

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

## UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES  
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité :

Réseaux Electriques

## THÈME

**Design of Active Fault -Tolerant Control for Mitigating  
Communication Failures in Wide-Area Damping Control**

Préparé par : ANAYA Youcef

**BENSATALA Djamel**

Devant le Jury :

<i>Nom et prénoms</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>
<i>Mr K. NEGADI</i>	<i>Pr</i>	<i>Président</i>
<i>Mr B. BEKKI</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur 1</i>
<i>Mem M. BEDOUI</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur 2</i>
<i>Mr M. BENASLA</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Mr T. ALLAoui</i>	<i>Pr</i>	<i>Co-Encadreur</i>

PROMOTION 2023 /2024

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

## UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES  
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité :

Réseaux Electriques

## THÈME

**Conception d'un contrôle actif tolérant aux défauts pour atténuer les échecs de communication dans le contrôle d'amortissement à grande échelle**

Préparé par : ANAYA Youcef

**BENSATALA Djamel**

Devant le Jury :

<i>Nom et prénoms</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>
<i>Mr K. NEGADI</i>	<i>Pr</i>	<i>Président</i>
<i>Mr B. BEKKI</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur 1</i>
<i>Mem M. BEDOUI</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur 2</i>
<i>Mr M. BENASLA</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Mr T. ALLAoui</i>	<i>Pr</i>	<i>Co-Encadreur</i>

PROMOTION 2023 /2024

**ملخص:** يُعد نظام التحكم في التخميد على نطاق واسع (WADC) تقنية حيوية لتعزيز استقرار وأمان الأنظمة الكهربائية الحديثة. ومع ذلك، فإن اعتماد أنظمة WADC على شبكات الاتصالات يجعلها عرضة لفشل الاتصالات. يهدف هذا المقترح لرسالة المساتير إلى معالجة هذا التحدي الحاسم من خلال تصميم نظام تحكم نشط متحمل للأعطال (FTC) يضمن مرونة وأداء WADC في ظل اضطرابات الاتصالات. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تصميم وتنفيذ إطار عمل FTC نشط يمكنه اكتشاف إشارات التغذية المرتدة الخاطئة بشكل موثوق واختيار إشارات بديلة صحية في الوقت الحقيقي للحفاظ على أداء تخميد مقبول. سيتم تصميم النظام ليتكيف ديناميكيًا مع ظروف الأعطال، مما يضمن استمرار تشغيل نظام التحكم واستقراره. سيتم إجراء تحليلات مودالية ومحاكاة زمنية للتحقق من أداء الطريقة المقترحة. يهدف هذا الدراسة إلى المساهمة في المجال من خلال تقديم حل مبتكر لتعزيز متانة أنظمة WADC في مواجهة فشل الاتصالات والتهديد المتزايد للهجمات الإلكترونية. من المتوقع أن تحسن نهج FTC المقترح من موثوقية وأداء الأنظمة الكهربائية الحديثة، مما يؤدي إلى زيادة استقرار الشبكة وتقليل القابلية للتعرض لاضطرابات الشبكة والتهديدات الإلكترونية. مع تطور الأنظمة الكهربائية ودمج تقنيات التحكم الأكثر تقدمًا، يصبح الحاجة إلى WADC موثوقة ومرنة أمرًا حاسمًا. من المتوقع أن تكون نتائج هذه الرسالة ذات تأثير عملي على قطاع الطاقة، مما يعزز اعتماد WADC كأداة أساسية لاستقرار الشبكة في مواجهة تحديات الاتصالات.

**Résumé :** Le contrôle d'amortissement à grande échelle (WADC) est une technologie essentielle pour améliorer la stabilité et la sécurité des systèmes électriques modernes. Cependant, la dépendance des systèmes WADC aux réseaux de communication les rend vulnérables aux échecs de communication. Cette proposition de mémoire de master vise à relever ce défi critique en concevant un système de contrôle tolérant aux fautes (FTC) actif qui assure la résilience et les performances des WADC en cas de perturbations de communication. L'objectif principal de cette recherche est de concevoir et de mettre en œuvre un cadre FTC actif capable de détecter de manière fiable les signaux de rétroaction défectueux et de sélectionner ensuite en temps réel des signaux alternatifs sains pour maintenir des performances d'amortissement acceptables. Le système sera conçu pour s'adapter dynamiquement aux conditions de défaut, garantissant ainsi la continuité du fonctionnement et de la stabilité du système de contrôle. Des analyses modales et des simulations temporelles seront réalisées pour vérifier les performances de la méthode proposée. Cette étude vise à contribuer au domaine en fournissant une solution innovante pour améliorer la robustesse des systèmes WADC face aux échecs de communication et à la menace croissante des cyber-attaques. L'approche FTC proposée devrait améliorer la fiabilité et les performances des systèmes électriques modernes, menant à une stabilité accrue du réseau et réduisant la vulnérabilité aux perturbations des réseaux de communication et aux cyber-menaces. À mesure que les systèmes électriques évoluent et intègrent des techniques de contrôle plus avancées, le besoin de WADC fiables et résilients devient crucial. Les résultats de ce mémoire devraient avoir des implications pratiques pour le secteur de l'énergie, en favorisant l'adoption des WADC comme un outil essentiel pour la stabilité du réseau face aux échec de communication.

**Abstract:** Wide-Area Damping Control (WADC) is a crucial technology for enhancing the stability and security of modern power systems. However, the reliance on communication networks in WADC systems makes them susceptible to communication failures. This Master's thesis proposal aims to address this critical challenge by designing an Active Fault-Tolerant Control (FTC) system that ensures the resilience and performance of WADC under communication disruptions. The primary objective of this research is to design and implement an active FTC framework that can reliably detect faulty feedback signals and subsequently select healthy alternative signals in real-time to maintain acceptable damping performance. The system will be designed to adapt dynamically to fault conditions, ensuring continued control system operation and stability. Modal analysis and time domain simulations will be performed to verify the performance of the proposed method. This study aims to contribute to the field by providing an innovative solution for enhancing the robustness of WADC systems in the face of communication failures and the growing threat of cyber-attacks. The proposed FTC approach is anticipated to improve the reliability and performance of modern power systems, ultimately leading to increased grid stability and reducing susceptibility to both network disruptions and cyber threats. As power systems continue to evolve and integrate more advanced control techniques, the need for reliable and resilient WADC becomes critical. The results of this Master's thesis are expected to have practical implications for the energy sector, promoting the adoption of WADC as a crucial tool for grid stability in the presence of communication challenges.

# Table des matières

## Table des matières

Introduction Générale : ..... 1

### **Chapitre 01** : Introduction à la surveillance et au contrôle à grande échelle (WAMC)

I.1 Introduction : ..... 3

I.2 Explication des systèmes électriques interconnectés d'aujourd'hui :..... 3

I.3 Définition et structure des WAMS : ..... 4

I.3.1. Définition des WAMS : ..... 4

I.3.2. Structure des WAMS : ..... 4

I.3.3 Fonctionnement global des WAMS : ..... 5

I.4. Historique du développement des WAMS et leur application dans les réseaux électriques

I.4.1. Historique : ..... 6

I.4.2. Applications modernes et avantages des WAMS : ..... 6

I.4.3. Les principales applications des WAMS incluent : [11] ..... 7

I.5 Définition des PMU et leur rôle dans les WAMS : ..... 7

I.5.1 Définition des PMU : ..... 7

I.5.2 Rôle des PMU dans les WAMS : ..... 7

I.5.3 Avantages des PMU dans les WAMS : ..... 8

I.6. Comparaison entre les systèmes WAMS et SCADA : ..... 9

I.6.1. Définition et objectifs WAMS : ..... 9

I.6.2. Technologies utilisées WAMS : ..... 10

I.6.3. Portée et échelle WAMS : ..... 10

I.6.4 Applications et Fonctionnalités ..... 10

I.6.5 Avantages et Limitations ..... 11

I.7 Défis des futurs WAMS : ..... 12

I.7.1 Intégration des énergies renouvelables : ..... 12

I.7.2 Sécurité et cybersécurité..... 12

I.7.3 Gestion des données massives : ..... 12

I.7.4 Fiabilité des communications : ..... 13

I.8 Défis des échecs de communication dans les WAMS : ..... 13

I.9. Introduction au contrôleur d'amortissement à grande échelle (WADC) : ..... 14

I.9.1. Définition du WADC : ..... 14

I.9.2. Rôle important du WADC : .....	14
I.9.3. Principe de fonctionnement du WADC : .....	15
I.10 Conclusion.....	16

**Chapitre 02: WADC et le défi des échecs de communication**

II.1 Introduction : .....	16
II.2 Présentations du problème des oscillations dans les systèmes électriques : .....	16
II.2.1 Les différents types d'oscillations à faibles fréquences : .....	17
□ Les oscillations des modes locaux : .....	18
□ Les oscillations des modes interzones : .....	18
□ Les oscillations des modes de contrôle : .....	19
□ Les oscillations des modes de torsion : .....	19
II.2.2 Analyser les modes d'oscillation dans les systèmes électriques : .....	19
II.2.3 Réside : .....	21
II.3 PSS conventionnel comme outil pour amortir les oscillations de puissance : .....	23
II.3.1 Contrôleur d'amortissement à grande échelle (WADC : Wide-Aera Damping Controller) : .....	24
II.3.2 Structure et Fonctionnement : .....	24
II.3.3 Conception de systèmes WADC : .....	25
II.3.4 Effet des retards de communication dans les WADC et stratégies de gestion : .	27
II.3.5 Problème d'échec de communication dans les WADC :Erreur ! Signet non défini.	
II.4 Exemple d'application : .....	30
II.4.1 Système de test : .....	30
II.4.2 Analyse modale : .....	30
II.4.3 Utilisation du PSS : .....	31
II.4.4 Conception d'un WADC : .....	33
II.5 Conclusion : .....	34

**Chapitre 03 : Conception d'un nouveau FTC pour atténuer les échecs de communication**

III.1 Introduction : .....	39
III.2 Structure du WADC et échecs potentiels : .....	39
III.2.1 3. Structure .....	39
III.2.2 Signal d'entrée : .....	39

III.2.3	3.2.3 Échecs potentiels :.....	39
III.3	Contrôle tolérant aux fautes proposé :.....	40
III.3.1	Contrôle tolérant aux fautes (FTC) :.....	40
III.3.2	Identification des modes électromécaniques dans les systèmes électriques : ....	41
III.3.3	Identification par sous-espaces stochastiques : .....	42
III.3.4	Organigramme de la méthode FTC proposée :.....	45
III.3.5	Application :.....	47
III.4	Conclusion.....	51
	Conclusion Générale.....	55

## Liste des Figures

Figure (1-1) : Structure des WAMS

Figure(1-2) : PMU dans le WAMS

Figure (1-3): Structure du système WADC

La Figure (2-1). Influence du couple d'amortissement sur la stabilité.

Le figure (2-2) classification de la stabilité de l'angle de rotor

Figure (2-3) Système de puissance simple à deux régions.

Figure (2-4) : L'ensemble système-contrôleur en boucle fermée

Le Figure (2-5) : Structure générale d'un système d'excitation statique avec son AVR et PSS.

Le Figure (2-6) : Modèle d'un PSS conventionnel

Le Figure (2-7) : Structure de contrôle à deux niveaux.

La Figure (2-8) : Distribution temporisée dans china southern grid

La figure (2-9) un système typique à deux zones

La figure (2-11) Simulation d'un défaut triphasé avec et sans PSS dans G2

La figure (2-12) Simulation d'un défaut triphasé avec et sans WADC

La figure (2-13) Simulation d'un défaut triphasé avec et sans échec de communication

Figure 3.1 Problème d'identification de système

Figure(3-2) : Organigramme illustrant le FTC proposé.

Figure (3-3) : Réponses lorsque  $\Delta\omega_3$  est perdu et que  $\Delta\omega_{14}$  est utilisé comme entrée

Figure (3-4). Réponses lorsque  $\Delta\omega_3$  est perdu et que  $\Delta\omega_{24}$  est utilisé comme entrée.

Figure 3-5. Réponses lorsque  $\Delta\omega_3$  ou  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $-\Delta\omega_4$  est utilisé comme entrée.

Figure (3-6). Réponses lorsque  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $\Delta\omega_{23}$  est utilisé comme entrée.

Figure (3-7). Réponses lorsque  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $\Delta\omega_{24}$  est utilisé comme entrée.

Figure(3-8) Réponses lorsque  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $-\Delta\omega_3$  est utilisé comme entrée.

Figure(3-9). Réponses lorsque  $\Delta\omega_3$  est perdu et que  $\Delta\omega_{14}$  est utilisé comme entrée.

Figure(3-10). Réponses lorsque  $\Delta\omega_3$  est perdu et que  $\Delta\omega_{24}$  est utilisé comme entrée.

Figure(3-11). Réponses lorsque  $\Delta\omega_3$  ou  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $-\Delta\omega_4$  est utilisé comme entrée.

Figure(3-12) Réponses lorsque  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $\Delta\omega_{23}$  est utilisé comme entrée.

Figure (3-13). Réponses lorsque  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $\Delta\omega_{24}$  est utilisé comme entrée.

Figure (3-14). Réponses lorsque  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $-\Delta\omega_3$  est utilisé comme entrée

Figure (3-15). Exécution de la fonction "n4sid" dans MATLAB.

Figure (3-16). Identification Toolbox pour vérifier les résultats.

## Liste des Tableaux

Tableau I-1 : Différences entre les systèmes WAMS et SCADA

Tableau II.1 : Modes d'oscillation du système sans PSS

Tableau II.2: L'amortissement du mode d'oscillation avec PSS (G2)

Tableau II.3 : indices d'observabilité du mode interzone.

Tableau II.4 : Indices d'observabilité du mode interzones avec PSS local en G2

Tableau III.1 : Angle du résidu, indice d'observabilité et facteur d'amortissement des signaux choisis

## **Nomenclature:**

<b>WADC</b>	Wide Area Damping Control
<b>WAMS</b>	Wide Area Measurement System
<b>SSI</b>	Stochastic Subspace Identification
<b>PSS</b>	Power System Stabilizer
<b>PMU</b>	Phasor Measurement Unit
<b>HVDC</b>	High Voltage Direct Current
<b>FACTS</b>	Flexible AC Transmission System
<b>NASPI</b>	North America Synchrophasor Initiative
<b>SSI</b>	Stochastic Subspace Identification
<b>PDC</b>	<i>Phasor Data Concentrator</i>
<b>AVR</b>	<i>Automatic Voltage Regulators</i>

# Introduction Générale

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Dans le contexte moderne où la demande en énergie électrique ne cesse de croître, les réseaux électriques connaissent une expansion rapide, rendant leur gestion de plus en plus complexe. Pour garantir une distribution stable et fiable de l'énergie, il est impératif de surveiller et de contrôler ces vastes réseaux de manière efficace. Les systèmes de surveillance et de contrôle à grande échelle (WAMS : Wide-Area Monitoring System) jouent un rôle essentiel dans cette tâche, permettant de maintenir la stabilité et la sécurité des réseaux électriques contemporains.

Parmi ces systèmes, le Contrôle d'Amortissement à Grande Échelle (WADC : Wide-Area Damping Controller) se distingue par sa capacité à atténuer les oscillations du système et à améliorer la stabilité dynamique des réseaux. Cependant, la dépendance des WADC aux réseaux de communication les rend vulnérables aux échecs de communication, ce qui peut compromettre leur performance et leur fiabilité. Face à ce défi, il devient crucial de développer des systèmes de contrôle tolérants aux fautes (FTC : Fault-Tolerant Control) capables de maintenir la stabilité du réseau même en cas de défaillance de communication.

Ce mémoire s'attache à aborder ce défi critique en concevant un système de FTC actif pour les WADC, destiné à garantir leur résilience et performance en présence de perturbations de communication. L'objectif principal de cette recherche est de concevoir et de mettre en œuvre un cadre FTC actif qui puisse détecter de manière fiable les signaux de rétroaction défectueux et sélectionner des signaux alternatifs sains en temps réel, afin de maintenir des performances d'amortissement acceptables. Le système devra s'adapter dynamiquement aux conditions de défaillance, assurant ainsi la continuité des opérations de contrôle et la stabilité du réseau.

À travers une analyse modale et des simulations en domaine temporel, la performance de la méthode proposée sera vérifiée. Cette étude vise à apporter une solution innovante pour renforcer la robustesse des systèmes WADC face aux échecs de communication et aux menaces croissantes des cyber-attaques. La méthode FTC proposée est censée améliorer la fiabilité et la performance des systèmes électriques modernes, augmentant ainsi la stabilité du réseau et réduisant la vulnérabilité aux perturbations du réseau de communication et aux cyber-menaces. Au fur et à mesure que les systèmes électriques évoluent et intègrent des techniques de contrôle de plus en plus avancées, la nécessité de WADC fiables et résilients devient critique. Les résultats de ce mémoire devraient avoir des implications pratiques importantes pour le secteur de l'énergie, en favorisant l'adoption des WADC comme outil essentiel pour la stabilité du réseau en présence de défis de communication.

## Plan du Mémoire

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux, chacun abordant un aspect clé du contrôle d'amortissement à grande échelle et de la tolérance aux fautes.

### ➤ **Chapitre 1 : Introduction à la surveillance et au contrôle à grande échelle (WAMCs)**

Ce chapitre offre un aperçu complet des technologies de surveillance et de contrôle à grande échelle, essentielles pour garantir la stabilité et la sécurité des réseaux électriques modernes. Nous examinerons l'évolution et l'importance de ces technologies dans la gestion efficace des réseaux de grande envergure, en mettant l'accent sur le Contrôle d'Amortissement à Grande Échelle (WADC) et son rôle crucial.

### ➤ **Chapitre 2 : WADC et le défi des échecs de communication**

Ce chapitre se concentre sur les oscillations dans les réseaux électriques, un problème critique pour la stabilité et la sécurité des systèmes électriques. Nous explorerons les différents types d'oscillations, les dangers qu'elles représentent, et les stabilisateurs de système électrique conventionnels (CPSS : Conventional Power System Stabilizer). Nous examinerons ensuite les contrôleurs d'amortissement à grande échelle WADC et les échecs de communication potentiels, ainsi que les techniques existantes pour atténuer ces échecs.

### ➤ **Chapitre 3 : Conception d'un nouveau FTC pour atténuer les échecs de communication**

Ce chapitre se focalise sur la conception d'un nouveau FTC adapté aux systèmes WADC. L'objectif est de développer un algorithme en temps réel pour la sélection de signaux d'entrée sains capables de remplacer les signaux défectueux en cas d'échec de communication. Nous détaillerons la conception, la mise en œuvre et les performances de cet algorithme, en soulignant son potentiel pour améliorer la robustesse des systèmes WADC.

# **Chapitre :01**

**Introduction à la surveillance et au contrôle à  
grande échelle (WAMC)**

## **I.1 Introduction :**

Dans le monde moderne, la demande en énergie électrique est en constante augmentation. Cela a conduit à une expansion rapide des réseaux électriques, rendant leur gestion de plus en plus complexe. Pour assurer une distribution d'énergie stable et fiable, il est essentiel de surveiller et de contrôler efficacement ces vastes réseaux. C'est là qu'interviennent les systèmes de surveillance et de contrôle à grande échelle (WAMCS: Wide Area Monitoring and Control Systems).

Ce chapitre offre un aperçu complet des technologies de surveillance et de contrôle à grande échelle, essentielles pour garantir la stabilité et la sécurité des réseaux électriques modernes. Nous commencerons par examiner l'évolution et l'importance de ces technologies dans la gestion efficace des réseaux de grande envergure. Ensuite, nous nous concentrerons spécifiquement sur le Contrôle d'amortissement à grande échelle (Wide-Area Damping Controller, WADC), en soulignant son rôle crucial dans les opérations des systèmes électriques contemporains. Le WADC représente une avancée significative dans la capacité à atténuer les oscillations du système et à améliorer la stabilité dynamique des réseaux électriques modernes.

## **I.2 Explication des systèmes électriques interconnectés d'aujourd'hui :**

Le paysage des systèmes électriques interconnectés a subi une transformation profonde, évoluant en des réseaux vastes et complexes qui s'étendent sur des régions géographiques étendues. Avec la demande croissante en électricité, l'échelle de ces systèmes a connu une expansion exponentielle. Cette croissance concerne non seulement la couverture géographique, mais également la complexité des composants interconnectés. De multiples réseaux, souvent répartis entre différents pays ou régions, sont méticuleusement tissés ensemble pour faciliter le partage des ressources et optimiser l'utilisation de l'énergie. Cette interdépendance complexe a engendré un réseau de lignes de transmission, de postes électriques et de réseaux interconnectés, formant une infrastructure hautement sophistiquée. La magnitude de ces systèmes, combinée à l'intégration de sources d'énergie diverses et de technologies avancées, crée un nouveau paradigme pour les opérateurs de réseaux. Naviguer à travers ce terrain expansif et complexe nécessite un équilibre délicat entre expertise technique, systèmes avancés de surveillance et de contrôle, ainsi qu'une planification stratégique pour assurer le fonctionnement fiable et résilient de ces réseaux électriques interconnectés. Cependant, la complexité croissante de ces systèmes interconnectés a engendré divers problèmes de stabilité qui défient les gestionnaires de réseau. Ci-dessous, nous expliquons les principales caractéristiques des systèmes électriques interconnectés d'aujourd'hui :[1]

### **✓ Difficulté de construction de nouvelles lignes de transmission :**

Les défis liés à l'obtention des droits de passage pour la construction de nouvelles lignes de transmission aériennes ont poussé les opérateurs du système de transmission (GRT) à maximiser l'utilisation des infrastructures existantes. Cela est crucial pour répondre à la demande croissante en électricité tout en évitant les complexités associées à la construction de nouvelles lignes de transmission.[2]

### **✓ Pénétration croissante des énergies renouvelables intermittentes :**

La part croissante des ressources énergétiques renouvelables intermittentes et variables, telles que l'énergie solaire et éolienne, introduit des incertitudes dans les opérations du système électrique. Cette incertitude accrue rend plus difficile pour les GRT de respecter le critère N-1 (assurant une redondance pour la fiabilité du système) sans recourir à des contrôles d'urgence.[3]

### **✓ Adoption de lignes HVDC et dispositifs FACTS :**

L'adoption croissante de lignes à courant continu à haute tension (HVDC) et des systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS : Flexible Alternating Current Transmission System) constitue une réponse aux défis posés par l'évolution du paysage énergétique. Ces technologies offrent des solutions innovantes pour concevoir des contrôles d'urgence plus rapides et plus efficaces. Les liens

HVDC, par exemple, facilitent la transmission d'électricité sur de longues distances avec des pertes moindres, tandis que les dispositifs FACTS améliorent la stabilité et le contrôle du réseau.[4]

✓ **Développement de systèmes de surveillance à grande échelle (WAMS) avec PMUs :**

Le développement rapide et le déploiement de systèmes de surveillance à grande échelle (WAMS : Wide-Area Measurement system) basés sur des unités de mesure de phase (PMU : Phasor Measurement Units) marquent une avancée significative. Ces systèmes fournissent des mesures synchronisées en temps réel sur une vaste zone géographique. En mettant en œuvre des schémas de contrôle d'urgence en boucle fermée qui exploitent des mécanismes de rétroaction, les opérateurs de réseau peuvent répondre rapidement à des perturbations arbitraires. Cela améliore la stabilité globale et la résilience des systèmes électriques interconnectés.

Comprendre et aborder ces caractéristiques est essentiel pour gérer efficacement et garantir la fiabilité des systèmes électriques interconnectés d'aujourd'hui [5]

### **I.3 Définition et structure des WAMS :**

#### **I.3.1. Définition des WAMS :**

Les systèmes de surveillance à grande échelle, connus sous le nom de Wide-Area Monitoring Systems (WAMS), sont des ensembles de technologies et d'outils utilisés pour surveiller en temps réel les conditions et les performances des réseaux électriques sur de vastes zones géographiques. Les WAMS collectent, analysent et transmettent des données précises et synchronisées sur les paramètres électriques grâce à des unités de mesure phase (Phasor Measurement Units, PMU) et d'autres capteurs avancés. Ces systèmes permettent aux opérateurs de réseau de détecter rapidement les anomalies, d'améliorer la stabilité du réseau et d'optimiser l'exploitation des infrastructures électriques.[6]

#### **I.3.2. Structure des WAMS :**

La structure d'un système WAMS se compose de plusieurs composants interconnectés, chacun jouant un rôle crucial dans la surveillance et le contrôle du réseau électrique. Voici les principaux éléments constitutifs des WAMS : [7]

##### **1. Unité de mesure phase (PMU)**

- **Fonction** : Les PMUs mesurent les grandeurs électriques telles que les tensions et les courants à des points stratégiques du réseau avec une précision temporelle élevée, synchronisée par GPS.
- **Rôle** : Elles fournissent des données instantanées et synchronisées sur les conditions du réseau, essentielles pour analyser les phénomènes dynamiques.

##### **2. Systèmes de communication**

- **Fonction** : Transmettre les données collectées par les PMUs aux centres de contrôle en temps réel.
- **Rôle** : Utilisent diverses technologies de communication, telles que la fibre optique, les réseaux sans fil et les satellites, pour assurer une transmission rapide et fiable des données.

##### **3. Centre de traitement et d'analyse des données**

- **Fonction** : Regrouper, stocker et analyser les données transmises par les PMUs.
  - **Rôle** : Utilise des logiciels avancés pour traiter les données, identifier les anomalies, prévoir les perturbations et soutenir la prise de décision en temps réel.
4. **Interface homme-machine (IHM)**
- **Fonction** : Fournir aux opérateurs de réseau une visualisation claire et intuitive des données du réseau.
  - **Rôle** : Permet aux opérateurs de surveiller l'état du réseau, d'identifier les problèmes potentiels et de prendre des mesures correctives rapidement.
5. **Systèmes de contrôle et de protection**
- **Fonction** : Mettre en œuvre les décisions prises par les gestionnaires ou par les systèmes automatisés en réponse aux anomalies détectées.
  - **Rôle** : Incluent des dispositifs de contrôle tels que les relais de protection, les disjoncteurs et les dispositifs FACTS pour stabiliser et protéger le réseau.

### I.3.3 Fonctionnement global des WAMS :

Le fonctionnement des WAMS repose sur l'intégration et la coopération de ces composants. Les PMUs situées à divers points du réseau captent les données électriques synchronisées, qui sont ensuite transmises via des systèmes de communication robustes aux centres de traitement. Ces centres analysent les données en temps réel, permettant aux gestionnaires de visualiser l'état du réseau et d'identifier rapidement les perturbations. Les systèmes de contrôle et de protection sont alors activés pour prendre les mesures nécessaires afin de maintenir la stabilité et la fiabilité du réseau électrique.[8]

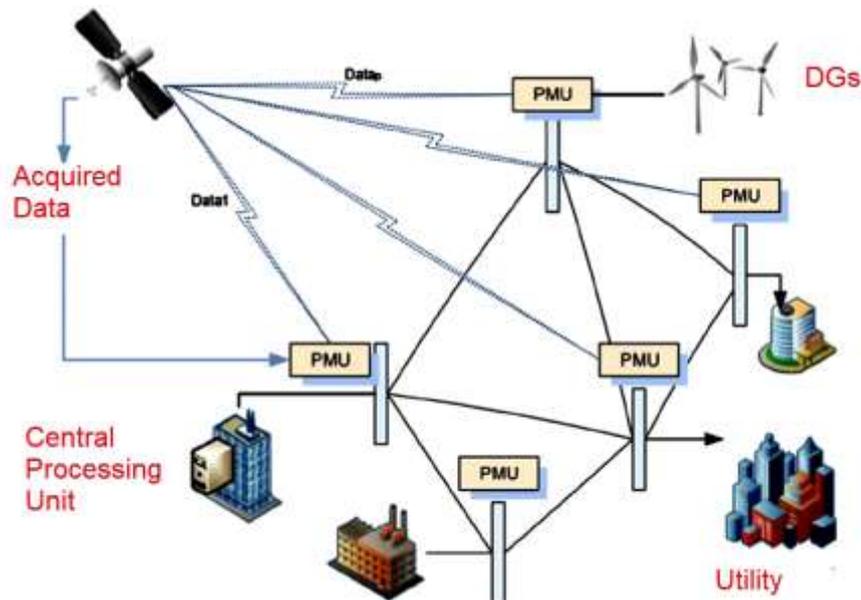


Figure (1-1) : Structure des WAMS [9]

## **I.4. Historique du développement des WAMS et leur application dans les réseaux électriques :**

### **I.4.1. Historique :**

Les systèmes de surveillance à grande échelle WAMS ont transformé la manière dont les réseaux électriques sont gérés, en offrant une visibilité en temps réel et des capacités de réponse rapide aux perturbations. Voici un aperçu de leur développement et de leur application dans les réseaux électriques à travers le monde.[10]

#### **Années 1980-1990 : Les prémices des WAMS**

L'introduction des unités de mesure PMU dans les années 1980 a marqué le début du développement des WAMS. Les PMU permettent de mesurer les grandeurs électriques synchronisées avec une précision temporelle élevée, grâce à la synchronisation par GPS. Ces avancées technologiques ont posé les bases de la surveillance à grande échelle en temps réel des réseaux électriques.

#### **Années 2000 : Déploiement initial et premiers succès**

Les premières implémentations des WAMS ont été réalisées au début des années 2000. Des projets pionniers aux États-Unis, comme le North American SynchroPhasor Initiative (NASPI), ont démontré l'efficacité des WAMS pour améliorer la fiabilité et la stabilité du réseau électrique. Des pays comme la Chine et l'Inde ont également commencé à investir massivement dans les technologies WAMS pour moderniser leurs infrastructures électriques.

#### **Années 2010 : Expansion mondiale et adoption accrue**

Au cours de la décennie suivante, le déploiement des WAMS s'est intensifié à travers le monde. En Europe, des initiatives comme le projet ITESLA et le projet REALISEGRID ont illustré l'engagement du continent à intégrer les WAMS pour la gestion des réseaux transfrontaliers. En Asie, la Chine a largement adopté les WAMS, en les intégrant dans son réseau électrique national pour gérer la forte croissance de la demande énergétique et l'intégration des énergies renouvelables.

### **I.4.2. Applications modernes et avantages des WAMS :**

Aujourd'hui, les WAMS sont utilisés dans de nombreux pays pour diverses applications critiques dans les réseaux électriques, notamment : [11]

- **États-Unis** : Les WAMS sont largement utilisés pour améliorer la résilience du réseau face aux catastrophes naturelles et aux cyberattaques. Le projet NASPI continue de jouer un rôle crucial dans l'expansion et l'optimisation des WAMS.
- **Chine** : La Chine utilise les WAMS pour gérer la stabilité de son vaste réseau électrique, particulièrement important en raison de la forte proportion d'énergies renouvelables intermittentes comme l'éolien et le solaire.
- **Inde** : Les WAMS aident à stabiliser le réseau électrique indien, qui est soumis à des variations de charge importantes et à des défis liés à l'intégration des énergies renouvelables.

- **Europe** : Les pays européens utilisent les WAMS pour surveiller et contrôler les réseaux électriques transfrontaliers, assurant ainsi une distribution stable et fiable de l'énergie à travers le continent.

#### **I.4.3. Les principales applications des WAMS incluent : [11]**

- **Détection et localisation des pannes** : Les WAMS permettent de détecter rapidement les anomalies et les pannes, facilitant des interventions rapides pour minimiser les interruptions de service.
- **Amélioration de la stabilité du réseau** : Les données en temps réel fournies par les WAMS aident les gestionnaires à comprendre les dynamiques du réseau et à prendre des mesures proactives pour maintenir la stabilité.
- **Gestion des énergies renouvelables** : Les WAMS sont essentiels pour intégrer efficacement les sources d'énergie renouvelable, en surveillant leur impact sur le réseau et en adaptant les opérations en conséquence.
- **Optimisation de l'exploitation du réseau** : Les informations détaillées et synchronisées des WAMS permettent d'optimiser l'utilisation des ressources et de réduire les pertes d'énergie.

En conclusion, les WAMS représentent une avancée significative dans la gestion des réseaux électriques modernes, offrant des capacités de surveillance et de contrôle inégalées qui sont essentielles pour répondre aux défis énergétiques actuels et futurs.

### **I.5 Définition des PMU et leur rôle dans les WAMS :**

#### **I.5.1 Définition des PMU :**

Les unités de mesure phase PMU sont des dispositifs de mesure avancés qui mesurent la tension, le courant et leur phase dans les réseaux électriques. Ces mesures sont synchronisées temporellement avec une grande précision grâce à la synchronisation par GPS, ce qui permet de fournir des informations en temps réel sur l'état du réseau électrique. [12]

#### **I.5.2 Rôle des PMU dans les WAMS :**

Les PMUs jouent un rôle central et crucial dans la mise en œuvre des systèmes WAMS en fournissant des informations temporelles et de phase précises sur l'état du réseau. Voici leurs rôles principaux :[13]

##### **✓ Mesure synchronisée des phasors**

Les PMUs mesurent les phasors de la tension et du courant à des points stratégiques du réseau avec une précision temporelle élevée. Ces mesures incluent la magnitude et la phase des grandeurs électriques, essentielles pour une analyse détaillée du réseau.

##### **✓ Collecte et transmission des données en temps réel**

Les PMUs transmettent les données collectées en temps réel aux centres de contrôle via des réseaux de communication sécurisés et fiables. Cela permet une surveillance continue et instantanée des conditions du réseau.

✓ **Détection des anomalies et des perturbations**

En fournissant des mesures synchronisées de différents points du réseau, les PMUs permettent de détecter rapidement les anomalies, les perturbations et les variations dynamiques, telles que les oscillations de puissance, les chutes de tension, et les défaillances de composants.

✓ **Analyse et amélioration de la stabilité du réseau**

Les données des PMUs sont utilisées pour analyser la stabilité du réseau en temps réel, identifier les risques de défaillance et prendre des mesures préventives pour maintenir la stabilité. Cela inclut des actions comme le réajustement de la charge et l'activation de dispositifs de contrôle.

### **I.5.3 Avantages des PMU dans les WAMS :**

✓ **Précision et synchronisation temporelle**

Grâce à la synchronisation GPS, les PMUs fournissent des mesures extrêmement précises et synchronisées, permettant une analyse cohérente des conditions du réseau à tout moment.

✓ **Détection rapide des événements**

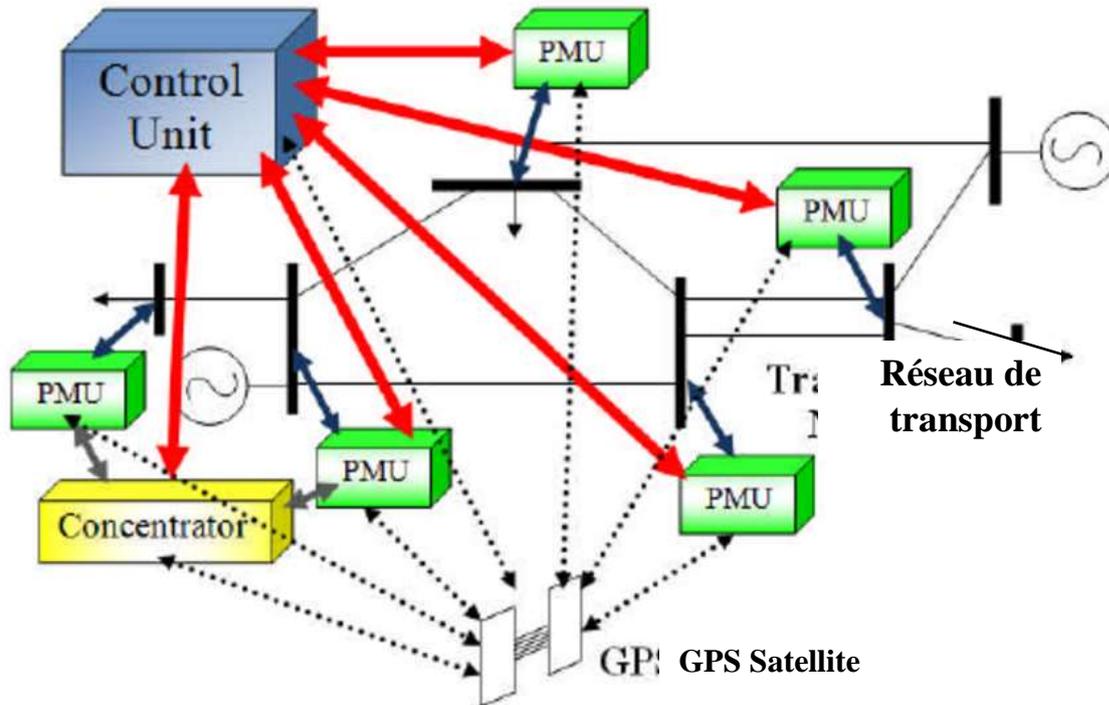
Les PMUs permettent la détection presque instantanée des anomalies et des perturbations, permettant aux opérateurs de réagir rapidement pour minimiser les impacts et éviter les pannes majeures.

✓ **Amélioration de la visibilité du réseau**

En collectant des données de multiples points du réseau, les PMUs offrent une vue détaillée et complète de l'état du réseau, aidant à une meilleure compréhension des dynamiques et des interactions au sein du système.

✓ **Support à la prise de décision**

Les données précises et en temps réel des PMU aident les gestionnaires et les systèmes automatisés à prendre des décisions informées et rapides pour gérer les conditions du réseau de manière efficace.



Figure(1-2) : PMU dans le WAMS [14]

## I.6. Comparaison entre les systèmes WAMS et SCADA :

Les systèmes de surveillance à grande échelle WAMS et les systèmes de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) sont deux technologies essentielles utilisées dans la gestion des réseaux électriques. Bien qu'ils partagent certains objectifs communs, leurs fonctionnalités, technologies sous-jacentes et applications diffèrent considérablement. Voici une comparaison détaillée entre ces deux systèmes : [15]

### I.6.1. Définition et objectifs WAMS :

- **Définition** : Les WAMS sont des systèmes avancés de surveillance en temps réel qui utilisent des unités de mesure phasorielle (PMU) pour collecter des données synchronisées sur les tensions, les courants et leurs phases à travers le réseau électrique.
- **Objectifs** : Améliorer la stabilité et la fiabilité du réseau en fournissant une visibilité en temps réel et des analyses détaillées sur les conditions du réseau.

### SCADA:

- **Définition** : Les systèmes SCADA sont utilisés pour superviser, contrôler et automatiser les infrastructures critiques telles que les réseaux électriques, les pipelines, les systèmes de distribution d'eau, etc. Ils collectent des données en temps réel à partir de divers capteurs et dispositifs de terrain.
- **Objectifs** : Superviser et contrôler les opérations quotidiennes du réseau, automatiser les processus, et fournir des informations pour la gestion et la maintenance des infrastructures.

### I.6.2. Technologies utilisées WAMS :

- **PMUs** : Unités de mesure phasorielle synchronisées par GPS pour des mesures précises des phasors de tension et de courant.
- **Systèmes de communication à haute vitesse** : Fibre optique, réseaux sans fil et satellites pour une transmission rapide des données.
- **Centres de traitement avancés** : Logiciels d'analyse en temps réel pour traiter les données et détecter les anomalies.

#### SCADA :

- **RTU et PLC** : Unités terminales distantes (RTU) et automates programmables (PLC) pour la collecte et le contrôle des données.
- **Réseaux de communication** : Utilisation de diverses technologies comme Ethernet, radio, modem téléphonique, etc.
- **Serveurs SCADA et HMI** : Logiciels SCADA pour l'acquisition, le traitement des données, et interfaces homme-machine (HMI) pour la visualisation et le contrôle.

### I.6.3. Portée et échelle WAMS :

- **Portée géographique large** : Surveillance de vastes zones géographiques, souvent à l'échelle nationale ou régionale.
- **Données synchronisées** : Collecte de données synchronisées en temps réel permettant une analyse cohérente à travers tout le réseau.

#### SCADA :

- **Portée plus locale** : Utilisé principalement pour la gestion locale des infrastructures, avec une portée géographique plus limitée.
- **Données non synchronisées** : Collecte de données en temps réel, mais sans la synchronisation temporelle précise.

### I.6.4 Applications et Fonctionnalités

#### WAMS :

- **Analyse de la stabilité du réseau** : Identification des oscillations de puissance, analyse des défauts et des conditions de défaillance.
- **Prévention des pannes** : Détection proactive des anomalies pour éviter les pannes majeures.
- **Intégration des énergies renouvelables** : Gestion des fluctuations des sources d'énergie renouvelable.

#### SCADA :

- **Supervision et contrôle** : Surveillance des opérations quotidiennes et contrôle des équipements en temps réel.
- **Automatisation** : Automatisation des processus industriels et des systèmes de distribution.

- **Maintenance et gestion des actifs** : Surveillance de l'état des équipements pour planifier la maintenance et prolonger la durée de vie des actifs.

### I.6.5 Avantages et Limitations

#### WAMS :

- **Avantages** :
  - ✓ Surveillance en temps réel avec des mesures précises et synchronisées.
  - ✓ Amélioration de la stabilité et de la fiabilité du réseau.
  - ✓ Capacité à gérer les dynamiques complexes du réseau électrique.
- **Limitations** :
  - ✓ Coûts élevés d'installation et de maintenance.
  - ✓ Besoin de technologies de communication avancées

#### SCADA :

- **Avantages** :
  - ✓ Éprouvé et largement utilisé dans diverses industries.
  - ✓ Automatisation efficace des processus et amélioration de l'efficacité opérationnelle.
  - ✓ Flexibilité pour différentes applications et échelles.
- **Limitations** :
  - ✓ Moins de précision et de synchronisation temporelle par rapport aux WAMS.
  - ✓ Moins adapté à l'analyse dynamique en temps réel des réseaux à grande échelle.

Le tableau (I-1) Résume les principales différences entre les systèmes WAMS et SCADA:

Caractéristique	SCADA	WAMS
Portée de la surveillance	Locale (Sous-station, zones spécifiques)	Étendue (réseau électrique, région)
Type de Donnée Mesure	Niveaux de tension, courants, états des disjoncteurs, etc.	Mesures synchrophasées avancées
Fréquence de Mesure	Basse (intervalles de plusieurs secondes à quelques minutes)	Haute (plusieurs dizaines d'échantillons par seconde)
Applications	Surveillance en temps réel, contrôle d'équipements, collecte de données opérationnelles, gestion des actifs locaux	Détection d'oscillation électromécanique, surveillance de la stabilité du réseau, coordination des opérations sur grandes distances, reconstitution du système après des perturbations
Objectif principal	Amélioration de l'efficacité opérationnelle et de la fiabilité des équipements locaux	Amélioration de la stabilité et de la sécurité des réseaux électriques sur de larges zones, facilitation de la prise de décision pour les opérateurs

## **I.7 Défis des futurs WAMS :**

Les systèmes de surveillance à grande échelle WAMS jouent un rôle crucial dans la gestion des réseaux électriques modernes. Cependant, ils doivent relever plusieurs défis pour s'adapter aux besoins futurs et aux évolutions technologiques. Voici une discussion détaillée des principaux défis auxquels les futurs WAMS seront confrontés : [16]

### **I.7.1 Intégration des énergies renouvelables :**

#### **Défi :**

- Les sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie éolienne et solaire, sont intermittentes et imprévisibles. Intégrer ces sources tout en maintenant la stabilité et la fiabilité du réseau est un défi majeur.

#### **Solutions potentielles :**

- Développer des algorithmes avancés pour prévoir la production d'énergie renouvelable et ajuster les opérations du réseau en conséquence.
- Améliorer les capacités de stockage d'énergie pour équilibrer les fluctuations de production.

### **I.7.2 Sécurité et cybersécurité**

#### **Défi :**

- La nature interconnectée des WAMS les rend vulnérables aux cyberattaques, qui peuvent compromettre la sécurité et la fiabilité du réseau électrique.

#### **Solutions potentielles :**

- Mettre en place des protocoles de cybersécurité robustes, incluant le chiffrement des données et des systèmes de détection des intrusions.
- Former les opérateurs et le personnel technique à la sensibilisation à la cybersécurité et aux meilleures pratiques.

### **I.7.3 Gestion des données massives :**

#### **Défi :**

- Les WAMS génèrent d'énormes quantités de données en temps réel, nécessitant des capacités de stockage et de traitement importantes.

#### **Solutions potentielles :**

- Utiliser des technologies de big data et pour gérer et analyser les données à grande échelle.
- Développer des algorithmes d'intelligence artificielle pour extraire des informations exploitables à partir des vastes ensembles de données.

### **I.7.4 Fiabilité des communications :**

#### **Défi :**

- Les WAMS dépendent de systèmes de communication fiables pour transmettre les données en temps réel. Les interruptions ou les latences dans la communication peuvent affecter la performance du système.

#### **Solutions potentielles :**

- Mettre en œuvre des réseaux de communication redondants et diversifiés pour assurer une disponibilité constante.

### **I.8 Défis des échecs de communication dans les WAMS :**

L'échec de commutation dans le contexte des systèmes WAMS se réfère en effet à la défaillance de communication, où les dispositifs de mesure PMU ou d'autres équipements de surveillance ne parviennent pas à transmettre les données ou à communiquer avec les centres de contrôle. Les échecs de communication représentent un défi majeur dans les systèmes WAMS, affectant la fiabilité, la stabilité et la sécurité des réseaux électriques. Pour relever ces défis, des solutions techniques avancées, une gestion proactive et une formation adéquate du personnel sont essentielles.

Voici une analyse sur les points cruciaux associés à cette problématique spécifique :

#### ✓ **Intégrité des données :**

Lorsqu'un échec de communication se produit, les données en temps réel provenant des PMU ne sont pas transmises au centre de contrôle, ce qui compromet l'intégrité des données utilisées pour surveiller et contrôler le réseau électrique.

#### ✓ **Fiabilité du système :**

Les échecs de communication peuvent entraîner des lacunes dans la surveillance du réseau, ce qui peut réduire la fiabilité globale du système et compromettre la capacité des opérateurs à détecter et à réagir rapidement aux événements critiques.

#### ✓ **Délais de détection des événements :**

Les échecs de communication peuvent entraîner des retards dans la détection des événements et des anomalies du réseau, ce qui peut empêcher une intervention rapide pour éviter les pannes majeures ou les dommages aux équipements.

#### ✓ **Impact sur la gestion de la stabilité du réseau :**

Les échecs de communication peuvent affecter la capacité des opérateurs à surveiller les oscillations de puissance, les fluctuations de tension et d'autres paramètres critiques nécessaires à la gestion de la stabilité du réseau.

✓ **Complexité de la détection des pannes :**

Identifier et diagnostiquer les pannes de communication peut être complexe, en particulier dans les réseaux étendus. L'échec peut résulter de problèmes dans les équipements eux-mêmes, dans les réseaux de communication ou dans les interfaces entre les deux.

✓ **Redondance et résilience des réseaux de communication :**

Les WAMS doivent être équipés de systèmes de communication redondants et résilients pour atténuer les risques d'échecs de communication. Cependant, la mise en œuvre de telles solutions peut être coûteuse et complexe.

✓ **Développement de techniques de récupération :**

Des techniques avancées de récupération doivent être d'échec pour restaurer rapidement la communication en cas de défaillance. Cela peut inclure des mécanismes de basculement automatique vers des canaux de communication de secours ou des protocoles de rétablissement rapide.

## **I.9. Introduction au contrôleur d'amortissement à grande échelle (WADC) :**

Le Contrôleur d'Amortissement à Grande Échelle (Wide-Area Damping Controller, WADC) est un dispositif utilisé dans les réseaux électriques modernes pour améliorer leur stabilité dynamique et leur performance opérationnelle.[17]

### **I.9.1. Définition du WADC :**

Le WADC est un dispositif de contrôle avancé qui utilise les données en temps réel provenant des systèmes de surveillance à grande échelle WAMS pour atténuer les oscillations indésirables et améliorer la stabilité dynamique des réseaux électriques. Il agit en ajustant les paramètres des dispositifs de contrôle distribués à travers le réseau pour réduire les effets des perturbations et maintenir les conditions de fonctionnement optimales.[18]

### **I.9.2. Rôle important du WADC :**

Le WADC joue un rôle crucial dans les réseaux électriques modernes pour plusieurs raisons : [19]

1. **Amélioration de la stabilité dynamique** : Il contribue à réduire les oscillations indésirables du réseau et à stabiliser son fonctionnement en temps réel.
2. **Optimisation des performances opérationnelles** : Il permet une utilisation plus efficace des infrastructures existantes et une augmentation de la capacité de transport de l'énergie à travers le réseau.
3. **Réduction des pertes d'énergie** : En minimisant les surcharges et en optimisant les conditions de fonctionnement, il contribue à réduire les pertes d'énergie et à améliorer l'efficacité globale du réseau.
4. **Réponse rapide aux événements critiques** : Il permet une réponse rapide aux événements tels que les pannes d'équipement ou les fluctuations soudaines de charge, contribuant ainsi à maintenir la stabilité du réseau.

### I.9.3. Principe de fonctionnement du WADC :

Le WADC est conçu pour améliorer l'amortissement des oscillations dans les systèmes électriques. Son fonctionnement repose sur une architecture avancée qui intègre la surveillance à large échelle et la commande distribuée. [20]

#### 1. Acquisition de Données via PMU

Le processus commence par l'acquisition de données en temps réel provenant des PMU, tels que la vitesse des générateurs, la puissance dans les lignes de transmission.

#### 2. Génération des signaux de contrôle

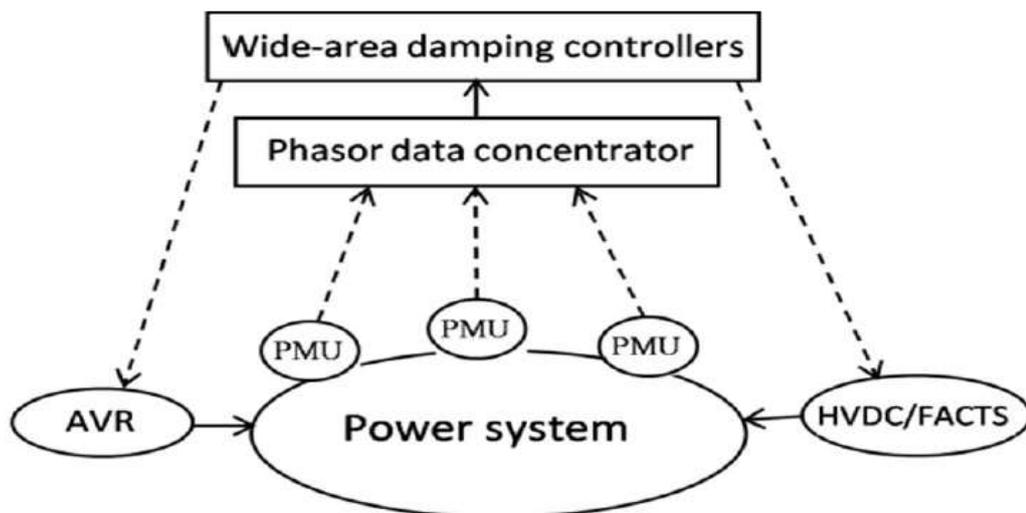
Le WADC génère des signaux de contrôle destinés à atténuer les oscillations.

##### 1. Envoi des signaux de contrôle

Les signaux de contrôle générés sont envoyés aux dispositifs de contrôle locaux dans le réseau.

- **Dispositifs cibles** : Les signaux sont destinés à divers équipements tels que :
  - **Générateurs** : Pour ajuster les paramètres de fonctionnement des générateurs synchrones afin d'améliorer l'amortissement.
  - **Dispositifs FACTS** : Pour réguler les flux de puissance et stabiliser le réseau.
  - **Liaisons HVDC** : Pour contrôler la transmission d'énergie sur de longues distances.

La structure WADC appliquée aux systèmes électriques est également illustrée dans [Figure\(1-3\)](#) [11]



**Figure (1-3):** Structure du système WADC

### **I.10 Conclusion :**

En conclusion, ce chapitre a mis en lumière l'importance des technologies de surveillance et de contrôle à grande échelle pour la stabilité et la sécurité des réseaux électriques. Nous avons souligné le rôle central du Contrôle d'Amortissement à Grande Échelle (WADC) dans les opérations des systèmes électriques modernes, démontrant comment il contribue à atténuer les oscillations et à améliorer la stabilité dynamique. En comprenant les principes et les avantages du WADC, nous sommes mieux préparés à explorer les défis et les solutions associés à la mise en œuvre de ces technologies avancées dans les chapitres suivants. Cette base solide est essentielle pour développer des stratégies efficaces de gestion des réseaux électriques à grande échelle

## **Chapitre 2 :**

**WADC et le défi des échecs de  
communication**

## II.1. Introduction :

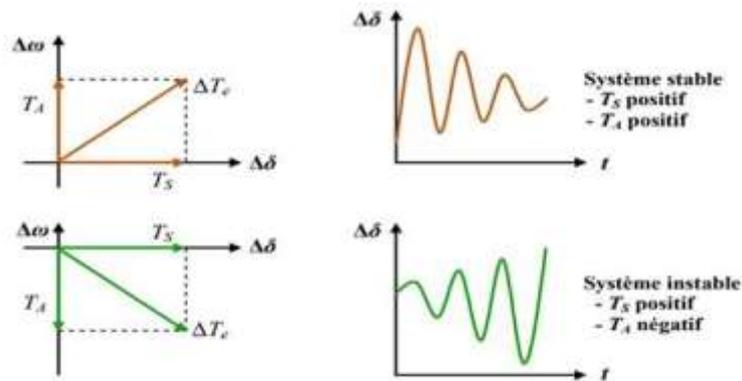
Ce chapitre se concentre sur les oscillations dans les réseaux électriques, un problème critique qui peut menacer la stabilité et la sécurité des systèmes électriques. Nous commencerons par une exploration approfondie des différents types d'oscillations, mettant en lumière les dangers qu'elles représentent pour les réseaux électriques. Ensuite, nous établirons les fondements mathématiques nécessaires à la modélisation des systèmes électriques et à l'analyse des dynamiques d'oscillation. Nous présenterons également les stabilisateurs de système électrique conventionnels (CPSS), qui utilisent des signaux d'entrée locaux pour stabiliser le système. Ensuite, nous nous pencherons sur les contrôleurs d'amortissement à grande échelle (WADC), en examinant leur structure et leurs méthodologies de conception. Enfin, nous identifierons les échecs de communication potentiels pouvant perturber le fonctionnement des WADC et évaluerons les techniques existantes pour atténuer ces échecs, en discutant de leur efficacité.

## II.2. Présentations du problème des oscillations dans les systèmes électriques :

Le réseau électrique est un vaste système dynamique constitué de milliers d'éléments interconnectés. Son instabilité peut être provoquée par divers facteurs. La protection et la commande du réseau impliquent plusieurs composants opérant à différentes échelles de temps. Par exemple, lors d'un défaut triphasé, la stabilité et la continuité du service sont assurées par plusieurs systèmes :[21]

1. **Système de protection** : Il isole le défaut pour éviter sa propagation.
2. **Contrôleurs d'amortissement** : Ils atténuent les oscillations transitoires.
3. **Système d'excitation** : Il rétablit le niveau de tension.
4. **Régulateurs de vitesse** : Ils stabilisent le réseau en le ramenant à un nouveau point de fonctionnement.

L'action rapide et puissante du système d'excitation, bien qu'améliorant la stabilité transitoire, a une influence négative sur l'amortissement des oscillations du système. Le courant d'excitation, destiné à renforcer le couple synchronisant, est toujours en retard par rapport aux caractéristiques temporelles des composants électriques du générateur et du système. Dès que le changement d'excitation est identifié, le système d'excitation subit un temps de retard inévitable. Pendant ce délai, l'état oscillant du système évolue, nécessitant un nouvel ajustement du courant d'excitation, créant ainsi un décalage constant. Par conséquent, le système d'excitation introduit l'énergie requise à contretemps, induisant des courants dans le rotor qui s'opposent aux courants générés par l'écart de vitesse du rotor ( $\Delta\omega$ ). Cela réduit, voire inverse, le couple d'amortissement, augmentant les oscillations du générateur et risquant une perte de stabilité. La figure 2-1 montre comment le couple d'amortissement affecte la stabilité du système sous de petites perturbations, soulignant la complexité de maintenir une stabilité dynamique optimale dans un réseau électrique.



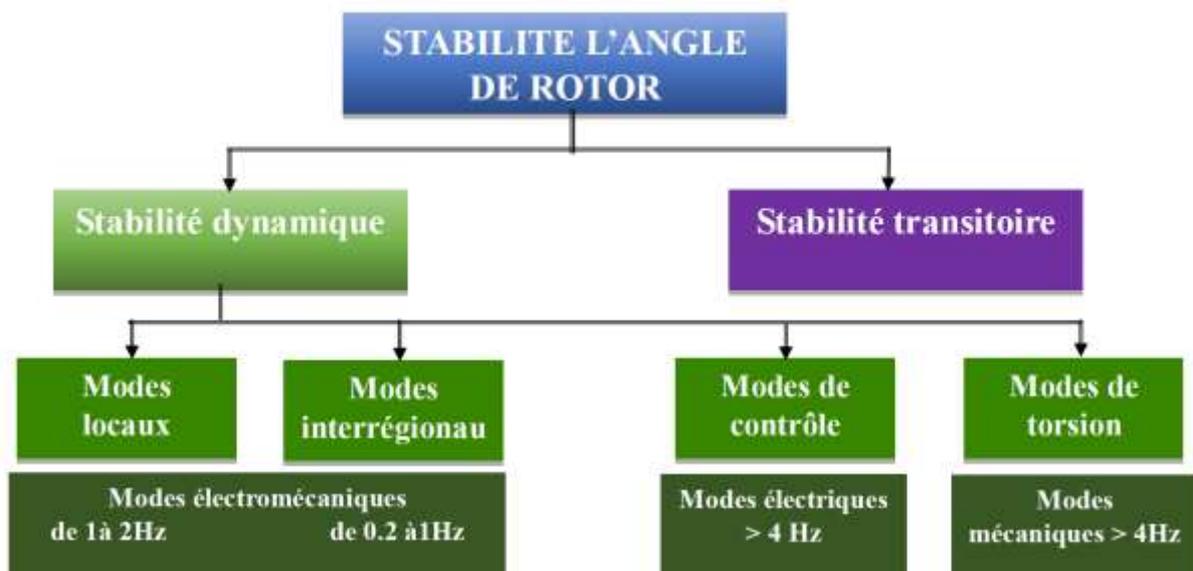
La Figure (2-1). Influence du couple d'amortissement sur la stabilité.

### II.2.1. Les différents types d'oscillations à faibles fréquences :

Comme nous l'avons vu, les oscillations électromécaniques sont associées aux rotors des générateurs. Pendant ces oscillations, l'énergie mécanique cinétique est échangée entre les générateurs lors de l'écoulement de la puissance électrique dans le réseau. Ces oscillations peuvent être classées en deux groupes selon leurs manières d'évolution : [22]

- Oscillations spontanées.
- Oscillations dues à une perturbation.

Les types des oscillations à faibles fréquences rencontrées habituellement dans les systèmes de puissance peuvent être classés en quatre groupes, **figure (2-2)**. Généralement, la fréquence de ces oscillations fournit une bonne indication sur leurs types.



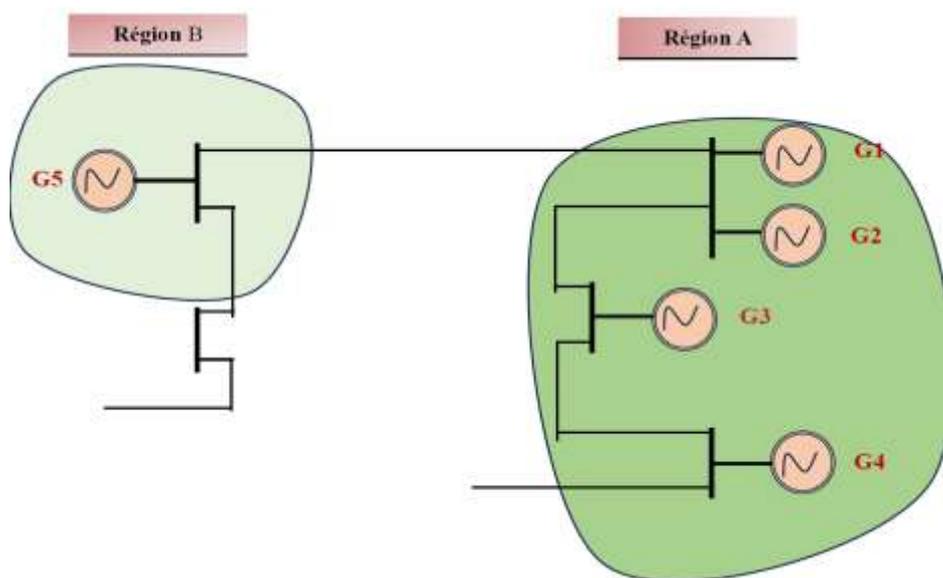
Le figure (2-2) classification de la stabilité de l'angle de rotor

➤ **Les oscillations des modes locaux :**

Les modes locaux sont les modes les plus rencontrés dans les systèmes de puissance. Ils sont Associés aux oscillations entre un générateur (ou un groupe des générateurs) d'une centrale électrique et le reste du système. Le terme local est utilisé car les oscillations sont localisées dans Une seule centrale ou une petite partie du système, (par exemple : les générateurs G1 et G2 oscillent ensemble par rapport au générateur G3 trouvé dans la même région, **figure (2-3)**). La gamme de fréquence de ces oscillations est généralement de 1 à 2 Hz. L'expérience montre que ces oscillations tendent à se produire lors de l'utilisation des régulateurs de tension possédant une réponse rapide et quand le lien de transmission entre une centrale et ses charges est très faible. Pour assurer un bon amortissement de ces modes, des sources d'amortissement, tel le stabilisateur de puissance, peuvent être ajoutées aux générateurs à l'origine de ces modes. [23]

➤ **Les oscillations des modes interzones :**

Les oscillations des modes interzones, aussi appelées oscillations interrégionales ou globaux, résultent de l'interaction entre certains générateurs d'une zone du système et d'autres générateurs d'une zone distincte. Par exemple, les générateurs G1, G2, G3 et G4 de la région A oscillent de concert par rapport au générateur G5 de la région B, comme illustré dans l **figure (2-3)**. Ces modes présentent généralement des amortissements très faibles, et en cas d'amortissement négatif, de petites perturbations peuvent déclencher des oscillations divergentes. Leurs fréquences se situent typiquement entre 0.2 et 1 Hz, ce qui est inférieur à celui des modes locaux en raison des réactances élevées des liaisons entre les systèmes de puissance. En règle générale, la fréquence naturelle et le facteur d'amortissement d'un mode interrégional diminuent lorsque l'impédance d'une ligne d'interconnexion ou la puissance transmise augmentent. Les caractéristiques du système d'excitation et des charges influencent également ces oscillations, les rendant plus complexes que les modes locaux. Étant donné que les modes interrégionaux impliquent plusieurs générateurs, un bon amortissement de ces modes peut nécessiter l'utilisation de stabilisateurs de puissance pour un grand nombre de générateurs. [24]



**Figure (2-3) Système de puissance simple à deux régions.**

➤ **Les oscillations des modes de contrôle :**

Les oscillations liées aux modes de contrôle peuvent être attribuées soit à des réglages inadéquats des contrôleurs des générateurs, tels que les systèmes d'excitation ou les gouverneurs, soit à d'autres dispositifs de contrôle tels que les convertisseurs HVDC, les SVC, etc. Ces oscillations se manifestent à une fréquence supérieure à 4 Hz.

➤ **Les oscillations des modes de torsion :**

Ces oscillations sont principalement dues aux éléments rotatifs présents entre les générateurs et leurs turbines. Elles peuvent également être générées par l'interaction des éléments rotatifs avec le contrôle de l'excitation, le contrôle du gouverneur, les lignes équipées de compensateurs de condensateurs en série, et ainsi de suite. Leur fréquence dépasse également les 4 Hz

**II.2.2. Analyser les modes d'oscillation dans les systèmes électriques :**

Un système électrique est un système non linéaire. Il peut généralement être linéarisé autour du point d'équilibre sur lequel les méthodes d'analyse linéaire standard peuvent être appliquées. Cette linéarité de comportement est d'une grande aide dans l'analyse des Oscillations du système. Une fois que nous avons un modèle linéaire, les méthodes puissantes d'analyse modale nous sont ouvertes. Elles permettent de caractériser les oscillations facilement, rapidement et avec précision. De plus, des modèles linéaires peuvent être utilisés Pour concevoir des contrôles qui amortissent les oscillations du système. Une évaluation précise de la fréquence des oscillations électromécaniques et de leur amortissement peut être obtenue à partir de l'analyse des valeurs propres. Par ailleurs, l'analyse modale permet d'obtenir des informations plus approfondies, telles que la nature des modes (dominants ou non, etc.).[22]

➤ **Valeurs propres :**

Une fois le modèle d'état linéaire correspondant à l'équation établi, la caractérisation de la stabilité du système peut être réalisée à partir de la matrice dynamique A et de ses valeurs propres. Considérons un système linéaire défini par ce modèle d'état. En appliquant la transformation de Laplace à ces équations, nous obtenons l'ensemble d'équations suivant : [25]

$$s\Delta x(s) = A\Delta x(s) + B\Delta u(s) \tag{2-1}$$

$$\Delta y(s) = C\Delta x(s) + D\Delta u(s)$$

La solution explicite de ce système d'équations est la suivante :

$$\Delta y(s) = C(sI - A)^{-1} B\Delta u(s) + D\Delta u(s) \tag{2-2}$$

Où : I est la matrice d'identité.

Ainsi, la dynamique du système est régie par l'équation caractéristique de la matrice d'état A, exprimée par :

$$Det(\lambda \cdot I - A) = 0 \tag{2-3}$$

Les valeurs  $\lambda$  qui satisfont cette équation sont appelées les valeurs propres du système. Chaque valeur propre correspond à un mouvement du système associé à une fréquence particulière. Une valeur propre, ou mode, est caractérisée par une fréquence d'oscillation et un facteur d'amortissement. Elle est généralement représentée par le nombre complexe suivant : [26]

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (2-4)$$

Cette relation est équivalente à celle qui définit les valeurs propres d'un système du second ordre. Par conséquent :

$$\lambda = -\omega_n \zeta \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2-5)$$

Où :  $\sigma$  est la partie réelle de la valeur propre (abscisse de convergence).

$\omega$  est la pulsation propre d'oscillation (rad/s).

$\omega_n$  est la pulsation naturelle d'oscillation (rad/s)

$\zeta$  est le facteur d'amortissement d'oscillation.

Une matrice d'état de dimension  $n \times n$  est associée à  $n$  valeurs propres.

L'analyse des valeurs propres permet d'obtenir tout d'abord la fréquence d'oscillation et le facteur d'amortissement. [25]

La fréquence naturelle d'oscillation est donnée par la relation suivante :

$$f = \omega / 2\pi \quad (2-6)$$

Le taux de décroissance de l'amplitude des oscillations est habituellement exprimé par le facteur d'amortissement  $\zeta$ . Pour un mode d'oscillation associé à une valeur propre complexe  $\sigma \pm j\omega$ , le facteur d'amortissement est défini par :

$$\zeta = -\sigma / \sqrt{\sigma^2 + \omega^2} \quad (2-7)$$

Le facteur d'amortissement ( $\zeta$ ) de chaque mode d'oscillation du système doit être supérieur à une valeur déterminée. Cette valeur minimale acceptable dépend du système et est établie à partir d'expériences opérationnelles et/ou d'études de sensibilité. En général, cette valeur se situe entre 0,05 et 0,1. [25]

### ➤ Vecteurs propres :

Le modèle linéaire d'un système de puissance électrique, comme exposé précédemment, peut être formulé sous la forme d'un modèle d'état défini par l'équation (2-1). Les vecteurs propres de la matrice d'état du système, à droite et à gauche, peuvent être obtenus à partir des équations suivantes : [27]

$$A\phi_i = \lambda_i \Phi_i \quad (2-8)$$

$$\Psi_i A = \lambda_i \Psi_i \quad (2-9)$$

Où :  $\lambda_i$  est une  $i^{\text{ème}}$  valeur propre (toutes les valeurs propres étant supposées distinctes).

$\Phi_i$  est le  $i^{\text{ème}}$  vecteur propre à droite associé à  $\lambda_i$ .

$\Psi_i$  est le  $i^{\text{ème}}$  vecteur propre à gauche associé à  $\lambda_i$ .

Pour une matrice d'état de dimension  $n \times n$ , le vecteur propre à droite est un vecteur colonne de taille  $n \times 1$ , tandis que le vecteur propre à gauche est un vecteur ligne de taille  $1 \times n$ . Ces deux vecteurs sont définis de la manière suivante :

$$\Psi_i \Phi_j = \begin{cases} 0 & ; \quad i \neq j \\ 1 & ; \quad i = j \end{cases} \quad (2-10)$$

L'ensemble des vecteurs propres à droite du système forme la matrice modale à droite, donnée Comme suit :

$$\Phi = [\phi_1 \quad \dots \quad \phi_i \quad \dots \quad \phi_n] \quad (2-10)$$

De même, la matrice modale à gauche est formée des vecteurs propres à gauche :

$$\Psi = [\psi_1^T \quad \dots \quad \psi_i^T \quad \dots \quad \psi_n^T] \quad (2-11)$$

Le vecteur propre à droite,  $\phi_i$ , exprime l'importance relative de chaque variable d'état dans un mode d'excitation spécifique. Dans un vecteur propre à droite complexe, l'amplitude relative des composantes indique le degré de participation des variables d'état au mode considéré, tandis que la phase des éléments montre le déphasage des variables d'état dans ce mode particulier. En revanche, le vecteur propre à gauche,  $\psi_i$ , identifie les variables d'état qui contribuent à la composition du  $i^{\text{ème}}$  mode et illustre la contribution de chaque variable d'état à l'évolution de ce mode. Dans le plan complexe, le diagramme représentant les composantes d'un vecteur propre à droite,  $\phi_i$ , en fonction des différentes variables d'état est appelé le "mode shape".

### II.2.3. Résidu :

La méthode des résidus permet d'identifier l'efficacité du signal d'entrée d'un contrôleur de stabilisation ou de trouver l'emplacement optimal de celui-ci dans un système de puissance multi machines. Cette méthode est dérivée de la relation entre la fonction de transfert et le modèle d'état. [28]

Le modèle d'état d'un système englobe à la fois les propriétés d'entrée/sortie du système et son comportement interne, tandis que la fonction de transfert du système se concentre uniquement sur la relation entre l'entrée et la sortie du système.

La contrôlabilité du mode  $i$  depuis la  $j^{\text{ème}}$  entrée est donnée par :

$$k_{ci} = |\psi_i B_j| \quad (2.12)$$

L'observabilité du mode  $i$  depuis la  $j^{\text{ème}}$  sortie est donnée par :

$$k_{ci} = |C_j \phi_i| \quad (2.13)$$

Le système (2.1) peut être exprimé par :

$$\frac{y(s)}{u(s)} = C(sI - A)^{-1}B = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s-\lambda_i} \quad (2.14)$$

Le résidu peut s'exprimer par la relation suivante :

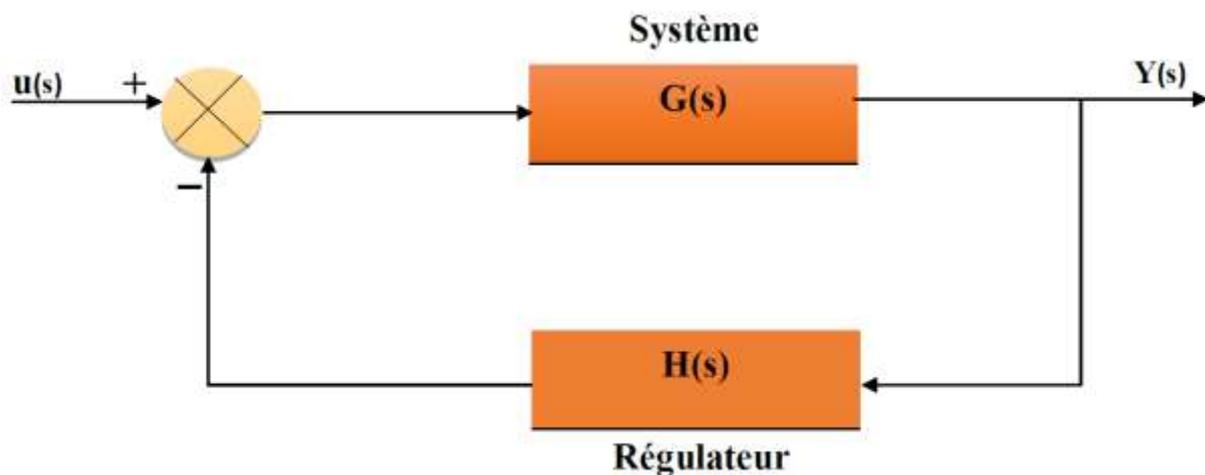
$$R_i = C\varphi_i\psi_i^T B \quad (2.15)$$

Selon cette relation, on constate que le résidu  $R_i$  pour un mode  $\lambda_i$  spécifique évalue la sensibilité de ce mode à un signal de contre-réaction de sortie vers l'entrée. De ce fait, les résidus peuvent indiquer les modes les plus influencés par un signal de rétroaction.

En refermant la boucle avec un régulateur  $H(s)$ , les valeurs propres du système initial  $G(s)$  vont subir un déplacement. Ce déplacement des valeurs propres peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta\lambda_i = R_i H(\lambda_i) \quad (2.16)$$

Cette relation met en évidence que le changement des valeurs propres, induit par l'action du contrôleur, est directement proportionnel aux amplitudes des résidus associés.[25]



**Figure (2-4) : L'ensemble système-contrôleur en boucle fermée**

Dans le contexte d'un système multivariable, l'effet du même contrôleur  $H(s)$  (indépendamment de sa structure et de ses paramètres) peut être évalué à différents endroits. En calculant le résidu associé à un mode spécifique  $\lambda_i$  pour chaque emplacement, celui qui présente le résidu le plus élevé indique l'endroit optimal et le plus efficace pour le contrôleur. De manière similaire, en modifiant le signal d'entrée du contrôleur, on obtient différentes valeurs de résidus. Ainsi, le signal d'entrée le plus efficace est identifié par le résidu le plus élevé [25]

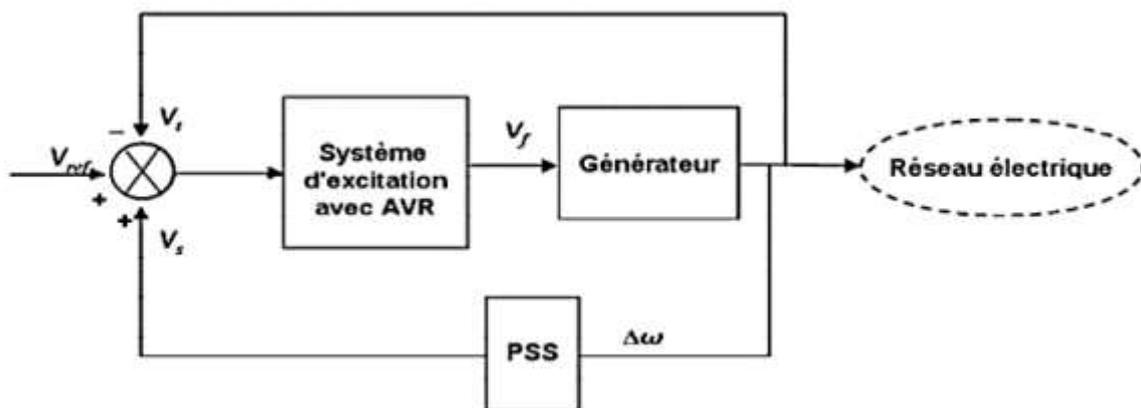
### II.3. PSS conventionnel comme outil pour amortir les oscillations de puissance :

Pour assurer le fonctionnement sûr et stable d'un système électrique, il est essentiel d'atténuer rapidement les oscillations dès leur détection. Pour améliorer la stabilité angulaire face aux petites perturbations, deux approches peuvent être adoptées : [29]

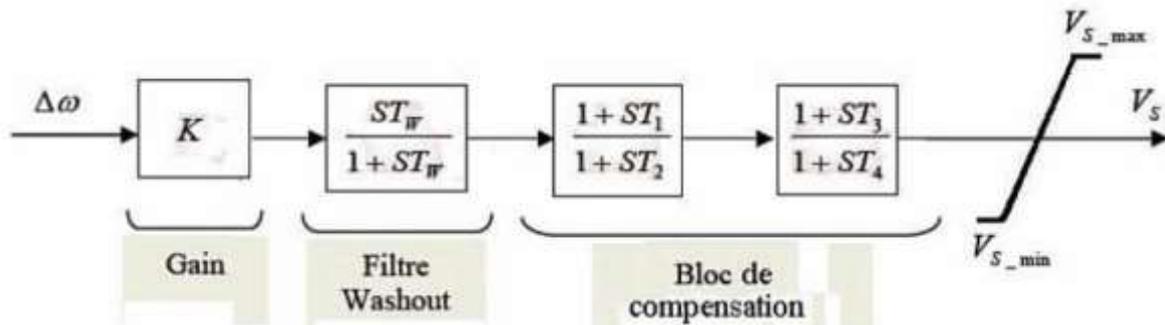
De manière physique : en renforçant le couple d'amortissement agissant sur le rotor des machines synchrones.

- De manière mathématique : en déplaçant les valeurs propres complexes associées à une oscillation instable ou sous-amortie vers la partie gauche du plan complexe.

Cela est généralement accompli en intégrant des stabilisateurs de puissance (PSS : Power system stabilizer) comme des contrôleurs additionnels dans les systèmes d'excitation. Le signal  $V_s$  illustré dans la Figure (2-5) représente la sortie du PSS, qui est alimenté par un signal d'entrée dérivé de la vitesse du rotor, de la fréquence ou de la puissance électrique, ou d'une combinaison de ces variables. L'objectif principal de la conception des PSS est de fournir un couple d'amortissement supplémentaire aux fréquences critiques des oscillations, sans affecter le couple de synchronisation. Les contrôleurs PSS, qui sont connus pour leur simplicité, leur facilité d'installation, leur efficacité et leur coût abordable, sont largement utilisés pour améliorer la stabilité face aux petites perturbations. Le PSS est configuré pour amortir les oscillations en ajustant la tension d'excitation du générateur, générant ainsi un couple qui aide à atténuer les fluctuations de puissance. Ce processus d'amortissement est réalisé par l'application d'un couple électrique au rotor, synchronisé avec les variations de vitesse.[30]



**Le Figure (2-5) : Structure générale d'un système d'excitation statique avec son AVR et PSS.**



**Le Figure (2-6) : Modèle d'un PSS conventionnel [31]**

Un PSS ajoute un signal de tension proportionnel à la variation d'une grandeur électrique à l'entrée du régulateur de tension (AVR) du générateur. Étant conçu pour générer un couple électrique proportionnel à la variation de vitesse, il est préférable d'utiliser la variation de vitesse ( $\Delta\omega$ ) comme entrée du PSS. Le type de PSS le plus couramment utilisé est le PSS conventionnel (CPSS), reconnu pour son efficacité dans le maintien de la stabilité face aux petites perturbations. Ce type de PSS est typiquement composé de quatre blocs, comme illustré dans la Figure (2-6) :[30]

- Un amplificateur.
- Un filtre passe-haut (filtre Wash out).
- Un bloc de compensation de phase.
- Un limiteur.

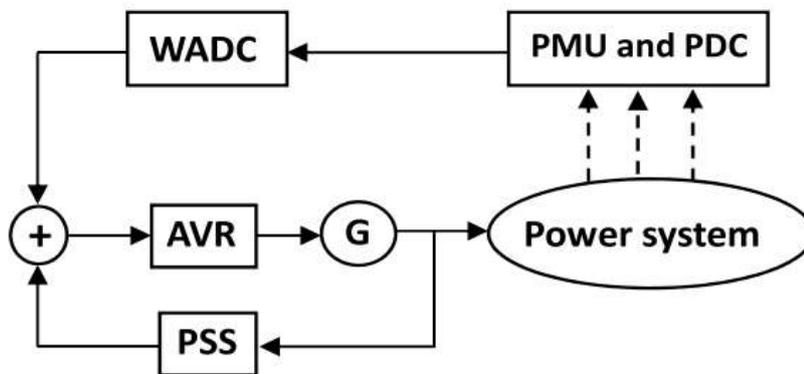
### II.3.1. Contrôleur d'amortissement à grande échelle (WADC : Wide-Aera Damping Controller) :

Comme abordé dans la Section I.9 du chapitre 1, le WADC diffère des stabilisateurs conventionnels CPSS en utilisant des signaux d'entrée distants, souvent issus de systèmes de mesure à grande échelle (WAMS). Son objectif principal est de stabiliser le réseau en ajustant les caractéristiques d'amortissement sur une vaste zone géographique, permettant ainsi des ajustements en temps réel basés sur ces signaux distants. Le WADC est un système de contrôle largement étudié ces dernières années pour atténuer les oscillations interzones dans les systèmes électriques. Au cours des deux dernières décennies, différentes technologies de WADC basées sur le WAMS ont été proposées, développées et certaines ont été mises en œuvre avec succès dans des systèmes de transmission réels à travers divers pays.

### II.3.2. Structure et Fonctionnement :

Différentes structures de contrôle ont été proposées pour mettre en œuvre les WADC aux réseaux électriques. Parmi celles-ci, la structure centralisée avec schéma hiérarchique est la plus utilisée dans la littérature. Dans cette structure, le WADC est situé dans le centre de contrôle à proximité ou intégré dans le PDC (Phasor Data Concentrator). Il reçoit les signaux d'entrée des unités de mesure locales PMUs et envoie les signaux de contrôle aux dispositifs de contrôle locaux, c'est-à-dire les (AVR : Atomic Voltage Regulator) des générateurs, ou

dans certains cas, des dispositifs FACTS ou des liaisons HVDC comme indiqué dans schéma hiérarchique comprend deux niveaux de contrôle comme illustré dans la figure (2-7). Le premier niveau est constitué des contrôleurs locaux décentralisés existants (c'est-à-dire les PSS locaux ou CPSS), et le deuxième niveau est constitué des contrôleurs centralisés (c'est-à-dire le WADC ). Plusieurs WADC peuvent être utilisés pour améliorer l'amortissement des modes inter-zones dominants, ce qui améliore ainsi la stabilité globale du système interconnecté. Les contrôleurs sont conçus séquentiellement en utilisant une approche décentralisée, ce qui signifie que l'on conçoit le contrôleur d'amortissement pour dispositif, puis on passe à la fermeture de la boucle avant de concevoir la boucle de contrôle suivante.[30]



**Le Figure (2-7) : Structure de contrôle à deux niveaux.**

L'avantage principal de ce schéma hiérarchique est que si un échec se produit dans les liaisons de communication du WADC, une action d'amortissement minimale sera toujours assurée par le niveau décentralisé (c'est-à-dire le contrôleur local). Les niveaux de contrôle à grande échelle ne sont utilisés que pour améliorer l'amortissement de certains modes interzones spécifiques, ce qui signifie que seuls quelques WADC seront nécessaires. Généralement, le WADC est utilisé pour amortir le mode interzone critique qui ne peut pas être adéquatement amorti en utilisant les CPSS, c'est-à-dire dans la situation où le mode n'est pas aussi hautement contrôlable et observable dans les signaux locaux du générateur.

### II.3.3. Conception de systèmes WADC :

➤ **Les étapes importantes du processus de conception :**

Le processus de conception d'un WADC implique généralement plusieurs étapes importantes :

- ✓ **Développement du modèle** : Développer des modèles mathématiques représentant le comportement dynamique du système électrique, incluant les générateurs, les lignes de transmission et les charges, en tenant compte des interactions interzones.
- ✓ **Identification du système** : Identifier les modes d'oscillation interzones présents dans le système électrique grâce à l'analyse de la dynamique du système et des mesures.

- ✓ **Conception du contrôleur** : Concevoir un algorithme de contrôle pour le système WADC capable d'ajuster les caractéristiques d'amortissement à travers une large zone géographique. Cela peut impliquer l'utilisation de techniques de contrôle avancées telles que le contrôle linéaire ou non linéaire, le contrôle adaptatif ou le contrôle robuste.
- ✓ **Traitement du signal** : Développer des méthodes pour traiter les signaux distants obtenus à partir des systèmes de mesure à grande échelle (WAMS) afin d'extraire des informations pertinentes sur la dynamique du système et les oscillations interzones.
- ✓ **Validation et tests** : Valider le système WADC conçu grâce à des études de simulation et, si possible, des tests en laboratoire à l'aide de simulateurs en temps réel. Vérifier l'efficacité du contrôleur dans la stabilisation du système électrique dans diverses conditions de fonctionnement et de perturbations.

➤ **Schéma bloc :**

La structure des WADC ressemble généralement à celle des PSS conventionnels [figure\(2-7\)](#), utilisant souvent une structure de contrôle en avance et en retard. Dans cette configuration, le système WADC intègre à la fois des composants en avance et en retard pour ajuster les caractéristiques d'amortissement à travers le système électrique.

➤ **Les différentes Méthode de conception :**

**A. Résidu :**

Un WADC est généralement un contrôleur de compensation de type avance-retard et sa fonction de transfert est donnée par :

$$H(s) = k \frac{T_w s}{1+T_w s} \left( \frac{1+T_1 s}{1+T_2 s} \right)^m \quad (2-17)$$

$T_w$  est la constante de temps de lavage (généralement 5-10 s),  $T_1$  et  $T_2$  sont les constantes de temps du régulateur,  $K$  est un gain constant positif, et  $m$  est le nombre de blocs de retard-avance (habituellement choisi à 2). La magnitude du résidu  $|R_i|$  détermine le gain de  $H(s)$ , tandis que l'angle du résidu indique la compensation de phase requise pour chaque mode afin d'atteindre un effet d'amortissement. Étant donné qu'une valeur élevée de  $|R_i|$  est nécessaire pour obtenir de bonnes performances d'amortissement, le signal avec la plus grande observabilité est choisi comme entrée pour le WADC.[22]

Les constantes de temps  $T_1$ ,  $T_2$  peuvent être déterminées comme suit :

$$\alpha = \frac{T_1}{T_2} = \frac{1 - \sin\left(\frac{\phi_i}{m}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\phi_i}{m}\right)} \quad (2-18)$$

$$T_2 = \frac{1}{2\pi f_i \sqrt{\alpha}} \quad (2-19)$$

$$T_1 = \alpha T_2 \quad (2-20)$$

**B. Méthode de placement de pôles :**

Le placement de pôles consiste à repositionner les pôles du système en boucle fermée (les valeurs propres de la matrice d'état du système) de manière à obtenir les caractéristiques dynamiques désirées, telles qu'une meilleure stabilité et des réponses plus rapides. En ajustant les pôles, on peut contrôler la dynamique du système, y compris l'amortissement des oscillations et la rapidité de la réponse.

- Le contrôleur est calculé pour déplacer les pôles du système en boucle fermée aux emplacements désirés.
- Les méthodes de calcul peuvent inclure des techniques algébriques ou des algorithmes d'optimisation.

#### **II.3.4. Effet des retards de communication dans les WADC et stratégies de gestion :**

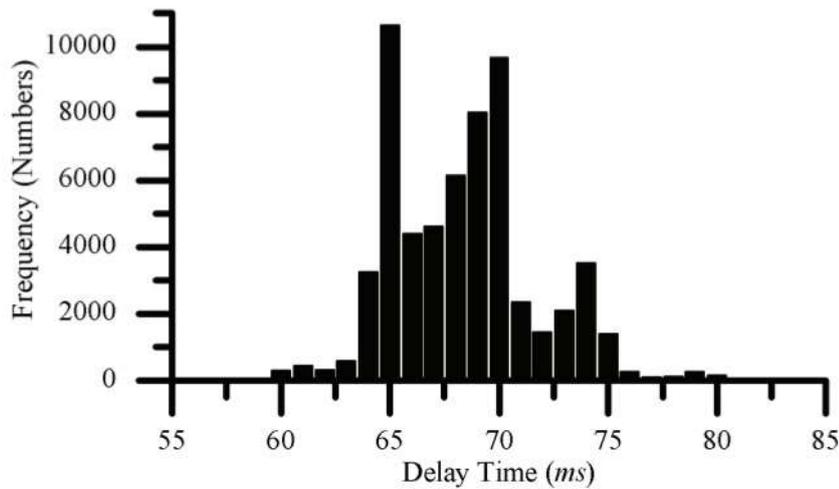
Dans les systèmes d'amortissement à grande échelle WADC, les signaux de rétroaction sont souvent transmis sur de longues distances via des réseaux de communication. Ces réseaux introduisent inévitablement des retards de communication, qui peuvent affecter la performance et la stabilité du système de contrôle. Comprendre et gérer l'effet de ces retards est essentiel pour assurer un fonctionnement stable et efficace des WADC.

Un rapport récent du NASPI (North American SynchroPhasor Initiative) a mis en lumière les défis posés par les retards de communication dans les réseaux électriques américains. Selon ce rapport, 71 % des PMU en réseau sur la côte est n'ont pas réussi à fournir des données valides en raison de problèmes liés aux réseaux de communication. Cela souligne l'importance de traiter les retards de communication pour garantir la fiabilité et la performance des systèmes WADC.[32]

##### **➤ Effets des retards sur les WADC :**

- ✓ Les retards peuvent introduire des phases supplémentaires dans le système de contrôle, ce qui peut réduire les marges de stabilité et provoquer des oscillations indésirables.
- ✓ Un retard excessif peut entraîner une instabilité du système, surtout si les contrôleurs ne sont pas conçus pour compenser ces retards.
- ✓ Les retards peuvent diminuer l'efficacité des contrôleurs d'amortissement, réduisant ainsi leur capacité à atténuer les oscillations électromécaniques.
- ✓ La performance du système peut se dégrader, avec des réponses plus lentes et des oscillations résiduelles prolongées.

Figure (2-8) montre la distribution des délais mesurés dans le sud de la Chine. Dans laquelle le retard est distribué à partir de 60 ms à 80 ms. Les délais de rétroaction allant de 50 ms à 1,0 s ont été compensés à l'aide de différentes techniques classiques pour WADC.[33]



**La Figure (2-8) : Distribution temporisée dans china southern grid [34]**

#### I.1.1.1 Stratégies de gestion des retards :

##### ➤ Conception robuste des contrôleurs :

- ✓ Les techniques de contrôle robustes, telles que  $H_2$  et  $H_\infty$ , peuvent être utilisées pour concevoir des contrôleurs capables de gérer les incertitudes et les retards.
- ✓ Des compensateurs de retard peuvent être intégrés pour atténuer l'effet des délais de communication.

##### ➤ Prévion et compensation des retards :

- ✓ L'utilisation d'algorithmes de prédiction pour estimer et compenser les retards en temps réel peut améliorer la performance du système.
- ✓ Des techniques de contrôle prédictif peuvent anticiper les effets des retards et ajuster les actions de contrôle en conséquence.

##### ➤ Amélioration de l'infrastructure de communication :

- ✓ La mise à niveau des réseaux de communication pour réduire les délais de transmission et de traitement peut minimiser les retards.

### II.3.5 Problème d'échec de communication dans les WADC :

Les systèmes de contrôle d'amortissement à grande échelle WADC sont essentiels pour maintenir la stabilité dynamique des réseaux électriques modernes. Cependant, ils rencontrent deux défis pratiques majeurs : le retard de transmission et l'échec de communication. Bien que le problème du retard de transmission ait été largement traité dans la littérature la recherche sur l'échec de communication reste limitée, avec des contributions clés trouvées dans. Avec l'adoption croissante des WADC et l'utilisation de la technologie WAMS, les réseaux

électriques deviennent plus vulnérables aux défaillances d'information et aux cyberattaques. Il est donc crucial de concevoir des techniques de contrôle efficaces pour renforcer la résilience du système contre ces défaillances.

➤ **Impact des échecs de communication :**

Les potentiels dans les liens de communication des WADC peuvent gravement affecter leur fonctionnement et efficacité. Les interruptions de réseau, la congestion, les perturbations électromagnétiques, les problèmes de synchronisation et les cyberattaques sont autant de facteurs pouvant entraîner des échecs de communication. Ces échecs peuvent entraîner la perte de données cruciales, compromettre la stabilité du système et produire des réponses de contrôle inadéquates.

➤ **Solutions proposées pour les échecs de communication :**

Certaines études ont abordé ces défaillances et proposé des solutions, parmi lesquelles le contrôle tolérant aux pannes (FTC) s'est révélé très efficace [29]-[31]. Le FTC peut être classé en actif ou passif :

✓ **Contrôles tolérants :**

Certaines études ont abordé ces défaillances et proposé des solutions, parmi lesquelles les contrôles tolérants aux pannes (FTC : Fault-Tolerant Control) s'est révélé très efficace. Le FTC peut être classé en actif ou passif :

✓ **Contrôles passifs :**

- Conçus pour faire face aux échecs prédéfinis sans contrôle supplémentaire post-défaut.
- Fonctionnent de manière préventive, ce qui les rend conservateurs et complexes à concevoir.

✓ **Contrôles actifs :**

- Déclenchés uniquement lorsqu'un défaut se produit, agissant à l'état post-défaut.
- Similaires aux contrôles d'urgence en sécurité des réseaux électriques, ces schémas minimisent les réserves nécessaires mais sont coûteux et complexes.

➤ **Techniques de réaffectation et suppression :**

La réaffectation de la génération est couramment utilisée pour contrer les oscillations interzones, tandis que la suppression de charge est une autre technique explorée [36]. Ces méthodes sont coûteuses et difficiles à mettre en œuvre, mais elles peuvent être évitées par des contrôles d'urgence moins coûteux spécifiquement conçus pour les échecs de WADC.

➤ **Actionneur virtuel et redondance**

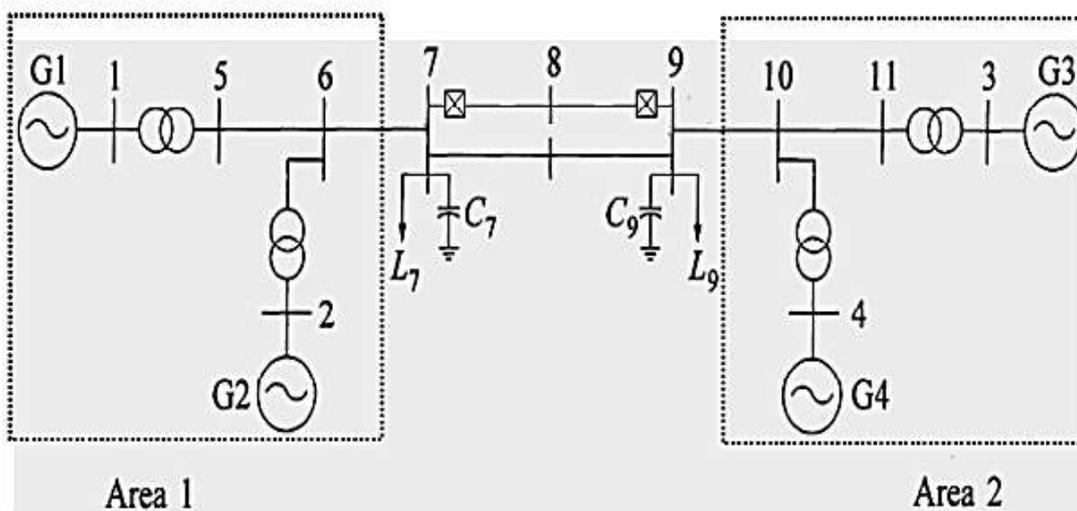
Le concept d'actionneur virtuel » permet de rediriger le signal de commande vers d'autres actionneurs disponibles en cas de d'échec, sans redessiner le WADC nominal. Bien que cette

approche soit efficace, elle nécessite plusieurs blocs de reconfiguration, augmentant la complexité et la taille du contrôleur.

## II.4. Exemple d'application :

### II.4.1. Système de test :

Figure (2-9) montre le système à deux régions bien connu utilisé dans cette étude. Le système (également connu sous le nom de système de Kundur) se compose de deux régions entièrement symétriques reliées par deux lignes de transmission de 230 kV. Chaque générateur est équipé d'un excitateur statique (gain élevé : 200) et d'un régulateur de turbine à vapeur (gouverneur). La charge est représentée par des impédances constantes et le système nominal fonctionne avec la région 1 exportant 413 MW vers la région 2. Bien qu'il s'agisse d'un petit réseau, il imite de très près le comportement de systèmes typiques en fonctionnement réel. Les données du système et les détails peuvent être trouvés dans [5].



La figure (2-9) un système typique à deux zones

### II.4.2. Analyse modale :

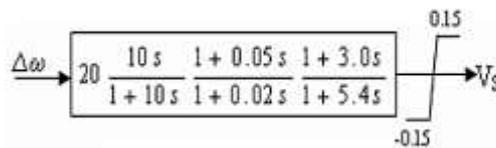
Le modèle est linéarisé autour d'un point de fonctionnement nominal. L'analyse modale montre que le système a trois modes d'oscillation ; deux modes locaux légèrement amortis (un dans chaque région) et un mode interzone impliquant toute la région 1 contre la région 2, qui est mal amortie (instable). Les fréquences et les facteurs d'amortissement de ces trois modes sont donnés dans le [tableau II.1.](#) [25]

**Tableau II.1 : Modes d'oscillation du système sans PSS**

Mode	Valeur propre	Fréquence (Hz)	L'amortissement (%)	Mode shape
<b>Mode local 1 (Région 1)</b>	$-0.676 \pm j7.045$	1.121	9.55	G1 contre G2
<b>Mode local 2 (Région 2)</b>	$-0.668 \pm j7.267$	1.156	9.16	G3 contre G4
<b>Mode interzone</b>	$0.107 \pm j4.026$	0.640	-2.68	(G1, G2) contre (G3,G4)

**II.4.3. Utilisation du PSS :**

Pour améliorer l'amortissement et stabilise le mode interzone, un PSS original de est attaché au générateur G2. Le bloc du PSS est représenté sur la figure (2-10). Il a été conçu dans pour améliorer l'amortissement des trois modes du système considéré.[22]



**La figure (2-10) schéma fonctionnel du PSS**

Le PSS de G2 n'apporte pas une amélioration suffisante de l'amortissement du mode interzone et ce mode reste instable avec un amortissement de -0,4 % **tableau II.2** Cela est dû au fait que ce mode n'est pas bien observable dans les signaux localement disponibles comme indique le **tableau II.3**

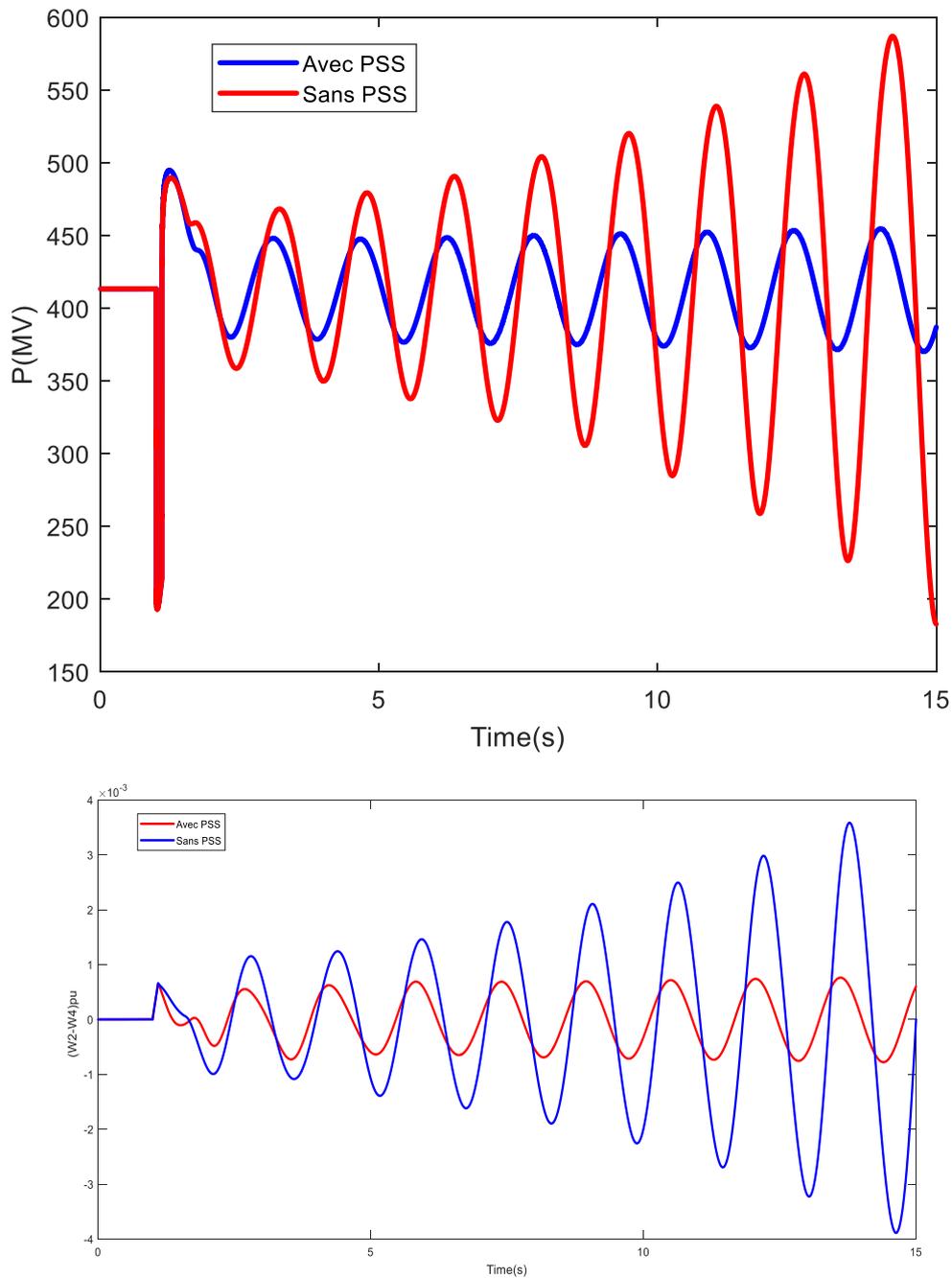
**Tableau II.2: L'amortissement du mode d'oscillation avec PSS (G2)**

Modes	$\zeta(\%)$
Local 1	22.65
Local 2	9.12
Interzone	-0.4

**Tableau II.3 : indices d'observabilité du mode interzone.**

Signal	$\Delta\omega_1$	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_3$	$\Delta\omega_4$
obs <sup>1</sup>	0.0043	0.0021	0.0063	0.0056

Les résultats de l'analyse modale sont validés par une simulation non linéaire dans laquelle un défaut triphasé est appliqué au bus 8 pendant une durée de 100 ms et éliminé sans interruption de ligne. Les résultats de la simulation avec et sans PSS sont présentés sur [figure \(2-11\)](#). La figure montre clairement que les oscillations ont un amortissement négatif.



**La figure (2-11) Simulation d'un défaut triphasé avec et sans PSS dans G2**

#### II.4.4. Conception d'un WADC :

Comme indiqué dans plusieurs études, pour garantir un bon amortissement de ce mode interzone critique, un WADC est nécessaire. Ainsi, nous allons concevoir un WADC fonctionnant en parallèle avec le PSS local de G2, qui est censé fournir un amortissement élevé ( $\zeta > 10\%$ ) au mode interzone, car ce mode est fortement contrôlable dans G2.

Sur la base des indices d'observabilité associés aux vitesses de rotation du rotor indiquées dans le [tableau II.3](#), l'écart de vitesse de G3 ( $\Delta\omega_3$ ) offre la meilleure observabilité du mode interzones et peut être utilisé comme entrée pour le WAPSS. Comme G3 oscille par rapport à G1 et G2, l'indice d'observabilité de  $\Delta\omega_3$  peut être encore augmenté en le combinant avec  $\Delta\omega_1$  ou  $\Delta\omega_2$ . Le signal ( $\Delta\omega_1 - \Delta\omega_3$ ) est finalement choisi comme entrée, ce qui fournit une observabilité élevée du mode interzones (0,0106) tel que démontré dans le [tableau II.4](#)

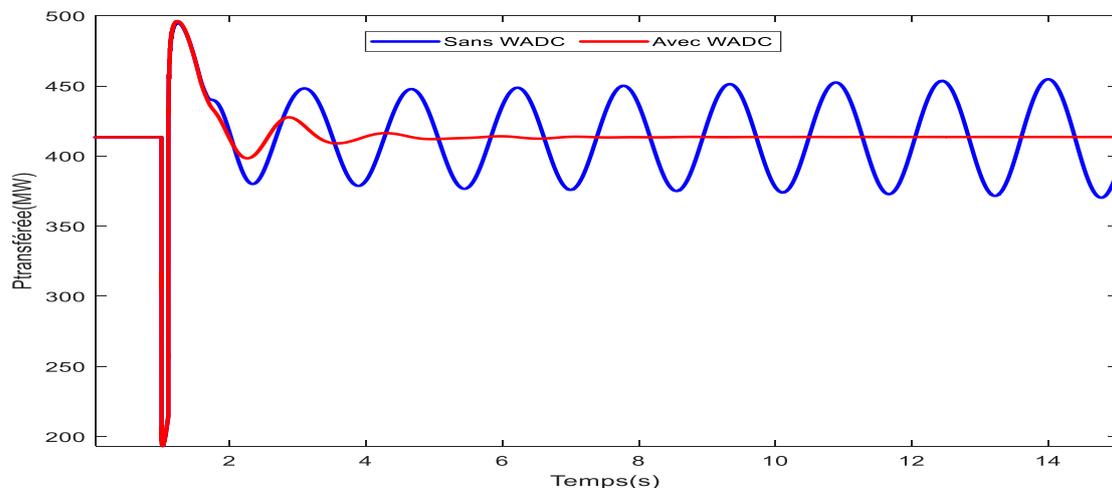
**Tableau II.4 : Indices d'observabilité du mode interzones avec PSS local en G2**

Signal	$\Delta\omega_1$	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_3$	$\Delta\omega_4$	$\Delta\omega_1 - \Delta\omega_3$	$\Delta\omega_1 - \Delta\omega_3$
Obs	0.0043	0.0021	0.0063	0.0056	0.0106	0.0085

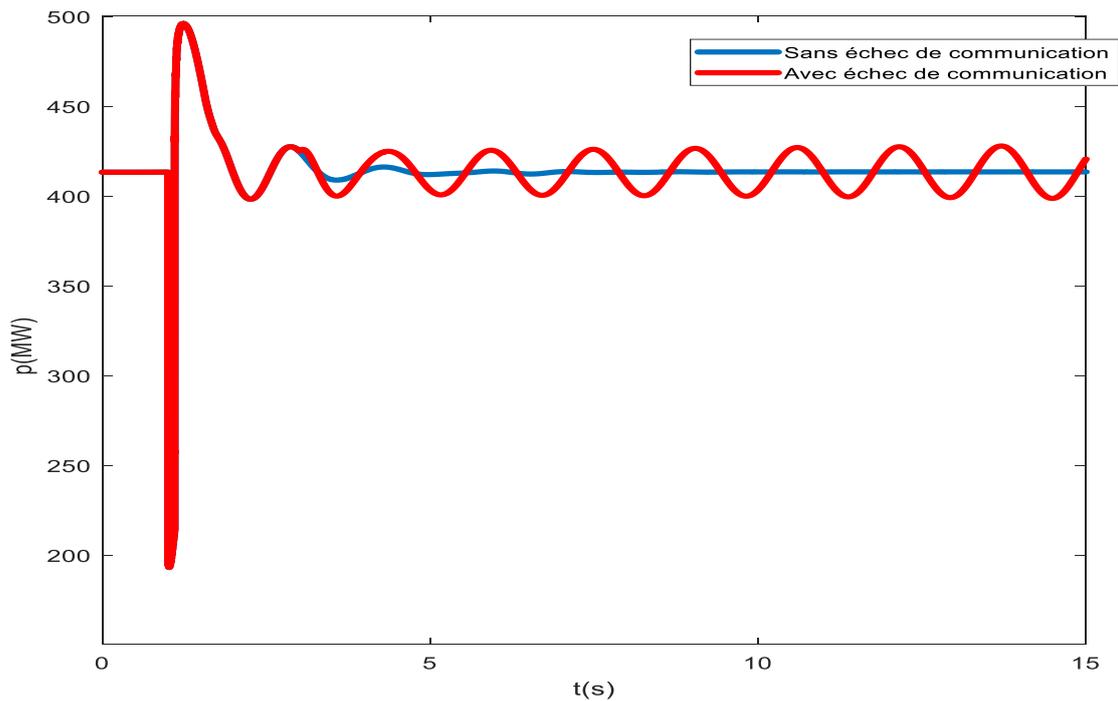
La méthode de compensation de phase de résidu discutée dans la section [II.3.3.3](#) pour concevoir le contrôleur. La fonction de transfert du régulateur est : [22]

$$H(s) = 20 \frac{10s}{1+10s} \left( \frac{1+0.2086s}{1+0.2752s} \right)^2 \quad (2-21)$$

Le WADC conçu améliore considérablement l'amortissement du mode interzone, qui atteint 18,75 %. La [figure \(2-12\)](#) valide l'amélioration de l'amortissement obtenue lorsqu'un défaut triphasé est appliqué au bus 8 pendant 100 ms. Cependant, lorsqu'un échec de communication se produit, le WADC devient inefficace, comme le montre la [figure \(2-13\)](#), où un échec de communication survient après 3 secondes. Par conséquent, il est essentiel de développer des techniques capables de pallier les échecs de communication afin de garantir un fonctionnement sécurisé du système électrique.



**La figure (2-12) Simulation d'un défaut triphasé avec et sans WADC**



La figure (2-13) Simulation d'un défaut triphasé avec et sans échec de communication

## II.5. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a fourni une analyse détaillée des oscillations dans les réseaux électriques, en soulignant les types d'oscillations et leurs impacts potentiels sur la stabilité du système. Nous avons établi les bases mathématiques nécessaires pour modéliser et analyser ces oscillations et avons présenté les stabilisateurs de système électrique conventionnels, ainsi que leurs limitations. En examinant les contrôleurs d'amortissement à grande échelle, nous avons mis en évidence leurs avantages et les défis associés à leur utilisation, notamment les échecs de communication. Cette analyse nous prépare à explorer des solutions innovantes pour améliorer la résilience et la stabilité des réseaux électriques dans le chapitre suivant.

**Chapitre 03 : Conception  
d'un nouveau FTC pour  
atténuer les échecs de  
communication**

### III.1 Introduction :

L'importance des systèmes de contrôle tolérants aux pannes (FTC) dans les systèmes de contrôle d'amortissement à grande échelle (WADC) ne peut être sous-estimée. Ces systèmes jouent un rôle crucial dans la stabilisation des oscillations de puissance dans les réseaux électriques. Cependant, ils sont souvent confrontés à des défis majeurs, notamment les échecs de communication qui peuvent compromettre leur performance et leur fiabilité. Dans ce contexte, ce travail se concentre sur la conception d'un nouveau FTC adapté aux systèmes WADC. L'objectif est de développer un algorithme en temps réel qui permet la sélection de signaux d'entrée sains, même en cas d'échec de communication. Cet algorithme est conçu pour maintenir des performances d'amortissement acceptables, assurant ainsi la stabilité et l'efficacité du système WADC. Ce chapitre présente en détail la conception et la mise en œuvre de cet algorithme, mettant en lumière son potentiel pour améliorer la robustesse des systèmes WADC face aux échecs de communication.

### III.2 Structure du WADC et échecs potentiels :

#### III.2.1 3. Structure

Pour offrir un contrôle tolérant aux pannes (FTC) efficace et contrer la perte soudaine de signaux distants, il est crucial d'examiner la structure des WADC. Plusieurs configurations de contrôle ont été proposées pour la mise en œuvre des WADC dans les systèmes électriques. Parmi celles-ci, la structure centralisée avec un schéma hiérarchique est la plus fréquemment citée dans la littérature. Dans cette configuration, le WADC est situé au centre de contrôle, soit à proximité, soit intégré dans le PDC (Phasor Data Concentrator) [30]. Il reçoit les signaux d'entrée provenant des unités de mesure locales et renvoie les signaux de commande aux dispositifs de contrôle locaux, tels que les AVR (Automatic Voltage Regulators) des générateurs, ou dans certains cas, aux dispositifs FACTS ou aux liaisons HVDC, comme illustré à la [figure \(1-3\)](#)

#### III.2.2 Signal d'entrée :

Le signal de rétroaction doit posséder une observabilité élevée du mode à amortir. Plusieurs approches ont été utilisées pour sélectionner des signaux d'entrée efficaces pour les WADC, telles que les résidus et les mesures géométriques. Les signaux les plus couramment utilisés sont la différence de vitesse, la puissance active de la ligne de connexion, l'angle du générateur, la magnitude de la tension et du courant, ainsi que leur angle [30]. Comme le suggèrent plusieurs études, utiliser la différence de vitesse comme signal d'entrée pour les WADC pourrait être un moyen efficace d'améliorer l'amortissement des modes interzones et a été largement utilisé.

#### III.2.3 Échecs potentiels :

Sur la base de la structure donnée à la [Figure \(1-3\)](#), les échecs suivants peuvent se produire :

- Perte des signaux distants acquis par les PMU, par exemple en raison d'un échec de communication. Ce type d'échec est appelé échec de capteur et peut être détecté à l'extrémité de réception du WADC dans le PDC.
- Perte du signal de contrôle distant produit par le WADC. Ce type d'échec est appelé échec d'actionneur.

### III.3 Contrôle tolérant aux fautes proposé :

#### III.3.1 Contrôle tolérant aux fautes (FTC) :

Le Contrôle Tolérant aux Fautes (FTC : Fault-Tolerant Control) est une approche de gestion et de régulation des systèmes visant à maintenir des performances acceptables malgré la présence de pannes ou de défaillances dans certaines parties du système. Il s'agit de concevoir des stratégies de contrôle capables de détecter, diagnostiquer et compenser les fautes afin de prévenir la détérioration du fonctionnement global. L'objectif principal du FTC est d'assurer la stabilité, la sécurité et la fiabilité du système en présence de conditions anormales, en minimisant les interruptions et les dégradations des performances. Comme indiqué dans le chapitre 2, le Contrôle Tolérant aux Fautes (FTC) peut être utilisé pour atténuer les échecs de communication dans le WADC. Cette technique peut être classée soit comme active, soit comme passive. Comme discuté dans l'introduction générale, en raison de plusieurs limitations, le FTC passif n'est pas acceptable dans les marchés de l'électricité ouverts et modernes où les systèmes électriques fonctionnent plus près de leurs limites de stabilité. Cela crée une forte incitation à développer des schémas de FTC actifs efficaces qui pourraient remplacer les schémas passifs. Par conséquent, nous développerons dans ce chapitre un schéma de FTC actif efficace capable de gérer les échecs de communication dans le WADC [30-37].

#### ➤ Actions correctives :

La partie principale de tout FTC actif est l'action corrective, qui définit les mesures à prendre pour gérer la défaillance détectée. Dans notre contrôle proposé, l'action corrective pour traiter les échecs de capteur consiste à appliquer un autre signal, parmi les signaux de mesure disponibles, ayant une meilleure observabilité du mode concerné. Récemment, avec l'adoption à grande échelle de la technologie WAMS et la disponibilité de grandes quantités de données en temps réel au centre de contrôle, cette technique est devenue plus attrayante et faisable. Cependant, pour passer d'un canal de communication défaillant à un canal de communication sain, un autre contrôleur est nécessaire, ce qui implique la conception de plusieurs contrôleurs ainsi qu'une stratégie de commutation. Cette approche est proposée dans [31], où un ensemble de contrôleurs d'amortissement SISO (Single-Input Single-Output) a été conçu, avec un contrôleur pour chaque mesure. Bien que cette méthode soit efficace pour contrer les échecs

de communication, l'augmentation du nombre de contrôleurs accroît le coût et la complexité du système

Pour surmonter ce problème et réduire le nombre de contrôleurs, la référence [30] propose un critère pour sélectionner les signaux pouvant être appliqués au même contrôleur. Selon ce critère, le signal sain sélectionné peut être appliqué sans nécessiter un autre contrôleur et peut fournir un effet d'amortissement similaire (ou légèrement inférieur) à celui du signal défaillant. Notez que dans ce mémoire, le signal défaillant sera également appelé le signal original.

En plus de l'indice d'observabilité, qui est un critère important pour sélectionner le signal pouvant remplacer le signal défaillant, la référence [30] inclut un deuxième critère : l'angle de phase du résidu correspondant. Comme indiqué dans l'équation (2-1), la compensation de phase nécessaire pour fournir un effet d'amortissement à chaque mode est liée à l'angle de phase du résidu correspondant. Par conséquent, si l'angle de phase du résidu associé à un signal de rétroaction choisi est proche de celui associé au signal de rétroaction défaillant par

rapport au mode interzones concerné, il est prévu que ce signal de rétroaction choisi puisse fournir un amortissement à ce mode par le biais du même contrôleur. L'effet d'amortissement fourni par le signal de rétroaction choisi est lié à son indice d'observabilité du mode concerné. Le critère de sélection des signaux de rétroaction est donc donné par :

$$\varphi_i^k(j) - \phi_i \leq \gamma, \quad j = 1, 2, \quad (3.1)$$

où  $\varphi_i^k(j)$  est l'angle du résidu pour le  $i^{\text{ème}}$  mode associé au signal candidat  $k$  dans l'état de fonctionnement  $j$ ,  $\phi_i$  est l'angle du résidu pour le  $i^{\text{ème}}$  mode associé au signal original dans l'état de fonctionnement nominal (c'est-à-dire le résidu pour lequel le contrôleur a été conçu), et  $\gamma$  est un seuil défini pour garantir l'effet d'amortissement (typiquement : 10-15 degrés [30]). La différence donnée par (3.1) sera appelée différence d'angle de résidu tout au long de ce mémoire.

Au lieu de concevoir un ensemble de contrôleurs SISO (un pour chaque mesure comme dans [31]), le critère proposé permet d'utiliser plusieurs mesures pour un seul contrôleur.

Cependant, le FTC présenté dans [30] est proposé pour fonctionner selon une approche événementielle. Cela signifie que les actions correctives sont déterminées hors ligne et déclenchées une fois que les échecs pertinents sont détectés. C'est un inconvénient majeur de cette méthode car elle ne serait efficace que pendant le point de fonctionnement pour lequel les actions correctives sont déterminées. Lorsque le point de fonctionnement change, les actions correctives déterminées hors ligne pourraient ne plus être efficaces. Ainsi, pour surmonter cet inconvénient, nous développons dans ce mémoire une approche basée sur la réponse qui peut déterminer les actions correctives appropriées en temps réel. Cela signifie que nous devons trouver une technique capable de calculer en temps réel la phase du résidu des signaux sélectionnés, ce qui est l'objectif de la section suivante.

### III.3.2 Identification des modes électromécaniques dans les systèmes électriques :

La Figure 3.1 montre un schéma d'un système dynamique avec une entrée  $u$ , une sortie  $y$  et une perturbation  $v$ . Nous pouvons observer  $u$  et  $y$ , mais pas  $v$ ; nous pouvons manipuler directement l'entrée  $u$ , mais pas  $y$ . Même si nous ne connaissons pas la structure interne du système, les données mesurées d'entrée et de sortie fournissent des informations utiles sur le comportement du système. Ainsi, nous pouvons construire des modèles mathématiques pour décrire la dynamique du système à partir des données observées d'entrée-sortie. Les modèles dynamiques pour la prédiction et le contrôle incluent les fonctions de transfert, les modèles d'espace d'état et les modèles de séries temporelles, qui sont paramétrés en termes d'un nombre fini de paramètres. Ces modèles dynamiques sont donc appelés modèles paramétriques.

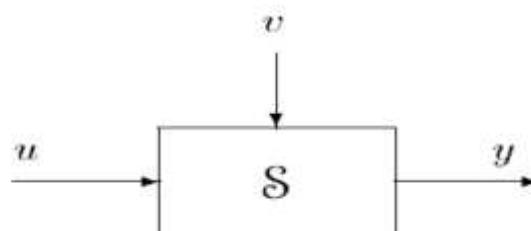


Figure 3.1. Problème d'identification de système

Les méthodes d'identification des systèmes représentent une alternative efficace aux approches de linéarisation pour l'analyse des modes des systèmes électriques. Elles exploitent des enregistrements en domaine temporel tels que les résultats de simulation ou les données mesurées, offrant ainsi une flexibilité indépendante de la taille du système, conditionnée uniquement par la disponibilité et la qualité des signaux temporels. Ces méthodes deviennent indispensables lorsque la linéarisation n'est pas réalisable ou que seules des données temporelles sont accessibles, permettant ainsi de calculer efficacement les modes faiblement amortis et de déduire des modèles linéaires simplifiés. Malgré leurs avantages, les méthodes d'identification présentent des limites. Contrairement à la représentation linéaire qui permet de calculer tous les modes d'un système à une condition de fonctionnement donnée, les méthodes d'identification sont restreintes aux modes présents dans les signaux utilisés pour l'identification. Les modes bien amortis ou ceux masqués par du bruit peuvent être difficiles à détecter, et des défis pratiques tels que le choix de l'ordre du système, la présence de modes parasites et l'influence des non-linéarités doivent être soigneusement abordés. L'introduction des méthodes d'identification pour l'étude des oscillations électromécaniques dans les systèmes électriques a été initiée par les travaux novateurs du Dr. John Hauer au début des années 1980. Son approche, en particulier l'analyse de Prony, a ouvert la voie à une application étendue dans l'industrie électrique. Ces méthodes ont permis de dériver efficacement les caractéristiques modales à partir de données temporelles, facilitant ainsi l'analyse de stabilité et la conception de systèmes de contrôle adaptés aux conditions réelles des réseaux électriques.

En général, il existe deux principales méthodes pour l'identification des modes électromécaniques dans les systèmes de puissance [42]: les méthodes d'analyse par décroissance (Ringdown Analysis Methods) et les méthodes ambiantes (Ambient Methods).

1. **Méthodes d'analyse par décroissance (Ringdown Analysis Methods) :** Ces méthodes sont utilisées après une perturbation significative du système, telle qu'une déconnexion de ligne ou une perte de charge. Suite à cette perturbation, le système oscille et les signaux de ces oscillations transitoires sont analysés. Les méthodes de décroissance, comme l'analyse de Prony, permettent d'extraire les caractéristiques modales du système en se basant sur ces signaux transitoires. Elles sont particulièrement efficaces pour identifier les modes peu amortis et peuvent fournir une vision claire des propriétés dynamiques du système pendant les événements de décroissance.
2. **Méthodes ambiantes (Ambient Methods) :** Les méthodes ambiantes analysent les petites fluctuations naturelles du système en régime permanent. Ces fluctuations sont dues à des variations aléatoires de la charge et d'autres petits perturbateurs. Les méthodes ambiantes, telles que l'analyse par les méthodes d'identification de sous-espace ou la méthode de l'estimation du modèle autorégressif, utilisent ces signaux de bruit de fond pour identifier les modes du système. Bien que les modes identifiés soient souvent moins précis que ceux obtenus par les méthodes de décroissance, les méthodes ambiantes sont très utiles pour la surveillance continue et en temps réel des oscillations dans les systèmes de puissance.

### III.3.3 Identification par sous-espaces stochastiques :

La méthode d'identification par sous-espaces stochastiques (SSI: Stochastic Subspace Identification) est une technique avancée utilisée dans le domaine de l'identification des systèmes dynamiques. Elle permet d'estimer les paramètres et les caractéristiques d'un

système à partir de données mesurées en utilisant des concepts issus de la théorie des sous-espaces et du traitement stochastique du signal. Contrairement à d'autres méthodes d'identification, la SSI est particulièrement efficace pour extraire des informations à partir de données enregistrées en temps réel ou de simulations, même en présence de bruit significatif.

Dans ce mémoire, la méthode d'identification par sous-espaces stochastiques (SSI) est adoptée pour identifier en ligne les modes d'oscillation en utilisant les signaux mesurés afin de calculer l'observabilité et la phase du résidu de différents signaux, pour trouver le signal approprié qui pourrait remplacer le signal défectueux.

### III.3.3.1 Modèle stochastique d'espace d'état [43]:

Les mesures de données disponibles à partir du WAMS sont discrètes et peuvent être modélisées dans la forme d'espace d'état stochastique discrète suivante :

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \quad \mathbf{A}_d = e^{\mathbf{A}t_s} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

Où  $\mathbf{x}_k$  est le vecteur d'état discret ;  $\mathbf{y}_k$  est le vecteur de sortie discret ;  $t_s$  est le temps d'échantillonnage ; le bruit de processus  $\mathbf{w}_k$  et le bruit de mesure  $\mathbf{v}_k$  sont des bruits de moyenne nulle, c'est-à-dire  $E(\mathbf{w}_k) = E(\mathbf{v}_k) = \mathbf{0}$  ; et  $\mathbf{A}_d$  et  $\mathbf{A}$  désignent respectivement les matrices d'état discrètes et continues dans le temps.

Les données mesurées peuvent être divisées en deux parties appelées passé et futur, et sont formées en tant que matrice de Hankel par blocs, comme suit :

$$\mathbf{Y}_{i|2i-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_0 & \mathbf{Y}_1 & \dots & \mathbf{Y}_{J-1} \\ \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 & \dots & \mathbf{Y}_J \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{Y}_{i-1} & \mathbf{Y}_i & \dots & \mathbf{Y}_{i+J-2} \\ \mathbf{Y}_i & \mathbf{Y}_{i+1} & \dots & \mathbf{Y}_{i+J-1} \\ \mathbf{Y}_{i+1} & \mathbf{Y}_{i+2} & \dots & \mathbf{Y}_{i+J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{Y}_{2i-1} & \mathbf{Y}_{2i} & \dots & \mathbf{Y}_{2i+J-1} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{0|i-1} \\ \mathbf{Y}_{i|2i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{y}_p \\ \mathbf{y}_f \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Où  $\mathbf{y}_p = \mathbf{Y}_{0|i-1}$  et  $\mathbf{y}_f = \mathbf{Y}_{i|2i-1}$  sont respectivement les parties passée et future dans la matrice de Hankel bloc ;  $i$  est égal à  $2m/l$  avec  $m$  et  $l$  étant l'ordre du système et le nombre de signaux de sortie ;  $j$  est le nombre d'échantillons de données. En déplaçant la frontière entre les parties passée et future dans la matrice de Hankel vers le bas de  $l$  lignes, de nouvelles parties passée et future peuvent être générées comme :

$$\mathbf{y}_p^+ = \mathbf{y}_{0|i} \text{ et } \mathbf{y}_f^- = \mathbf{y}_{i+1|2i-1}, \text{ respectivement.} \quad (3.4)$$

Les projections orthogonales peuvent ensuite être calculées comme

$$\mathbf{O}_i = \mathbf{Y}_f / \mathbf{y}_p \quad (3.5)$$

$$\mathbf{o}_{i-1} = \mathbf{y}_f^- / \mathbf{y}_p^+$$

et la décomposition en valeurs singulières (SVD) de la projection pondérée est :

$$\mathbf{w}_1 \mathbf{O}_i \mathbf{w}_Z = \mathbf{USV}^T = [\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$\mathbf{w}_2 = [\mathbf{I}]_{j \times j}$   $\mathbf{U}$  et  $\mathbf{V}$  sont des matrices unitaires obtenues à partir du processus SVD. L'ordre du système  $m$  est déterminé en inspectant les valeurs singulières dans  $\mathbf{S}$ , et la sous-matrice  $\mathbf{S}_1$  (matrice identité  $m \times m$ ) représente le cosinus des angles principaux entre l'espace des lignes des sorties passées  $\mathbf{y}_p$  et des sorties futures  $\mathbf{y}_f$ . Les matrices d'observabilité étendues sont déterminées comme suit :

$$\Gamma_i = \mathbf{w}^{-1} \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{1/2} \quad (3.7)$$

$$\Gamma_{i-1} = \underline{\Gamma}_i$$

Où  $\underline{\Gamma}_i$  est  $\Gamma_i$  avec les  $l$  dernières lignes supprimées.

L'état du filtre de **Kalman** avant les séquences peuvent être obtenues comme :

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \Gamma_i \mathbf{O}_i \quad (3.8)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{i+1} = \Gamma_{i-1} \mathbf{O}_{i-1}$$

Ainsi,  $\mathbf{A}_d$  et  $\mathbf{C}$  peuvent être exprimés comme :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_d \\ \mathbf{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{i+1} \\ \mathbf{y}_{i|i} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_i \quad (3.9)$$

On notera que la matrice d'état  $\mathbf{A}_d$  est Identifiés collectivement à partir des signaux mesurés au lieu d'un signal individuel particulier. Cela donne à SSI l'unicité avantage d'une grande robustesse et d'une haute résistance au bruit.

### III.3.3.2 Analyse modale et identification de la forme modale :

La matrice d'états temporels discrets  $\mathbf{A}_d$  peut être exprimée comme suit :

$$\mathbf{A}_d = \boldsymbol{\psi} \begin{bmatrix} \mathbf{n}_1 & \square & \square & \square \\ \square & \mathbf{n}_2 & \square & \square \\ \square & \square & \ddots & \square \\ \square & \square & \square & \mathbf{n}_m \end{bmatrix} \boldsymbol{\psi}^{-1} \quad (3.10)$$

Où  $\mathbf{n}_i$  est la valeur propre du système à temps discret pour  $i=1, 2, \dots, m$  et  $\boldsymbol{\psi}$  est la matrice de vecteurs propres du système à temps discret. La valeur propre  $\lambda_i$  du système à temps continu peut être calculée à partir de la valeur propre du système discret  $\mathbf{n}_i$  comme suit :

$$\lambda_i = \frac{\ln(\mathbf{n}_i)}{t_s} = \mathbf{a}_i + j\mathbf{b}_i \quad (3.11)$$

Et les paramètres du mode d'oscillation peuvent alors être calculés comme :

$$f_i = \sqrt{\mathbf{a}_i^2 + \mathbf{b}_i^2} / 2\pi \quad (3.12)$$

$$\zeta_i = -a_i / \sqrt{a_i^2 - b_i^2}$$

Où  $f_i$  est la fréquence d'oscillation et  $\zeta_i$  est le coefficient d'amortissement. Enfin, la matrice de forme de mode d'oscillation  $\Phi$  peut être calculée comme la matrice d'observabilité de mode de la manière suivante :

$$\phi = C\Psi \quad (3.13)$$

Dès que les vecteurs propres à gauche et à droite sont disponibles à partir de l'équation (3.10), le résidu  $R_i$  du mode d'oscillation  $i$  peut être exprimé par l'équation (2.15).

### III.3.4.3. Algorithmes numériques pour l'identification des systèmes d'état par sous-espaces (algorithme : N4SID)

N4SID c'est une variante spécifique de SSI qui se concentre sur la décomposition de l'opérateur de covariance des données mesurées. Le "N" dans N4SID fait référence au nombre de sous-espaces utilisés dans l'analyse. En général, N4SID est une méthode d'identification de système basée sur SSI, qui utilise des techniques statistiques pour estimer les caractéristiques des systèmes dynamiques à partir de données réelles, offrant ainsi une approche robuste et largement utilisée dans le domaine de l'ingénierie et des sciences appliquées [42].

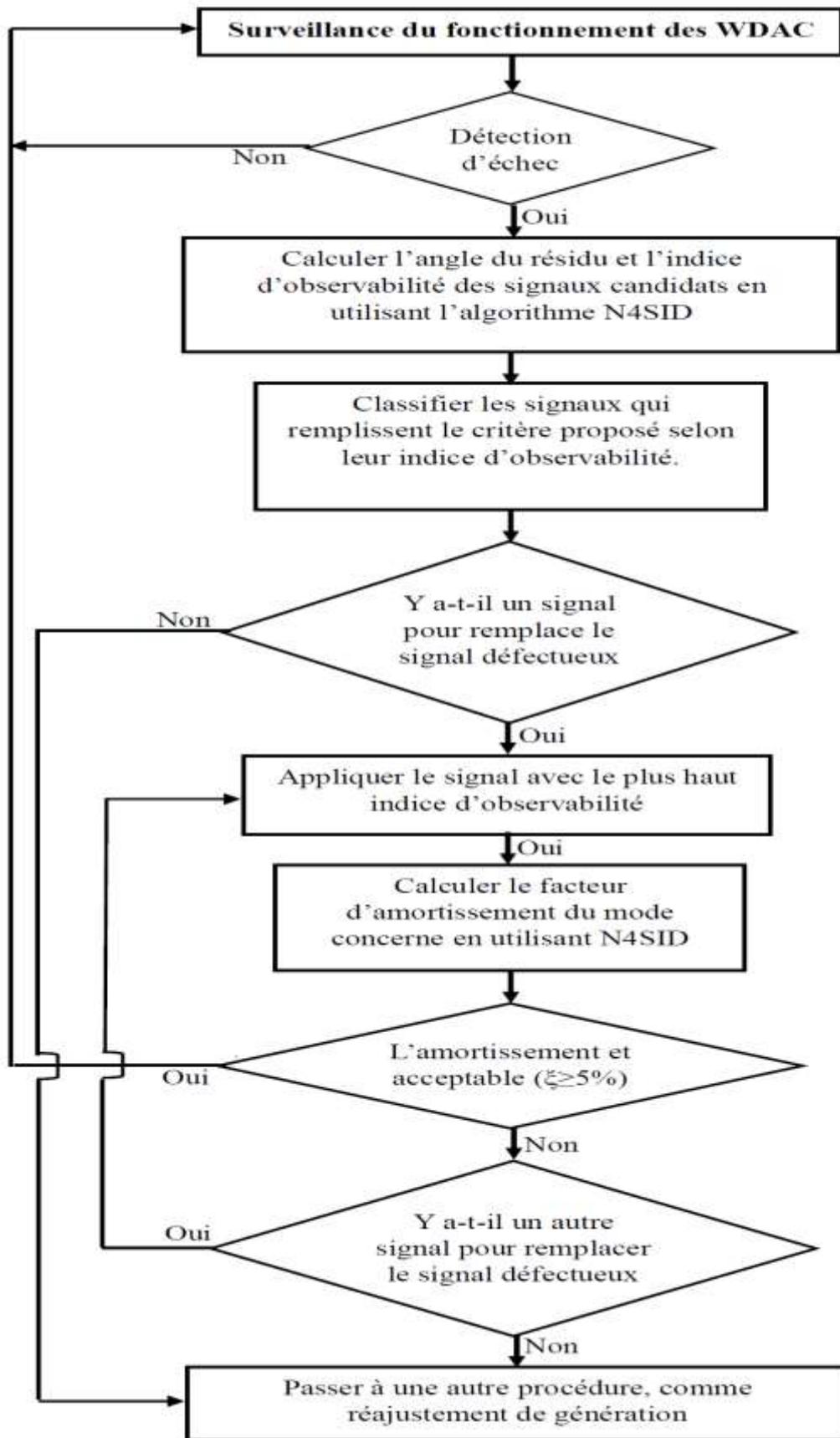
#### ➤ Fonctionnement :

N4SID fonctionne en plusieurs étapes clés :

- **Formation des matrices de Hankel** : À partir des données mesurées, des matrices de Hankel sont formées pour capturer la structure du système.
- **Décomposition des sous-espaces** : Utilisation de techniques de décomposition de valeurs singulières (SVD) pour extraire les sous-espaces principaux.
- **Identification des matrices de transfert** : À partir des sous-espaces identifiés, les matrices de transfert et d'observation du système sont estimées.

### III.3.4 Organigramme de la méthode FTC proposée :

La Figure (3-2) présente un organigramme décrivant la stratégie FTC proposée. L'objectif du contrôle proposé est d'éviter ou de minimiser les pénalités économiques encourues par les techniques conventionnelles telles que la méthode de réajustement de la génération. Pour atteindre cet objectif, le contrôle proposé doit être appliqué avant les procédures de réajustement de la génération. Si l'impact des actions correctives disponibles déterminées par le FTC n'est pas suffisant pour obtenir l'amortissement approprié du mode concerné, la procédure de réajustement de la génération doit être mise en œuvre pour obtenir l'amortissement souhaité.



Figure(3-2) : Organigramme illustrant le FTC proposé.

### III.3.5. Application :

Le système de Kundur utilisé au Chapitre 2 est utilisé ici pour valider l'efficacité de notre FTC proposé. Rappelons que le WADC est appliqué à G2 avec ( $w1-w3$ ) utilisé comme signal d'entrée. L'utilisation du WADC permet d'obtenir un taux d'amortissement de 18,75 % du mode interzone. Si le WADC devient inefficace en raison, par exemple, d'une défaillance de communication, l'amortissement du mode interzone devient négatif et le système devient instable. Ainsi, nous allons appliquer des défaillances de communication et vérifier si le FTC proposé peut contrer le problème et garantir un amortissement acceptable du mode interzone. Les défaillances de communication sont appliquées comme suit :

**Cas 1 :** Un échec de commutation est appliqué à 3 s.

**Cas 2 :** Un échec de commutation est appliqué à 3 s. Ensuite, un défaut triphasé a été appliqué à 15 s au milieu des lignes de liaison (bus 8 sur la figure 6) pendant 100 ms.

Pour appliquer l'algorithme N4SID, la fonction "n4sid" de MATLAB est utilisée pour une fenêtre de 4 s. Ensuite, l'action corrective est appliquée à 8 s pour les deux cas.

Le FTC proposé peut identifier les signaux appropriés pour remplacer le signal défectueux  $\Delta\omega_{13}$ . Les angles de résidu calculés pour divers signaux candidats montrent que les signaux  $\Delta\omega_{14}$ ,  $\Delta\omega_{24}$ ,  $\Delta\omega_{23}$ ,  $-\Delta\omega_3$  et  $-\Delta\omega_4$  répondent parfaitement au critère proposé. Le signe négatif indique que la vitesse du rotor doit être utilisée en sens inverse. Étant donné que le signal d'origine  $\Delta\omega_{13}$  est une combinaison de deux signaux  $\Delta\omega_1$  et  $\Delta\omega_3$ , la perte de l'un de ces signaux entraîne l'échec du signal entier. Lorsque le signal  $\Delta\omega_3$  est perdu, les signaux  $\Delta\omega_{14}$ ,  $\Delta\omega_{24}$  ou  $-\Delta\omega_4$  peuvent être utilisés comme entrée pour le WADC. En revanche, lorsque le signal  $\Delta\omega_1$  est perdu, les signaux  $\Delta\omega_{23}$ ,  $\Delta\omega_{24}$ ,  $-\Delta\omega_4$  ou  $-\Delta\omega_3$  peuvent être utilisés comme entrée.

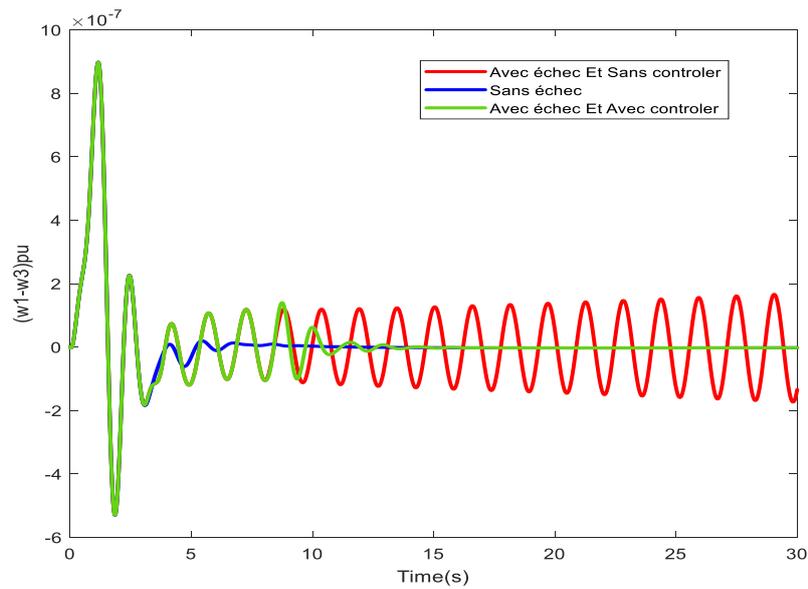
Les signaux sont classés selon leurs indices d'observabilité, comme indiqué dans le [Tableau \(3.1\)](#), qui fournit également les angles de résidu et l'amortissement fourni par chaque signal. Le signal  $\Delta\omega_{14}$  offre un amortissement élevé et pourrait parfaitement remplacer le signal  $\Delta\omega_{13}$ . Les signaux  $\Delta\omega_{23}$  et  $-\Delta\omega_3$  fournissent un bon amortissement ( $> 5\%$ ), tandis que les signaux  $\Delta\omega_{24}$  et  $-\Delta\omega_4$  fournissent un amortissement acceptable, garantissant ainsi la stabilité du système.

Les Fig. 3.3 à Fig. 3.14 montrent les réponses du système pour les deux cas ci-dessus, avec et sans application du FTC. À des fins de comparaison, le cas sans échec de communication est également illustré dans les figures. Les figures montrent le signal  $\omega_1-\omega_3$ , offrant une observation claire du mode interzone. Les oscillations de puissance sur les lignes de raccordement sont également présentées dans les figures. Il peut être observé à partir des figures qu'avec le FTC proposé, le système est bien amorti après la défaillance de communication, ce qui correspond aux résultats du [Tableau \(3-1\)](#). Cela confirme clairement l'efficacité de notre approche proposée.

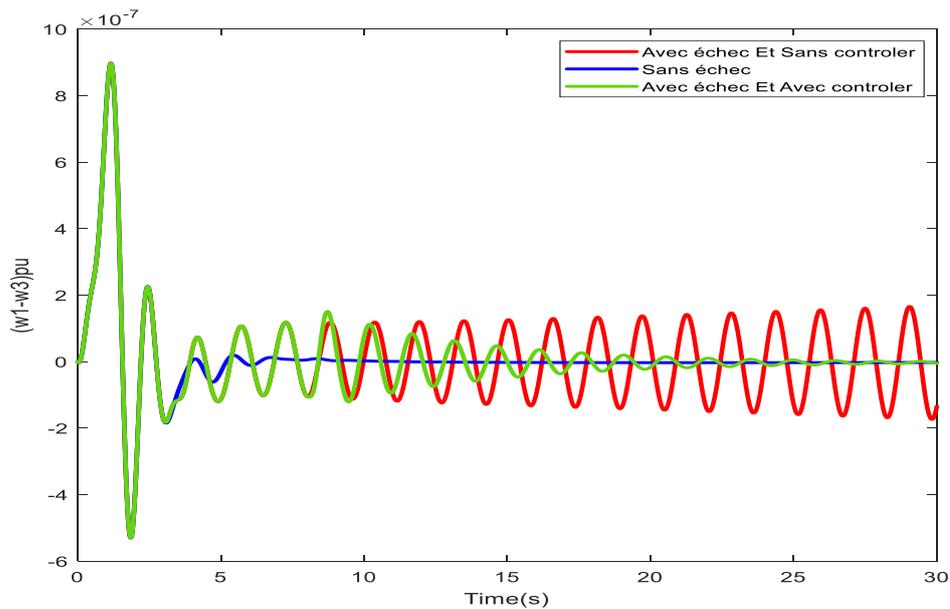
**Tableau (III-1). Angle du résidu, indice d'observabilité et facteur d'amortissement des signaux choisis**

Signal	$\Delta\omega_{13}$	$\Delta\omega_{14}$	$\Delta\omega_{23}$	$\Delta\omega_{24}$	$-\Delta\omega_3$	$-\Delta\omega_4$
Angle du résidu (Deg)	161	158	162	159	163	159
Indice d'observabilité	0.0101	0.0095	0.0079	0.0073	0.0060	0.0054
Facteur d'amortissement (%)	18.75	15.46	5.07	4.27	5.04	4.00

**Réponses pour le cas 1 :**



**Figure (3-3)** Réponses lorsque  $\Delta\omega_3$  est perdu et que  $\Delta\omega_{14}$  est utilisé comme entrée.



**Figure (3-4).** Réponses lorsque  $\Delta\omega_3$  est perdu et que  $\Delta\omega_{24}$  est utilisé comme entrée.

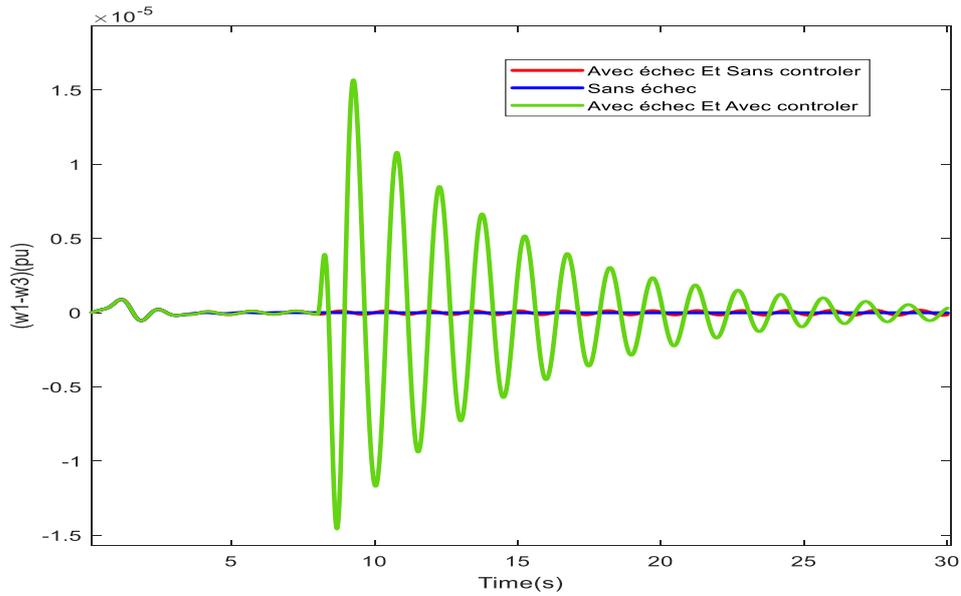


Figure 3-5. Réponses lorsque  $\Delta\omega_3$  ou  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $-\Delta\omega_4$  est utilisé comme entrée.

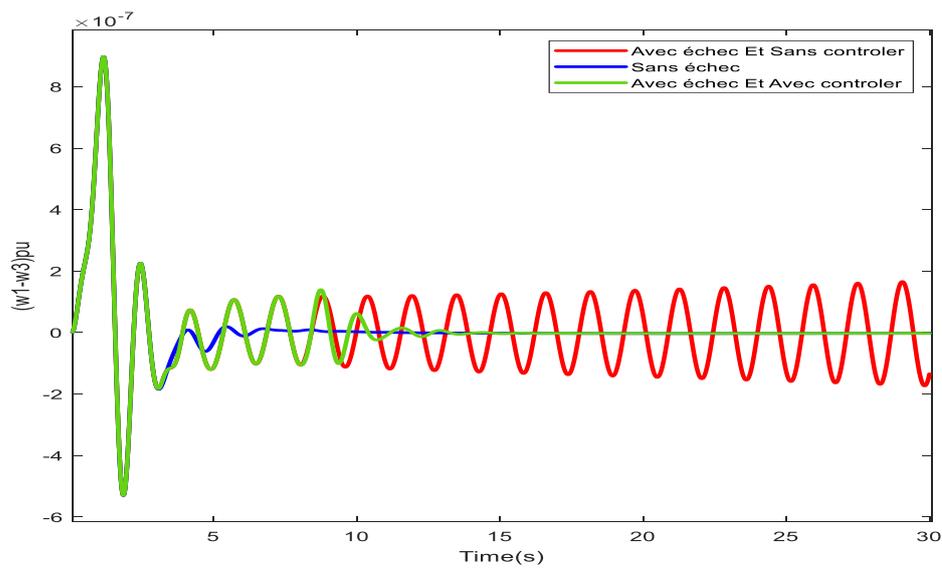


Figure (3-6). Réponses lorsque  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $\Delta\omega_{23}$  est utilisé comme entrée.

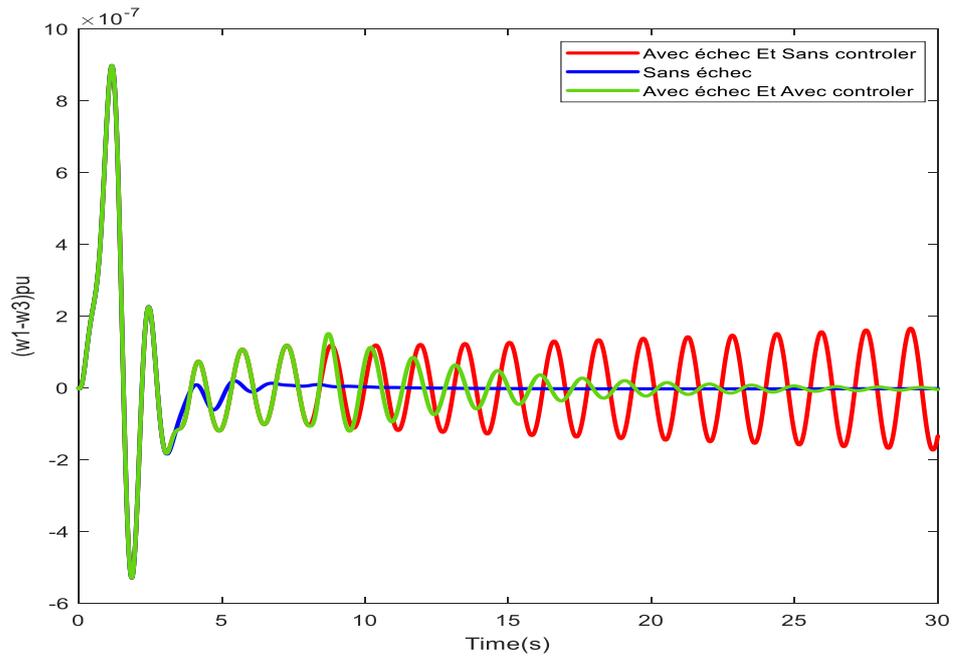
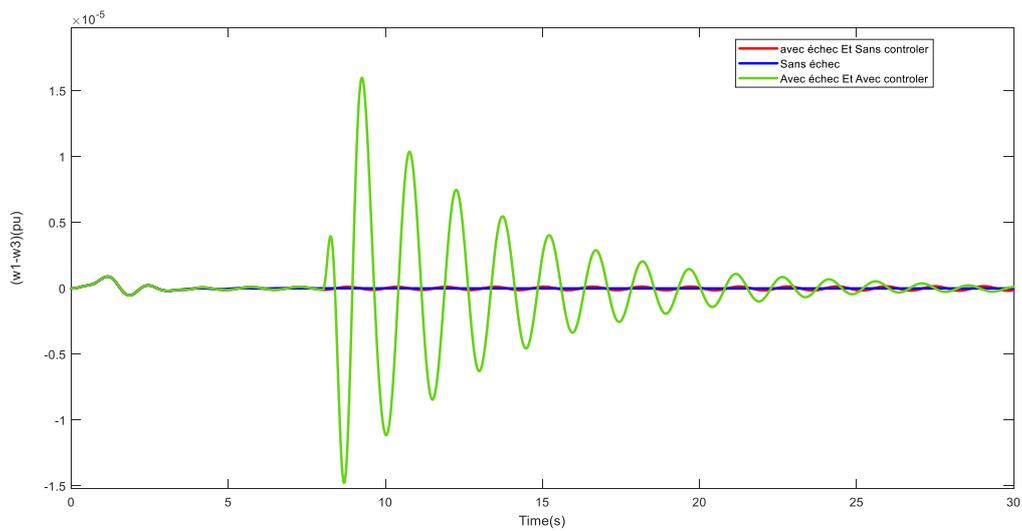
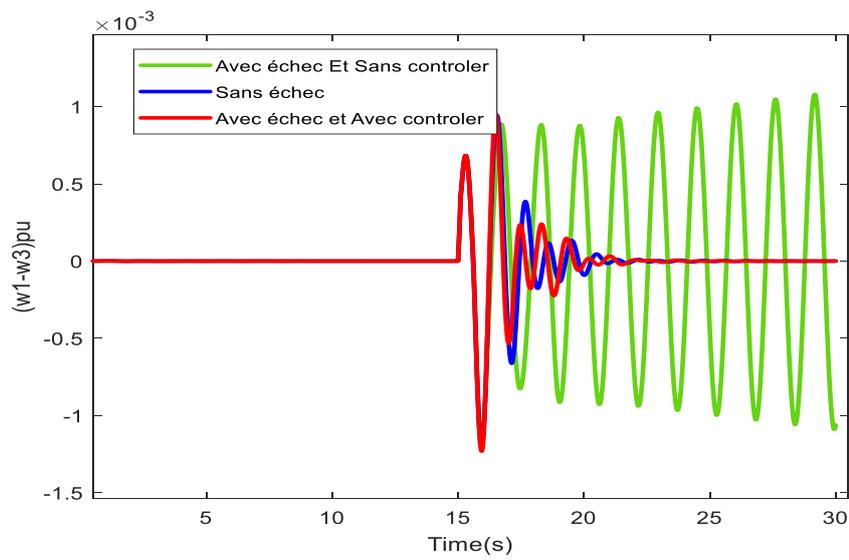


Figure (3-7). Réponses lorsque  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $\Delta\omega_{24}$  est utilisé comme entrée.

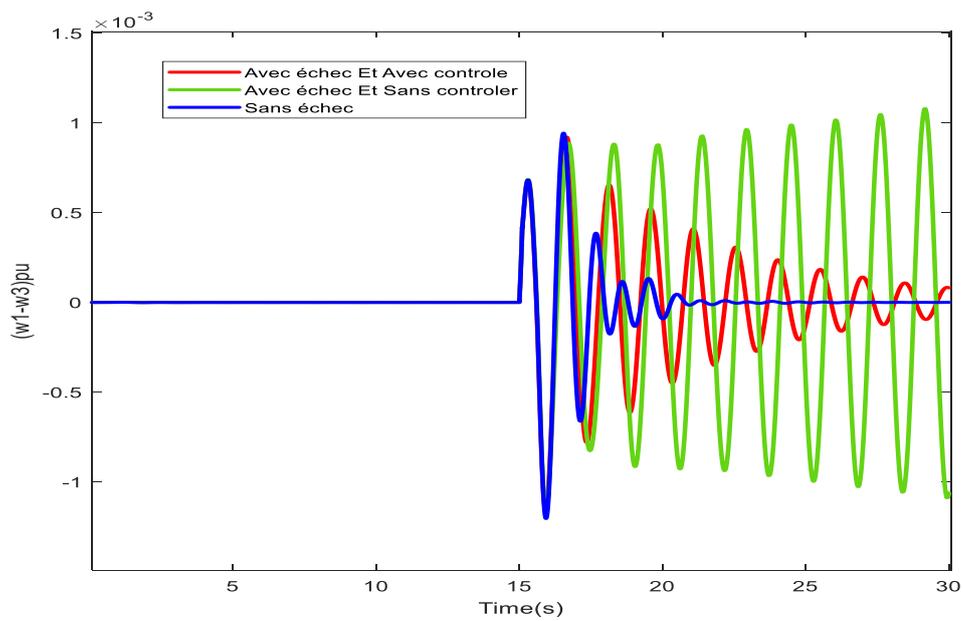


Figure(3-8) Réponses lorsque  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $-\Delta\omega_3$  est utilisé comme entrée.

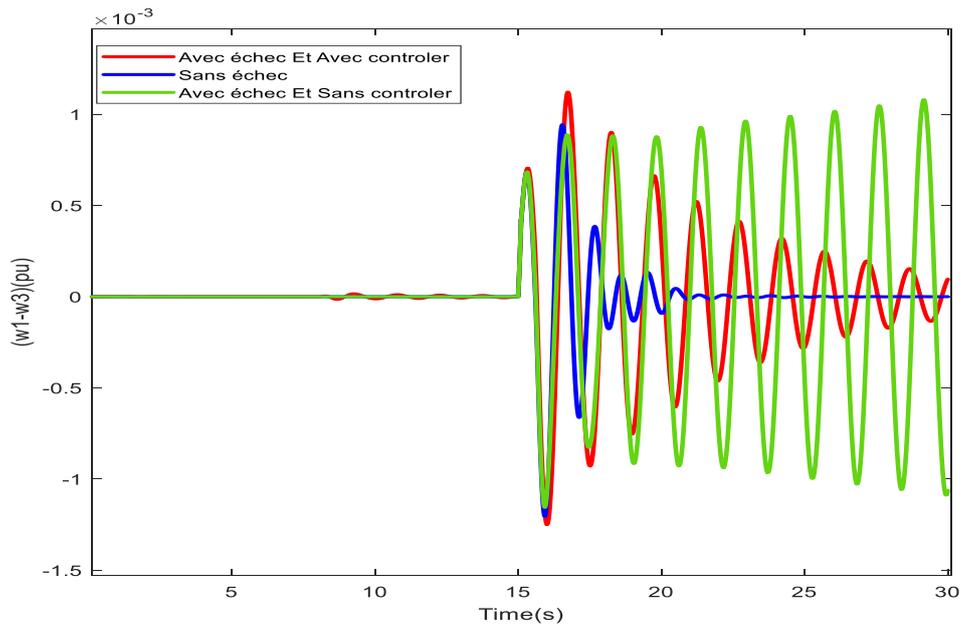
**Réponses pour le cas 2 :**



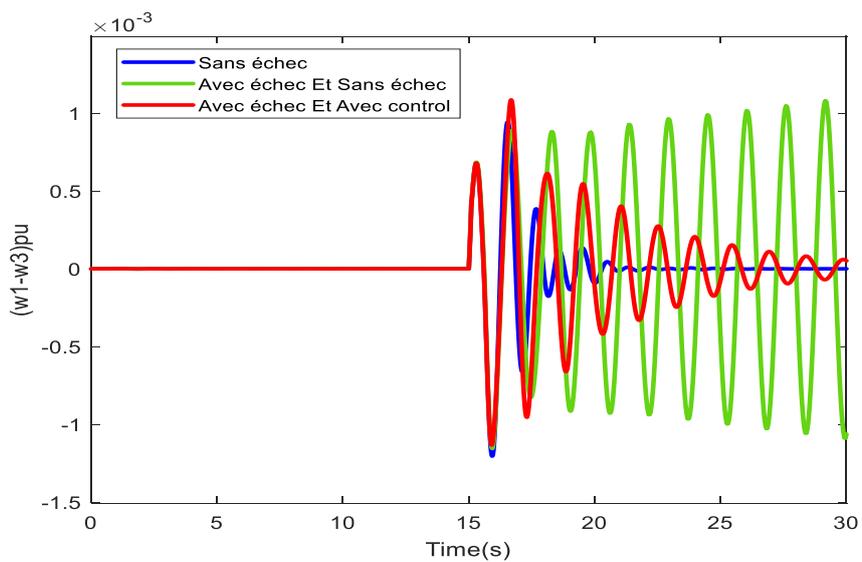
**Figure(3-9).**Réponses lorsque  $\Delta\omega_3$  est perdu et que  $\Delta\omega_{14}$  est utilisé comme entrée.



**Figure(3-10).**Réponses lorsque  $\Delta\omega_3$  est perdu et que  $\Delta\omega_{24}$  est utilisé comme entrée.



**Figure(3-11)** Réponses lorsque  $\Delta\omega_3$  ou  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $-\Delta\omega_4$  est utilisé comme entrée.



**Figure(3-12)** Réponses lorsque  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $\Delta\omega_{23}$  est utilisé comme entrée.

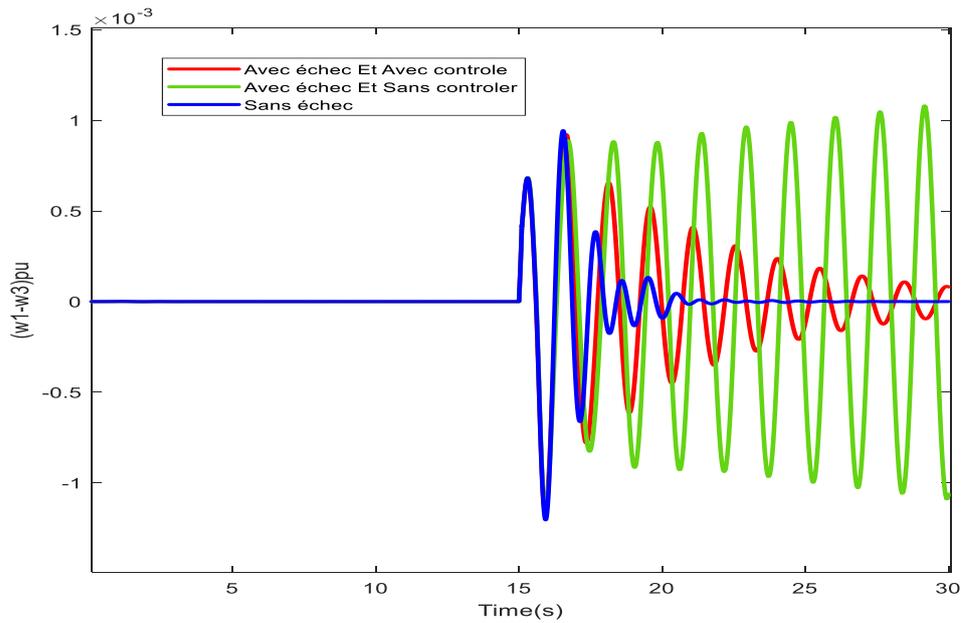


Figure (3-13). Réponses lorsque  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $\Delta\omega_{24}$  est utilisé comme entrée.

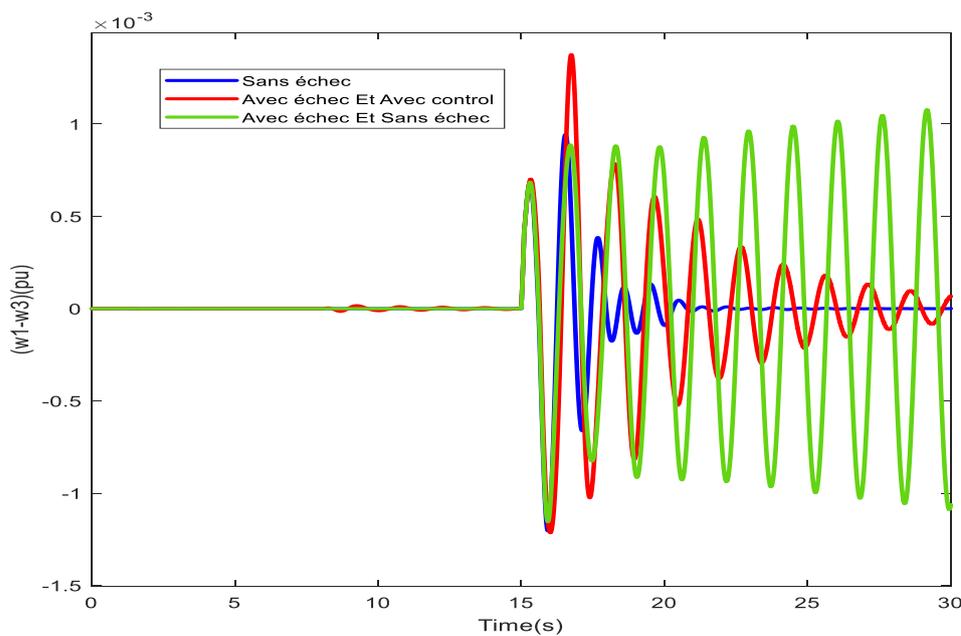


Figure (3-14). Réponses lorsque  $\Delta\omega_1$  est perdu et que  $-\Delta\omega_3$  est utilisé comme entrée.

La figure 3-15 montre une capture illustrant comment la fonction "n4sid" s'exécute dans MATLAB. Nous pouvons utiliser la boîte à outils d'identification (Identification Toolbox) pour vérifier les résultats obtenus, comme le montre la figure 3-16.

```

command Window
View MATLAB Help. See resources for Getting Started.
>> sys = n4sid(tt,10)

sys =
Discrete-time identified state-space model:
x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t)
y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)

A =
      x1      x2      x3      x4      x5      x6      x7      x8
x1  0.9910    0.0547    0.004401 -0.0001793 -0.0001063 -8.047e-06 -5.126e-06 2.494e-07
x2 -0.09047   0.9933    0.03483  -0.001085  -0.0005298 -8.749e-05 -1.782e-05 -3.765e-06
x3 -0.01828  -0.009538   0.9772  -0.08835   0.002021  -0.003503  9.506e-05 -0.0001955
x4 -0.03217  -0.03011   0.09102   0.9737   0.05641   0.001973   0.001627  0.0001214
x5 -0.05619  -0.01033   0.05218  -0.1002   0.9884   0.07867  -0.02003   0.004609
x6  0.03973   0.02874  -0.006932  0.04663  -0.03007   0.9882   0.09921  -0.003238
x7  0.06315  -0.006671   0.01853   0.0368  -0.01167  -0.1306   0.9688   0.08308
x8 -0.03354  -0.03184   0.07938  -0.0389  -0.07540   0.05702  -0.08313   0.0623
x9 -0.03159   0.003256   0.02801  -0.01865   0.0125   0.008493  0.05843  -0.2211
x10 -0.05264  -0.1385   0.1019  -0.1172  -0.2796   0.1513   0.0945  -0.3672
x11  0.1183  -0.02441  -0.05114   0.06372  -0.07256  -0.06161  0.09925  -0.1871
x12 -0.1144   0.0443   0.01863  -0.05044   0.1203   0.03142  -0.04076  0.08956
x13 -0.03549   0.02137   0.03379  -0.009957  0.04483  0.005568  -0.05570  0.01619
x14  0.007478  0.01597   0.01905   0.01605   0.0267  -0.01726  -0.04333  -0.01626
x15 -0.04223  0.01707  -0.01245  -0.01677   0.05169  0.008577  0.00563  0.03561
    
```

Figure (3-15). Exécution de la fonction "n4sid" dans MATLAB.

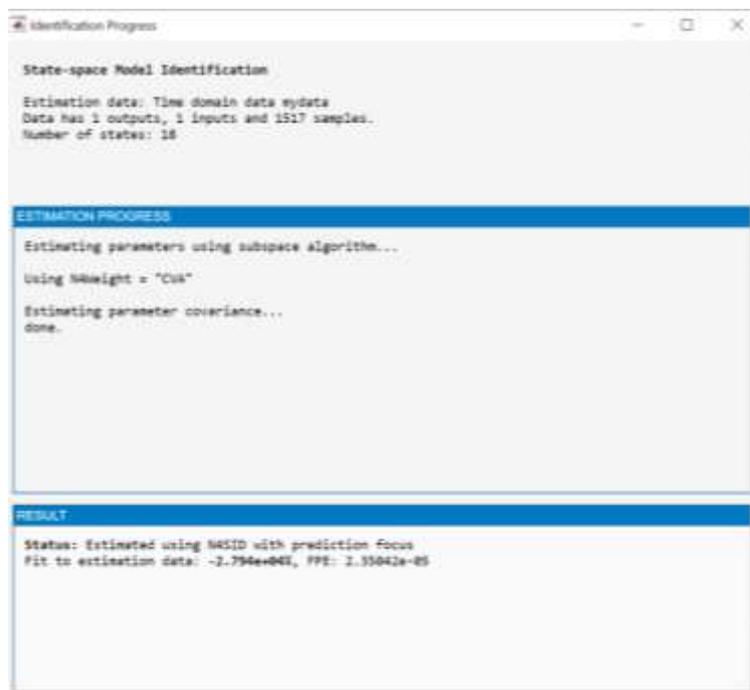


Figure (3-16). Identification Toolbox pour vérifier les résultats.

### III.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a exploré la conception et la mise en œuvre d'un algorithme en temps réel pour les systèmes de contrôle tolérants aux fautes (FTC) dans les systèmes de contrôle d'amortissement à grande échelle (WADC). Cet algorithme est essentiel pour surmonter les défis posés par les échecs de communication, en permettant la sélection de signaux d'entrée alternatifs pour maintenir la performance et la stabilité du système. Les résultats obtenus démontrent que notre approche peut améliorer de manière significative la robustesse des systèmes WADC, assurant une stabilité et une efficacité accrues même en présence d'échecs de communication. Ce travail représente une avancée importante dans le domaine des systèmes de contrôle tolérants aux fautes, offrant des perspectives prometteuses pour le futur des réseaux électriques intelligents et stables.

# Conclusion Générale

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Ce mémoire s'est concentré sur le développement d'une solution novatrice pour renforcer la robustesse et la stabilité des systèmes de Contrôle d'Amortissement à Grande Échelle (WADC) face aux défis posés par les échecs de communication. La technologie WADC joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la stabilité et de la sécurité des systèmes électriques modernes, mais sa dépendance aux réseaux de communication la rend vulnérable aux perturbations. En réponse à cette vulnérabilité, notre recherche a proposé un système de contrôle tolérant aux fautes (FTC) actif, capable de détecter et de remplacer en temps réel les signaux de rétroaction défectueux par des signaux sains, assurant ainsi la continuité des performances d'amortissement.

Les contributions clés de ce mémoire peuvent être résumées comme suit :

1. **Importance des systèmes de surveillance et de contrôle à grande échelle (WAMCs) :** Nous avons mis en évidence le rôle crucial des technologies WAMCs, en particulier du WADC, dans la gestion et la stabilisation des réseaux électriques. Cette compréhension approfondie a posé les bases pour aborder les défis et les solutions avancées dans les chapitres suivants.
2. **Analyse des oscillations et des échecs de communication :** Une analyse détaillée des oscillations dans les réseaux électriques et leurs impacts potentiels sur la stabilité du système a été réalisée. Nous avons également exploré les limitations des stabilisateurs de système électrique conventionnels et l'importance de développer des contrôleurs d'amortissement à grande échelle (WADC) capables de faire face aux échecs de communication.
3. **Conception et mise en œuvre d'un algorithme FTC :** Le cœur de notre recherche a porté sur la conception d'un algorithme en temps réel pour les systèmes FTC dans les WADC. Cet algorithme permet la sélection de signaux d'entrée alternatifs en cas de défaillance de communication, assurant ainsi la stabilité et l'efficacité du système. Les résultats de nos simulations ont démontré l'efficacité de cette approche, offrant une solution prometteuse pour renforcer la résilience des réseaux électriques modernes.

### Perspectives et implications futures

Les résultats obtenus dans ce mémoire ouvrent la voie à plusieurs perspectives de recherche et d'application :

- **Renforcement de la cyber-sécurité :** En plus de la tolérance aux pannes de communication, les futurs travaux pourraient se concentrer sur l'amélioration de la résilience des WADC face aux cyber-attaques, intégrant des mécanismes de détection et de mitigation des menaces informatiques.
- **Extension aux réseaux électriques intelligents :** L'application des méthodes développées dans ce mémoire pourrait être étendue aux réseaux électriques intelligents, où l'intégration de sources d'énergie renouvelables et la gestion dynamique de la demande posent des défis supplémentaires de stabilité et de fiabilité.
- **Déploiement pratique :** Les algorithmes et les solutions proposés devraient être testés et validés dans des environnements réels, permettant une évaluation pratique de leur performance et de leur efficacité dans des conditions opérationnelles variées.

## **Conclusion générale**

---

En conclusion, ce mémoire a apporté une contribution significative au domaine des systèmes de contrôle tolérants aux fautes pour les WADC, offrant une solution robuste et efficace pour améliorer la stabilité et la sécurité des réseaux électriques modernes en présence de perturbations de communication. Ces avancées sont cruciales pour le développement de systèmes électriques plus résilients et fiables, répondant aux exigences croissantes des infrastructures énergétiques contemporaines.

# Bibliographie

## Bibliographie

- [1] Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.
- [2] El-Hawary, M. E. (2008). *Principles of Electric Machines with Power Electronic Applications*. Wiley-IEEE Press.
- [3] Dörfler, F., & Bullo, F. (2013). "Synchronization and Transient Stability in Power Networks and Non-Uniform Kuramoto Oscillators." *SIAM Journal on Control and Optimization*, 50(3), 1616-1642.
- [4] Farhangi, H. (2010). "The Path of the Smart Grid." *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(1), 18-28.
- [5] "Wide-Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement," Electric Power Research Institute (EPRI) Report, 2016.
- [6] Phadke, A. G., & Thorp, J. S. (2008). *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. Springer.
- [7] Abur, A., & Exposito, A. G. (2004). *Power System State Estimation: Theory and Implementation*. CRC Press.
- [8] Wide-Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement," Electric Power Research Institute (EPRI) Report, 2016.
- [9] Electric power systems research
- [10] Kamwa, I., Samantaray, S. R., & Joos, G. (2012). "Wide-Area Measurement-Based Stabilizing Control of Large Power Systems—A Decentralized/Hierarchical Approach". *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(1), 65-75.
- [11] Phadke, A. G., & Thorp, J. S. (2008). *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. Springer.
- [12] Dhenuvakonda, K.R.; Singh, A.R.; Thakre, M.P.; Umre, B.S.; Kumar, A.; Bansal, R.C. Effect of SSSC-based SSR controller on the performance of distance relay and adaptive approach using synchronized measurement. *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* 2018, 28,
- [13] Makram, E. B., Girgis, A. A., & Brahma, S. M. (2004). A Wide Area Protection Scheme for the Entergy Electric Power System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(4), 1837-1843.
- [14] Terzija, V., Valverde, G., Cai, D., Regulski, P., Madani, V., Fitch, J., & Skok, S. (2011). WideArea Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks. *Proceedings of the IEEE*, 99(1), 80-93.
- [15] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2011.
- [16] L. Fan, Z. Miao, and D. Osborn, "A Novel Wide-Area Damping Controller for Inter-Area Oscillation Using Phasor Measurement Units," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2382-2390, Sept. 2015.
- [17] IEEE Standard C37.118.1-2011. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems Bibliographie
- [18] IEEE Task Force on Power System Stabilizers, « Overview of Power System Stability Concepts », *IEEE Trans. On Power Systems*, pp. 1762-1768, 2003.
- [19] IEEE Standard 421.2-1990, IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems, 1990.
- [20] Van Ness J.E. and Dean F.D., « Interaction between subsystems of a power system », *Proc. American Control Conference*, Baltimore, pp. 1553-1557, June 1994.
- [21] Hasan Alkhatib. « Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques : optimisation de la régulation par une méthode métaheuristique""". Thèse de doctorat. Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, 2008.
- [22] Bragasson R.F., Damping in the Icelandic power system, Small signal stability analysis and solutions, Master Thesis, Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, 2005.

- [23] Aboul-Ela M.E., Salam A.A., McCalley J.D. and Fouad A.A., « Damping Controller Design for Power System Oscillations Using Global Signals », IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, n°. 2, pp. 767-773, May 1996.
- [24] BENASLA MOKHTAR, ‘Contribution à l’amélioration des nouvelles structures d’une ligne HVDC pour transporter à longues distances de l’électricité solaire de source saharienne’ Thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2018.
- [25] S. P. Kerr, W. R. Kerr and T. Xu. Wide-area Oscillation Identification and Damping Control in Power Systems. Foundations and Trends in Electric Energy Systems, vol. 2, no. 2, pp. 133–197, 2018.
- [26] ] Lu C, Zhang X, Wang X, Han Y. Mathematical expectation modeling of wide area controlled power systems with stochastic time delay. IEEE Trans Smart Grid 2015;6(3):1511–9.
- [27] Wu H, Tsakalis KS, Heydt GT. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design. IEEE Trans Power Syst 2004;19(4):1935–41.
- [28] Silverstein A. NASPI update and technology roadmap. North American Syn chrophasor Initiative (NASPI). Tech. Rep.; 2011.
- [29] H. H. Alhelou, A. Y. Abdelaziz, and P. Siano, Wide Area Power Systems Stability, Protection, and Security. Cham, Switzerland: Springer, 2021.
- [30] M. BENASLA et al. "A Criterion for Designing Emergency Control Schemes to Counteract Communication Failures in Wide-Area Damping Control", IEEE Access, 2023
- [31] S. Zhang and V. Vittal, “Wide-area control resiliency using redundant communication paths,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 5, pp. 2189–2199, Sep. 2014.
- [32] M. E. Raoufat, K. Tomsovic, and S. M. Djouadi, “Virtual actuators for wide-area damping control of power systems,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 6, pp. 4703–4711, Nov. 2016.
- [33] D.V. Nair and M. Murty, “Reconfigurable control as actuator fault-tolerant control design for power oscillation damping,” Protection Control Modern Power Syst., vol. 5, no. 1, pp. 1–12, Feb. 2020. Bibliographie
- [34] F. R. S. Sevilla and P. Korba, “Semi-active wide-area fault-tolerant control in electric power systems,” in Proc. 19th World Congr. Int. Fed. Autom. Control, South Africa. Aug, 2014, pp. 3605–3610.
- [35] J. Jiang, “Fault-tolerant control systems—An introductory overview,” Acta Autom. Sinica, vol. 31, no. 1, pp. 161–174, Jan. 2005.
- [36] J. Lunze and J. H. Richter, “Reconfigurable fault-tolerant control: A tutorial introduction,” Eur. J. Control, vol. 14, no. 5, pp. 359–386, Jan. 2008.
- [37] X.-Z. Jin, W.-W. Che, Z.-G. Wu, and H. Wang, “Analog control circuit designs for a class of continuous-time adaptive fault-tolerant control systems,” IEEE Trans. Cybern., vol. 52, no. 6, pp. 4209–4220, Jun. 2022.
- [38] C.Y. Chung, L.Wang, F. Howell, and P.Kundur, “Generation rescheduling methods to improve power transfer capability constrained by small-signal stability,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 1, pp. 524–530, Feb. 2004.
- [39] J. Cao, W. Du, H. Wang, Z. Chen, and H. F. Li, “A novel emergency damping control to suppress power system inter-area oscillations,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 3, pp. 3165–3173, Aug. 2013.
- [40] M. M. Othman and S. Busan, “A novel approach of rescheduling the critical generators for a new available transfer capability determination,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 1, pp. 3–17, Jan. 2016.
- [41] L. Yazdani and M. R. Aghamohammadi, “Damping inter-area oscillation by generation rescheduling based on wide-area measurement information,” Int. J. Elect. Power Energy Syst., vol. 67, pp. 138–151, May 2015.
- [42] P. V. Overchee and B. D. Moore, Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Applications. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 1996.
- [43] P. Zhang et al. "Adaptive wide-area damping control scheme with stochastic subspace identification and signal time delay compensation", IET Generation, Transmission & Distribution, 201

