateur

Un générateur est un système qui permet de convertir une forme d'énergie, généralement mécanique, en électricité. Il existe différents modèles de générateurs. Dans les analyses statiques, les générateurs sont souvent modélisés comme des sources de courant. En régime stationnaire, un générateur est généralement contrôlé de manière à maintenir la puissance active injectée au jeu de barres et la tension aux bornes du générateur constantes. Dans ce cas, on utilise généralement des machines synchrones et le diagramme de phase [5].

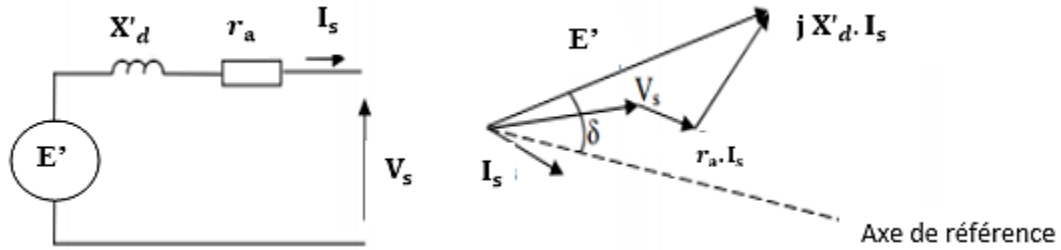


Figure II. 1: Représentation simplifiée d'une machine synchrone.

E' : F.E.M transitoire de la machine synchrone.

V_s : Tension aux bornes de la machine.

I_s : Courant de la machine.

r_a : Résistance statorique de la machine.

$X'd$: Réactance transitoire de la machine.

II.2.2. Système de transmission de l'énergie (lignes, transformateur)

Le système de transmission d'énergie est utilisé pour transférer la puissance d'un nœud à un autre.

II.2.2.1. Lignes

Les réseaux de transport assurent la liaison entre les centres de production et les zones de consommation, facilitant ainsi l'échange de puissance à travers les lignes d'interconnexion. Dans l'analyse dynamique des réseaux électriques, les modèles des lignes de transmission sont généralement classés en trois catégories en fonction de leur longueur (longue, moyenne, courte). Théoriquement, une ligne électrique de transport peut être représentée comme un ensemble de résistances et de réactances réparties le long de la ligne [6].

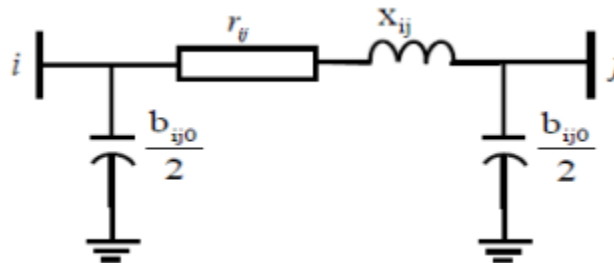


Figure II. 2: Modèle en π des lignes.

Où l'admittance série y_{ij} vaut

$$y_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + jX_{ij}} \quad (\text{II.0})$$

Avec :

r_{ij} : La résistance série de la ligne.

X_{ij} : La réactance inductive série de la ligne.

y_{ij} : L'admittance de la branche i - j .

$\frac{b_{ij0}}{2}$: La réactance capacitive parallèle de la ligne.

II.2.2.2. Transformateur

Le transformateur joue un rôle essentiel dans le domaine de l'énergie électrique. Il permet d'augmenter la tension pour le transport efficace de l'énergie sur de longues distances, et de réduire cette tension pour la distribution aux consommateurs de manière économique.

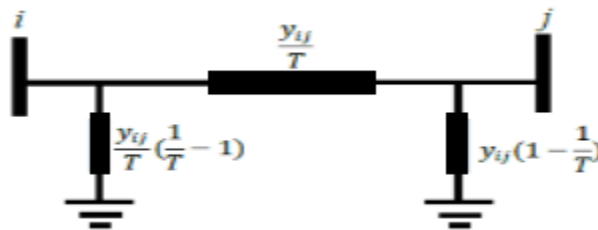


Figure II. 3:Modèle simplifié du transformateur.

T : Rapport de transformation.

II.3. Charge

La modélisation de la charge revêt une grande importance lors de l'étude et de l'analyse des systèmes énergétiques, en particulier dans le contexte de la compensation de l'énergie réactive.

Dans le réseau électrique, les charges, qui représentent les consommateurs, peuvent être modélisées de manière individuelle, où chaque nœud représente un groupe de consommateurs. En régime permanent, les charges sont représentées par des puissances constantes qui sont indépendantes de la tension. Cette modélisation est illustrée dans la Figure II.4 et est décrite par la relation suivante :

$$S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li} \quad (\text{II.1})$$

Chapitre II : Concept de la stabilité dans les réseaux électriques

Où, S_{Li} est la puissance complexe de la charge, P_{Li} la puissance active et Q_{Li} la puissance réactive

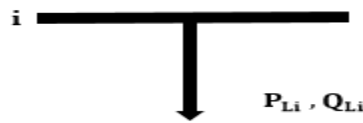


Figure II. 4:Modèle d'une charge électrique.

II.4. Modélisation du système éolien

La Figure II. 5 présente le schéma d'une éolienne connectée au réseau. Ce schéma inclut les différentes variables mécaniques et électriques nécessaires pour modéliser la chaîne de conversion électromécanique.

Nous commençons par présenter le modèle aérodynamique de la turbine, suivi du modèle mécanique de l'éolienne. Ensuite, nous abordons la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

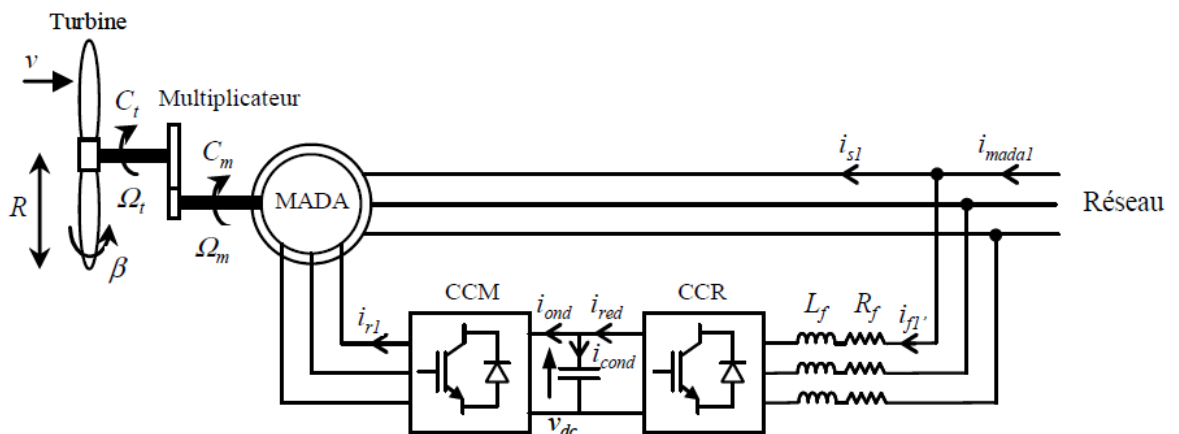


Figure II. 5:Eolienne basée sur une MADA connectée au réseau [7].

II.4.1. Modèle de la turbine éolienne

La production d'énergie éolienne dépend de l'interaction entre les pales du rotor, la masse et la vitesse du vent. Supposons qu'une turbine éolienne équipée de pales d'une longueur R entraîne une génératrice via un multiplicateur de vitesse avec un gain G . (Figure II.6).

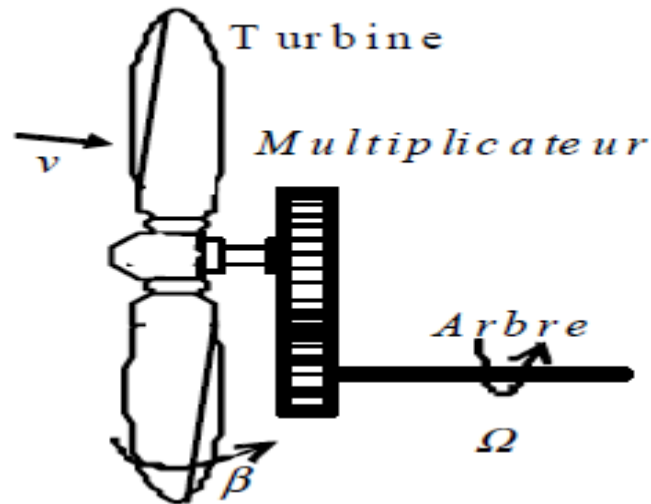


Figure II. 6: Turbine éolienne [7].

La puissance mécanique réelle (P_t) extraite du vent peut être écrite comme suit :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.2})$$

Où :

ρ est la densité de l'air (kg/m³),

R est le rayon de pale de l'éolienne (m),

V_w est la vitesse du vent (m/s),

$C_p(\lambda, \beta)$ est le coefficient de puissance.

Le coefficient de puissance varie avec la vitesse du vent présente un maximum de 16/27 soit 0,593. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de l'angle de calage des pales β et de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

La vitesse spécifique λ s'exprime :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_w} \quad (\text{II.3})$$

Ω_t est la vitesse de rotation de la turbine. Le couple turbine (aérodynamique) est le rapport entre la puissance mécanique et la vitesse de l'arbre :

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t} \quad (\text{II.4})$$

II.4.2. Modélisation de multiplicateur

La turbine est normalement couplée à l'arbre du générateur par l'intermédiaire d'une boîte de vitesses dont le rapport de multiplication G est choisi afin de régler la vitesse de l'arbre du générateur dans une plage de vitesse souhaitée. En négligeant les pertes de transmission, le couple et la vitesse d'arbre de l'éolienne, se référant au côté turbine de la boîte de vitesses, sont donnés par :

$$T_g = \frac{T_t}{G} \quad \text{et} \quad \Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (\text{II.5})$$

Où : T_t et T_g sont respectivement les couples turbine et génératrice.

La puissance mécanique optimale, qui peut être générée à l'aide du suivi du point de puissance maximale (MPPT), peut être exprimée comme suit :

$$P_{t-opt} = \frac{C_{P-max}}{\lambda_{opt}^2} \frac{\rho \pi R^5}{2} \frac{\Omega_{mec}^3}{G^3} \quad (\text{II.6})$$

Un modèle d'éolienne avec un contrôle de vitesse est illustré à (**Figure II.7**)

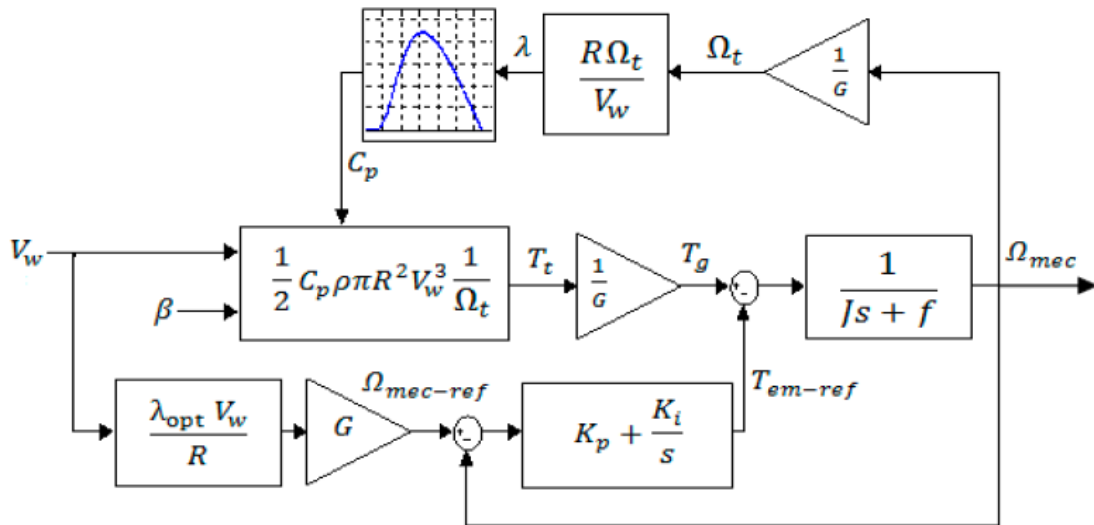


Figure II. 7:Modèle d'éolienne avec un contrôle de vitesse [7].

L'équation du système mécanique de l'ensemble turbine-génératrice est donné par :

$$C_g - C_{em} = \left(\frac{J_t}{G^2} + J_g \right) * \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_t}{G^2} + f_g \right) \Omega_g \quad (\text{II.7})$$

Avec :

J_t [kg.m²] est le moment d'inertie de la turbine ;

f_t [Nm.s/rad] est le coefficient de frottement de la turbine ;

G est le rapport du multiplicateur ;

Jg [kg.m²] est le moment d'inertie de la génératrice ;

fg [Nm.s/rad] est le coefficient de frottement de la génératrice ;

Cg [Nm] est le couple mécanique de la génératrice ;

Cem [Nm] est le couple électromagnétique de la génératrice ;

Ω_g [rad/s] est la vitesse de rotation de la génératrice.

II.4.3. Modélisation de la connexion Onduleur – Réseau

Après avoir régulé la tension du bus continu, la puissance extraite, doit être injectée au réseau via l'onduleur auquel il est connecté. Le schéma suivant de la Figure II.8 illustre le système global d'injection ainsi que sa commande.

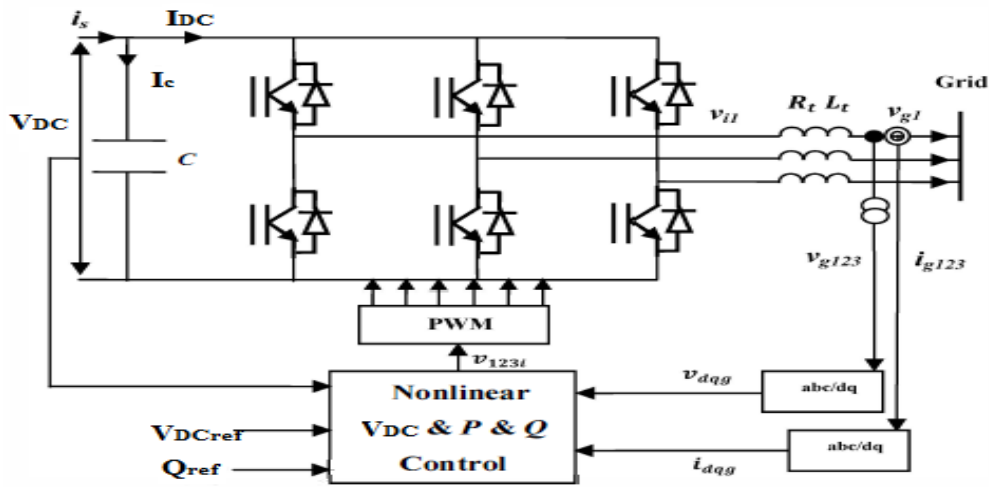


Figure II. 8: Schéma bloc de processus d'injection [5].

D'après la (figure II.8) l'équation des tensions est tels que [7]

$$\begin{bmatrix} V_{g1} \\ V_{g2} \\ V_{g3} \end{bmatrix} = R_t \begin{bmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{bmatrix} + L_t \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{i1} \\ V_{i2} \\ V_{i3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

La transformation de l'équation (IV.14) dans le repère dq donne :

$$V_{dg} = V_{di} - R_t i_{dg} - L_t \frac{di_{dg}}{dt} + \omega L_t i_{qg} \quad (\text{II.9})$$

$$V_{qg} = V_{qi} - R_t i_{qg} - L_t \frac{di_{qg}}{dt} + \omega L_t i_{dg} \quad (\text{II.10})$$

Ou : ω la fréquence angulaire de la tension d'alimentation.

Le système de contrôle suppose que la tension est équilibrée, par conséquent la composante V_{og} n'est pas présente dans les équations P et Q. Dans un référentiel stationnaire et pour un système triphasé équilibré, les puissances à la sorties active et réactive instantanées, du côté de l'offre, peut être défini comme :

$$P_g = \frac{3}{2} (V_{dg}i_{dg} + V_{qg}i_{qg}) \quad (\text{II.11})$$

$$Q_g = \frac{3}{2} (V_{qg}i_{dg} - V_{dg}i_{qg}) \quad (\text{II.12})$$

Maintenant, l'angle initial du référentiel d-q est défini sur $\pi/2$, et l'angle initial de la phase 1 est mis à 0, cela fait que le composant V_{qg} est nul et la composante V_{dg} doit être égale à V_{g1} . Dans ce référentiel les équations P et Q ci-dessus deviendront [7] :

$$P_g = \frac{3}{2} V_{dg}i_{dg} \quad (\text{II.13})$$

$$Q_g = -\frac{3}{2} V_{dg}i_{dg} \quad (\text{II.14})$$

Ainsi, les flux de puissance active et réactive sont contrôlés par i_{dg} et i_{qg} respectivement.

II.5. Exigence de la stabilité

Dans la pratique, afin de faire face aux incidents graves et de réduire leurs conséquences, il est essentiel de mettre en place des mesures correctives et d'installer des automates spécifiques qui constituent le plan de défense du système électrique. Ces mesures visent à limiter la propagation de ces incidents et à faciliter la reconnexion rapide des consommateurs dans les zones hors tension. Il est crucial d'identifier immédiatement tout défaut afin d'isoler rapidement l'équipement défectueux du réseau électrique sain. Selon [8], les études de stabilité impliquent... :

- Prévoir le fonctionnement synchrone.
- Envisager les principaux scénarios critiques tels que le déclenchement des lignes, le déclenchement des transformateurs, le court-circuit, la perte des groupes de production, la perte de l'alimentation du distributeur et la variation de charge importante, etc.
- Prédire le comportement du réseau face à ces perturbations.
- Prévoir les schémas d'exploitation tels que la compensation.
- Préconiser les moyens à mettre en œuvre tels que les types de protection et de réglage, plans de délestage, etc.
- Prévoir et planifier l'ensemble production-consommation.

Grâce à ces études, il devient possible de mieux appréhender le fonctionnement du réseau et d'identifier les mesures à prendre pour réduire les risques de coupure d'alimentation.

II.6. Stabilité des réseaux électriques

La stabilité d'un réseau électrique se réfère à sa capacité à retrouver un état d'équilibre stable après une perturbation, ainsi qu'à maintenir cet état pendant et après ladite perturbation, en prenant en compte les conditions initiales. La stabilité repose sur un équilibre délicat entre différentes forces, et l'instabilité peut se manifester de diverses manières, selon la configuration et le mode de fonctionnement du réseau.

II.7. Types de stabilité

II.7.1. Classification de la stabilité d'un système électro-énergétique

Selon la nature et l'amplitude de la perturbation, nous pouvons définir trois types de stabilité, la stabilité statique, la stabilité dynamique et la stabilité transitoire.

II.7.1.1. Stabilité statique (de tension)

La stabilité statique concerne les faibles perturbations qui peuvent apparaître dans un système électrique à cause des variations du régime de la machine et de la consommation et son effet sur le fonctionnement normal est presque négligeable, donc le système reste stable statiquement. Pour ce type de stabilité on peut modéliser le système par des équations différentielles linéaires [9].

II.7.1.2. Stabilité dynamique (de fréquence)

L'étude de cette stabilité concerne toujours les petites perturbations au point de fonctionnement normal. Cette étude détermine l'intervention des éléments de régulation pour rendre le système à cet état normal. Le système en stabilité dynamique est décrit par des équations différentielles non linéaires, mais on peut les linéariser autour d'un point de fonctionnement [9].

II.7.1.3. Stabilité transitoire (de l'angle)

La stabilité transitoire d'un réseau de transport d'énergie électrique est son aptitude à retrouver une position d'équilibre stable après une perturbation brusque et de forte amplitude. Cette perturbation peut écarter notablement le réseau de sa position initiale. Un système d'énergie électrique est en régime de stabilité transitoire si à la suite d'une perturbation très courte et de grande amplitude (tels que les courts-circuits, les déclenchements des lignes, les faux couplages, etc.) le système retrouve son état initial ou un autre état stable. L'intervention des dispositifs de régulation et de protection est indispensable [8].

II.8. Classification de la stabilité de réseau d'énergie électrique

La stabilité peut être subdivisée, selon l'effet de la perturbation, sur les variables électriques du réseau, principalement sur les machines. La stabilité est donc subdivisée en trois catégories selon la **Figure II.9** la stabilité angulaire, qui étudie les excursions angulaires des rotors des machines synchrones, la stabilité de tension et la stabilité de fréquence du réseau [10].

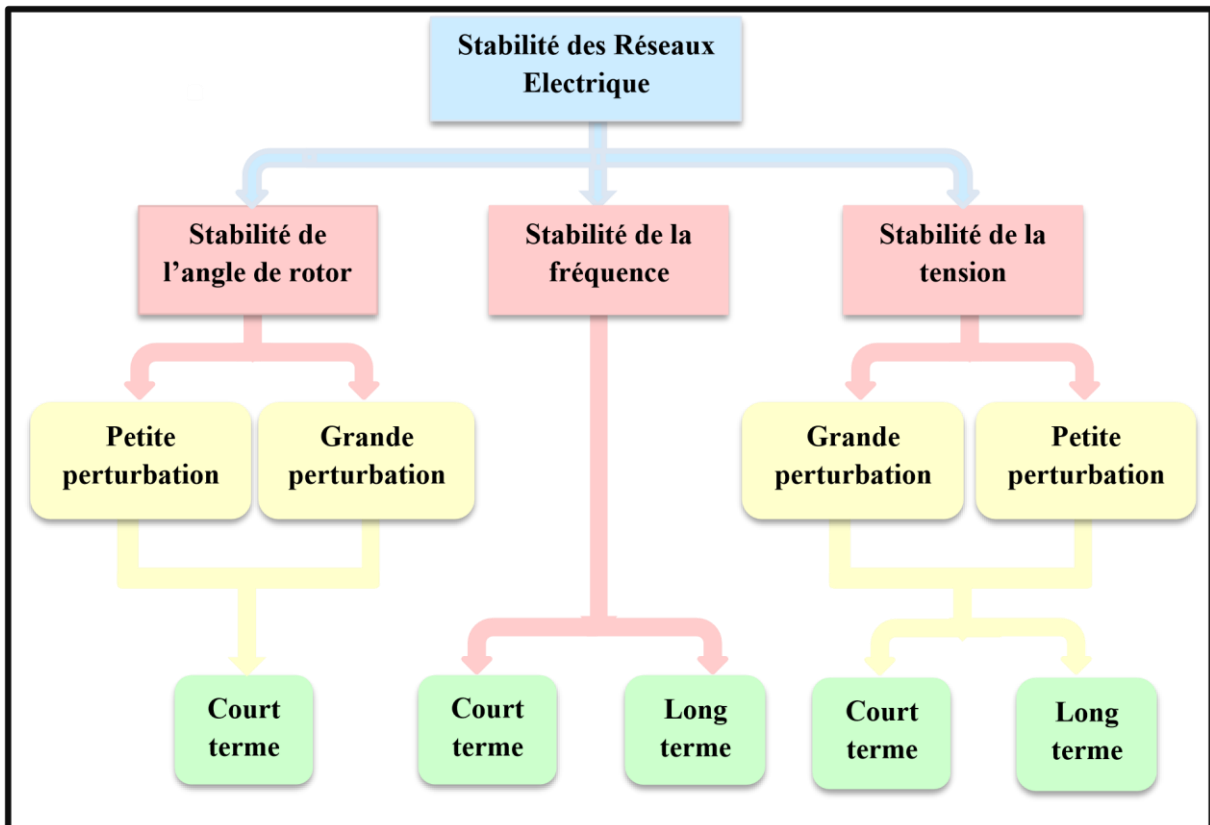


Figure II. 9:Classification des différents types de la stabilité de système de puissance [11].

II.9. Stabilité angulaire

Cette stabilité est une condition d'équilibre entre deux forces opposées. En régime permanent, il y a un certain équilibre entre le couple mécanique à l'entrée et le couple électrique à la sortie de chaque machine, la vitesse reste constante. S'il y a une perturbation dans le réseau électrique, cet équilibre est bouleversé la vitesse de chaque machine est modifiée [11]. De plus, la stabilité de l'angle de rotor concerne la capacité des machines synchrones d'un système de puissance interconnecté de rester en synchronisme suite à une perturbation. Elle dépend de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre les couples électromagnétique et mécanique agissant sur le rotor de chaque machine synchrone dans le système. L'instabilité qui peut

résulter se produit sous forme d'augmentation des oscillations angulaires de certains générateurs pouvant conduire à une perte de synchronisme avec d'autres générateurs [12].

II.9.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations (en petits signaux)

C'est la capacité d'un réseau électrique à maintenir le synchronisme sous des petites perturbations de charge ou de génération. Les perturbations sont considérées suffisamment petites pour pouvoir linéariser les équations du système. L'instabilité peut être divisée en deux familles : l'augmentation permanente de l'angle rotorique due à l'insuffisance du couple synchronisant et l'augmentation de l'amplitude des oscillations du rotor due à l'insuffisance du couple d'amortissement [11].

II.9.2. Stabilité angulaire aux grandes perturbations

La stabilité angulaire aux grandes perturbations, est la capacité du système électrique à maintenir le synchronisme après une perturbation importante tel un court-circuit sur une ligne de transmission ou une perte d'une partie importante de la charge ou de la génération. Le résultat de la réaction du système implique de grandes excursions des angles des rotors des générateurs est influencée par la relation non linéaire de la puissance par rapport à l'angle [5] [Si l'instabilité se manifeste directement suite à la perturbation (plus précisément dans la première seconde qui suit l'élimination du défaut), elle est appelée instabilité de première oscillation (cas 1) et elle s'étend sur 3 à 5 secondes. L'instabilité transitoire peut se résulter de la superposition des effets de plusieurs modes d'oscillation lents excités par la perturbation provoquant ainsi une variation importante de l'angle de rotor au-delà de la première oscillation, instabilité de multi oscillations (cas 2). La gamme de temps associée va de 10 à 20 secondes comme il est montré dans la (Figure II. 10) [12].

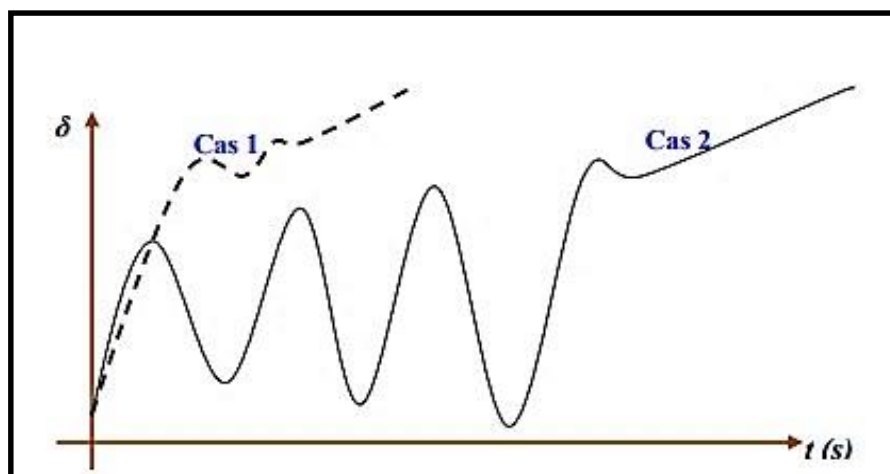


Figure II. 10: Variation d'angle de rotor [12].

II.10. Stabilité de la tension

La stabilité de tension, se rapporte à la capacité d'un système de puissance, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de maintenir des valeurs de tensions acceptables à tous les nœuds du système après avoir subi une perturbation. Le cœur du problème réside dans l'instabilité de tension du réseau électrique due au non-contrôlabilité et à la chute progressive de tension après des perturbations comme l'augmentation de charge ou le changement du régime de fonctionnement et l'incapacité du réseau à fournir la puissance réactive suffisante. La chute de tension est généralement due à une accumulation de transit des puissances active et réactive sur les lignes d'un réseau [11].

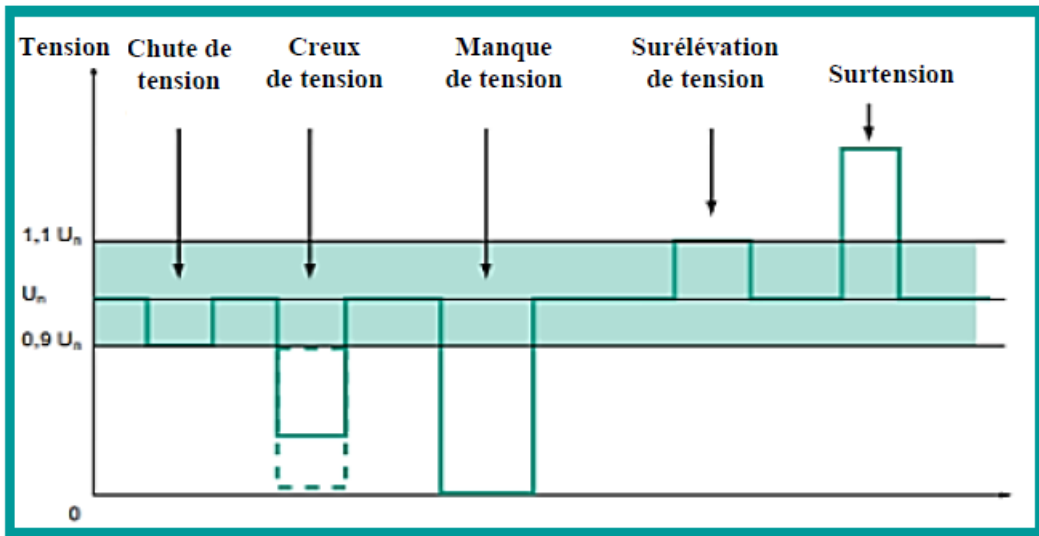
II.10.1. Stabilité de la tension aux grandes perturbations

La stabilité de tension en grandes perturbations est la capacité du système à maintenir la tension stable à la suite de grandes perturbations telles que les défauts du système ou la perte d'un générateur. Cette capacité est déterminée par la topologie du système, les caractéristiques des charges et les interactions entre les contrôles continus de tension (réglage primaire et secondaire de tension, compensateurs statiques et tournants d'énergie réactive), les contrôles discrets (gradins de condensateurs, d'inductances et régulateurs en charge) et les protections. Le cadre du temps d'étude d'intérêt peut s'étendre de quelques secondes à plusieurs dizaines de minutes [5].

II.10.2. Stabilité de la tension aux petites perturbations

La Stabilité de la tension aux petites perturbations c'est la capacité d'un réseau électrique à contrôler la tension aux nœuds suite à petites perturbations comme l'augmentation progressive de charge du réseau ou de petits changements du réseau. Cette forme de stabilité est déterminée par les caractéristiques des charges et les dispositifs de régulation et de protection à l'instant étudié. Ce concept est très utilisé pour déterminer comment la réponse de tension évolue en fonction de petites modifications du réseau à n'importe quel instant. Les analyses statiques peuvent être utilisées pour déterminer la marge de stabilité, pour identifier des facteurs influençant la stabilité, pour examiner l'état du système dans un grand nombre de configurations. Le critère de stabilité aux petites perturbations est satisfait s'il y a l'augmentation de l'amplitude de tension d'un nœud quelconque du réseau lors de l'augmentation de la puissance réactive injectée dans ce même nœud [11] .

- **Amplitude**



- **Durée**

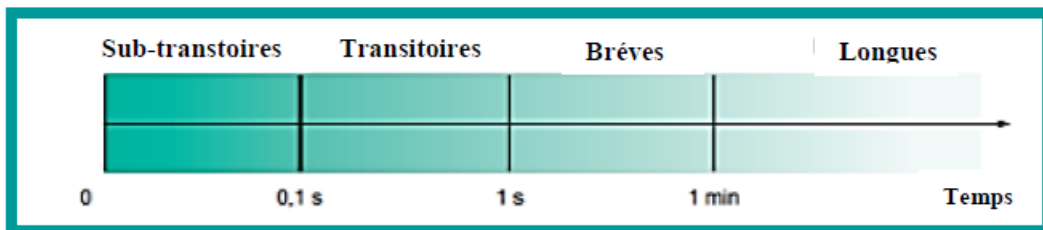


Figure II. 11: Perturbations de tension dans les réseaux [11].

II.11. Stabilité de fréquence

La stabilité de fréquence se réfère à la capacité d'un réseau électrique à maintenir une fréquence électrique stable dans des conditions normales de fonctionnement, malgré les variations de la charge et de la génération. Lorsque la production d'énergie est équilibrée avec la demande, la fréquence du réseau reste constante. Cependant, des fluctuations importantes de la charge ou des perturbations soudaines peuvent entraîner des variations de la fréquence, ce qui peut avoir des conséquences néfastes sur les équipements électriques sensibles et la stabilité du réseau dans son ensemble. La stabilité de fréquence est donc essentielle pour assurer un fonctionnement fiable du système électrique.

II.12. Causes d'instabilité

Les causes d'instabilité dans un réseau électrique peuvent être multiples et variées. Voici quelques-unes des principales causes d'instabilité :

- Déséquilibre entre l'offre et la demande : Lorsque la production d'énergie électrique ne correspond pas à la demande en électricité, cela peut entraîner des variations de tension et de fréquence, ce qui peut perturber le fonctionnement du réseau.
- Perturbations soudaines : Des événements imprévus tels que des pannes de générateurs, des courts-circuits, des défaillances d'équipement ou des perturbations météorologiques peuvent provoquer des instabilités dans le réseau.
- Manque de synchronisation : Si les générateurs connectés au réseau ne sont pas correctement synchronisés, cela peut entraîner des fluctuations de tension et de fréquence, ce qui peut conduire à une instabilité.
- Résonance électromécanique : Des interactions complexes entre les systèmes électriques et mécaniques peuvent créer des phénomènes de résonance, provoquant des oscillations indésirables dans le réseau.
- Facteurs environnementaux : Des conditions environnementales extrêmes, telles que des tempêtes, des séismes ou des catastrophes naturelles, peuvent endommager les infrastructures électriques et perturber le fonctionnement du réseau.

Il est important de noter que ces causes peuvent être interdépendantes et se renforcer mutuellement, entraînant des situations d'instabilité plus complexes. La gestion et la prévention de ces causes sont essentielles pour assurer la stabilité et la fiabilité du réseau électrique.

II.13. Amélioration de la stabilité

On peut améliorer la stabilité des systèmes de puissance par plusieurs techniques citons les techniques suivantes

II.13.1. Amélioration de la stabilité par les techniques classiques

La stabilité peut être considérablement améliorée en utilisant plusieurs techniques à savoir :

- Élimination rapide des défauts : L'utilisation de protections et de disjoncteurs performants permet de détecter et d'isoler rapidement les défauts dans le réseau électrique, minimisant ainsi leur impact sur la stabilité du système.

Chapitre II : Concept de la stabilité dans les réseaux électriques

- Dispositifs de régulation et de protection : L'installation de dispositifs de régulation de tension, de régulation de fréquence et de protection appropriés contribue à maintenir les paramètres électriques du réseau dans des limites acceptables et à prévenir les conditions instables.
- Maintien d'une réserve de puissance : Les centrales électriques doivent disposer d'une réserve de puissance disponible pour faire face aux variations de la charge et maintenir l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie.
- Renforcement de la protection des générateurs : Des mesures doivent être prises pour renforcer la protection des générateurs contre les défauts qui se produisent à proximité, afin de prévenir les effets néfastes sur la stabilité du système.
- Planification et adaptation de la production - consommation : Une planification appropriée de la production et de la consommation d'énergie, en tenant compte des variations saisonnières et des besoins futurs, contribue à maintenir l'équilibre et la stabilité du système électrique.
- Régulateurs PSS (Power System Stabilizer) : Les régulateurs PSS sont des dispositifs utilisés pour améliorer la stabilité en ajustant les paramètres du système électrique en réponse aux fluctuations de charge. Ils contribuent à réduire les oscillations indésirables et à maintenir le système dans un état stable.

II.13.2. Amélioration de la stabilité par les techniques modernes

- Régulation par FACTS
- La technique de HVDC : (La technique de transport d'énergie à courant continu en haute tension)

II.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu modélisation des systèmes de production et de transport ou nous avons présenté les différents types de stabilité ainsi que les différentes méthodes d'amélioration de la stabilité des réseaux par les dispositifs tel que les FACTS et les PSSs .

Chapitre III

Simulation et résultats

III.1 Introduction

L'objectif de cette simulation est d'étudier les impacts de l'intégration de l'énergie éolienne sur la stabilité et le fonctionnement du réseau électrique. Elle permet d'analyser les variations de tension et de fréquence, les oscillations du réseau électrique et d'autres paramètres pertinents. De plus, la simulation offre la possibilité d'évaluer l'efficacité de différentes stratégies de contrôle et de gestion pour assurer une intégration harmonieuse de l'énergie éolienne.

Dans cette simulation, nous allons utiliser un modèle représentatif d'un réseau électrique existant, comprenant des générateurs conventionnels, des lignes de transmission, des transformateurs et des charges. Nous allons intégrer des éoliennes dans ce modèle en tenant compte de leurs taux de participation en production dans une des centrales du réseau étudié.

En ajustant les paramètres de calculs, tels que le taux de pénétration de l'énergie éolienne, et les stratégies de contrôle et de gestion, nous serons en mesure d'observer les effets de l'intégration de l'énergie éolienne sur la stabilité du réseau électrique. Les résultats de cette simulation fourniront des informations précieuses pour identifier les défis potentiels et proposer des solutions pour une utilisation efficace et fiable de cette source d'énergie renouvelable.

En résumé, cette simulation propose un protocole en plusieurs étapes, sur le réseau interarea, où nous allons introduire l'énergie à source éolienne de 10% à 30% par rapport à la source classique existante avec un pas de 5%, et voir l'effet des systèmes stabilisateurs de puissance (PSS) sur le comportement des machines du système, après les variations concernant l'intégration.

III.2 Simulation et conclusions

Les étapes suivies pour effectuer cette simulation sont ordonnées tels que :

- Une première exécution par simulation du système en introduisant la source éolienne dans la centrale G1 avec un taux égal à 10%.
- Un court-circuit front est appliqué à l'instant 1s jusqu'à 1.2s au milieu de la ligne entre les deux zones.
- Des PSSs sont placés aux niveaux de chaque machine.
- Trois types différents de PSSs sont adaptés au système pour voir l'effet sur le comportement des machines vis-à-vis les oscillations électromécaniques dans la présence de la production éolienne.

- Une comparaison des performances du système électrique en variant par augmentation du taux de pénétration de la production éolienne et en changeant les types des PSSs.
- Une identification des combinaisons entre taux de pénétration et type de PSS pour une stabilité meilleure traduite par la réduction des oscillations.
- Des conclusions seront tirées suite aux discussions et commentaires liés aux calculs et simulations présentées.
- Des recommandations seront conseillées à la fin du travail.

III.3 Applications et étude de cas par MATLAB/Simulink

La simulation est un outil puissant pour évaluer l'intégration des éoliennes dans le réseau électrique inter-régions.

III.3.1 Description du système

Le système test utilisé [13] dans cette application se compose de deux zones entièrement symétriques reliées entre elles par deux lignes de 230 kV d'une longueur de 220 km. Il a été spécialement conçu dans [14] [15] pour étudier les oscillations électromécaniques à basse fréquence dans les grands réseaux interconnectés. Malgré sa petite taille, il imite très étroitement le comportement des systèmes typiques en fonctionnement réel.

Chaque zone est équipée de deux générateurs à rotor rond identiques d'une puissance nominale de 20 kV/900 MVA. Les machines synchrones ont des paramètres identiques [14] [15], à l'exception des inerties qui sont de $H = 6,5s$ dans la zone 1 et de $H = 6,175s$ dans la zone 2 [14].

La charge est représentée par des impédances constantes et répartie entre les zones de manière à ce que la zone 1 exporte 413 MW vers la zone 2. Étant donné que la charge d'impédance de surtension d'une seule ligne est d'environ 140 MW [14], le système est quelque peu sollicité, même à l'état stationnaire. Le flux de charge de référence avec G2 considéré comme la machine de référence est tel que tous les générateurs produisent environ 700 MW chacun. Les résultats peuvent être visualisés en ouvrant Powergui et en sélectionnant l'initialisation des machines. Ils diffèrent légèrement de [14], car le profil de tension de charge a été amélioré (rendu plus proche de l'unité) en installant 187 Mvar supplémentaires de condensateurs dans chaque zone. De plus, les pertes de transmission et de génération peuvent varier en fonction du niveau de détail dans la représentation des lignes et des générateurs.

Chapitre III : Simulation et résultats

La représentation du système multi-machine été faite en utilisant l'environnement MATLAB-Simulink, comme présenté par la **figure III.1** :

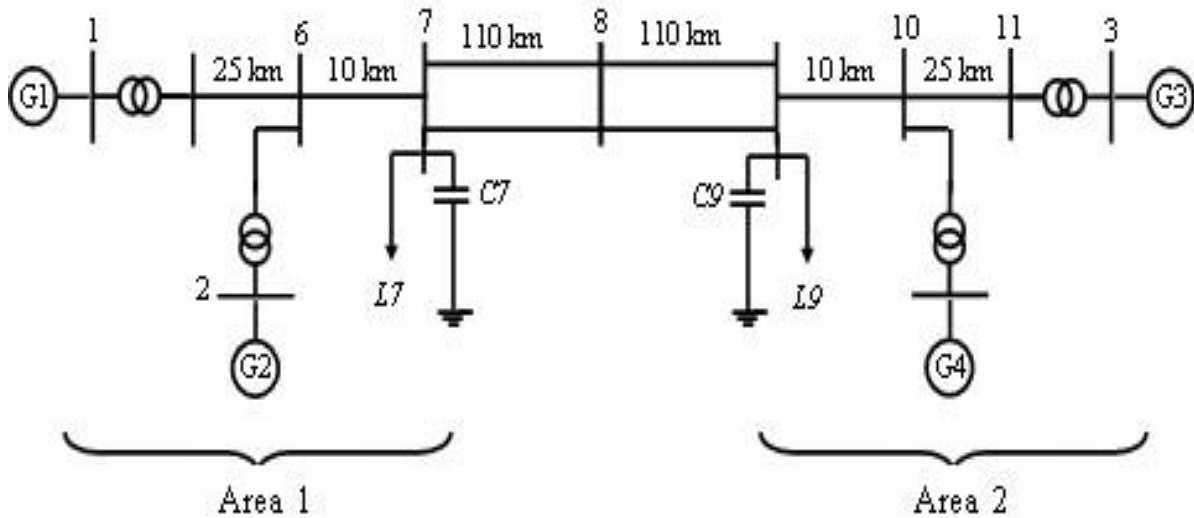


Figure III. 2: Représentation schématique des deux régions du système étudié.

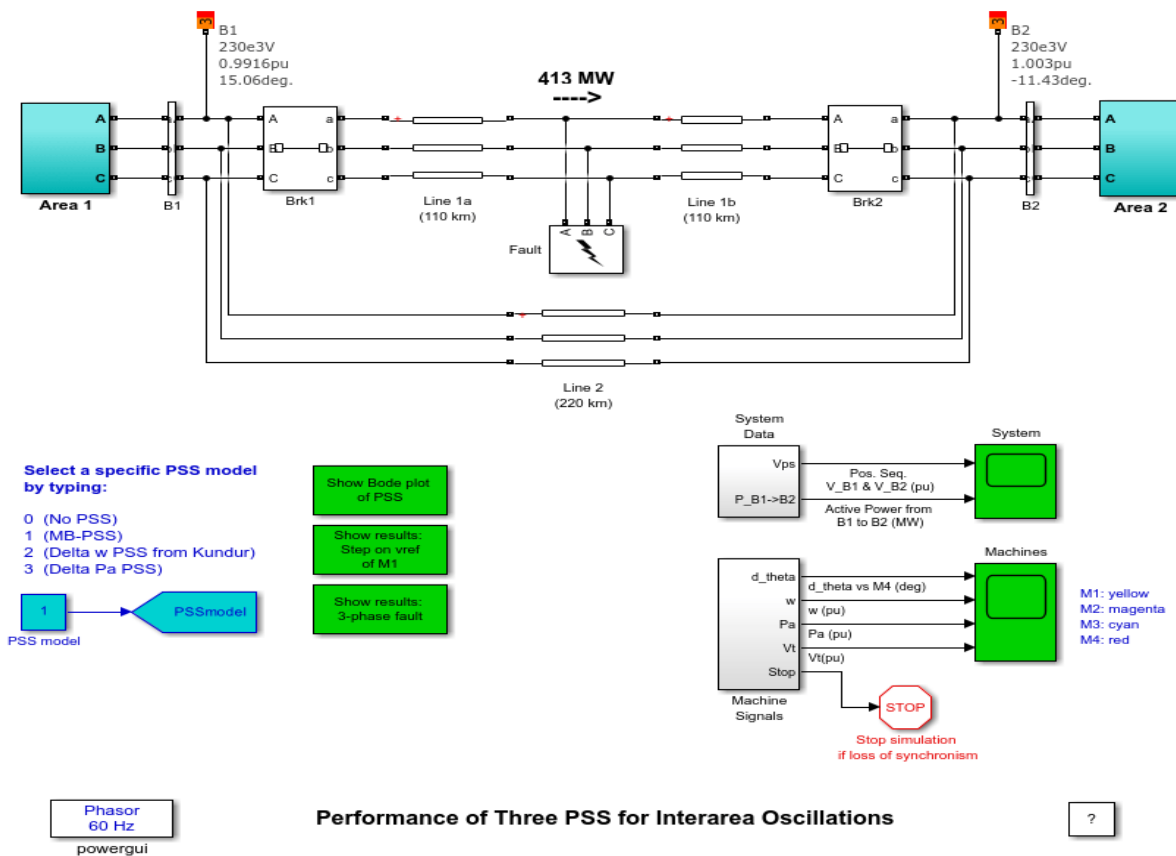


Figure III. 1 : Système multi-machine étudié par MATLAB-SIMULINK.

Intégration d'une éolienne dans area 1

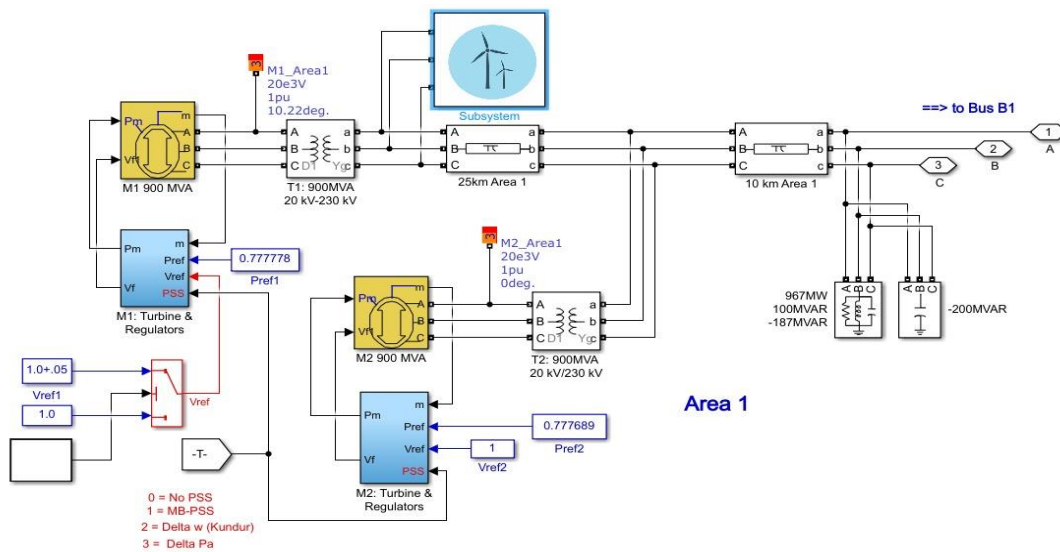


Figure III. 3: Intégration d'une éolienne dans area 1.

Tableau III. 1 : Caractéristiques de l'éolienne.

$P_n(\text{VA})$	270	$R_r(\text{pu})$	$4.377 \cdot 10^3$
$V_n(\text{V})$	575	$L_r(\text{pu})$	0.1791
$f_n(\text{Hz})$	60	$L_m(\text{pu})$	6.77
$R_s(\text{pu})$	$4.843 \cdot 10^3$	$H(\text{s})$	5.04
$L_s(\text{pu})$	0.1248	$F(\text{pu})$	0
P	3		

Avec

- P_n : puissance nominale en VA
- V_n : tension nominale en V
- f_n : la fréquence
- L_s : inductance statorique
- R_s : résistance statorique
- R_r : résistance rotorique
- L_r : inductance rotorique
- L_m : inductance mutuelle

H : facteur de frottement

- P : nombre des pair des pôles

Les choix de PSSs

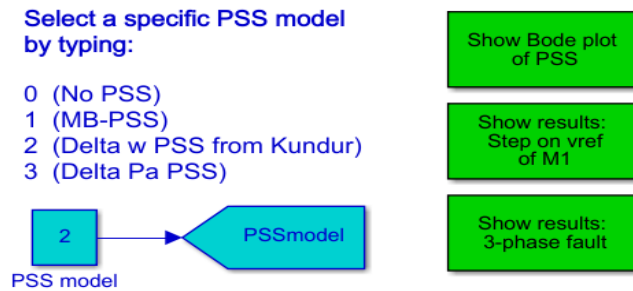


Figure III. 4: Choix de PSSs .

III.4 Amortissement des oscillatoires inter-régions :

Les échanges croissants d'énergie font apparaître des oscillations de puissance, nommées « Oscillation inter-régions ». Ces oscillations électromécaniques sont visibles par l'oscillation de la vitesse ou l'angle des arbres des générateurs d'au moins deux régions mais aussi par l'oscillation de la puissance transitant sur les lignes du réseau [16]. Les oscillations inter-régions limitent la production d'énergie par les machines ainsi que le transport d'énergie, entre autres à cause de l'écart des oscillations qui dépasse la capacité de production des générateurs, et augmentent les risques d'instabilité. Pour mieux représenter ce phénomène d'oscillations inter-régions, on prend souvent un exemple mécanique analogue (figure III.5): celui de deux chariots reliés par un ressort, oscillants en opposition de phases, chaque chariot représentant un groupe de machines cohérentes (c'est-à-dire avec des angles internes id «en phases») et le ressort représentant les lignes [17].

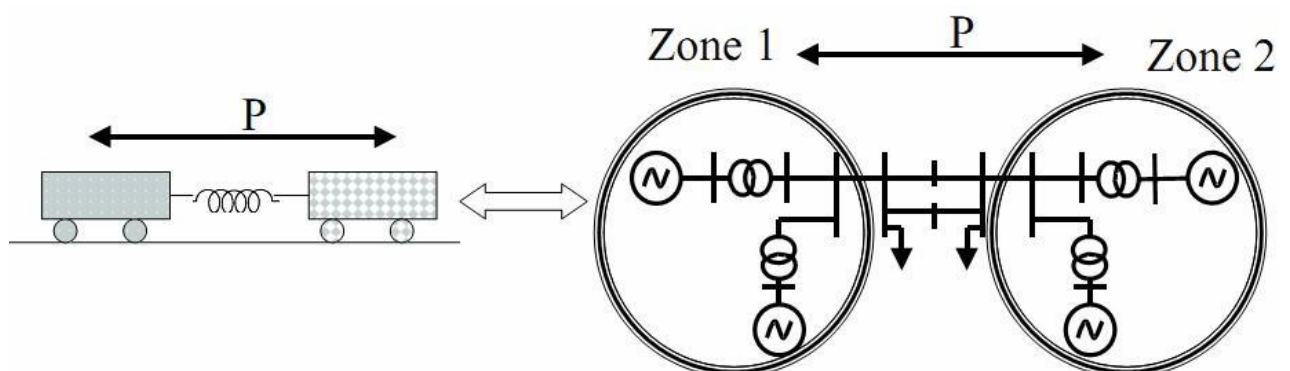


Figure III. 5: Exemple mécanique analogue aux oscillations inter-régions.

III.5 Résultat de simulation :

Cinq cas sont étudiés, partant d'un taux de pénétration de 10% jusqu'à 30% augmenté d'un pas de 5%.

Chapitre III : Simulation et résultats

Pour chaque cas en utilise trois types de PSSs (le multi bonde (pss1) puis le PSS kundur qui est de type avance retard (pss2) et finalement le PSS ΔP (pss3))

On va simuler comme dit en les étapes de partie Simulation et résultats

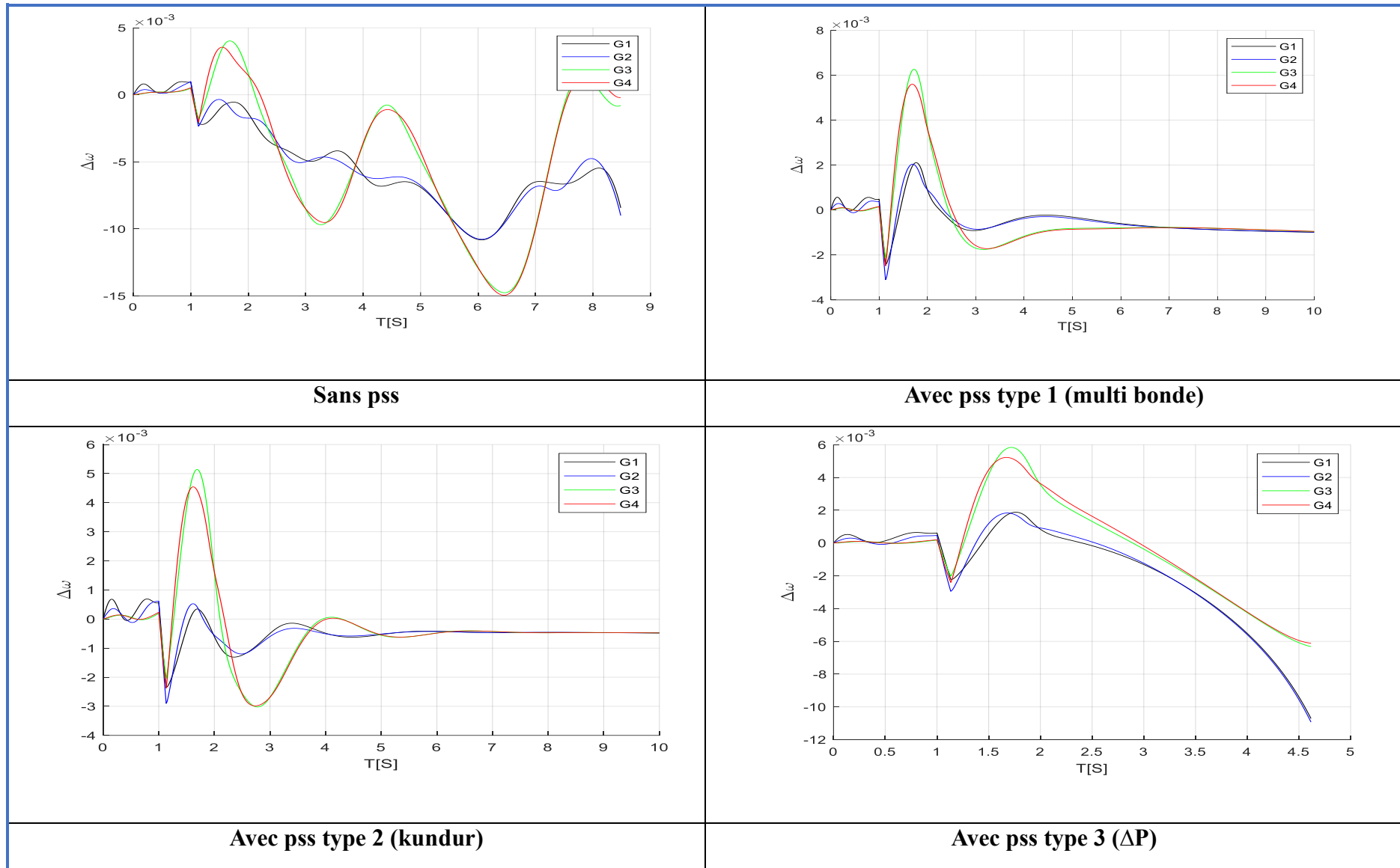


Figure III. 6: oscillations électromécaniques pour 10% taux de pénétration.

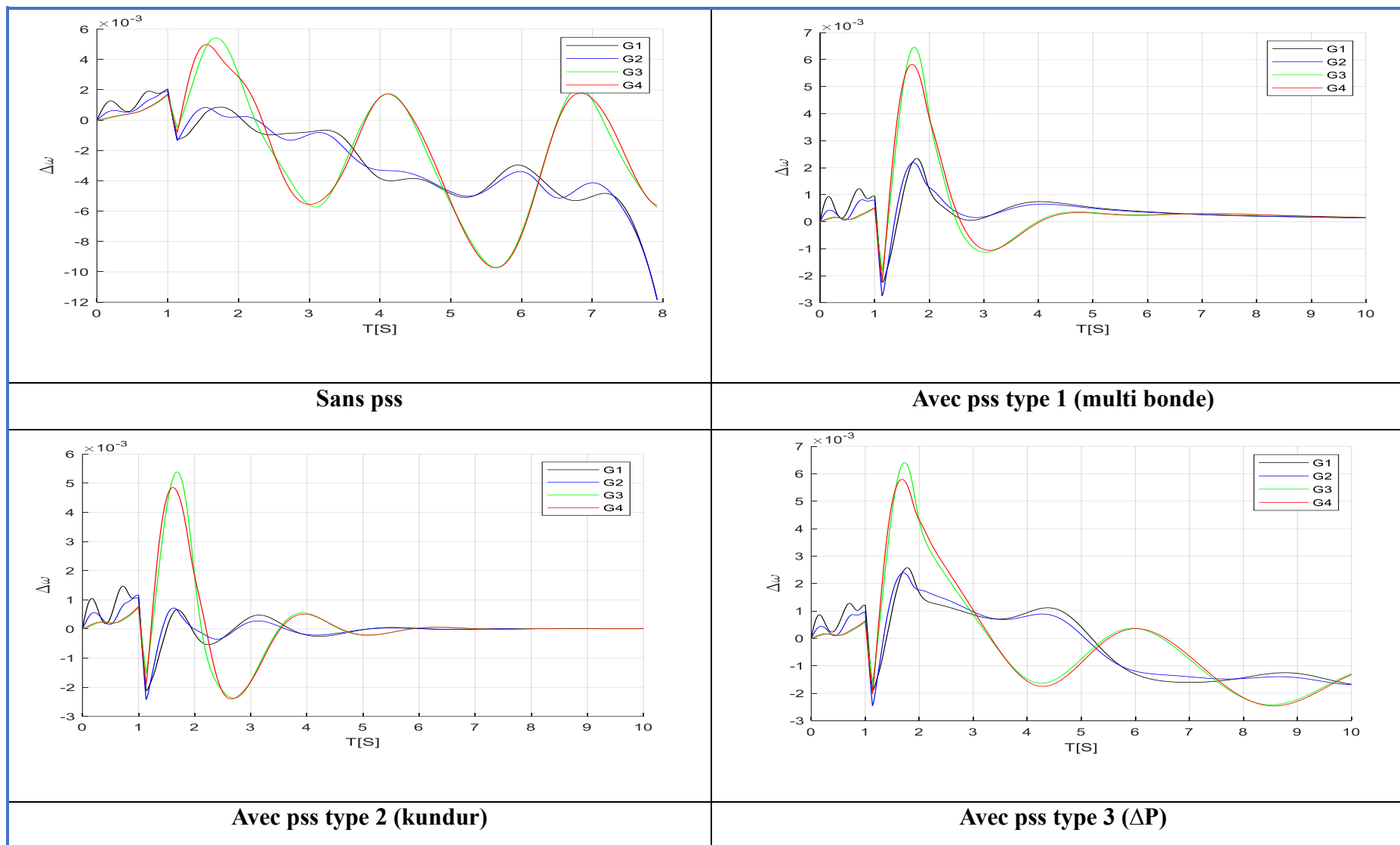


Figure III. 7: oscillations électromécaniques pour 15% taux de pénétration.

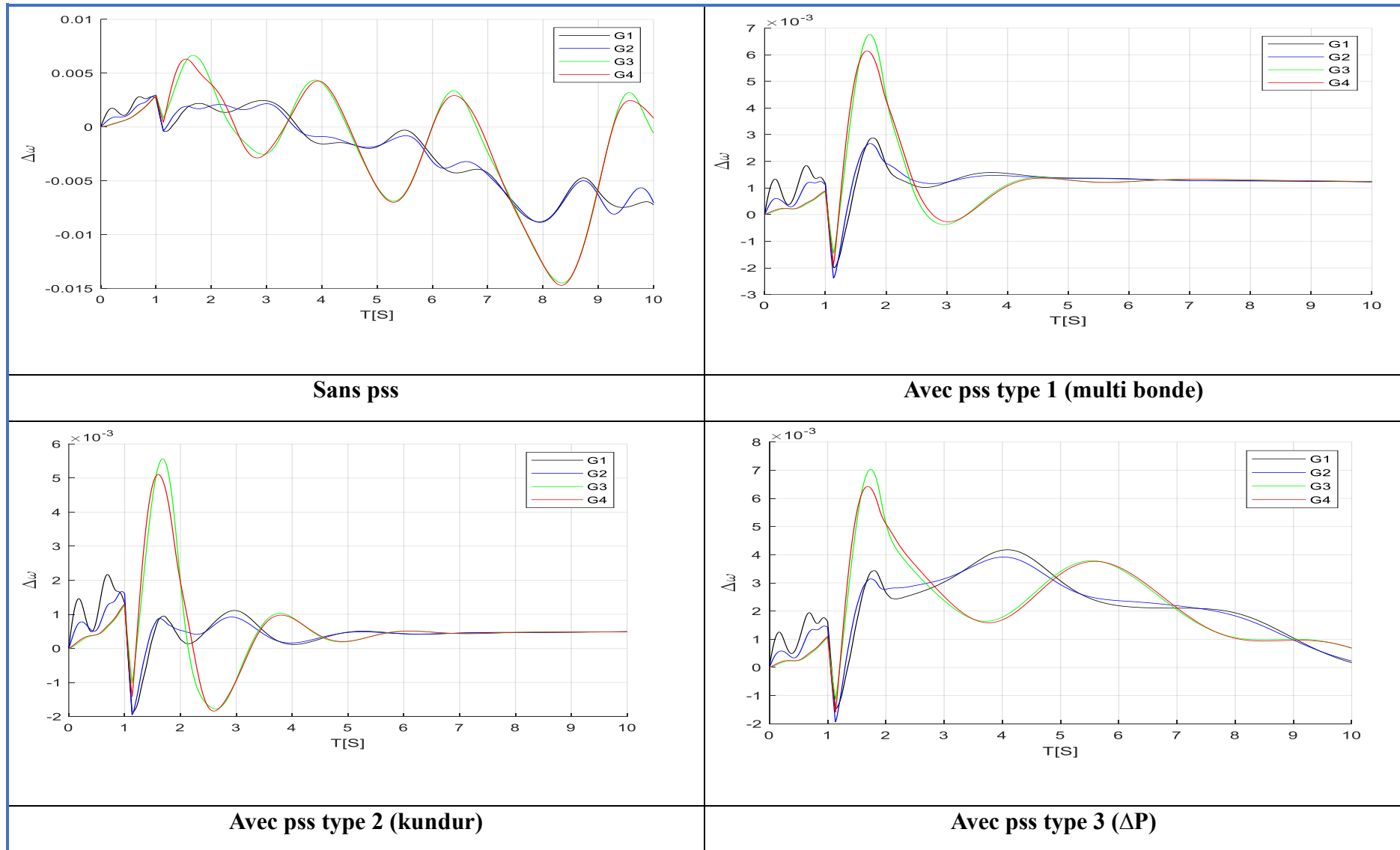


Figure III. 8:oscillations électromécaniques pour 20% taux de pénétration.

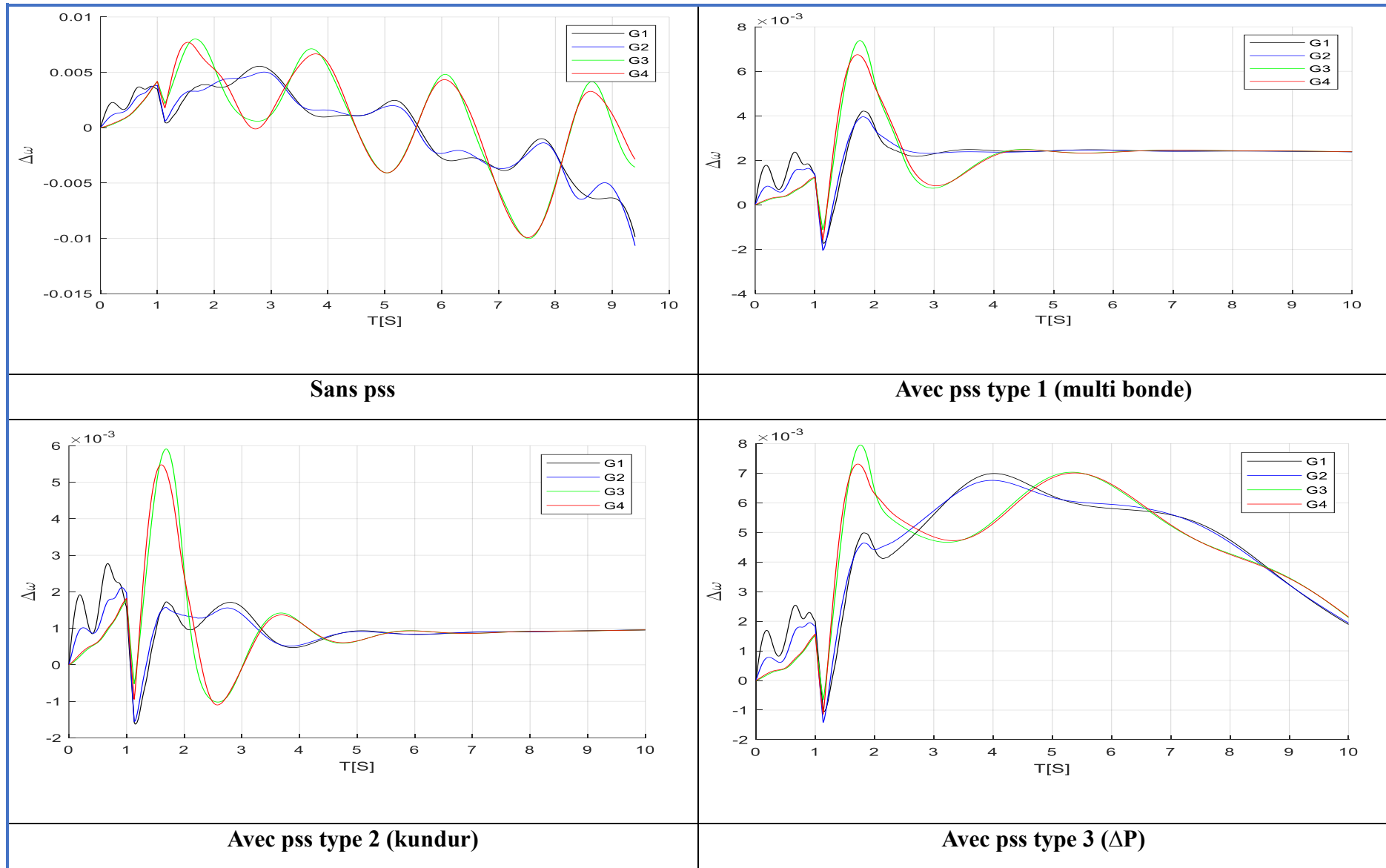


Figure III. 9:oscillations électromécaniques pour 25% taux de pénétration.

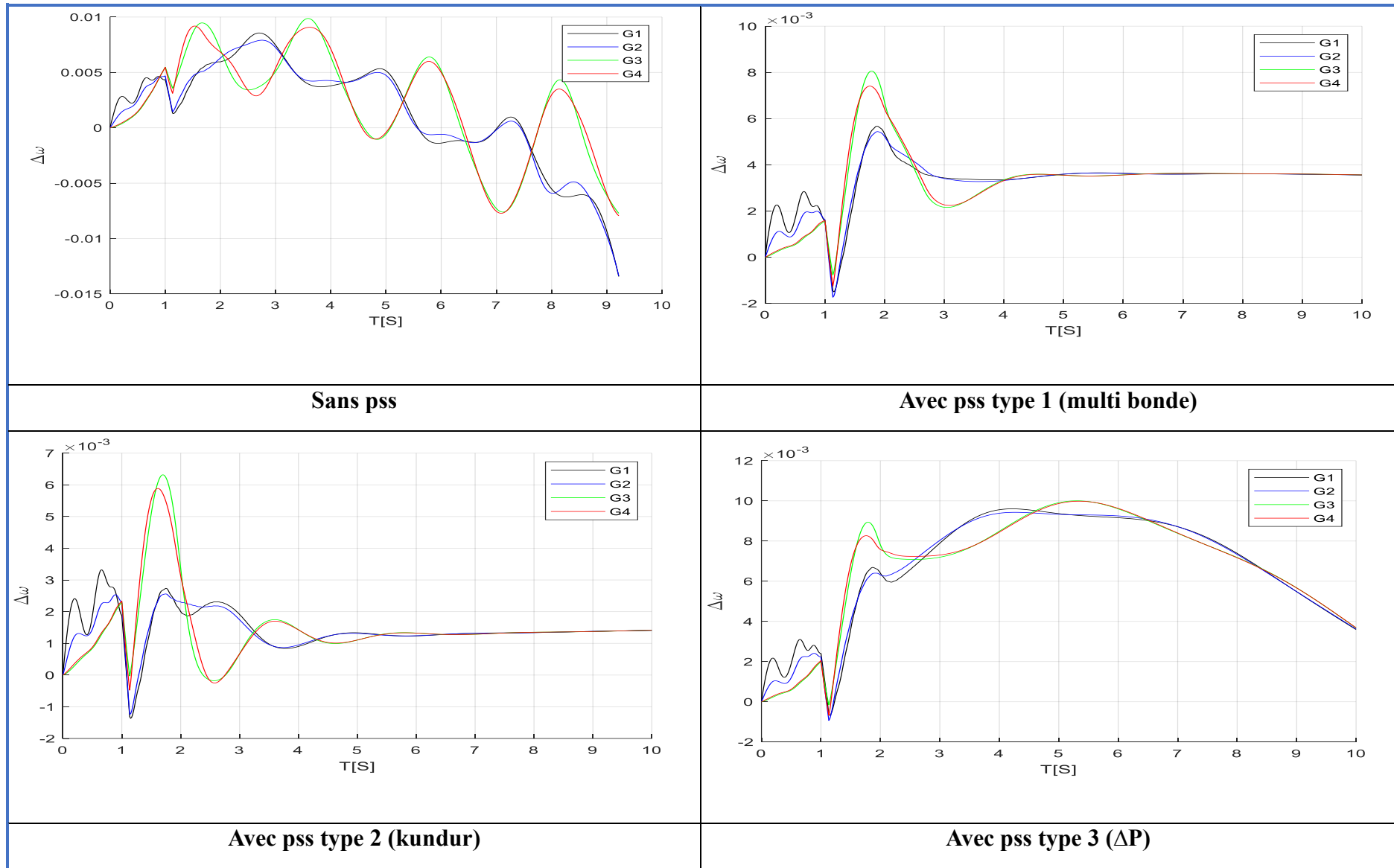


Figure III. 10:oscillations électromécaniques pour 30% taux de pénétration.

III.5.1 Analyse des résultats :

- Pour **Figure III.6** d'intégration 10%

Une augmentation visible de $\Delta\omega$ pour toutes les machines avec une oscillation très marquée pour les machines de la zones 2.

Le PSS du type 2 est remarquablement efficace pour la réduction des oscillations et pour la tenue de la stabilité du système.

Notant que l'incident appliqué simultanément avec l'intégration de l'éolienne fait perdre totalement la stabilité du système sans la présence des PSSs.

- Pour **Figure III.7** d'intégration 15%

L'augmentation du taux de pénétration de l'énergie éolienne participe visiblement dans l'amplifications des ondulations de $\Delta\omega$ des machines particulièrement G1 où nous avons placé la source éolienne, $\Delta\omega$ de la machine G1 a augmenté par rapport à celle du cas de 10%

Le type 2 du PSS reste robuste et assure l'équilibre du réseau, comparé à ceux des types 1 et 3, toute en marquant une incapacité totale du PSS type 3.

- Pour **Figure III.8** d'intégration 20%

Malgré le pic de l'angle garde une augmentation du rend géométrique la réduction des oscillations est assurée toujours par le PSS type 2 en mieux puisque le retour des machines diffèrent du PSS1 au PSS 2.

- Pour **Figure III.9** d'intégration 25%

A cette étape on remarque l'affaiblissement du rôle des PSSs malgré le retour relatif à la stabilité notamment par le type 2.

- Pour **Figure III.10** d'intégration 30%

Plus la participation de l'éolienne dans la production est élevée plus le rôle des PSS est faible dans la réduction des oscillations et dans le retour à l'équilibre, cette constatation est plus importante pour les machines G3 et G4 de la zone 2 qui sont les plus sensibles pour tous les cas étudiés, une conséquence prévue à cause de la différence des inerties des deux zones.

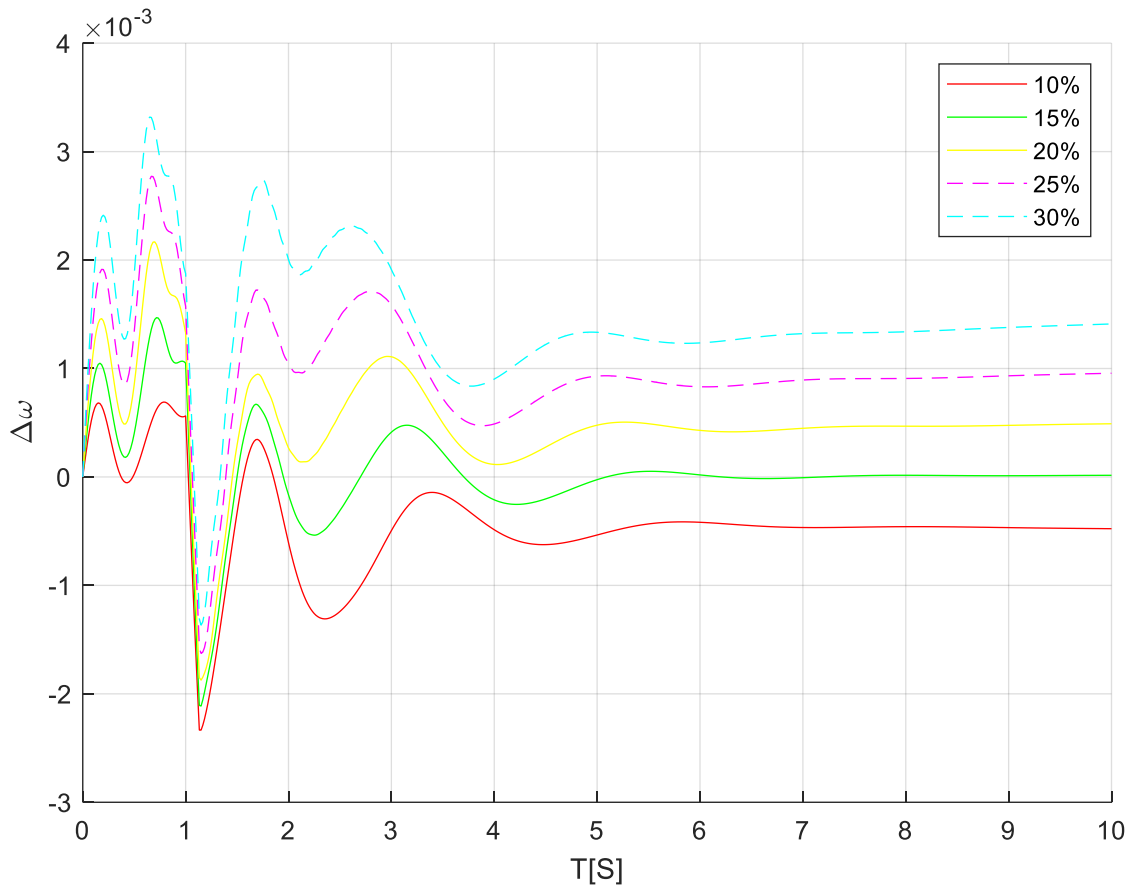


Figure III. 11: Effet de taux de pénétration dans G1 avec PSS type 2.

Une comparaison du comportement de la machine G1 pour l'ensemble des cas étudiés est illustrée dans la **figure III.11** qui montre bien que l'intégration de l'éolienne a un effet direct sur l'apparition des oscillations électromécaniques, ce phénomène est touché dans l'intervalle entre 0s et 1s où le système n'a subi aucun incident (le court-circuit).

Après le court-circuit la machine réagit de même, mais la présence du PSS (type2) aide au retour à chaque augmentation mais de façons qui se différencient tout en amortissant les oscillations totalement dans 3s pour tous les cas.

"Lors des simulations menées pour évaluer la performance de trois Power System Stabilizers (PSS) dans la stabilisation des oscillations d'interconnexion, à savoir PSS 1, PSS 2 et PSS 3, les résultats ont montré que le PSS 2 (kundur) a donné la meilleure réponse parmi les trois PSS testés. Cette constatation a été basée sur une analyse des résultats obtenus, en tenant compte des paramètres tels que les oscillations d'interconnexion observées, les variations de l'angle, qui sont les paramètres jugeant la stabilité du système.

Le taux de pénétration maximum d'énergie éolienne a été fixé à 30% pour ces simulations. Cette valeur représente la participation de la production d'énergie éolienne dans le

Chapitre III : Simulation et résultats

centrales G1 du système étudié. En analysant les résultats, il a été conclu que le PSS 2 (kundur) était particulièrement efficace dans la stabilisation des oscillations d'interconnexion, même avec une pénétration élevée et maximale de l'énergie éolienne.

Tableau III.2: comparaison entre la performance des PSSs par rapport à l'intégration.

Taux PSSs	10%	15%	20%	25%	30%
Pss1	Très bien	Très bien	Bon	Mauvais	Mauvais
Pss2	Excellent	Excellent	Très bien	Bon	Bon
Pss3	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais

III.6 Conclusion

Les résultats de calculs par simulation aident à montrer, que l'intégration des éoliennes diminuent l'inertie des réseaux électriques, comme toute autre ressource à énergie renouvelable, une réalité traduite par le comportement oscillatoire de l'angle des machines qui augmente avec le taux de participation de l'énergie éolienne dans un des groupes du système malgré qu'il a été choisi dans la région à inertie plus important pour éviter le déséquilibre totale du système après l'application du défaut.

Les PSSs type 1 et 2 placés dans tous les groupes ont nettement assuré la réduction et l'élimination des oscillations électromécaniques et la tenue de la stabilité du système avec une efficacité du PSS type 2 remarquable.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail porte sur le comportement dynamique des réseaux électriques dans la présence des ressources éoliennes avec différent taux de participation dans la production des groupes. Le comportement dynamique concerné est lié aux oscillations électromécaniques qui peuvent mener à un déséquilibre du système où il peut perdre sa stabilité en augmentant ce taux d'intégration puisqu'il agit directement à la diminution de l'inertie du système.

En premier lieu nous avons inséré des éoliennes par pas de 5% entant que taux de participation dans un groupe de génération du réseau étudié (InterArea).

L'insertion est limitée de 10% à 30% de la production du groupe au quelle elle est insérée.

Un défaut de court-circuit est appliqué au milieu de la ligne entre les deux zones du réseau testé. Cet incident se manifeste à l'instant 1s, des PSSs sont placé au niveau des groupes de génération. Pour voir l'effet des PSSs sur ce problème combiné plusieurs types sont testés.

Les calculs étaient assurés par des simulations réalisées par Simulink/ MATLAB.

Les résultats nous mènent à faire des constatations et tirer des conclusions ainsi que des perspectives, à conseiller aux chercheurs et au intéressés.

- L'imiter le taux de l'intégration des éoliennes est très important pour garder la stabilité du réseau.
- L'augmentation des pénétrations des ressources éoliennes augmente les oscillations électromécaniques.
- Les oscillations sans contrôle trouble la stabilité des systèmes
- La présence des PSSs réduit les ondulations de l'angle des machines du réseau perturbé.
- Les PSSs diffèrent d'un type à un autre dans leurs rôles stabilisateurs dans les réseaux électrique menacés.
- Utiliser des PSSs adaptatifs.

Pour améliorer le comportement dynamique des réseaux dans la présence des éoliennes :
Faire une optimisation du taux d'intégration des éoliennes dans un réseau.

Voir le comportement de l'éolienne intégrée à un réseau électrique vis-à-vis le potentiel éolien.

Elaborer une commande au niveau de l'éolienne pour réduire les oscillations électromécanique des machines électriques.

Bibliographie

- [1] P. Gipe, Wind Energy Comes of Age, California, 1995.
- [2] P. Berlu, «Calcul des Efforts Subis par les Eoliennes de Moyenne et Forte Puissance,» Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille I, Lille, 1999..
- [3]". T. Types", WindEurope, [En ligne]. Available: <https://windeurope.org/about-wind/technology/wind-turbine-types/>.
- [4] O. BOUCHIBA, «conception,modelisation,et simulation dune station hybrid PV/eolienne connectée au réseau».
- [5] O. BOUCHIBA, «these de doctorat».2021
- [6] GACEM Abdelmalek, « Commande Robuste D'un Dispositif FACTS Par Les Méthodes Métaheuristiques Pour La Stabilité De Tension D'un Réseau Electrique,» Thèse De Doctorat, Université Mohamed Khider, biskra, 2019.
- [7] ATHMANE Bouzidi, «Modélisation Et Simulation Des Réseaux Electriques,» Cours, Université De Abderrahmane Mira, , Bejaia, 2016/2017..
- [8] T. GHENNAM, «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation», thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lill, 2011.
- [9] MESSALTI Sabir, «Analyse de la stabilité transitoire des Réseaux de transport a courant continu en haute tension (HVDC-FACTS),» Thèse De Doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2011.
- [10] E. Nechadi, «Commande Et Stabilité D'un Système Electroenergetique,» Thèse De Doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2013.
- [11] B. V. WENDY Carolina, «Modélisation Des Réseaux De Distribution Sous Incertitudes,» Thèse De Doctorat, Université De Grenoble, 2006.
- [12] CHULASA Praing, « Stabilité D'un Réseau De Transport Avec Pôles De Production Et De Consommation Eloignés En Période De Forte Croissance,» Thèse De Doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2000.
- [13] HASAN Alkhatib, «Etude De La Stabilité Aux Petites Perturbations Dans Les Grands Réseaux Electriques : Optimisation De La Régulation Par Une Méthode Etaheuristique,» Thèse De Doctorat, Université Aix-Marseille III, Marseille , 2008.

- [14] «mathworks,» [En ligne]. Available: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/performance-of-three-pss-for-interarea-oscillations.html>.
- [15] P. Kundur, « Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994, Example 12.6, p. 813,» 1994. [En ligne].
- [16] R. Klein, «Moorthy and Kundur: "Analytical investigation of factors influencing PSS performance," IEEE Trans. on EC, Vol. 7 , No 3, September 1992, pp.382-390,» 3 september 1992. [En ligne].
- [17] A. Hammer, «Analysis of IEEE Power System Stabilizer Models,» Master of Science in Electric Power Engineering, Norwegian University of Science and Technology Department of Electric Power Engineering, June 2011..
- [18] O. Samuelsson, «Power System Damping,» Structural aspects of controlling active power,thèse, Lund, 1997.
- [19] R.D.D. A. Müller, A review on doubly fed induction generators in wind power applications, 2002.
- [20] é.d.e é.d.l.s.l.r.e.e. (. i. Centrale géothermique de Rittershoffen, Novembre 2017. [En ligne]. Available: http://www.basrhin.gouv.fr/content/download/27456/189645/file/14267_6_Etude_Imp_concession_ES-Roqu_Ritt_avann.pdf.
- [22] “. d. l. p. p. d. l. c. d. c. à. S.-L. Communiqué de presse, mars 2012. [En ligne]. Available: https://www.territoire-energie.com/wpcontent/uploads/2017/03/cp_ebm_chauffage-urbaine-saint-louis_230212.pdf.
- [23] R. d. p. d. t. d. c. d. l. d. l. M. Centrale hydroélectrique de la MEIJE, «Centrale hydroélectrique de la MEIJE, Réunion de présentation des travaux de construction de l'aménagement de la Meije,» Avril 2017. [En ligne]. Available: <https://www.lumofrance.com/uploads/2017/04/2017-04-12-reunion-info-unite-pdf.pdf>.
- [24] C. Naïm, « “Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens,» Mémoire de Magister en électrotechnique, Université de Mentouri Constantine, Constantine, 2010.