

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE DU 20 AOUT 1955 SKIKDA**

**Faculté de Technologie**

**Département : Pétrochimie**



**Mémoire**

**En vue de l'obtention du diplôme de Master.**

**Filière : Industries Pétrochimiques**

**Spécialité : Automatisation et contrôle en industries pétrochimiques**

**Par: CHENA Amar & MERZOUGUI Abdeldjalil**

**Thème:**

**Stratégie de contrôle déclenchée par événement pour les systèmes industriels à grande échelle via le réseau**

**Soutenu publiquement le : 30 / 06 / 2024 devant le jury composé de :**

<b>Président</b>	ZENNIR Youcef	Professeur	Univ. 20 Août 1955
<b>Encadrant</b>	ROUAMEL Mohamed	PHD	Univ. 20 Août 1955
<b>Co-encadrant</b>	BOURAHALA Faycal	MCA	Univ. 20 Août 1955
<b>Examineur</b>	BENDIB Riad	MCA	Univ. 20 Août 1955

**Promotion: 2023/2024**



# Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Avant tout, je remercie ma famille pour son soutien inconditionnel tout au long de mon parcours académique. À mes parents, pour leur amour indéfectible, leur confiance en moi et leurs encouragements constants. Votre soutien moral et financier a été la pierre angulaire de ma réussite. Vous avez été une source inestimable de motivation et de force.

Je souhaite également remercier le Dr. ROUAMEL Mohamed et Pr. BOURAHALA Faycal, Professeurs Associés à la faculté de génie électrique de l'Université du 20 Août 1955 Skikda, pour leur précieuse guidance, leurs conseils avisés tout au long de ce travail. Leur disponibilité et expertise ont été d'une grande aide dans l'élaboration de ce mémoire.

Mes remerciements vont également à Mr. ZENNIR Youcef Professeur à l'université de Skikda, a bien voulu présider ce jury de thèse.

Mes remerciements vont également à Mr. BENDIB Riad Professeur à l'université de Skikda, qui m'ont fait l'honneur de faire partie de ce jury.

Ma gratitude va aussi à l'ensemble des enseignants et personnels de l'Université de Skikda pour leur accompagnement et leur soutien tout au long de mon parcours académique. Leur dévouement à l'enseignement et à la recherche a été une source constante d'inspiration.

Je remercie également mes collègues et amis et toute la promotion de 2019, pour leur camaraderie, leurs encouragements et les échanges intellectuels enrichissants. Votre soutien et votre motivation ont été essentiels à la réalisation de ce projet.

Enfin, je remercie toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont cru en moi et m'ont soutenu. Votre confiance et votre soutien m'ont permis de surmonter les défis et de mener à bien ce mémoire.

CHENA Amar et MERZOUGUI Abdeljalile

# Abreviations

CDE	Contrôle Déclenché par un Evénement
CDP	Contrôleur de Domaine Principal
CL	Contrôleur local
CLL	Contrôle de lien logique
CPI	Contrôleurs Programmables Industriel
IMLs	Inégalités Matricielles Linéaires
LKFs	fonctionnelle de Lyapunov-Krasovskii
LTI	Linéaire à Temps Invariant
MDE	Mécanisme Déclenché par un Evénement
PCT	Protocole de Contrôle de Transmission
PI	protocole Internet
PID	Proportional-Integral-Derivative
PLC	Programmable Logic Controller
SCD	Système de Controle Distrebué
SCR	Système de Contrôle du Réseau
SGE	Systèmes à Grande Echelle
SSs	Sous Systèmes



## **Résumer :**

Ce mémoire aborde le problème du contrôle déclenché par événement décentralisé pour les grands échelle systèmes sujets aux retards induits par le réseau. Chaque sous-système au sein du système à grande échelle examiné est représenté par un modèle linière, et la communication des informations entre eux se fait via un canal numérique. Notre approche proposée implique un contrôle déclenché par événement décentralisé, où chaque sous-système est capable de prendre des décisions de diffusion en utilisant localement les SCR lorsqu'un événement spécifié est déclenché. Nous proposerons un nouveau mécanisme de déclenchement d'événement (MDE) qui dicte quand la transmission des variables de prémisse et des états du système au contrôleur devrait avoir lieu. En sélectionnant une fonctionnelle de Lyapunov-Krasovskii (LKF) appropriée et en appliquant des lemmes de relaxation pertinents, nous présentons des conditions de conception supplémentaires relaxées basées sur des inégalités matricielles linéaires (IML). Cela permet une relaxation maximale des retards induits par le réseau admissible et des intervalles de libération de paquets. Ces conditions sont validées à travers des exemples numériques représentant divers systèmes à grande échelle avec retard réseau, incluant une comparaison avec d'autres méthodes existantes en termes de robustesse.

**Mots clés :** Contrôle décentralisé déclenché par événement pour les systèmes à grande échelle en réseau, Systèmes de contrôle en réseau, Retard réseau, Limitation de la bande passante.

## **ملخص:**

تتناول هذه الأطروحة مشكلة التحكم اللامركزي الناتج عن الأحداث في الأنظمة واسعة النطاق المعرضة للتأخير الناجم عن الشبكة. يتم تمثيل كل نظام فرعي ضمن النظام واسع النطاق المدروس بنموذج خطي، ويتم تبادل المعلومات بينهما عبر قناة رقمية. يتضمن نهجنا المقترح التحكم اللامركزي الناتج عن الحدث، حيث يكون كل نظام فرعي قادرًا على اتخاذ قرارات البث باستخدام SCRs محليًا عند تشغيل حدث محدد. سنقترح آلية جديدة لبدء الحدث (ETC) تحدد متى يجب أن يتم نقل المتغيرات الأساسية وحالات النظام إلى وحدة التحكم. من خلال اختيار وظيفة Lyapunov-Krasovskii المناسبة (LKF) وتطبيق نماذج الاسترخاء ذات الصلة، فإننا نقدم شروط تصميم مريحة إضافية تعتمد على عدم مساواة المصفوفة الخطية (LMI). وهذا يسمح بأقصى قدر من الاسترخاء المسموح به للتأخير الناجم عن الشبكة والفواصل الزمنية لإصدار الحزم. ويتم التحقق من صحة هذه الشروط من خلال أمثلة عديدة تمثل أنظمة واسعة النطاق مختلفة مع تأخير في الشبكة، بما في ذلك المقارنة مع الطرق الأخرى الموجودة من حيث المتانة.

**الكلمات المفتاحية :** التحكم اللامركزي في الأحداث للأنظمة الشبكية واسعة النطاق، أنظمة التحكم الشبكية، تأخير الشبكة، اختناق عرض النطاق الترددي.

**Abstract:**

This thesis addresses the issue of event-triggered decentralized control for large-scale systems subject to network-induced delays. Each subsystem within the examined large-scale system is represented by a linear model, and information communication between them occurs via a digital channel. Our proposed approach involves event-triggered decentralized control, where each subsystem can make broadcast decisions using locally available state-triggered communication rules when a specified event occurs. We introduce a new event-triggering mechanism (ETM) that dictates when the transmission of premise variables and system states to the controller should occur. By selecting an appropriate Lyapunov-Krasovskii functional (LKF) and applying relevant relaxation lemmas, we present additional relaxed design conditions based on linear matrix inequalities (LMI). This allows for maximum relaxation of allowable network-induced delays and packet release intervals. These conditions are validated through numerical examples representing various large-scale systems with network delay, including a comparison with other existing methods in terms of robustness.

**Keywords:** Event-triggered decentralized control for networked large-scale systems, Networked control systems, Network delay, Bandwidth constraints.

# Table of Contents

<b>Acknowledgments</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>List of Figures</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introduction Générale</b>	<b>1</b>
1.1 Revue historique . . . . .	3
1.2 Notre contribution . . . . .	5
1.3 Organisation de la thèse . . . . .	6
<b>2 Systèmes à grande échelle : architectures, modélisation et protocoles de contrôle réel</b>	<b>9</b>
2.1 Introduction . . . . .	9
2.2 Définition des Système à grande échelle . . . . .	10
2.2.1 Modèle Interconnecté . . . . .	10
2.2.2 Complexité . . . . .	10
2.2.3 Problématique . . . . .	11
2.3 Les avantages et les inconvénients de systèmes interconnectés . . . . .	12
2.3.1 Les avantages . . . . .	12
2.3.2 Les inconvénients . . . . .	12
2.4 Structures des systèmes interconnectés . . . . .	13
2.4.1 Modèle non structuré . . . . .	14
2.4.2 Structure orientée Entrée/Sortie . . . . .	14
2.4.3 Modèle orienté interaction . . . . .	14
2.5 Les structures des systèmes à grande échelle . . . . .	15

2.5.1	La structures décentralisé . . . . .	15
2.5.2	La structures centralisé . . . . .	16
2.5.3	La Structure distribué . . . . .	16
2.6	Modélisation des Système a grand Echelle . . . . .	17
2.6.1	Modélisation des SGE décentralisée . . . . .	17
2.6.1.1	Les modèles interconnectés découplés par les sorties . . . .	18
2.6.2	Systèmes à grande échelle à données échantillonnées en temps continu	18
2.6.3	Modélisation des Système centralisée . . . . .	19
2.7	Commande des système a grand Échelle . . . . .	20
2.7.1	Décomposition du système de commande . . . . .	21
2.7.1.1	Décomposition verticale . . . . .	21
2.7.1.2	Décomposition horizontale . . . . .	22
2.7.1.3	Décomposition mixte . . . . .	23
2.7.2	Modélisation du système de commande . . . . .	23
2.8	Problématique de stabilité des systèmes interconnectés . . . . .	24
2.9	Techniques de commande des systèmes à grand échelle . . . . .	24
2.9.1	Commande rétroactive . . . . .	25
2.9.2	Commande sous réseau de communication . . . . .	26
2.9.2.1	Modèle de retard induit par le réseau dans le SGE . . . . .	27
2.9.2.1.1	Approche du système avec retard d'entrée . . . . .	28
2.9.2.2	Perte de paquets . . . . .	28
2.9.2.3	Limitation de la bande passante . . . . .	29
2.10	Exemple des Systèmes d'ingénierie complexes . . . . .	30
2.10.1	système de télécommunication . . . . .	30
2.10.2	Automobile . . . . .	31
2.11	Différents systèmes réels à grande échelle . . . . .	31
2.11.1	Contrôle de surveillance et acquisition de données (SCADA) . . . . .	31
2.11.1.1	Avantages de SCADA . . . . .	32
2.11.1.2	Inconvénients de SCADA . . . . .	32
2.11.2	Système de Contrôle Distribué . . . . .	32
2.11.2.1	Avantages des SCD . . . . .	33
2.11.2.2	Inconvénients des SCD . . . . .	33

---

2.12 Conclusion . . . . .	34
<b>3 Contrôle décentralisé déclenché par événement pour les systèmes à grande échelle en réseau</b>	<b>35</b>
3.1 Introduction . . . . .	35
3.2 Préliminaires . . . . .	37
3.3 Résultats principal . . . . .	40
3.3.1 Analyse de Stabilité . . . . .	41
3.4 Exemples numériques . . . . .	44
3.5 Conclusion . . . . .	47
<b>References</b>	<b>51</b>



# List of Figures

2.1	Structures des systèmes interconnectés : a) Modèle non structuré b)Modèle orienté Entrée/Sortie c) Modèle interconnecté [26]. . . . .	13
2.2	Architecture de la structure décentralisée [34] . . . . .	15
2.3	Architecture de la structure centralisée . . . . .	16
2.4	Architecture des systèmes de contrôle distribué [78] . . . . .	17
2.5	Structure décentralisée naturelle d'un système interconnecté découplé par les sorties [49]. . . . .	18
2.6	Décomposition verticale d'un système de commande [26] . . . . .	22
2.7	Décomposition horizontale d'un système de commande de grande dimension [26] . . . . .	23
2.8	Décomposition mixte d'un système de commande [26] . . . . .	23
2.9	Les types de commande retroactive [27] . . . . .	25
2.10	Une représentation en bloc simple d'un système de contrôle en réseau (SCR) [9].	26
2.11	Configuration du système CENTUM CS 3000 [57] . . . . .	33
3.1	Systèmes non linéaires à grande échelle en réseau sous schéma de contrôle déclenché par événement [23] . . . . .	39
3.2	Trajectoires des états et instants et intervalles de CDE de sous-systèmes 1. . .	46
3.3	Trajectoires des états et instants et intervalles de CDE de sous-systèmes 2. . .	46



# Chapter 1

## Introduction Générale

Dans les usines industrielles, la surveillance et le contrôle de la qualité de production est l'un des aspects les plus importants, car des processus de surveillance et de contrôle efficaces ont un impact significatif sur les résultats de production. Cela inclut l'efficacité des dispositifs et des algorithmes impliqués dans le processus, incitant les chercheurs à déployer des efforts concertés pour améliorer et développer les processus de surveillance et de contrôle, notamment dans les domaines du contrôle et des capteurs. Le processus de surveillance et de contrôle peut être défini comme le processus de maintien d'une quantité physique à une valeur constante et/ou une consigne variable à suivre bien définie malgré les perturbations externes et/ou variation du besoin du processus [4]. Pendant de nombreuses années, les chercheurs ont fourni des stratégies de contrôle précises et exemplaires découlant de la théorie de contrôle classique, allant du contrôle en boucle ouverte aux stratégies de contrôle avancées. Dans le contrôle classique (traditionnel), les composants du système, y compris les contrôleurs, les capteurs et les actionneurs, sont généralement situés dans la même zone physique. Chaque nœud système différent est connecté individuellement via un câblage électrique, et les systèmes sont conçus pour apporter toutes les informations des capteurs à un emplacement central pour la surveillance et la prise de décision [6]. Pour relever les défis associés à de tels systèmes, les experts ont proposé plusieurs stratégies, notamment des algorithmes de contrôle distribué, des techniques de contrôle de supervision et des systèmes de contrôle en réseau. SCD, SCADA, sont des exemples de systèmes à grande échelle les plus largement utilisés. Chaque composants du ces systèmes sont physiquement connecter via un câble électrique analogique en temps réel avec le central du calcule. [3]

Dans le contrôle classique (traditionnel), les composants du système: contrôleurs, capteurs et actionneurs, sont généralement situés dans la même zone physique et chaque nœud de système différent est connecté séparément par un câblage électrique, les systèmes étant conçus pour amener toutes les informations des capteurs à un emplacement central pour la surveillance. Et les décisions sur la façon d'agir et il est mis en œuvre avec succès dans l'industrie depuis des décennies. Par conséquent, en raison du nombre croissant de configurations physiques en expansion, l'architecture point à point traditionnelle est limitée et difficile à satisfaire aux exigences de contrôle strictes, telles que le contrôle décentralisé, le contrôle à distance, etc. Ce qui a conduit à l'introduction des réseaux de communication dans le concept de télécommande dans le système, qui a généré des systèmes de contrôle de réseau (Networked Control Systems (SCRs)). Les systèmes de contrôle en réseau (SCR) sont des systèmes de contrôle décentralisés ou distribués (SCD) dans lesquels les boucles de contrôle (capteurs, actionneurs et contrôleurs) sont fermées via un canal de communication numérique en temps réel. Ainsi, l'échelle du système de contrôle en réseau est généralement beaucoup plus grande que celle des systèmes de contrôle conventionnels [5].

Il existe différents protocoles de communication utilisés dans les systèmes à grande échelle appelés protocoles de bus de terrain tels que MODBUS, HART, CAN et Ethernet industriel qui permettent aux dispositifs de se connecter au même réseau de communication. MODBUS est un protocole open source qui permet la communication entre les dispositifs, tandis que HART est utilisé pour transmettre des signaux numériques et analogiques entre les dispositifs sur le terrain et un système de contrôle. CAN est largement utilisé dans l'industrie automobile pour la communication entre différents systèmes électroniques dans un véhicule. De plus, Ethernet est souvent utilisé comme colonne vertébrale pour connecter différents sous-systèmes et dispositifs à un système de contrôle central. Cependant, la complexité du système de contrôle en réseau et les effets néfastes du canal de transmission peuvent entraîner des retards de communication, des pertes de paquets et des désordres de paquets. Ces problèmes peuvent entraîner une perte de données, ce qui peut affecter les performances et la sécurité du système. Pour surmonter ces défis, comme nous l'avons mentionné précédemment, divers mécanismes de contrôle et stratégies de communication ont été proposés, tels que par exemple les stratégies de contrôle déclenchées par événement et auto-déclenchées, qui sont utilisées pour améliorer la qualité du contrôle via le réseau de communication en réduisant les paquets transmis inutiles [3] [63].

À la fin de cette introduction, nous pouvons simplement dire que les systèmes complexes nécessitent des techniques de surveillance efficaces et sécurisées, des protocoles de contrôle robustes et des méthodes de contrôle intelligentes.

## 1.1 Revue historique

Depuis les années 1950, la théorie des systèmes a connu une évolution significative, passant d'une discipline axée sur des systèmes électroniques et aérospatiaux simples à une capable de traiter des systèmes complexes dans divers domaines tels que la société, l'économie, l'industrie et le gouvernement. Initialement, les ingénieurs se sont appuyés sur des techniques numériques ancrées dans la théorie classique des systèmes, mais à mesure que la complexité des systèmes augmentait exponentiellement, il est devenu évident que de nouvelles approches étaient nécessaires. Exploiter les interconnexions structurelles au sein des systèmes à grande échelle est apparu comme une stratégie clé, que ce soit en utilisant des techniques de matrice creuse ou en décomposant les systèmes plus grands en composants plus petits et plus gérables. Bien que de nombreuses techniques avancées soient encore en développement, maximiser les interconnexions structurelles reste essentiel pour relever efficacement les défis posés par les systèmes grands et complexes [52]. Dans les années 1970 Le Système de Contrôle Distribué a été introduit et en remplacement des systèmes de contrôle centralisés traditionnels utilisant des CLP (Contrôle Logique Programmable). Les premiers systèmes SCD ont été utilisés dans les industries de process, telles que la pétrochimie, la chimie et la production d'énergie. Au cours des dernières décennies, les systèmes à grande échelle ou les systèmes de contrôle distribué sont devenus de plus en plus populaires en raison de leurs avantages par rapport aux systèmes de contrôle traditionnels, tels qu'une performance accrue, une flexibilité et une évolutivité. Cependant, l'histoire de la communication entre les sous-systèmes dans un Système de Contrôle en Réseau (SCR) n'a pas toujours été fluide. Initialement, la communication entre les sous-systèmes était réalisée à l'aide de transmissions périodiques, ce qui présentait plusieurs inconvénients, notamment des temps de réponse médiocres, un gaspillage de bande passante et le risque de collisions de données. Au cours des dernières décennies, de grands efforts ont été consacrés à la modélisation, à l'analyse de stabilité et à la conception de contrôle des systèmes à grande échelle en raison de l'existence de différentes imperfections induites par le réseau qui nécessitent des méthodes d'analyse et de synthèse tenant compte de toutes ces imperfections.

Malheureusement, une grande partie de la recherche documentaire disponible sur les SCR a considéré certains types d'imperfections de réseau et a ignoré les autres types, alors qu'il est important de considérer que la conception d'un CLL typique nécessite des compromis entre les différents types d'imperfections. Par exemple, réduire les erreurs de quantification entraîne des retards de transmission plus importants, ce qui signifie qu'il est nécessaire de faire des compromis entre ces deux imperfections pour obtenir une bonne qualité de service (QoS). Par conséquent, il est important d'améliorer et d'intégrer les résultats disponibles pour obtenir un cadre dans lequel toutes les imperfections induites par le réseau peuvent être étudiées simultanément avec la possibilité de compromis. Il existe deux façons différentes de modéliser les imperfections induites par le réseau : la première méthode est la méthode déterministe qui suppose un modèle borné sur les retards temporels, le nombre de pertes de paquets et les intervalles d'échantillonnage où toutes les possibilités de processus aléatoires sont ignorées. La deuxième classe de méthodes utilise la nature stochastique des imperfections induites par le réseau pour modéliser les SCR. L'approche des systèmes commutés, l'approche des systèmes impulsifs. L'étude des problèmes de stabilité des systèmes à grande échelle est un objectif crucial dans le domaine du contrôle, où le principal objectif est de réduire l'effet des imperfections induites par le réseau sur la stabilité en garantissant une limite d'imperfections maximale autorisée (MAIB) garantissant la stabilité de la boucle fermée et en atteignant de bonnes performances (par exemple, garantir une limite de retard maximale autorisée, le nombre maximum de pertes de paquets, l'erreur de quantification maximale). Par conséquent, la MAIB devient un indice de performance clé pour réduire le conservatisme de la conception de stabilité [22]. Dans un article de 2021, les chercheurs présentent une stratégie de contrôle déclenchée par événement adaptée aux systèmes en réseau confrontés à des attaques hybrides et à des limitations dans les ressources réseau. Un nouveau modèle basé sur des événements pour les systèmes de contrôle en réseau est établi dans ce travail [41]. Enfin, un article récent de 2023 propose l'intégration de la technique d'estimation et de rejet des perturbations déclenchée par événement (DER) avec la stratégie de contrôle prédictif en réseau (CPR) pour les systèmes de contrôle en réseau soumis à des perturbations externes et des retards temporels [66]. Les résultats de cette recherche sur le web démontrent de manière indiscutable l'étude et l'exploration approfondies du contrôle déclenché par événement dans le contexte historique des systèmes de contrôle en réseau. Cette stratégie vise à réduire la transmission de données, à optimiser l'utilisation des ressources et à relever les défis tels que le basculement

du système, les attaques DoS, les attaques hybrides et les perturbations externes. Le contrôle auto-déclenché est une stratégie qui combine des aspects du contrôle déclenché par le temps et du contrôle déclenché par événement. Il exécute des actions de contrôle lorsque certains événements se produisent ou que des conditions spécifiques sont remplies, tout comme le contrôle déclenché par événement. De plus, il intègre un composant périodique où des actions de contrôle sont exécutées périodiquement si aucun événement déclencheur ne se produit dans un intervalle de temps prédéfini. Cette approche hybride offre les avantages du contrôle déclenché par événement et du contrôle déclenché par temps, offrant une adaptabilité tout en garantissant une exécution périodique. Des méthodes de modélisation de systèmes commutés ont été utilisées pour capturer l'incertitude et la nature variable dans le temps des retards induits par le réseau dans les schémas de contrôle déclenchés par événement et auto-déclenchés, améliorant ainsi les performances des systèmes de contrôle en réseau. Le développement de schémas de contrôle de déclenchement, y compris le contrôle déclenché par temps, le contrôle déclenché par événement et le contrôle auto-déclenché, a considérablement fait progresser les systèmes à grande échelle. Ces stratégies visent à améliorer l'efficacité de la communication et du contrôle et à optimiser l'utilisation des ressources [83] [33].

## 1.2 Notre contribution

Dans le domaine des systèmes à grande échelle, les systèmes de contrôle en réseau (SCRs) ont émergé comme un champ d'étude crucial, permettant le contrôle de systèmes interconnectés complexes. Cependant, comme mentionné précédemment, la présence de retards induits par le réseau et de limitations de bande passante pose d'importants défis à la stabilité et à l'efficacité de ces systèmes. Les principales contributions de ce mémoire sont les suivantes :

- Obtenir une limite de retard induit par le réseau maximale garantissant la stabilité et la stabilisation des SCRs. Nous avons utilisé l'idée de traiter les SGEs comme des systèmes à échantillonnage multiple en construisant de nouveaux LKFs comprenant des termes intégraux simples, doubles, ainsi qu'un nouveau vecteur de LKFs augmenté, et avons également utilisé de nouveaux lemmes (lemmes de Wirtinger et réciproques étendus) pour estimer les dérivées du vecteur de LKFs. Nous avons obtenu les conditions de conception de stabilité et de contrôle.
- Concevoir une nouvelle méthodologie de contrôle déclenchée par événement (CDE) qui at-

ténuée efficacement les charges réseau dans les SGEs et améliore la qualité de service du réseau.

- Développer un contrôleur en réseau robuste à rétroaction de sortie en incorporant le mécanisme déclenché par événement proposé, qui minimise non seulement le nombre de paquets transmis mais renforce également la résilience du système contre les perturbations externes.
- Vérifier la condition obtenue sur le cas spécial des systèmes à grande échelle qui est l'architecture des systèmes de contrôle en réseau et sur les vrais systèmes à grande échelle.

### 1.3 Organisation de la thèse

Le mémoire est organisé comme suit :

Le chapitre 1 fournit une introduction générale aux Systèmes à Grande Échelle (SGE) et à leurs différentes techniques de contrôle, protocoles de communication, et la stratégie de Contrôle Déclenché par Événement (CDE). Ensuite, une section est présentée qui passe en revue l'histoire et les tendances récentes des SGE et du CDE. Tout d'abord, il aborde le développement et les architectures des SGE, suivi des avantages et inconvénients de l'utilisation des Systèmes de Contrôle Distribué (SCD) et des Systèmes de Contrôle en Réseau (SCR) tout au long de l'histoire. Enfin, nous proposons une revue de l'une des solutions proposées pour ces systèmes afin de réduire les problèmes de communication, à savoir les tendances récentes en matière de contrôle déclenché. Les contributions apportées dans le cadre de ce mémoire sont ensuite présentées dans la section des contributions. Pour finir, ce chapitre se termine par la section d'organisation du mémoire, qui résume et facilite la présentation de ce travail pour les lecteurs.

Le chapitre 2 commence par une introduction aux structures, à la modélisation et aux protocoles réels utilisés dans les systèmes à grande échelle (SGE), ainsi qu'aux problèmes de recherche actuels. Il explore ensuite la définition de systèmes à grande échelle et du modèle interconnecté sa complexité, problématique et ces avantages et inconvénients, avec une section détaillant pour les structures du système interconnecté. En suite en présenté Les structures des systèmes à grande échelle centralisée, décentralisée et distribuée sont présentées avec des diagrammes et des explications sur leur fonctionnement. Un défi majeur abordé est la modélisation des SGE, en mettant l'accent sur la modélisation des SGE décentralisés avec système à grande échelle à donné échantillonnés en temps continu.

La section suivante traite de la commande des systèmes de grande dimension, de leur dé-

composition et de la modélisation des systèmes de commande, ainsi que des problématiques de stabilité des systèmes interconnectés. Une technique d'analyse est discutée pour déduire la stabilité du système global, avec des exemples de systèmes d'ingénierie complexes. Le chapitre se conclut par une discussion sur la commande des systèmes dynamiques, qui aborde la commande sous réseau de communication le modèle de retard induit par le réseau soulignant son importance dans l'automatique pour atteindre des objectifs spécifiques. Enfin, Les différents systèmes réels à grande échelle SCADA, SCD et leur avantages et inconvénients, avec une conclusion sur leur pertinence pour les systèmes à grande échelle, offrant une manipulabilité supérieure par rapport aux systèmes de contrôle distribué classiques (SCD), ainsi que la flexibilité de concevoir et de mettre en œuvre diverses stratégies de contrôle adaptées aux besoins spécifiques

Dans le chapitre 3, nous nous concentrons sur la conception du Contrôle décentralisé déclenché par événement pour les systèmes à grande échelle en réseau soumis à des retards induits par le réseau et des perturbations externes. Le chapitre débute par une introduction à notre travail. Ensuite, nous fournissons quelques préliminaires, comprenant le modèle général du système et certaines hypothèses qui nous aident dans notre travail. Nous présentons également le schéma général de la boucle de contrôle sur laquelle nous travaillerons, ainsi que l'état de tous ses composants et le type de contrôleur. Enfin, nous introduisons le modèle mathématique et quelques lemmes. De plus, l'analyse de la stabilité devient notre prochain objectif. Nous utilisons le Fonctionnel de Lyapunov-Krasovskii dans la preuve de notre théorème. Cette approche dérive des conditions basées sur les Inégalités Matricielles Linéaires (IMLs), qui sont nécessaires pour résoudre notre problème proposé. Cela nous permet de spécifier la limite maximale de retard admissible du système, en utilisant les lemmes de Finsler et de réciprocity étendue. Ensuite, nous présentons la deuxième contribution de cette thèse, qui introduit un nouveau design pour le Mécanisme Déclenché par Événement décentralisé. Pour y parvenir, nous développons une procédure de co-conception qui permet de déterminer simultanément les paramètres de déclenchement et les gains pour le contrôleur en réseau. Enfin, pour démontrer l'efficacité et la supériorité de notre méthodologie de conception de Systèmes en Réseau pour les SGE, nous fournissons exemple numérique. L'objectif principal de ces exemples est de réduire le nombre de transmissions inutiles, tout en préservant la bande passante du réseau, tout en garantissant la stabilité en boucle fermée



# Chapter 2

## Systemes à grande échelle : architectures, modélisation et protocoles de contrôle réel

### 2.1 Introduction

Les systèmes à grande échelle (SGE) sont des systèmes complexes qui peuvent être divisés ou découplés en sous-systèmes plus petits. Ils se caractérisent par leurs dimensions, qui peuvent être si grandes que les techniques conventionnelles de modélisation, d'analyse, de contrôle, de conception, d'optimisation, d'estimation et de calcul échouent à fournir des solutions raisonnables avec des efforts raisonnables. Les SGE se retrouvent dans divers domaines, y compris les systèmes d'automatisation industrielle comme les systèmes de contrôle distribué (SCD), permettant la modélisation et le contrôle de systèmes complexes avec de multiples composants interactifs pour une efficacité de production optimisée [37]. Le contrôle des SGE implique différentes structures, telles que le contrôle centralisé, décentralisé et distribué, ainsi que leur modélisation et leur contrôle en temps continu, en tenant compte du délai induit par le réseau, sont essentiels pour leur mise en œuvre réussie. Les problèmes de recherche actuels et les orientations futures des SGE comprennent la modélisation du système décentralisé, qui sont essentiels pour améliorer les performances et l'efficacité des systèmes à grande échelle [52]. Le développement de techniques de modélisation et de contrôle efficaces pour les SGE est un domaine de recherche actif, avec diverses méthodes analytiques et computationnelles proposées pour relever les défis de la modélisation et du contrôle des systèmes complexes d'ordre élevé [38].

## 2.2 Définition des Système à grande échelle

Un large-scale système, ou système à grande échelle, est défini comme un système caractérisé par un grand nombre de composants qui travaillent de manière coordonnée, souvent à distance, et distribués sur une vaste surface. Ces systèmes nécessitent des méthodes de contrôle efficaces pour garantir un fonctionnement adéquat malgré des ressources limitées, exigeant une planification stratégique pour répondre à des demandes spécifiques. En outre, les large-scale systèmes présentent des défis en termes de modélisation, de conception et de mise en œuvre du contrôle, nécessitant des solutions efficaces avec des efforts raisonnables.

**2.2.1 Modèle Interconnecté** : Les systèmes à grande échelle interconnectés sont des réseaux complexes composés de nombreux sous-systèmes reliés entre eux, étudiés en automatique. Voici quelques caractéristiques de ces systèmes : Mathématiquement, un système interconnecté peut être décomposé en plusieurs sous-systèmes reliés par des matrices d'interconnexion. Par exemple, un système à trois échelles de temps peut être composé de trois sous-systèmes interconnectés de troisième ordre chacun. [15] Les défis majeurs pour ces systèmes sont la fiabilité, la sécurité, la performance, l'extensibilité et la gestion efficace des ressources. Des axes de recherche incluent l'optimisation de la gestion des données, la réduction de la consommation d'énergie, la détection d'intrusions et la conception de cryptographie robuste. Dans le domaine électrique, les grands systèmes interconnectés permettent de relier les centrales de production aux centres de consommation sur de vastes zones géographiques, facilitant l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité. En résumé, les systèmes interconnectés à grande échelle sont des réseaux complexes multi-échelles qui posent des défis techniques et scientifiques passionnants en automatique, avec de nombreuses applications dans les réseaux électriques, informatiques et industriels.

**2.2.2 Complexité** : Le mot complexité vient du latin *complexus* qui signifie tissé ensemble et de *complexi* "ce qui contient des éléments différents" ([24] p.16). Les scientifiques adoptent deux approches vis-à-vis la complexité d'un système donné. Certains cherchent à le comprendre en observant son comportement et par l'expérience (le cas du système nerveux par exemple), d'autres cherchent des méthodes et des algorithmes applicables à ce processus. La complexité d'un système se caractérise par la difficulté de le modéliser en utilisant des outils mathématiques ordinaires. Il est généralement décrit par des équations à dérivées partielles,

des équations fortement non linéaires, etc. Selon Siljak [68], ces types de systèmes doivent présenter des incertitudes et des contraintes sur les informations entrantes et sortantes pour lui attribuer l'étiquette de complexité. Trois caractéristiques fondamentales de cette complexité sont souvent citées dans les publications scientifiques : • la dimension • les incertitudes et/ou perturbations • les informations sur les contraintes structurelles. Pour faire face au problème de complexité, plusieurs méthodes ont été élaborées. La majorité de ces méthodes font parties de l'un de ces trois groupes : • simplification du modèle • décomposition • décentralisation.

**2.2.3 Problématique** : Un problème de contrôler un systèmes de grande dimension interconnecté est l'utilisation de la commande décentralisée puisqu'elle est basée uniquement sur des informations locales de chaque sous-système. La commande doit être robuste pour compenser les imperfections liés à la modélisation des sous-systèmes. La conception d'une loi de commande est organisé autour de trois éléments principaux : • un modèle à contrôler. • mesures de contrôle admissibles. • un comportement désiré du système.

Le problème le plus général est de concevoir une commande, basée sur le modèle disponible en respectant les exigences définies dans le cahier de charge. Parmi les objectifs habituels de la synthèse d'un contrôle des processus :

- l'amélioration de la régulation à l'état d'équilibre ;
- l'adaptation en un temps fini aux changements brusque de régime de fonctionnement.

Après avoir défini les objectifs de commande, le but est de traduire les exigences en un objectif mathématique bien défini. Vient ensuite l'étape de synthèse de régulateur. Deux catégories de difficultés auxquelles le concepteur de commande est confronté :

- Les difficultés de conception :
  - l'absence d'un critère unique qui réunit tous les objectifs de commande ;
  - la structure des systèmes complexes.

- Les difficultés numériques :
  - le temps de calcul, l'espace mémoire ... ;
  - la complexité de problème d'optimisation à résoudre.

Afin de résoudre cette problématique, certains scientifiques ont proposé des méthodes de simplification de modèle [19], d'autres se sont penchés sur la formulation de problème de commande en utilisant la commande multi-critères connue sous le nom de la théorie des jeux [31]. Certains d'autres se sont intéressés à la manipulation du modèle et la synthèse d'une loi de

commande adaptée [20].

## 2.3 Les avantages et les inconvénients de systèmes interconnectés

Systèmes interconnectés à grande échelle offrent plusieurs avantages et inconvénients comme suit :

**2.3.1 Les avantages** : systèmes interconnectés Les systèmes interconnectés à grande échelle offrent plusieurs avantages : Scalabilité : Ces systèmes peuvent être mis à l'échelle en reproduisant les composants existants sans augmenter significativement la complexité. Flexibilité : La construction de systèmes à partir de composants commerciaux disponibles dans le commerce (COTS) provenant de plusieurs fournisseurs permet une plus grande flexibilité pour s'adapter aux besoins changeants [74]. Exploitation de l'infrastructure existante : L'interconnexion des systèmes existants permet aux organisations de tirer parti de leurs investissements dans les systèmes et l'infrastructure hérités. Amélioration des performances : L'interconnexion des systèmes permet un traitement parallèle et distribué pour répondre à la demande croissante de stockage et de vitesse de requête qui dépasse les améliorations prédites par la loi de Moore. Analyse des performances et stabilisation par rétroaction distribuée : Les systèmes interconnectés à grande échelle peuvent être stabilisés en utilisant un contrôle par rétroaction distribué, ce qui améliore les performances et la fiabilité [80]. Systèmes de contrôle décentralisés : Ces schémas permettent de décomposer les systèmes à grande échelle en sous-systèmes plus petits, rendant le contrôle plus efficace et plus robuste contre les pannes. Ces avantages rendent les systèmes interconnectés à grande échelle cruciaux pour de nombreuses applications modernes [50].

**2.3.2 Les inconvénients** : Voici les principaux inconvénients des systèmes à grande échelle hautement interconnectés :

- Les risques de sécurité et de confidentialité sont des problèmes courants qui découlent d'une interconnectivité non contrôlée. Les dommages peuvent circuler à travers les systèmes interconnectés et provoquer des effets en cascade loin du problème initial. Il existe un taux de défaillance inacceptable dans le développement des systèmes à grande échelle, beaucoup con-

naissant des dépassements de coûts significatifs, un manque de fonctionnalités souhaitées, ou étant annulés purement et simplement.

- Le nombre important de dispositifs interconnectés et le grand nombre de connexions entre eux pourraient dépasser de loin le nombre d'appareils informatiques et de communication plus conventionnels, exacerbant les problèmes des systèmes à grande échelle.

- À mesure que les systèmes intègrent davantage de composants et servent un nombre croissant d'utilisateurs, les défis pour atteindre la scalabilité deviennent plus sévères. Les paramètres de performance ne peuvent souvent pas être étendus pour maintenir une réactivité adéquate à mesure que le nombre d'utilisateurs augmente.

En résumé, bien que les systèmes à grande échelle interconnectés offrent de nombreux avantages, leur complexité, leur échelle et leur interconnectivité présentent des défis significatifs en termes de sécurité, de fiabilité, de scalabilité et de test, difficiles à surmonter avec les méthodes actuelles. Des recherches fondamentales sont nécessaires pour développer une meilleure compréhension scientifique et des méthodologies d'ingénierie pour la construction de tels systèmes [42].

## 2.4 Structures des systèmes interconnectés

Afin de mieux présenter le modèle étudié, cette section s'intéresse à la représentation d'état d'un système de grande dimension interconnecté. Trois types de représentation sont possibles. La première est une représentation non structurée dite compacte dont sa décomposition donne résultat aux deux autres modèles : le modèle orienté entrée/sortie et le modèle orienté interconnexion [26]. Les structures de ces trois modèles sont présentées dans la figure 2.1:

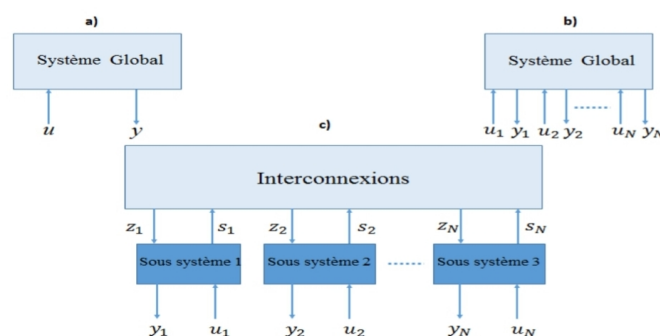


Figure 2.1: Structures des systèmes interconnectés : a) Modèle non structuré b) Modèle orienté Entrée/Sortie c) Modèle interconnecté [26].

**2.4.1 Modèle non structuré** : Le modèle non structuré est considéré comme étant de grande dimension lorsque le nombre d'entrées, de sorties et d'états est élevé, rendant ainsi son analyse et son étude impraticables. Bien que cette structure soit couramment utilisée dans la théorie des systèmes multivariables, elle est souvent considérée comme moins pertinente pour les systèmes de grande dimension, car elle ne fournit pas d'informations significatives sur les sous-systèmes qui le composent. Lorsqu'un système est de grande dimension, il peut devenir complexe et difficile à modéliser de manière efficace en raison du grand nombre de variables impliquées. Dans de tels cas, il peut être plus judicieux d'adopter des approches de modélisation plus structurées ou de réduire la dimension du système en identifiant les sous-systèmes clés ou en utilisant des techniques de réduction de modèle pour simplifier l'analyse et la conception. Il est important de prendre en compte la nature spécifique du système et les objectifs de modélisation pour choisir la meilleure approche, en tenant compte des limitations et des défis associés à la modélisation de systèmes de grande dimension [26].

**2.4.2 Structure orientée Entrée/Sortie** :

Dans le cas des systèmes multi-agents, les vecteurs d'entrées/sorties sont décomposés en sous-vecteurs  $\left( u^T = \begin{bmatrix} u_1^T & \dots & u_N^T \end{bmatrix} \text{ et } y^T(t) = \begin{bmatrix} y_1^T & \dots & y_N^T \end{bmatrix} \right)$  alors que le système est représenté par une structure compacte. Dans ce cas de figure, le centre de contrôle décentralisé génère la commande  $u_i$  et accède aux mesures de sortie  $y_i$ . Le modèle décrit ci-dessous rend les contraintes structurelles du contrôle décentralisé accessibles [26].

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax(t) + \sum_{i=1}^N B_i u_i(t) \\ y_i(t) &= C_i x(t) \end{cases}$$

**2.4.3 Modèle orienté interaction** : Le modèle orienté interaction est un paradigme de modélisation qui se concentre sur les interactions entre les différents éléments d'un système complexe, plutôt que sur les éléments eux-mêmes. Voici les principales caractéristiques de ce modèle :

Il représente les relations complexes entre les agents d'un même environnement, en se basant sur les interactions entre ces agents. Les interactions peuvent prendre différentes formes, comme un échange d'énergie ou de flux d'informations. Ce type de modèle est particulièrement utile pour la modélisation de phénomènes sociaux et la programmation de logiciels, où les in-

teractions entre les différents éléments jouent un rôle central. Les interactions sont représentées par des signaux à travers lesquels les sous-systèmes communiquent et s'influencent mutuellement. En résumé, le modèle orienté interaction met l'accent sur la modélisation des relations dynamiques entre les composants d'un système complexe, plutôt que sur les composants eux-mêmes, ce qui en fait un outil particulièrement adapté pour étudier les phénomènes sociaux et la conception de logiciels [51].

## 2.5 Les structures des systèmes à grande échelle

Les systèmes à grande échelle peuvent être divisés en deux structures fondamentales : la structure décentralisée et la structure des systèmes de contrôle distribué. La structure décentralisée implique une répartition du pouvoir de décision, offrant flexibilité et résistance aux pannes. En revanche, la structure des systèmes de contrôle distribué coordonne les décisions locales pour assurer la cohérence globale du système. Ces deux structures sont essentielles pour gérer des systèmes complexes de manière efficace et adaptative [16].

**2.5.1 La structures décentralisé** : Depuis plus de trois décennies, le concept de contrôle à structure décentralisée a gagné en popularité . Cette méthodologie innovante a prouvé son efficacité dans la résolution des défis posés par la dimensionnalité. Les structures de contrôle décentralisées sont devenues populaires pour gérer efficacement les systèmes à grande échelle en se concentrant sur les interconnexions entre les sous-systèmes, ce qui améliore l'efficacité computationnelle. Cette approche aborde des défis tels que la dimensionnalité et l'incertitude en mettant l'accent sur les états locaux des sous-systèmes pour la formulation des lois de contrôle. Pour résumé Le contrôle décentralisé des systèmes à grande échelle se concentre sur les interconnexions entre les sous-systèmes pour une gestion efficace.

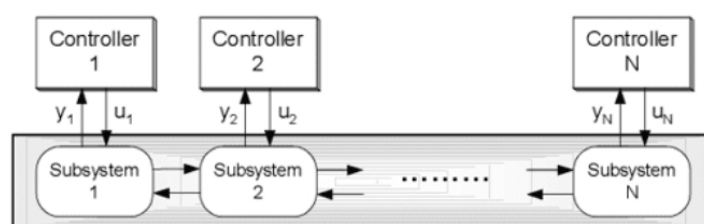


Figure 2.2: Architecture de la structure décentralisée [34]

**2.5.2 La structures centralisé** : La centralisation de l'autorité signifie que le pouvoir de la planification et de la prise de décision est exclusivement entre les mains de la haute direction. Il fait allusion à la concentration de tous les pouvoirs au niveau du sommet. En automatique, la plus part des approches se basent sur un modèle de contrôle centralisé où un composant est désigné comme contrôleur et est responsable de la gestion de l'exécution d'autres composants. Dans la majeure partie des approches employées en automatique, l'ensemble des informations issues des capteurs et des commandes générées vers les actionneurs est centralisé dans une structure de contrôle unique. L'ensemble du traitement et du stockage des données est assuré par un seul dispositif ou système central. Les avantages de ce type de structure comprennent une gestion efficace, une simplicité de gestion et une rentabilité accrue en raison de la nécessité de moins de matériel. Cependant, les inconvénients comprennent la dépendance à un seul point de défaillance et les risques de sécurité associés à la centralisation des données [64]

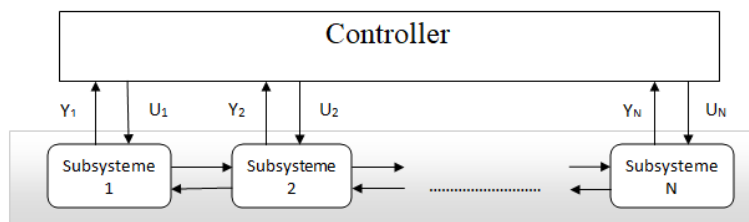


Figure 2.3: Architecture de la structure centralisée

**2.5.3 La Structure distribué** : Les systèmes de contrôle distribué répartissent les fonctions de contrôle sur plusieurs appareils, ce qui améliore l'efficacité et la fiabilité dans les systèmes complexes. Cette structure permet une évolutivité et des modifications faciles, ce qui en fait une solution idéale pour les systèmes adaptables. Le contrôle décentralisé, courant dans les grands systèmes, alloue des contrôleurs locaux indépendants, offrant ainsi flexibilité et tolérance aux pannes sans affecter les autres contrôleurs. Dans le contrôle distribué, plusieurs agents communiquent pour atteindre des objectifs communs, chacun disposant de son propre contrôleur et de capacités de prise de décision basées sur des données locales et des interactions avec les agents voisins. Le contrôle décentralisé est la structure la plus courante pour les systèmes à grande échelle, car il offre de la flexibilité en allouant des contrôleurs lo-

caux indépendants (CL). Cela signifie que si un CL doit être modifié ou redessiné en raison d'une panne ou d'un défaut, il n'est pas nécessaire de redessiner les autres CL. Le contrôle distribué implique plusieurs agents qui communiquent entre eux pour atteindre un objectif commun [35]. .

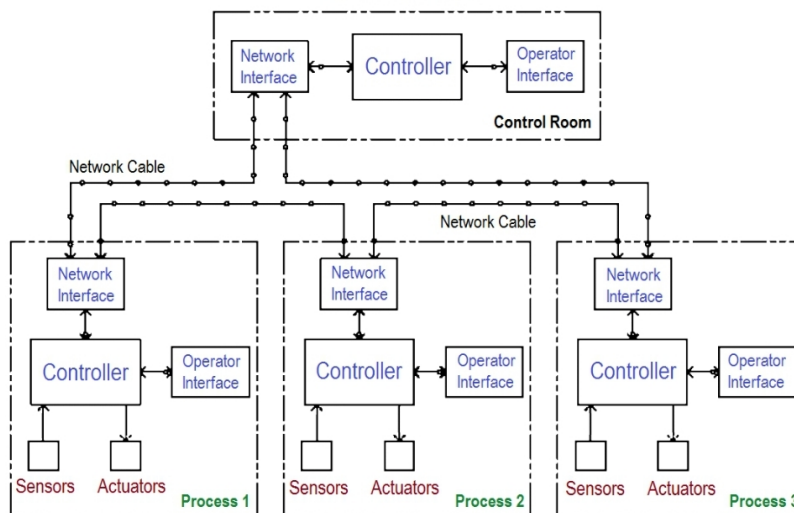


Figure 2.4: Architecture des systèmes de contrôle distribué [78]

## 2.6 Modélisation des Système a grand Echelle

Ces systèmes sont étudiés dans le domaine de recherche interdisciplinaire de la théorie des réseaux et du contrôle, et deviennent de plus en plus importants dans diverses applications industrielles. Dans cette section, nous présentons la modélisation d'un système à grande échelle comme un système de données multi-échantillonnées et modélisons le délai induit par le réseau et la limitation de la bande passante dans une telle architecture

**2.6.1 Modélisation des SGE décentralisée** : La modélisation décentralisée des systèmes de grande dimension implique la décomposition en sous-systèmes interconnectés. Cette approche permet la synthèse de lois de commande locales adaptées à chaque sous-système, favorisant la stabilité et l'efficacité du contrôle. Des méthodes d'identification décentralisée ont été développées pour ces systèmes, offrant une approche efficace pour les systèmes de grande taille. La décentralisation optimale, basée sur des observateurs locaux et des interactions entre sous-systèmes, améliore la stabilité numérique et la performance globale du système.

**2.6.1.1 Les modèles interconnectés découplés par les sorties** : Un système dynamique découplé par les sorties, est un système dont les équations dy-namiques sont couplés mais dont les observations sont strictement locales. Il est représenté par:

$$\dot{x}_i(t) = A_{ii}x_i(t) + B_iu(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N A_{ij}x_j(t) \quad (1.6a)$$

$$y_i(t) = C_i x_i(t), i \in \{1 \dots N\} \quad (1.6 b)$$

avec :  $A_{ii} \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$ ,  $B_i \in \mathbb{R}^{n_i \times q_i}$ ,  $C_i \in \mathbb{R}^{m_i \times n_i}$  et les vecteurs  $x_i \in \mathbb{R}^{n_i}$  et  $y_i \in \mathbb{R}^{m_i}$ . Le système (1.6) est dit singulière pour au moins un  $i \in \{1 \dots N\}$ . Dans le cas ou tous les sous-systèmes sont non singuliers on prendra  $E_i = I_{n_i}$  et on aura :

$$\dot{x}_i(t) = A_{ii}x_i(t) + B_iu(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N A_{ij}x_j(t) \quad (1.7a)$$

$$y_i(t) = C_i x_i(t), i \in \{1 \dots N\} \quad (1.7b)$$

Les systèmes physiques ayant un centre d'observation commun (figure 2.5). [12].

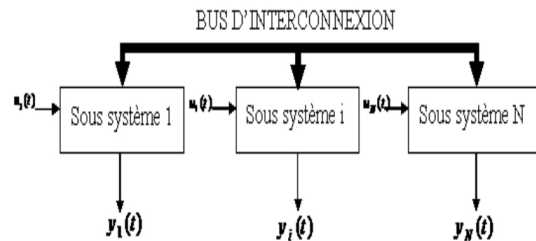


Figure 2.5: Structure décentralisée naturelle d'un système interconnecté découplé par les sorties [49].

$$\text{avec } \tilde{x} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \vdots \\ \tilde{x}_N \end{bmatrix} = S^{-1}x, y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \mathcal{B}_1 \\ \mathcal{B}_2 \\ \vdots \\ \mathcal{B}_N \end{bmatrix} = S^{-1}B \text{ et } C = CS.$$

**2.6.2 Systèmes à grande échelle à données échantillonnées en temps continu** : Les systèmes à grande échelle échantillonnés en temps continu (SGE) sont modélisés comme des systèmes en temps continu, où les capteurs, les actionneurs et les contrôleurs

sont interconnectés par des réseaux de communication divisés en sous-systèmes. Le système fonctionne en continu dans le temps, et des modèles à grande échelle en temps continu sont utilisés pour représenter des systèmes où l'état d'un système change continuellement au fil du temps. Ces modèles sont souvent représentés par un ensemble d'équations aux dérivées partielles couplées ou d'équations différentielles ordinaires. Dans le contexte des SGE, un SGE continu linéaire invariant dans le temps composé de  $N$  sous-systèmes interconnectés (SSs) est présenté, où la représentation espace d'état du  $i$ ème SS est formulée comme suit. Les modèles dynamiques en temps continu (CTMs) sont utilisés pour modéliser des systèmes où l'état d'un système change continuellement au fil du temps, et ils fournissent non seulement les mêmes informations que les modèles en temps discret mais aussi des paramètres indépendants de la longueur des intervalles de temps d'une étude donnée. Les CTMs surmontent les inconvénients pratiques et les limitations des modèles en temps discret, mais leur mise en œuvre est mathématiquement plus complexe car ils nécessitent le calcul différentiel. Cependant, des packages logiciels récents comme le package R `ctsem` ont facilité l'application d'une large gamme de CTMs. La représentation de l'espace d'état du  $i$ -ème SS est formulée comme suit [43] [11].

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_{ii}x_i(t) + B_{ii}u_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N A_{ij}x_j(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N B_{ij}u_j(t) \\ y_i(t) = C_{ii}x_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N C_{ij}x_j(t) \end{cases}$$

Où  $x_i(t) \in \mathbb{R}^{n_{xi}}$ ,  $u_i(t) \in \mathbb{R}^{n_{ui}}$  et  $y_i(t) \in \mathbb{R}^{n_{yi}}$  représentent respectivement l'état, l'entrée et la sortie du  $i$ ème SS. De plus,  $A_{ii}$ ,  $B_{ii}$  et  $C_{ii}$  indiquent respectivement les matrices système, d'entrée et de sortie du SSi. En outre,  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$  et  $C_{ij}$  désignent les matrices d'interconnexion des systèmes, des entrées et des sorties, respectivement.

**2.6.3 Modélisation des Système centralisée** : Si nous rassemblons tous les SSs et les représentons dans un système global, ce système serait représenté par le modèle linéaire espace-état global (SGE) familier et est décrit comme suit [58] [53]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

Pour tous les suivants :  $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_{N-1}(t) \ x_N(t)]^T$ ,  $u(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ \dots \ u_{N-1}(t) \ u_N(t)]^T$ , et  $y(t) = [y_1(t) \ y_2(t) \ \dots \ y_{N-1}(t) \ y_N(t)]^T$ . et le SGE composé de  $N$  SS interconnecter

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1(N-1)} & A_{1(N)} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2(N-1)} & A_{2(N)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{(N-1)1} & A_{(N-1)2} & \dots & A_{(N-1)(N-1)} & A_{(N-1)(N)} \\ A_{(N)1} & A_{(N)2} & \dots & A_{(N)(N-1)} & A_{(N)(N)} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1(N-1)} & B_{1(N)} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2(N-1)} & B_{2(N)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{(N-1)1} & B_{(N-1)2} & \dots & B_{(N-1)(N-1)} & B_{(N-1)(N)} \\ B_{(N)1} & B_{(N)2} & \dots & B_{(N)(N-1)} & B_{(N)(N)} \end{bmatrix}.$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1(N-1)} & C_{1(N)} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2(N-1)} & C_{2(N)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{(N-1)1} & C_{(N-1)2} & \dots & C_{(N-1)(N-1)} & C_{(N-1)(N)} \\ C_{(N)1} & C_{(N)2} & \dots & C_{(N)(N-1)} & C_{(N)(N)} \end{bmatrix}.$$

L'analyse et le contrôle des systèmes linéaires à commutation continue (SGEs) ont été largement étudiés, avec diverses techniques développées pour faire face aux défis posés par les retards temporels induits par le réseau et les pertes de paquets. Le contrôle par rétroaction d'état utilise l'état complet du système pour déterminer l'entrée de contrôle, tandis que le contrôle par rétroaction de sortie repose uniquement sur la sortie du système. Le contrôle déclenché par événement envoie des signaux de contrôle uniquement lorsque des événements déclencheurs spécifiques se produisent, tels qu'un changement dans l'état du système. Le contrôle dépendant du retard prend en compte les effets des retards temporels et les compense en utilisant des informations sur la taille et la variation du retard, tandis que le contrôle indépendant du retard suppose un retard constant qui ne varie pas dans le temps. Le contrôle prédictif basé sur le modèle utilise un modèle du réseau pour prédire le comportement futur du système et adapter les entrées de contrôle en conséquence. Ces techniques visent à améliorer les performances et la fiabilité des SGEs en temps continu face aux défis induits par le réseau [25] [17] [65].

## 2.7 Commande des système a grand Échelle

La commande centralisée et la commande décentralisée sont deux approches différentes pour la gestion et le contrôle des systèmes complexes. Dans une commande centralisée, il y a un seul contrôleur central qui gère l'ensemble du système. Cela permet un meilleur contrôle et

une meilleure coordination, mais peut être plus difficile à mettre en œuvre pour des systèmes de grande taille ou géographiquement dispersés, en raison de la complexité de la transmission des informations vers le contrôleur central. À l'inverse, dans une commande décentralisée, le système est divisé en sous-systèmes, chacun avec son propre contrôleur local. Cela permet une plus grande flexibilité et une meilleure adaptabilité, mais peut rendre la coordination plus difficile entre les différents sous-systèmes. Le choix entre une approche centralisée ou décentralisée dépend des objectifs, de la taille et de la complexité du système à contrôler. Une approche hybride combinant les deux peut également être envisagée pour tirer parti des avantages de chaque méthode. En résumé, la commande centralisée offre un meilleur contrôle global mais peut être plus complexe à mettre en œuvre, tandis que la commande décentralisée est plus flexible mais nécessite une coordination accrue entre les sous-systèmes [62] [28]. De nombreuses méthodes de conception de lois de commande centralisées ont été élaborées pour les systèmes linéaires depuis des décennies. Pour des raisons numériques et/ou de conception, les approches et outils classiques de la résolution de problème de commande ne permettent pas de résoudre un problème de commande assez complexe. La transmission d'informations contenant un grand nombre de mesures d'entrées et de sorties vers un seul contrôleur est une tâche très difficile surtout pour les systèmes délocalisés géographiquement. Des chercheurs comme Siljak, Bernusseau et Claveau ont conclu que la solution réside dans la décomposition de problème de commande sur le niveaux conceptuels afin de régler les obstacles liés à la modélisation et aux objectifs de commande, et sur le niveau numérique pour simplifier la synthèse des lois de commande. est proposé [26].

**2.7.1 Décomposition du système de commande** : Le système de commande est décomposé selon une approche verticale et une approche horizontale, avec une méthode mixte combinant les deux

**2.7.1.1 Décomposition verticale** : La décomposition verticale est une méthode de contrôle hiérarchique utilisée dans les systèmes de commande de procédés industriels. Elle se compose de quatre niveaux qui communiquent entre eux:

- Le niveau Régulation reçoit les mesures du procédé et lui envoie les signaux de commande.
- Le niveau Optimisation envoie des consignes d'optimisation des performances au niveau Régulation et reçoit les paramètres du niveau Adaptation.
- Le niveau Adaptation ajuste les paramètres des modèles de référence ou du régulateur.

•Le niveau Organisation est l'organe de décision qui choisit le mode de fonctionnement et les algorithmes de commande. L'opérateur intervient à ce niveau pour valider certaines décisions. [8]. .

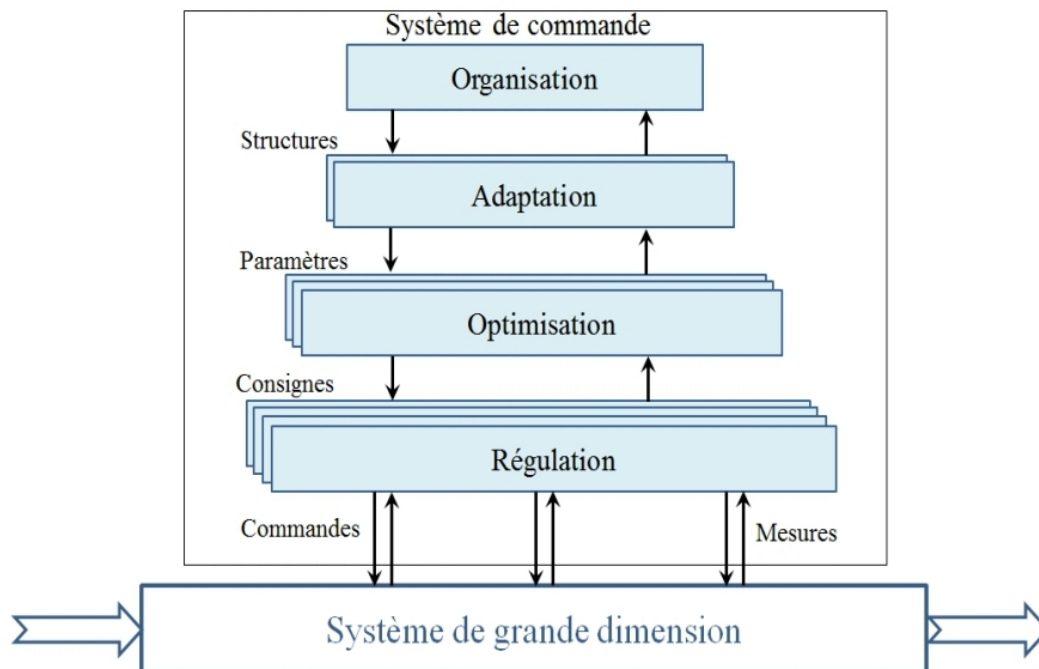


Figure 2.6: Décomposition verticale d'un système de commande [26]

**2.7.1.2 Décomposition horizontale** : La décomposition horizontale, également connue sous le nom de décomposition spatiale, est une approche de conception des systèmes de commande qui associe à chaque sous-système un problème de commande spécifique. Dans ce schéma, un contrôleur local est dédié à chaque sous-système, permettant ainsi une gestion plus fine et spécialisée des différentes parties du système. Pour atteindre un critère de commande global satisfaisant, les contrôleurs locaux des sous-systèmes doivent échanger des informations entre eux via des interconnexions. Cette communication entre les différents niveaux permet de coordonner les actions des contrôleurs locaux pour garantir le bon fonctionnement et la performance globale du système. Cette approche de décomposition horizontale offre une flexibilité et une adaptabilité accrues en permettant une gestion plus détaillée et spécifique de chaque sous-système, tout en assurant une coordination efficace pour atteindre les objectifs globaux de commande [67]. .

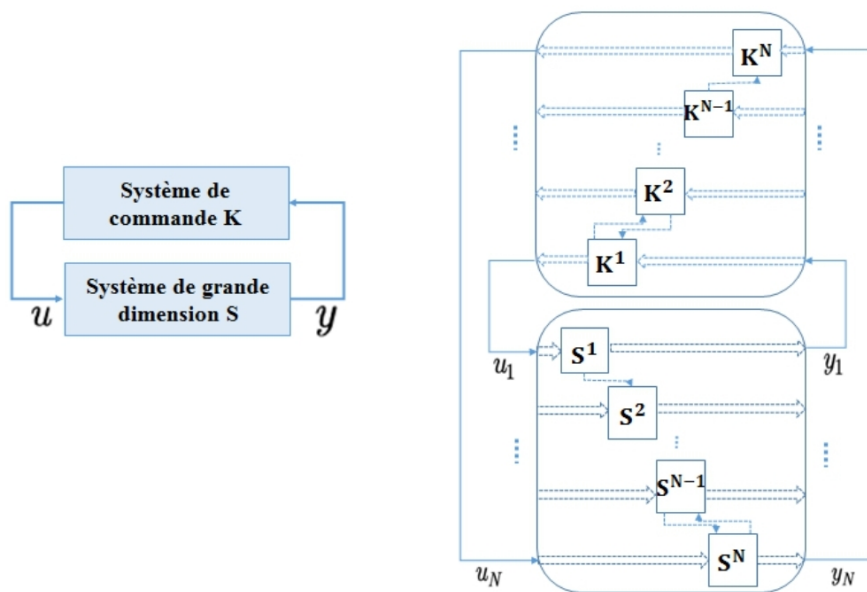


Figure 2.7: Décomposition horizontale d'un système de commande de grande dimension [26]

**2.7.1.3 Décomposition mixte** : La décomposition mixte combine les approches verticale et horizontale pour produire une stratégie de décomposition pyramidale à deux niveaux. Cette méthode coordonne les régulateurs locaux issus de la décomposition horizontale par un coordinateur [48].



Figure 2.8: Décomposition mixte d'un système de commande [26]

**2.7.2 Modélisation du système de commande** : La modélisation d'un système de commande est essentielle pour concevoir une loi de commande efficace. Elle consiste à

représenter mathématiquement le procédé à commander, les perturbations et incertitudes, afin de prédire son comportement. Le modèle doit être un compromis entre complexité et précision, permettant une compréhension qualitative et quantitative du système. Il peut prendre différentes formes: équations différentielles, fonction de transfert, représentation d'état. Les étapes clés sont:

- Identifier les entrées (commande, perturbations), sorties et variables d'état du système
- Écrire les équations décrivant la dynamique du procédé à partir des lois de la physique
- Linéariser le modèle si nécessaire autour d'un point de fonctionnement
- Valider le modèle par identification paramétrique et simulations
- Une fois le modèle établi, il sert de base pour synthétiser la loi de commande (PID, commande robuste, adaptative...) assurant les performances souhaitées en stabilité, précision et rejet des perturbations [54] [7].

## 2.8 Problématique de stabilité des systèmes interconnectés

La stabilité des systèmes interconnectés est un problème fondamental en théorie du contrôle. Dans le cas de la commande décentralisée, il est nécessaire que le système global en boucle fermée soit stable, mais aussi que les sous-systèmes en boucle fermée soient autonomes. De plus, la stabilité est souhaitable même en présence de perturbations au niveau des interconnexions entre les sous-systèmes [70]. Ce type de stabilité robuste est appelé stabilité connective. L'étude de la stabilité connective consiste à assurer la stabilité du système global, ce qui assure par conséquent la stabilité de tous les sous-systèmes. Une approche proposée par Siljak est d'utiliser un vecteur de Lyapunov dont chaque composante est une fonction scalaire associée à un sous-système. Une analyse conjointe de chaque fonction scalaire du vecteur de Lyapunov permet alors de déduire la stabilité du système global. La stabilité des systèmes interconnectés est cruciale pour leur fonctionnement et leur survie. Les modifications au sein du réseau ont des effets d'entraînement sur l'ensemble [79] [72].

## 2.9 Techniques de commande des systèmes à grand échelle

La commande des systèmes à grand échelle est un domaine important dans l'automatique qui vise à contrôler les systèmes pour atteindre des objectifs spécifiques. L'opérateur utilise

l'entrée de commande  $u(t)$  pour influencer la sortie du système  $y(t)$ . Les types de commande couramment utilisés sont :

- Commande ouverte : dans ce cas, l'opérateur a accès direct à l'entrée de commande et peut la modifier en fonction des besoins.
- Commande fermée : l'opérateur n'a pas accès direct à l'entrée de commande, mais peut ajuster les paramètres du système pour obtenir le comportement souhaité.
- Commande prédictive : l'opérateur utilise des modèles du système pour prévoir la sortie attendue et ajuster l'entrée de commande en conséquence.
- Commande adaptative : le système est conçu pour s'adapter aux changements dans l'environnement ou dans les besoins de l'opérateur.

**2.9.1 Commande rétroactive** : La commande rétroactive sont des systèmes de contrôle essentiels en technologie, utilisent la rétroaction pour ajuster les actions. deux types de commande rétroactive sont la commande par retour d'état, et la commande par retour de sortie. Ces méthodes comparent les signaux à contrôler à des références pour ajuster les actions correctives.

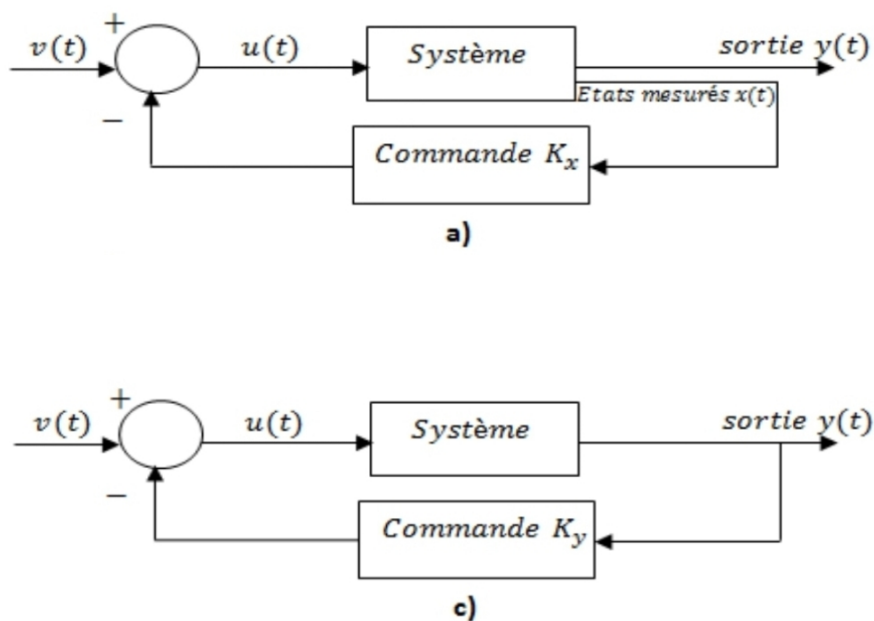


Figure 2.9: Les types de commande rétroactive [27]

**2.9.2 Commande sous réseau de communication** : Les systèmes commandés par réseaux de communication interconnectés présentent plusieurs défis pour la commande:

- La connaissance du système par le contrôleur n'est que partielle et instantanée, car les données reçues sont échantillonnées et quantifiées.
- Les réseaux induisent des retards de transmission variables et des pertes de paquets, néfastes pour la commande.
- Seul un nœud (capteur, actionneur ou calculateur) peut transmettre à un instant donné sur le réseau.
- La discrétisation des données par l'échantillonnage et la quantification peut être amplifiée par le réseau.

Pour relever ces défis, il faut développer des lois de commande spécifiques et s'assurer des conditions garantissant performances et robustesse. Une approche est d'exploiter la taille des paquets transmis pour envoyer des informations supplémentaires au contrôleur [18].

Les réseaux interconnectés utilisent souvent le protocole PI, indépendant des technologies locales comme Ethernet. Cela permet d'interconnecter de nombreux réseaux, mais nécessite des équipements comme des routeurs pour gérer l'adressage PI [10].

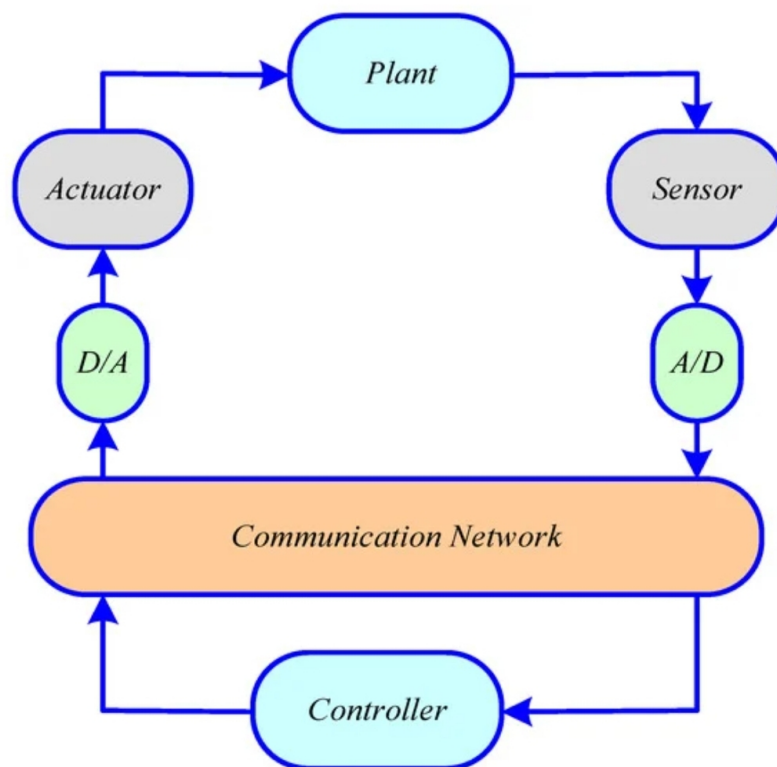


Figure 2.10: Une représentation en bloc simple d'un système de contrôle en réseau (SCR) [9].

**2.9.2.1 Modèle de retard induit par le réseau dans le SGE** : Le retard induit par le réseau est un facteur important à prendre en compte dans la modélisation et le contrôle des systèmes à grande échelle (SGE). Il fait référence au délai qui se produit lors de la transmission de données sur un réseau de communication ou un protocole, ce qui peut entraîner une instabilité et une dégradation des performances du système de contrôle. Il existe deux principaux types de retards temporels :

- Le retard capteur-vers-contrôleur : l'intervalle entre l'échantillonnage du signal par les capteurs et sa réception par le contrôleur. Le retard contrôleur-vers-actionneur : le temps entre la génération du signal de contrôle et son accessibilité à l'actionneur.

Ces retards sont causés par divers facteurs tels que le retard d'accès au médium, le retard de transport, le retard de congestion et d'autres facteurs liés au réseau. Pour tenir compte du retard induit par le réseau dans le système de contrôle, plusieurs approches ont été proposées, notamment :

- Les techniques de discrétisation pour le retard continu. Le contrôle déclenché par événement. Le contrôle basé sur les paquets.

Ces méthodes visent à atténuer les effets négatifs des retards induits par le réseau et à garantir la stabilité et les performances du système de contrôle SGE [21] [47] [60]. Les résultats de recherche fournissent un aperçu complet des défis et des approches de modélisation pour les systèmes de contrôle en réseau (SCR) avec des retards induits par le réseau. Les points clés sont les suivants :

\* Les retards induits par le réseau dans les SCR peuvent être constants, variables dans le temps, voire aléatoires, en fonction des caractéristiques du réseau telles que la charge, la topologie et les schémas de routage.

- Il existe deux approches principales pour modéliser les incertitudes induites par le réseau : limiter le retard maximal autorisé ou utiliser une modélisation stochastique avec des distributions de probabilité de retard connues.

- Les pertes de paquets dues à des erreurs de transmission ou à des débordements de tampon sont un autre problème significatif dans les SCR qui doit être pris en compte, avec des stratégies telles que le maintien d'une entrée nulle ou le maintien de l'entrée.

- L'exemple présenté et résumé montre comment le retard induit par le réseau peut être incorporé dans le modèle d'état-espace continu d'un SCR à grande échelle sous la forme d'un terme de retard. Cela permet l'utilisation de techniques de contrôle telles que le contrôle prédictif

pour atténuer l'impact du retard et améliorer la stabilité et les performances. En résumé, les résultats de la recherche montrent qu'il est crucial de modéliser et de tenir compte efficacement des retards induits par le réseau et des pertes de paquets pour la stabilité et les performances des SCR. [46] [56] [45].

**2.9.2.1.1 Approche du système avec retard d'entrée** : La principale approche pour traiter les systèmes à retard d'entrée dans les SLS (Systèmes à Logique Souple) consiste à modéliser le système comme ayant un retard variable dans le temps. Ce retard variable comprend le retard du capteur au contrôleur, le retard du contrôleur à l'actionneur, le retard de calcul, et les pertes de paquets représentées comme un retard. L'objectif clé de cette approche est de déterminer la borne supérieure maximale autorisée (BSMA) du retard de transmission qui garantit la stabilité et les bonnes performances des SLS. La détermination de cette BSMA est un facteur important pour les applications pratiques. La boucle fermée des SCR (Systèmes à Réseau de Commande) a donc été décrite par un système à retard variable dans le temps avec retard d'entrée. Les travaux dans cette approche visent à développer des méthodes pour analyser la stabilité et les performances de ces systèmes à retard variable [69] [55] [14].

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_{ii}x_i(t) + B_{ii}K_{ii}x_i(t - \tau(t)) \\ x(t) = \phi(t), \quad \tau(t) \in [-\tau_M, -\tau_m) \end{cases}$$

avec:

$$\begin{cases} 0 \leq \tau_m \leq \tau(t) \leq \tau_M \text{ or } (\tau_M + (\eta + 1)h \text{ Si des paquets sont perdus}) \\ \tau_m > 0, \tau_M > 0, \eta \geq 0 \end{cases}$$

où  $\tau_m$ ,  $\tau_M$ ,  $\eta$  sont respectivement la valeur supérieure, la valeur inférieure et le nombre de pertes de paquets. Il est important d'étudier les retards induits par le réseau dans les modèles SGE car ces retards peuvent dégrader les performances du système et même le déstabiliser. Des techniques de simulation et de modélisation ont été utilisées pour comprendre et estimer les effets des retards induits par le réseau sur les performances du système.

**2.9.2.2 Perte de paquets** : La perte de paquets est un autre problème critique pour les SCR (Systèmes de Commande en Réseau), qui survient en cas de collisions de paquets, de débordements de tampon et d'autres congestions réseau. Manifestement, ces phénomènes de perte de paquets entraînent une dégradation des performances des systèmes de contrôle voire les rendent instables dans certains cas. Pour faire face à ce problème, de nombreuses approches

ont été proposées qui envisagent différentes modélisations des SCR avec perte de paquets. Certains auteurs ont exploré les processus de perte de paquets de type Markov, en modélisant la perte de paquets comme une chaîne de Markov à temps discret avec une matrice de probabilité de transition donnée. D'autres ont modélisé les systèmes avec abandon de paquets, conditionnant les systèmes de contrôle en fonction de la réussite ou non de la transmission des paquets, et ont également modélisé les systèmes avec perte de paquets comme des systèmes dynamiques asynchrones.

Toutes ces méthodes de modélisation des phénomènes de perte de paquets peuvent être classées en deux catégories. La perte de paquets est modélisée comme un délai dans la transmission car si un paquet est perdu, le système récepteur attend un temps d'échantillonnage (le temps nécessaire pour que le système envoie le paquet suivant). Si ce paquet est à nouveau perdu, le récepteur attend un temps multiple en fonction du nombre de paquets perdus, et c'est pourquoi nous pouvons donner le modèle mathématique suivant :

$$P_r(t) = P_t(t - (d - 1)h) \quad (2.8)$$

où  $P_r(t)$  désigne le paquet utilisé par le nœud récepteur,  $P_t(t)$  représente le paquet au nœud émetteur,  $td$  est un nombre entier représentant le nombre de paquets perdus, et  $h$  est le temps d'échantillonnage. L'autre catégorie peut être appelée stratégie de conservation dans laquelle les données du dernier instant sont conservées lorsque le paquet actuel est perdu pendant la transmission. Elles peuvent être exprimées comme suit:

$$P_r(t) = \alpha(t)P_t(t) + (1 - \alpha(t))P_t(t - (d - 1)h) \quad (2.9)$$

où  $\alpha(t)$  est une variable aléatoire distribuée binaire scalaire qui équivaut à 1 lorsque le paquet est transmis avec succès, alors qu'elle est égale à 0 .

**2.9.2.3 Limitation de la bande passante** : Tout réseau de communication dispose d'une bande passante limitée, qui représente le nombre de bits pouvant être transmis par seconde. Cette limitation de la bande passante dépend non seulement de la largeur de bande physique, mais aussi de l'efficacité de l'encodage des données en paquets, de l'efficacité du fonctionnement du réseau en termes de temps inter-frames (longs ou courts), et de la présence de collisions de messages qui peuvent gaspiller du temps réseau. Ces contraintes ont un impact

significatif sur le fonctionnement des systèmes à boucles fermées (SGEs).

À cet égard, les chercheurs ont déployé d'énormes efforts pour déterminer le débit binaire minimum nécessaire pour atteindre les objectifs de contrôle. Parmi ces recherches, il y a celle concernant le débit binaire minimum nécessaire pour stabiliser un système LTI (Linéaire à Temps Invariant). Le débit binaire moyen est une mesure de la fréquence à laquelle les informations de rétroaction sont nécessaires (dans les réseaux numériques) pour garantir que le système reste stable. La rétroaction intermittente implique la fermeture de la boucle ouverte pendant certaines périodes fixes ou variables, ce qui crée des situations opportunistes où le capteur envoie des rafales d'informations lorsque le réseau est disponible, ce qui réduit la charge sur le réseau. La rétroaction quantifiée est fournie dans l'implémentation du système numérique, et si le système en boucle ouverte est instable, alors seulement nous pouvons déterminer le débit binaire moyen minimum pour traiter les informations de rétroaction. Des recherches supplémentaires sur les canaux de rétroaction contraints par la communication établissent un lien entre la stabilisabilité et une inégalité liant les données.

## 2.10 Exemple des Systèmes d'ingénierie complexes

Les systèmes d'ingénierie complexes sont couramment utilisés dans l'industrie automobile pour gérer les processus de conception, de production et de maintenance des véhicules. Voici quelques exemples de systèmes complexes

**2.10.1 système de télécommunication** : Un système de télécommunication est un ensemble complexe et géographiquement distribué de sous-systèmes interconnectés permettant la transmission d'informations à distance. Il est composé principalement d'un émetteur, d'un canal de transmission et d'un récepteur. L'émetteur prend un signal de source (texte, image, vidéo, son, etc.), le met sous une forme adaptée au canal de transmission (modulation), puis l'envoie sur le canal. Le canal peut être un fil électrique, une fibre optique, une liaison hertzienne, un satellite, etc... Le récepteur reçoit le signal, le démodule pour retrouver le signal original, puis le transmet au destinataire. Les systèmes de télécommunication permettent aujourd'hui de transmettre toutes sortes d'informations sur de très longues distances de manière rapide et fiable grâce à la normalisation internationale des paramètres d'interconnexion [13].

**2.10.2 Automobile** : L'industrie automobile utilise des systèmes complexes avec une conception et une production distribuées à l'échelle mondiale. L'automatisation est essentielle, avec une utilisation importante de robots industriels. Dans les années 1970, des ordinateurs spécialisés appelés contrôleurs programmables industriels (CPI) ont remplacé les processus séquentiels, améliorant la complexité des produits. Les voitures modernes intègrent jusqu'à 40 micro-contrôleurs reliés à des capteurs et des actionneurs, gérant des fonctions telles que le contrôle du moteur, la traction, le climat, la transmission, la régulation de vitesse, etc., facilitées par des microprocesseurs avancés et des capteurs dotés de communication [29].

## 2.11 Différents systèmes réels à grande échelle

: Dans le domaine de l'automatisation industrielle, les systèmes de contrôle jouent un rôle essentiel en garantissant le bon fonctionnement sans faille et efficace de processus complexes. Ces systèmes de contrôle reposent sur diverses conditions telles que des réseaux de communication robustes et des protocoles fiables, assurant ainsi la transmission fluide des signaux et des informations critiques tout au long du processus. Toute défaillance dans cette opération peut avoir un impact significatif sur la stabilité et l'efficacité du système, soulignant ainsi la nature cruciale de ces protocoles. Par conséquent, il est impératif d'explorer certains de ces protocoles plus en détail. Au sein des systèmes industriels à grande échelle, plusieurs modèles de contrôle sont employés, chacun présentant des forces et des faiblesses distinctes. Ces modèles de contrôle constituent l'ossature de l'automatisation industrielle, permettant une performance optimisée et une gestion efficace des processus industriels complexes.

**2.11.1 Contrôle de surveillance et acquisition de données (SCADA)** : est un système composé d'éléments logiciels et matériels qui permet aux organisations industrielles de contrôler des processus industriels localement ou à distance, de surveiller, de collecter et de traiter des données en temps réel, et d'interagir directement avec des dispositifs tels que des capteurs, des vannes, des pompes, des moteurs, etc., à travers des logiciels d'interface homme-machine (HMI), et d'enregistrer des événements dans un fichier journal. Les systèmes SCADA sont cruciaux pour les organisations industrielles car ils contribuent à maintenir l'efficacité, à traiter les données pour des décisions plus intelligentes, et à communiquer les problèmes du système pour aider à réduire les temps d'arrêt. L'architecture de base

d'un système SCADA commence avec des automates programmables (CLP) ou des unités terminales distantes (RTU). Les CLP et les RTU sont des micro-ordinateurs qui communiquent avec divers objets tels que des machines d'usine, des HMI, des capteurs et des dispositifs finaux, puis routent les informations de ces objets vers des ordinateurs équipés de logiciels SCADA. Le logiciel SCADA traite, distribue et affiche les données, aidant ainsi les opérateurs et autres employés à analyser les données et à prendre des décisions importantes. Les systèmes SCADA sont largement utilisés dans diverses industries pour surveiller et contrôler des opérations à grande échelle, jouant un rôle essentiel dans la gestion de processus complexes et assurant le bon fonctionnement des infrastructures critiques. Parmi les principaux avantages des systèmes SCADA, on trouve le contrôle centralisé, les données en temps réel, l'amélioration de l'efficacité, la fiabilité accrue et l'accès à distance. Cependant, les systèmes SCADA présentent également des inconvénients tels que des coûts élevés d'installation et de maintenance, la vulnérabilité aux cyber-attaques et la complexité d'utilisation.

**2.11.1.1 Avantages de SCADA** : Grande capacité de stockage des données : Les systèmes SCADA disposent d'une capacité de stockage massive, permettant aux opérateurs de suivre et d'analyser de grandes quantités d'informations sur de longues périodes. Flexibilité : Ils peuvent contrôler des processus à grande échelle impliquant plusieurs sites et fonctionner sur de grandes distances ainsi que sur de petites distances [73].

**2.11.1.2 Inconvénients de SCADA** : Complexité : Ces systèmes peuvent être complexes et difficiles à utiliser, nécessitant une formation spécialisée et des connaissances pour être utilisés efficacement. Vulnérabilité aux cyber-attaques : Ils peuvent être vulnérables aux piratages et à d'autres formes de cybercriminalité, pouvant entraîner un accès non autorisé à des données sensibles et la capacité de contrôler ou de manipuler des processus industriels [73].

**2.11.2 Système de Contrôle Distribué** Un Système de Contrôle Distribué (SCD) est une plateforme informatisée utilisée dans les processus industriels pour gérer plusieurs boucles de contrôle de manière décentralisée. Contrairement aux systèmes centralisés, les SCD répartissent des contrôleurs autonomes à travers le système, augmentant ainsi la fiabilité et réduisant les coûts d'installation en plaçant les fonctions de contrôle près des installations de traitement. Ces systèmes utilisent un réseau de processeurs et des interfaces opérateur connectées via des réseaux propriétaires ou standardisés, minimisant le câblage sur le terrain et

améliorant la fiabilité grâce à des câblages redondants.

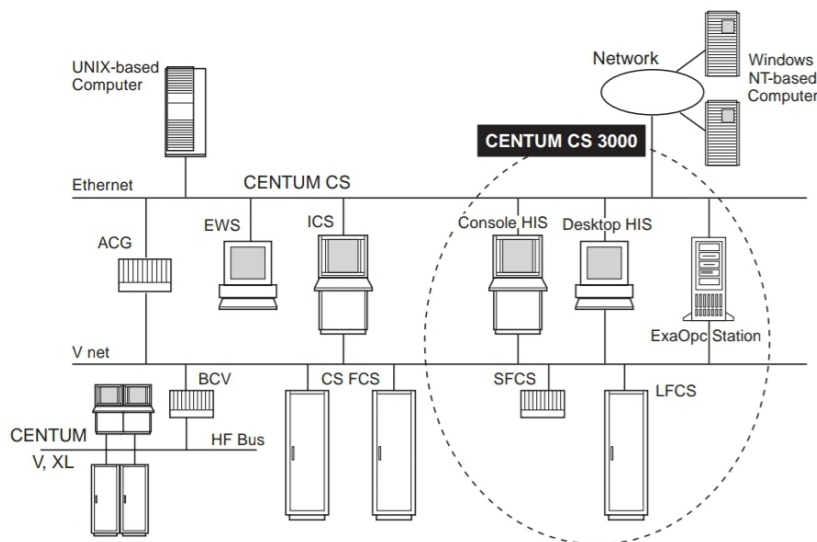


Figure 2.11: Configuration du système CENTUM CS 3000 [57]

**2.11.2.1 Avantages des SCD** Conception modulaire : Permet une expansion et une mise à niveau faciles, ce qui permet de répondre aux exigences changeantes du contrôle des processus, minimisant les coûts et les interruptions de production tout en assurant le fonctionnement continu des processus critiques. Surveillance centralisée : Permet aux opérateurs de détecter rapidement et de résoudre les problèmes du système, d'identifier les tendances et d'intégrer d'autres logiciels pour l'analyse des données en temps réel, améliorant ainsi l'efficacité et la fiabilité du système. Automatisation avancée : Permet une modélisation plus flexible des boucles de régulation, l'intégration de techniques de contrôle avancées, une augmentation du nombre de points de mesure et une exécution plus rapide des boucles de contrôle [2].

**2.11.2.2 Inconvénients des SCD** Coût élevé de mise en œuvre : Peut constituer un obstacle pour les petites et moyennes entreprises, nécessitant un matériel spécialisé, des logiciels et un personnel qualifié. Dépendance à un contrôle centralisé : Un point de défaillance unique peut arrêter toute une usine ou une ligne de production, présentant des risques pour la sécurité. La maintenance et la redondance sont cruciales pour minimiser les temps d'arrêt et les pertes de production. Manque de maîtrise du nouveau système : Étant considéré comme un système récent, une formation adéquate des ingénieurs et des utilisateurs est nécessaire [1].

## 2.12 Conclusion

D'après des recherches approfondies et des efforts assidus tout au long de ce chapitre, les SGE (systèmes à grande échelle) constituent un vaste domaine des systèmes de contrôle, donc nous avons essayé de présenter le modale interconnectés et les différentes structures réelles avec leurs avantages et inconvénients. Ensuite, nous nous sommes concentrés sur une partie très importante de cette thèse concernant la modélisation décentralisé insi que la Commande des système a Grand Echelle et. enfin, nous avons étudié la Problématique de stabilité des systèmes interconnectés et application du système interconnecter dans différents domaines avec leurs caractéristiques. En conclusion, nous tenons à dire que les systèmes de contrôle décentralisé émergent comme le choix le plus adapté et optimal pour la gestion des systèmes à grande échelle.

# Chapter 3

## Contrôle décentralisé déclenché par événement pour les systèmes à grande échelle en réseau

### 3.1 Introduction

Les systèmes à grande échelle, utilisés dans divers domaines pratiques tels que la fabrication, les écosystèmes, les réseaux de télécommunications, les systèmes électriques, la robotique, les réseaux de communication et les systèmes de transport, ont récemment suscité beaucoup d'attention. En général, un système à grande échelle se compose de plusieurs sous-systèmes avec des interconnexions évidentes, ce qui entraîne des problèmes tels que la non-linéarité, des défis supplémentaires, une grande dimensionnalité, des interconnexions fortes et des informations incertaines sur les connexions. Pour relever les défis posés par les systèmes à grande échelle, une approche logique consiste à décomposer le système global en plusieurs sous-systèmes ainsi que leurs interconnexions. Cela permet de contrôler l'ensemble du système par un groupe de contrôleurs indépendants plutôt qu'un seul contrôleur, une méthode communément appelée approche de contrôle décentralisé. [44].

Au cours des dernières décennies, le contrôle décentralisé a suscité une attention significative au sein des communautés de contrôle en tant qu'approche efficace pour la gestion des systèmes à grande échelle.

Parmi les différentes techniques décentralisées, la technique floue décentralisée, employant le modèle flou Takagi-Sugeno (T-S), s'avère efficace pour traiter le problème de non-linéarité au

sein des systèmes à grande échelle. Cela est réalisé en transformant la fonction non linéaire en une combinaison convexe sur un ensemble compact grâce à la modélisation floue T-S.

D'autre part, à mesure que les technologies de l'information et de l'informatique progressent rapidement, la communication basée sur les réseaux devient de plus en plus importante dans les systèmes de contrôle. Malheureusement, les imperfections induites par le réseau, telles que les erreurs de quantification, les pertes de paquets et les retards temporels, peuvent dégrader significativement les performances du système de contrôle en boucle fermée et peuvent même conduire à l'instabilité. Plusieurs travaux dans la littérature actuelle ont traité de tels problèmes.

De plus, dans de nombreuses mises en œuvre numériques de (SCRs), les ordinateurs sont souvent chargés d'effectuer des opérations de contrôle impliquant l'échantillonnage, la quantification, la transmission de la sortie de l'usine et le calcul de l'entrée de contrôle. La pratique traditionnelle suit un principe de contrôle déclenché par le temps, où les tâches de contrôle sont exécutées périodiquement. Cependant, cela peut entraîner des problèmes tels que des collisions, une congestion de canal ou des retards temporels accrus dans le réseau en raison de la bande passante de communication limitée. Récemment, il y a eu un intérêt croissant pour le contrôle déclenché par événement, visant à réduire les transmissions de données. Le principe sous-jacent du contrôle déclenché par événement consiste à décider si l'on doit transmettre des signaux de contrôle en fonction d'un seuil prédéterminé.

Récemment, le schéma MDE a été utilisé pour la synthèse de contrôle des systèmes flous en réseau T-S, en particulier pour les systèmes à grande échelle. Par exemple, dans [61] et [32], les auteurs ont introduit un design pour un contrôleur de compensation distribué parallèle déclenché par événement pour les systèmes flous T-S. Dans cette conception, les variables de prémisse du contrôleur sont déclenchées par le temps, ce qui résulte en une utilisation moins efficace de la bande passante réseau limitée.

De même, dans [40], une approche de synthèse pour le contrôle  $H_\infty$  déclenché par événement asynchrone (TE) a été proposée pour les systèmes flous T-S. Cette méthode intègre les valeurs échantillonnées des fonctions d'appartenance normalisées asynchrones des systèmes dans la conception du contrôleur. Récemment, dans [77], les auteurs ont étudié le problème de conception de contrôleur déclenché par événement décentralisé (TE) pour les grands systèmes non linéaires modélisés par des systèmes flous affines, lorsqu'un nouveau schéma de transmission déclenché par événement (TE) a été introduit pour diminuer la fréquence des mises à jour du

contrôleur et pour conserver la bande passante réseau limitée. Dans [75] les auteurs proposent une nouvelle approche pour synthétiser un contrôleur basé sur un observateur décentralisé pour un système non linéaire à grande échelle dans lequel les termes d'interconnexion sont exprimés sous forme non linéaire. Une nouvelle méthode pour synthétiser un contrôleur permettant de stabiliser le système à grande échelle non linéaire, représenté par un système flou Takagi-Sugeno (T-S) polynomial à grande échelle, a été proposée dans [76].

Motivé par les études susmentionnées, cet mémoire aborde le problème du contrôle déclenché par événement décentralisé pour les grands échelle systèmes sujets aux retards induits par le réseau. Chaque sous-système au sein du système à grande échelle examiné est représenté par un modèle linear, et la communication des informations entre eux se fait via un canal numérique. Notre approche proposée implique un contrôle déclenché par événement décentralisé, où chaque sous-système est capable de prendre des décisions de diffusion en utilisant localement les SCR lorsqu'un événement spécifié est déclenché. Nous proposerons un nouveau mécanisme de déclenchement d'événement (MDE) qui dicte quand la transmission des variables de prémisse et des états du système au contrôleur devrait avoir lieu. En sélectionnant une fonctionnelle de Lyapunov-Krasovskii (LKF) appropriée et en appliquant des lemmes de relaxation pertinents, nous présentons des conditions de conception supplémentaires relaxées basées sur des inégalités matricielles linéaires (LMI). Cela permet une relaxation maximale des retards induits par le réseau admissibles et des intervalles de libération de paquets.

Enfin, un exemple de simulation est fourni pour illustrer l'efficacité de la présente proposition.

**Notations 3.1** Dans la suite,  $*$  dans les matrices désigne les quantités transposées en blocs, et  $+$  dans les matrices désigne l'inverse de  $M$ -P. Pour une matrice  $M$  de dimension appropriée, on désigne  $\mathcal{H}(M) = M + M^T$ . Pour une matrice diagonal  $A = \text{diag}(a_1, a_2) = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \end{bmatrix}$ , un ensemble fini de  $r$  entiers positifs est désigné  $\mathcal{I}_r = \{1, \dots, r\}$ . Aussi,  $\forall j \in \mathcal{I}_7$ , les matrices d'entrées en blocs sont exprimées par  $e_j = \begin{bmatrix} 0_{n \times (j-1)n} & I_{n \times n} & 0_{n \times (7-j)n} \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{7n \times n}$ , par exemple:  $e_i^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ .

## 3.2 Préliminaires

Considérons un système à grande échelle composé d'un ensemble de  $N$  sous-systèmes interconnectés, décrits par leurs formes compactes en espace d'états, pour tous  $i \in \mathbb{I}_N = \{1, 2, \dots, N\} \in$

$\mathbb{N}^*$ , as [30, 36]:

$$\dot{x}_i(t) = A^i x_i(t) + B^i u_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \tilde{A}^{ij} x_j(t) \quad (3.1)$$

où  $x_i(t) \in \mathbb{R}^{n_i}$ ,  $u_i(t) \in \mathbb{R}^{m_i}$  sont respectivement le vecteur d'état, le vecteur de commande du  $i$ -ème sous-système,  $A^i \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$ ,  $B^i \in \mathbb{R}^{n_i \times m_i}$  et  $\tilde{A}^{ij} \in \mathbb{R}^{n_i \times n_j}$  sont des matrices constantes connues définissant les sommets des  $N$  sous-systèmes interconnectés.

Dans ce travail, pour stabiliser la classe de systèmes à grande échelle (3.1), Nous adoptons dans ce travail une stratégie de contrôle décentralisé via un réseau de communication, où chaque sous-système  $i$  dispose de son propre contrôleur en réseau et de son propre mécanisme de déclenchement d'événement (MDE) indépendant. L'objectif est de proposer une méthodologie de conception permettant de réduire les transmissions de données à travers les réseaux et d'économiser leur bande passante. À cette fin, nous proposons, pour les générateurs d'événements de chaque sous-système, un MDE dynamique amélioré pour décider si les mesures d'état d'échantillonnage actuelles doivent être transmises ou non aux contrôleurs via les réseaux.

**Notations 3.2** *Les capteurs sont pilotés par une horloge avec une période d'échantillonnage fixe  $h$ , de manière synchrone pour tous les sous-systèmes, et les contrôleurs et actionneurs décentralisés sont pilotés par événement à partir de MDE décentralisés implémentés dans les générateurs d'événements pour chaque sous-système.*

Supposons que le capteur soit déclenché par le temps avec une période d'échantillonnage fixe  $h$  et que sa séquence d'échantillonnage soit décrite par l'ensemble  $\mathcal{S} = \{0, S_1^i, S_2^i, \dots, s_k\}$ ,  $s_k = kh$ ,  $k \in \mathbb{N}$ . En collectant ces données d'échantillonnage, les données échantillonnées  $x(s_k)$  qui, au-delà de la condition de déclenchement conçue, devraient être transmises. Nous désignons la séquence déclenchée par événement par l'ensemble  $\mathcal{T} = \{0, t_1, t_2, \dots, t_k\}$ , avec  $\mathcal{T} \subset \mathcal{S}$ . Ainsi, les actionneurs mettront en œuvre leurs actions de contrôle avec ces données déclenchées basées sur les sorties et transmises avec succès. Lorsque les données échantillonnées sont envoyées par le générateur d'événements au contrôleur, il se produit un délai de communication entre le capteur et le contrôleur.  $\tau_{ki}^{sc}$ , et un délai de communication entre le contrôleur et l'actionneur.  $\tau_{ki}^{ca}$ . Le délai total induit par le réseau peut être regroupé sous la forme  $\tau_{ki} = \tau_{ki}^{sc} + \tau_{ki}^{ca}$  et satisfait  $\tau_{1i} \tau_i \leq \tau_{ki} \leq \tau_{2i}$ .

Pour réduire les transmissions de données à travers le réseau et ainsi économiser sa bande

passante, nous proposons, pour le générateur d'événements, un nouveau MDE. C'est-à-dire, pour décider si les mesures d'état d'échantillonnage actuelles doivent être transmises ou non au contrôleur via le réseau, le prochain instant de transmission  $t_{k+1}^i$  satisfait:

$$t_{k+1}^i = t_k^i + \min_{l \in \mathbb{N}} l_i h |\xi^{i^i}(t) \Omega^i \xi^{i^i}(t) > \rho^i(t) x^i(t_k^i) \Omega^i x^i(t_k^i)| \quad (3.2)$$

où  $\rho^i \in [0, 1]$ , est déterminé par des seuils de déclenchement d'événements et  $\Omega^i > 0$  est une matrice de pondération de déclenchement d'événement à concevoir.  $\xi^{i^i}(t) = x_i(t_k^i) - x_i(t_k^i + l_i h)$  est l'erreur d'état réelle entre les dernières données transmises et les données d'échantillonnage en temps réel actuelles.

De plus, la fonction  $\rho^i(t)$  is exprimée comme

$$\dot{\rho}^i(t) = \frac{1}{\rho^i(t)} \left( \frac{1}{\rho^i(t)} - \lambda^i \right) \xi^{i^i T}(t) \Omega^i \xi^{i^i}(t) \quad (3.3)$$

avec  $0 \leq \rho^i(0) \leq 1$  et une constante donnée  $1 \leq \lambda^i$  pour  $t \in \mathbb{I}_z$ .

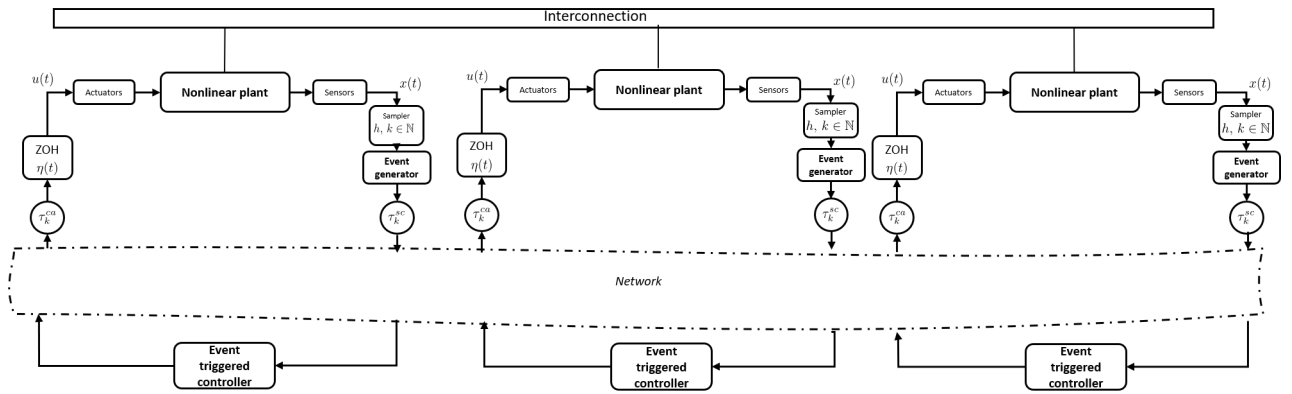


Figure 3.1: Systèmes non linéaires à grande échelle en réseau sous schéma de contrôle déclenché par événement [23]

En tenant compte de l'effet du délai de transmission du réseau, le signal de contrôle est constant pendant l'intervalle  $\mathbb{I}_z = [t_k^i + \tau_k^i, t_{k+1}^i + \tau_{k+1}^i)$ , qui peut être divisé, de manière similaire à celle empruntée dans [81], en plusieurs sous-intervalles de sorte que  $\mathbb{I}_z = \bigcup_{l=0}^{\bar{v}} \mathbb{I}_l$  avec:

$$\mathbb{I}_z = \begin{cases} \mathbb{I}_{l=0} = [t_k + \tau_k, t_k + h + \tau_k), l = 0 \\ \mathbb{I}_l = [t_k + lh + \bar{\tau}, t_k + lh + h + \bar{\tau}), l = 1, 2, \dots, \bar{v} - 1 \\ \mathbb{I}_{l=\bar{v}} = [t_k + \bar{v}h + \bar{\tau}, t_{k+1} + \tau_{k+1}), l = \bar{v} \end{cases} \quad (3.4)$$

Ensuite, la version avec délai du système peut être construite pour chaque deux instants transmis avec succès en définissant  $\eta_i(t) = t - (t_k^i + l_i h)$ . Évidemment,  $\eta_i(t)$  est une fonction morceau par morceau avec l'hypothèse que  $\tau_1 i = \tau_1^i \leq \eta_i(t) \leq \tau_2 i + h = \tau_2^i$  où  $\tau_1^i$  et  $\tau_2^i$  sont la valeur minimale et maximale du retard du système  $\eta_i(t)$  and  $\dot{\eta}_i(t)$ . Par conséquent, nous pouvons écrire  $x(t_k + lh) = x(t - \eta(t))$ .

Sur la base des MDE proposés pour chaque sous-système, les lois de commande CDP décentralisées en réseau sont définies comme suit :

$$u_i(t) = Kx_i(t_k^i) \quad (3.5)$$

À partir de la définition de  $\tau_i(t)$  et les erreurs d'état  $\xi_i(t)$  on peut écrire  $x_i(t_k^i) = x_i(t - \tau_i(t)) + \xi_i(t)$  et (3.5) devient:

$$u_i(t) = K(x_i(t - \tau_i(t)) + \xi_i(t)) \quad (3.6)$$

Substitution (3.6) into (3.1), donne l'expression de la dynamique en boucle fermée du  $i$ ème sous-système:

$$\dot{x}_i(t) = A^i x_i(t) + B^i K_{\alpha}^i (x_i(t - \tau_i(t)) + \xi_i(t)) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \tilde{A}^{ij} x_j(t) \quad (3.7)$$

Dans la suite, l'objectif est de fournir des conditions basées sur l'IMT pour la conception des MDE décentralisés MDE (3.2) et les lois de contrôle en réseau (3.5) de telle sorte que tous les sous-systèmes en boucle fermée (3.7) sont asymptotiquement stabilisés. À cette fin, les lemmes suivants seront utiles pour développer le résultat principal dans la section suivante.

**Lemma 1** (adapté de [82]) pour  $f(q) = q^2 \Phi_2 + q \Phi_1 + \Phi_0 \in \mathbb{R}^{p \times p}$ ,  $f(q) < 0$  pour tous  $q \in [\tau_1 i, \tau_2 i]$ , si et seulement si  $\exists U \in \mathbb{R}^{p \times p}$  telle que:

$$\begin{bmatrix} f(\tau_1 i) & \tau_1 \Phi_2 + \frac{1}{2} \Phi_1 + (\tau_2^i - \tau_1^i) U \\ \star & \Phi_2 - U - U^T \end{bmatrix} < 0 \text{ et } \mathcal{H}(U) > 0.$$

### 3.3 Résultats principal

La principale contribution de cet article est de proposer une procédure basée sur l'IMT pour la conception de contrôleurs déclenchés par des événements (3.6) pour les SCR soumis à des retards induits par le réseau et limitation de la bande passante, afin de réduire le trafic réseau en

réduisant le nombre de paquets libérés redondants. Le théorème suivant résume les conditions proposées

### 3.3.1 Analyse de Stabilité

**Theorem 3.1** *Pour des scalaires constants donnés  $\tau_{mi} > 0$ ,  $\tau_{Mi} > 0$ ,  $\rho_i > 0$  et le gain de contrôle donné  $K$ , le SCR perturbé en boucle fermée (3.7) est asymptotiquement stable, sous les instants de libération définis par la condition MDE (3.2), s'il existe les matrices réelles  $\mathcal{P}_i > 0$ ,  $\mathcal{Q}_1^i > 0$ ,  $\mathcal{Q}_2^i > 0$ ,  $R_1^i > 0$ ,  $R_2^i > 0$ ,  $N_i^1 > 0$ ,  $N_i^2 > 0$ ,  $\Omega_i > 0$ ,  $S_i$ ,  $\mathcal{M}_i$  et  $K_i^k$  telles que les conditions du lemme pour  $q = 1$  et 2 et :*

$$\begin{bmatrix} R_2^i & S_i \\ * & R_2^i \end{bmatrix} > 0 \quad (3.8)$$

$$\Lambda_{ij,j \neq i}^q = \begin{bmatrix} \Gamma_i^1 + \mathcal{H}(\mathbb{X}^i) & \Gamma_2^i & e_i^1 \tilde{A}^{ij} X^i \\ * & \Gamma_3^i & \mathbb{O} \\ * & * & -\varepsilon^{ij} \mathbb{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (3.9)$$

avec:

$$\Xi_i = \varepsilon_0(N-1) \left( e_i^1 e_i^{1T} + e_i^3 e_i^{3T} + e_i^5 e_i^{5T} + e_i^6 e_i^{6T} \right)$$

$$\mathbb{X}_i^{\ell,k} = \begin{bmatrix} A_i^\ell X_i & 0 & B_i^\ell \bar{K}_i^k & 0 & -\mathbb{X}_i & B_i^\ell \bar{K}_i^k \end{bmatrix}.$$

$$\Gamma_{1i} = \tau_1^2 \tilde{\Phi}_i^{3,2} + \tau_1^i \tilde{\Phi}_i^{3,1} + \tilde{\Phi}_i^{3,0} + \tilde{\Phi}_i^1 + \tilde{\Phi}_i^2 + \Xi_i - \rho_i e_i^8 \tilde{\Omega}_i e_i^{8T} + \rho_i (e_i^3 + e_i^8) \tilde{\Omega}_i (e_i^3 + e_i^8)^T, \quad (3.10)$$

$$\Gamma_2 = \tau_1^i \tilde{\Phi}_i^{3,2} + \frac{1}{2} \tilde{\Phi}_i^{3,1} + (\tau_2^i - \tau_1^i) U_i, \quad (3.11)$$

$$\tilde{\Phi}_1 = \mathcal{H}(e_i^1 \tilde{P}_i e_i^{5T}) + e_i^5 (\tilde{S}_1^i + \tilde{S}_2^i) e_i^{5T} - e_i^6 \tilde{S}_1^i e_i^{6T} - e_i^7 \tilde{S}_2^i e_i^{7T}, \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_i^2 = & e_i^1 (\tilde{Q}_1^i + \tilde{Q}_2^i - \tilde{R}_1^i) e_i^{1T} + \mathcal{H}(e_i^1 \tilde{R}_1^i e_i^{2T}) - e_i^2 (\tilde{R}_2^i + \tilde{R}_1^i + \tilde{Q}_1^i) e_i^{2T} + \mathcal{H}(e_i^2 (\tilde{R}_2^i - \tilde{W}_i) e_i^{3T}) \\ & + \mathcal{H}(e_i^2 \tilde{W}_i e_i^{4T}) + e_i^3 (\mathcal{H}(\tilde{W}_i) - 2\tilde{R}_2^i) e_i^{3T} + \mathcal{H}(e_i^3 (\tilde{R}_2^i - \tilde{W}_i) e_i^{4T}) - e_i^4 (\tilde{R}_2^i + \tilde{Q}_2^i) e_i^{4T} \\ & + e_i^5 (\tau_1^2 \tilde{R}_1^i + (\tau_2 - \tau_1)^2 \tilde{R}_2^i) e_i^{5T}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\tilde{\Phi}_i^{3,0} = -\mathcal{H}(\Pi_i^{1T} \tilde{M}_i \Pi_i^2) \quad (3.14)$$

$$\tilde{\Phi}_i^{3,1} = (\tau_2^i + \tau_1^i) \mathcal{H}(\Pi_i^{1T} \tilde{M}_i \Pi_i^2) - 2\Pi_i^{1T} \tilde{M}_i \Pi_i^1 \quad (3.15)$$

$$\tilde{\Phi}_i^{3,2} = (\tau_2 i + \tau_1 i) \Pi_i^{1T} \tilde{M}_i \Pi_i^1 - \tau_2^i \tau_1^i \mathcal{H}(\Pi_i^{1T} \tilde{M}_i \Pi_i^2) \quad (3.16)$$

$$\Pi_i^1 = \begin{bmatrix} e_i^{1T} \\ (e_i^3 + e_i^8)^T \end{bmatrix}, \Pi_i^2 = \begin{bmatrix} e_i^{5T} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

**Proof 3.1** *Considérons, pour chaque sous-système décentralisé en boucle fermée  $i \in \mathbb{I}_N$ , un candidat LKF donné par:*

$$V_i(t) = V_1^i(t) + V_2^i(t) + V_3^i(t), \quad (3.18)$$

avec:

$$V_1^i(t) = x_i^T(t) P_i x_i(t) + \int_{t-\tau_1^i}^t \dot{x}_i^T(s) S_1^i \dot{x}_i(s) ds + \int_{t-\tau_2^i}^t \dot{x}_i^T(s) S_2^i \dot{x}_i(s) ds, \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} V_2^i(t) &= \int_{t-\tau_1^i}^t x_i^T(s) Q_1^i x_i(s) ds + \tau_1^i \int_{-\tau_1^i}^0 \int_{t+v}^t \dot{x}_i^T(s) R_1^i \dot{x}_i(s) ds dv \\ &+ \int_{t-\tau_2^i}^t x_i^T(s) Q_2^i x_i(s) ds + (\tau_2^i - \tau_1^i) \int_{-\tau_2^i}^{-\tau_1^i} \int_{t+v}^t \dot{x}_i^T(s) R_2^i \dot{x}_i(s) ds dv, \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$V_3^i(t) = (\tau_2^i - \eta_i(t)) (\eta_i(t) - \tau_1^i) \psi_i^T(t) M_i \psi_i(t), \quad (3.21)$$

où  $\psi_i(t) = \text{col}\{x_i(t), x_i(t_k^i)\}$ .

la LKF(3.18) est positif si  $P_i > 0$ ,  $S_1^i > 0$ ,  $S_2^i > 0$ ,  $Q_1^i > 0$ ,  $Q_2^i > 0$ ,  $R_1^i > 0$  et  $R_2^i > 0$ . Notez qu'aux instants de libération, c'est-à-dire lorsque  $\eta_i(t) = \tau_1^i$  ou  $\eta_i(t) = \tau_2^i$ , on a  $V_3^i(x_i(t)) = 0$ . Par conséquent, nous n'avons pas besoin  $M_i$  être symétrique positif défini si le LKF  $V_i(t)$  in (3.18) diminue de façon monotone  $\forall t \in [t - \tau_2^i, t - \tau_1^i)$ . Dans ce cas, le SCR à grande échelle (3.7) est stable si,  $\forall i \in \mathbb{I}_N$ :

$$\dot{V}_i(t) = \dot{V}_1^i(t) + \dot{V}_2^i(t) + \dot{V}_3^i(t) < 0 \quad (3.22)$$

Définissons  $\zeta_i(t) = \text{col}\{x_i(t), x_i(t - \tau_1^i), x_i(t - \eta_i(t)), x_i(t - \tau_2^i), \dot{x}_i(t), \dot{x}_i(t - \tau_1^i), \dot{x}_i(t - \tau_2^i), \xi_i(t_k^i)\}$ . La dérivée de  $V_1^i(t)$  (voir (3.19)) donne :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1^i(t) &= 2x_i^T(t) P_i \dot{x}_i(t) + \dot{x}_i^T(t) (S_1^i + S_2^i) \dot{x}_i(t) - \dot{x}_i^T(t - \tau_1^i) S_1^i \dot{x}_i(t - \tau_1^i) - \dot{x}_i^T(t - \tau_2^i) S_2^i \dot{x}_i(t - \tau_2^i) \\ &= \zeta_i^T(t) \Phi_1^i \zeta_i(t) \end{aligned} \quad (3.23)$$

avec  $\Phi_1^i = \mathcal{H}(e_i^1 P_i e_i^{5T}) + e_i^5 (S_1^i + S_2^i) e_i^{5T} - e_i^6 S_1^i e_i^{6T} - e_i^7 S_2^i e_i^{7T}$ .

Maintenant, concentrons-nous sur la dérivée temporelle de (3.20), on a :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2^i(t) = & x_i^T(t)(Q_1^i + Q_2^i)x_i(t) - x_i^T(t - \tau_1^i)Q_1^i x_i(t - \tau_1^i) - x_i^T(t - \tau_2^i)Q_2^i x_i(t - \tau_2^i) + \dot{x}_i^T(t) \left( \tau_1^{i2} R_1^i + (\tau_2 - \tau_1^i)^2 R_2^i \right) \dot{x}_i(t) \\ & - \tau_1^i \int_{t-\tau_1^i}^t \dot{x}_i^T(s) R_1^i \dot{x}_i(s) ds - (\tau_2^i - \tau_1^i) \int_{t-\tau_2^i}^{t-\tau_1^i} \dot{x}_i^T(s) R_2^i \dot{x}_i(s) ds \end{aligned} \quad (3.24)$$

En appliquant le lemma 1 dans [39], on obtient :

$$-\tau_1^i \int_{t-\tau_1^i}^t \dot{x}_i^T(s) R_1^i \dot{x}_i(s) ds \leq -\zeta_i^T(t) (e_i^1 - e_i^2) R_1^i (e_i^1 - e_i^2)^T \zeta_i(t) \quad (3.25)$$

De plus, en appliquant le théorème 1 dans [59], si  $\begin{bmatrix} R_2^i & W_i \\ * & R_2^i \end{bmatrix} > 0$ , ça donne:

$$-(\tau_2^i - \tau_1^i) \int_{t-\tau_2^i}^{t-\tau_1^i} \dot{x}_i^T(s) R_2^i \dot{x}_i(s) ds \leq \begin{bmatrix} x_i(t - \tau_1^i) \\ x_i(t - \eta_i(t)) \\ x_i(t - \tau_2^i) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_2^i & R_2^i - W_i & W_i \\ * & -2R_2^i + \mathcal{H}(W_i) R_2^i - W_i \\ * & * & -R_2^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i(t - \tau_1^i) \\ x_i(t - \eta_i(t)) \\ x_i(t - \tau_2^i) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Ainsi, à partir de (3.24), (3.25) et (3.26), on obtient :

$$\dot{V}_2^i(t) \leq \zeta_i^T(t) \Phi_2^i \zeta_i(t) \quad (3.27)$$

avec  $\Phi_2^i = e_i^1 (Q_1^i + Q_2^i - R_1^i) e_i^{1T} + \mathcal{H}(e_i^1 R_1^i e_i^{2T}) - e_i^2 (R_2^i + R_1^i + Q_1^i) e_i^{2T} + \mathcal{H}(e_i^2 (R_2^i - W_i) e_i^{3T}) + \mathcal{H}(e_i^2 W_i e_i^{4T}) + e_i^3 (\mathcal{H}(W_i) - 2R_2^i) e_i^{3T} + \mathcal{H}(e_i^3 (R_2^i - W_i) e_i^{4T}) - e_i^4 (R_2^i + Q_2^i) e_i^{4T} + e_i^5 (\tau_1^{i2} R_1^i + (\tau_2^i - \tau_1^i)^2 R_2^i) e_i^{5T}$ .

En prenant la dérivée de (3.21), on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{V}_3^i(t) = & (\tau_2^i + \tau_1^i - 2\eta_i(t)) \psi_i^T(t) M_i \psi_i(t) + 2(\tau_2^i - \eta_i(t)) (\eta_i(t) - \tau_1^i) \psi_i^T(t) M_i \dot{\psi}_i(t) \\ = & \zeta_i^T(t) (\eta_i^2(t) \Phi_{32}^i + \eta_i(t) \Phi_{31}^i + \Phi_{30}^i) \zeta_i(t) \end{aligned} \quad (3.28)$$

avec  $\Phi_{30}^i = -\mathcal{H}(\Pi_1^{iT} M_i \Pi_2^i)$ ,  $\Phi_{31}^i = (\tau_2^i + \tau_1^i) \mathcal{H}(\Pi_1^{iT} M_i \Pi_2^i) - 2\Pi_1^{iT} M_i \Pi_1^i$ ,  $\Phi_{32}^i = (\tau_2^i + \tau_1^i) \Pi_1^{iT} M_i \Pi_1^i - \tau_2^i \tau_1^i \mathcal{H}(\Pi_1^{iT} M_i \Pi_2^i)$  et où  $\Pi_1^i$  et  $\Pi_2^i$  sont définis dans le théorème 1.

De (3.23)-(3.28), l'inégalité (3.22) est satisfaite si :

$$\zeta_i^T(t) \left( \eta_i^2(t) \Phi_{32}^i + \eta_i(t) \Phi_{31}^i + \Phi_{30}^i + \Phi_1^i + \Phi_2^i \right) \zeta_i(t) < 0 \quad (3.29)$$

et où  $\Pi_1^i$  et  $\Pi_2^i$  sont définis dans le théorème 1. Depuis (3.23)-(3.28), l'inégalité (3.22) est

satisfait si :

$$\begin{aligned}
 0 &= 2 \sum_{i=1}^N \zeta_i^T(t) \mathcal{G}_i \left[ A^i x_i(t) + B^i K_{\alpha}^i (x_i(t - \tau_i(t)) + \xi_i(t)) + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \tilde{A}^{ij} x_j(t) - \dot{x}_i(t) \right] \\
 &\leq \sum_{i=1}^N \zeta_i^T(t) \left( \Xi_i + \mathcal{H}(\mathcal{G}_i \mathbb{K}^i) + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \varepsilon_{ij}^{-1} \mathcal{G}_i \tilde{A}^{ij} \tilde{A}^{ijT} \mathcal{G}_i^T \right) \zeta_i(t)
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

avec:

$$\begin{aligned}
 \Xi_i &= \varepsilon_0(N-1) \left( e_i^1 e_i^{1T} + e_i^3 e_i^{3T} + e_i^5 e_i^{5T} + e_i^6 e_i^{6T} \right) \\
 \mathbb{K}^i &= \begin{bmatrix} A^i & 0 & B^i K_{\alpha}^i & 0 & -\mathbb{I} & B^i K_{\alpha}^i \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Depuis (3.23)-(3.30) nous pouvons écrire:

$$\dot{V}_i(t) \leq \sum_{i=1}^N \zeta_i^T(t) \left( \eta_i^2(t) \Phi_{32}^i + \eta_i(t) \Phi_{31}^i + \Phi_{30}^i + \Phi_1^i + \Phi_2^i + \Xi_i + \mathcal{H}(\mathcal{G}_i \mathbb{K}^i) + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \varepsilon_{ij}^{-1} \mathcal{G}_i \tilde{A}^{ij} \right) \zeta_i(t) < 0 \tag{3.31}$$

Donc, à partir de l'inégalité (3.2), l'inégalité (3.22) est suffisamment satisfaite si :

$$\begin{aligned}
 &\dot{V}_i(t) - \zeta_i^T(t) \Omega_i \xi_i(t) + \rho_i (x_i(t - \tau_i(t)) + \xi_i(t))^T \Omega_i (x_i(t - \tau_i(t)) + \xi_i(t)) \\
 &\leq \sum_{i=1}^N \zeta_i^T(t) \left( \eta_i^2(t) \Phi_{32}^i + \eta_i(t) \Phi_{31}^i + \Phi_{30}^i + \Phi_1^i + \Phi_2^i + \Xi_i + \mathcal{H}(\mathcal{G}_i \mathbb{K}^i) \right) \\
 &+ \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \varepsilon_{ij}^{-1} \mathcal{G}_i \tilde{A}^{ij} A_{\alpha}^{ijT} \mathcal{G}_i^T - \rho_i e_i^8 \Omega_i e_i^{8T} + \rho_i (e_i^3 + e_i^8) \Omega_i (e_i^3 + e_i^8)^T < 0
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

laisser  $D_X = \text{diag}(X_1^T, X_1^T, X_1^T, X_1^T, X_1^T, X_1^T, I, I)$  avec  $X_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ . Application du lemme (lemme 1 dans [71]) et du complément de Schur et de la congruence avec  $D_X$ , avec les changements de variables  $\tilde{\mathcal{P}}_i = X_i^T \mathcal{P}_i X$ ,  $\tilde{Q}_1^i = X_i^T Q_1^i X$ ,  $\tilde{Q}_2^i = X_i^T Q_2^i X$ ,  $\tilde{R}_1^i = X_i^T R_1^i X$ ,  $\tilde{R}_2^i = X_i^T R_2^i X$ ,  $\tilde{\Omega}_i = X_i^T \Omega_i X$ ,  $\tilde{S} = X_i^T S X$ ,  $\tilde{N}_i^1 = X_i^T N_1^i X$  et  $\tilde{K}^i = K^i X_i$ . nous obtenons les IML exprimés dans le théorème 1. Ceci termine la preuve.

### 3.4 Exemples numériques

Afin d'illustrer l'efficacité des principaux résultats obtenus dans la section précédente, la procédure d'analyse de stabilité et de conception de contrôle est présentée en deux sous-

sections.

**Exemple:** Considérons le système à grande échelle composé de deux sous-systèmes comme suit

$$A^1 = \begin{bmatrix} -1 & 0.5 \\ 1 & -1.5 \end{bmatrix}, A^2 = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 0.5 & -1 \end{bmatrix}, A^{12} = \begin{bmatrix} -0.01 & 0.02 \\ 0.025 & -0.04 \end{bmatrix}, A^{21} = \begin{bmatrix} -0.03 & 0.03 \\ 0.01 & -0.05 \end{bmatrix},$$

$$B^1 = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}, B^2 = \begin{bmatrix} 3 \\ 4 \end{bmatrix},$$

Définition des paramètres  $\tau_{mi} = 0.01$ ,  $\varepsilon_i^1 = 5.1$ ,  $\varepsilon_i^2 = 0.2$  et  $\rho_i = 0,2$ , les conditions du théorème 3.1 ont été résolues via la Matlab IML Toolbox et fournissent une valeur maximale de  $\tau_M = [0, 500 \quad 0, 300]$ , ainsi que la matrice de gain (3.6) du contrôleur de données échantillonnées suivante et la matrice de pondération de déclenchement MDE (3.2):

$$K^1 = 10 \times \begin{bmatrix} -0.1853 & -0.1545 \end{bmatrix}, K^2 = 10 \times \begin{bmatrix} 0.1488 & -0.2152 \end{bmatrix},$$

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0.5528 & -0.0090 \\ -0.0090 & 0.3359 \end{bmatrix}, \Omega_2 = \begin{bmatrix} 4.1196 & -1.6843 \\ -1.6843 & 3.2153 \end{bmatrix}.$$

Assumant  $h = 100 \text{ ms}$ , une simulation du system conçu system SCR en boucle fermé (3.7) est effectué avec le condition initial  $x_1 = [2 \quad 5]^T$  and  $x_2 = [3 \quad -3]^T$ . Dans les conditions de version conçues (3.2). Fig 3.2 et 3.3 décrit les trajectoires d'état en boucle fermée, les instants de libération et les intervalles. Le SCR conçu est correctement stabilisé et atteint l'origine en moins de 5 s.

Comme prévu, le SCR (3.7) en boucle fermée reste asymptotiquement stable, grâce à la mémoire MDE implémentée. De plus, seuls 127 de paquets de données au total (sur les 2000 paquets de données échantillonnés) sont transmis au ZOH via le réseau de communication. Cela se traduit par un taux de transmission d'environ 6,35% sur l'intervalle de temps  $[0, 20s]$ .

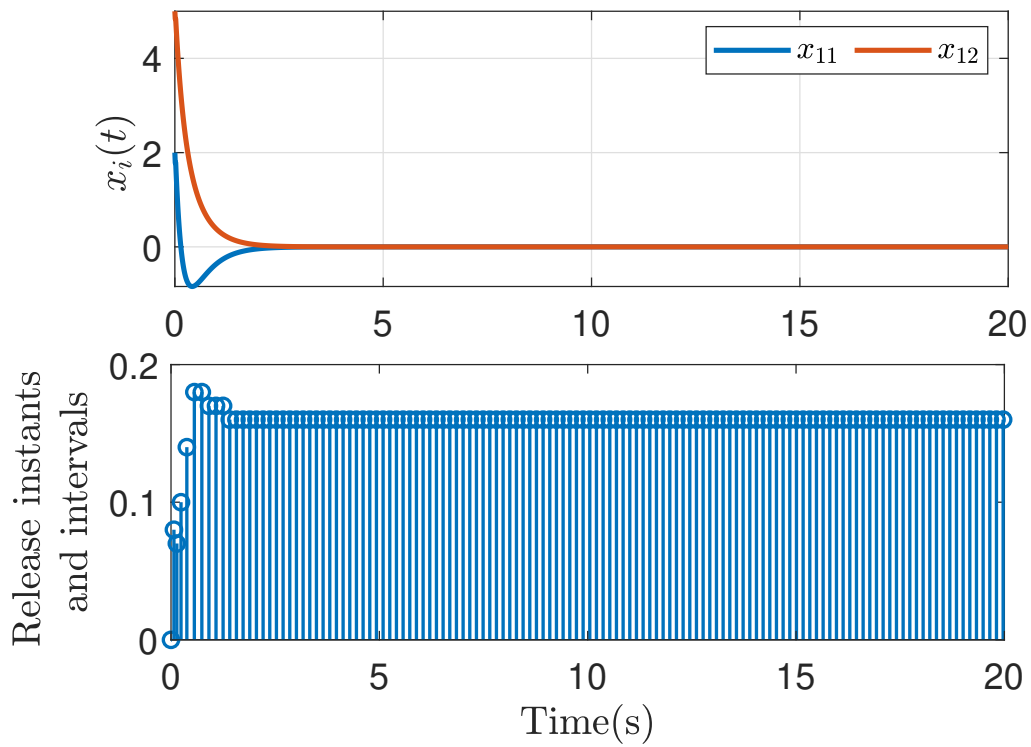


Figure 3.2: Trajectoires des états et instants et intervalles de CDE de sous-systèmes 1.

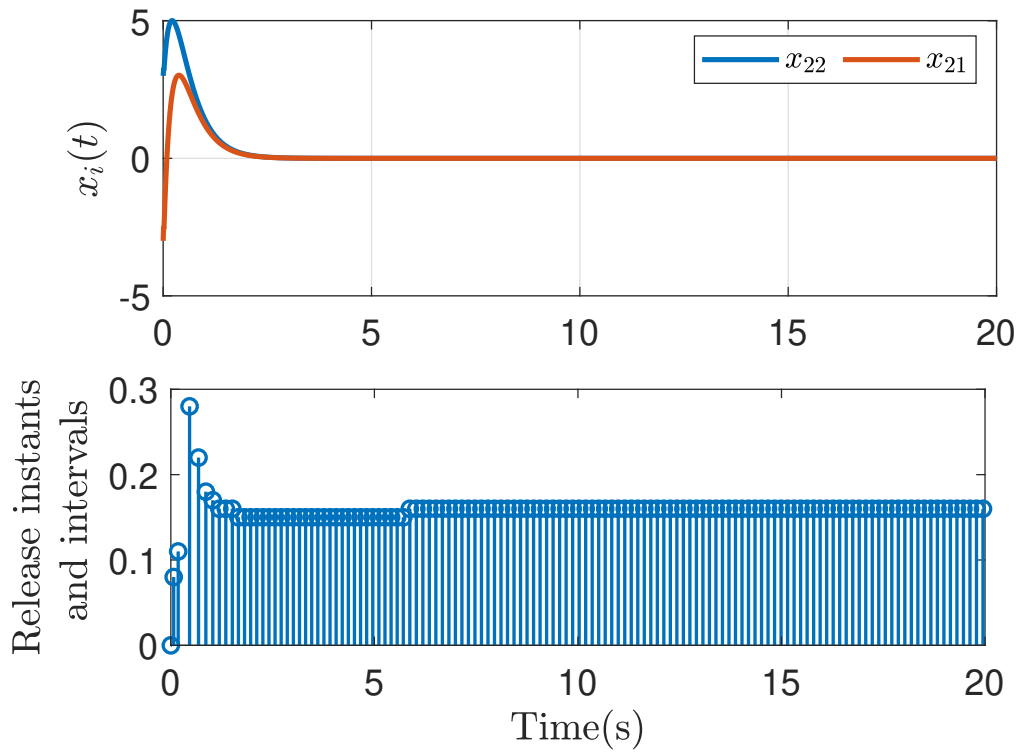


Figure 3.3: Trajectoires des états et instants et intervalles de CDE de sous-systèmes 2.

## 3.5 Conclusion

Dans notre mémoire , nous avons introduit un mécanisme déclenché par événement (MDE) conçu pour atténuer les charges réseau dans le contexte de la conception de régulateurs à données échantillonnées pour les systèmes à grande échelle (SGE) affectés par des retards induits par le réseau . Notre condition de déclenchement proposée réduit efficacement le nombre de paquets transmis, préservant ainsi la bande passante du réseau, tout en assurant la stabilité en boucle fermée. Nous avons atteint cet objectif en exploitant l'MDE proposé en conjonction avec une fonctionnelle de Lyapunov-Krasovskii semi-bouclée bien adaptée (LKF). Cette combinaison a conduit au développement de conditions de conception basées sur des inégalités matricielles linéaires (IML) relaxées. Pour valider l'efficacité de notre approche, nous avons présenté un exemple numérique. Cet exemple sert à illustrer les avantages pratiques et les améliorations offertes par notre proposition dans le domaine du contrôle déclenché par événement pour les SGE.



# Conclusion général

Cette mémoire présente plusieurs contributions à la conception du Contrôle décentralisé déclenché par événement pour les systèmes à SGE soumis à des retards induits par le réseau. Étant donné qu'il n'est pas possible d'éviter complètement ces imperfections, elles ont été prises en compte lors du processus de conception du contrôleur.

On se concentre sur les définitions principales des SGE, Modèle Interconnecté est sa problématique. Il présente également différentes structures pour les SGE et systèmes interconnectés discute des défis rencontrés dans leur modélisation et leur conception de contrôle. De plus, il présente les commande des systèmes à grande échelle et de stabilité des systèmes interconnectés , et le chapitre se termine par un aperçu des différents protocoles employés dans la mise en diverses techniques de contrôle utilisées dans l'étude des SGE sont discutées (DCS, SCADA). Les concepts fondamentaux de l'analyse de stabilité utilisant le fonctionnel de Lyapunov-Krasovskii sont présentés. Des lemmes et théorèmes liés à l'analyse de stabilité et réduire le conservatisme des conditions de stabilité et estimer la précision des dérivées temporelles résultantes. Des conditions de stabilité moins conservatives, sous la forme d'inégalités matricielles linéaires (LMI), sont dérivées en construisant de nouveaux fonctionnels augmentés de Lyapunov-Krasovskii (LKF). La condition de stabilité obtenue fournit une limite supérieure maximale admissible (MAUB) pour le retard induit par le réseau qui garantit la stabilité des systèmes de contrôle en réseau (SCR). Ensuite, un mécanisme déclenché par événement décentralisé (ETM) est proposé pour atténuer la charge du réseau dans la conception du contrôleur à données échantillonnées pour les SCR soumis à des retards induits par le réseau. En outre, une procédure de co-conception est développée pour déterminer à la fois les paramètres de déclenchement et les gains du contrôleur réseau proposé. Le lemme de Finsler est utilisé pour simplifier la conception du contrôle déclenché par événement décentralisé en introduisant des variables de décision de relaxation et en découplant les matrices du système de celles des fonctionnels de Lyapunov-Krasovskii. Cela simplifie le processus de conception du contrôle

déclenché par événement à un simple changement de variables. Enfin, la limite supérieure maximale admissible du retard induit par le réseau et les gains déclenchés par événement sont calculés en résolvant le problème d'optimisation convexe formulé par les LMI relaxées.

Enfin, les contributions présentées dans le Chapitre 3 sont validées à travers des exemples numériques pratiques. Les résultats démontrent que les effets négatifs des retards induits par le réseau imprévisibles et des perturbations avec des limitations de bande passante sont atténués, assurant un niveau élevé d'atténuation des perturbations et de stabilité pour les SCR.

# References

- [1] Advantages and disadvantages of dcs. *Automation Community*, December 30, 2023.
- [2] Advantages of cloud-based dcs control systems. *Automation Community*, December 30, 2023.
- [3] Florin-Gheorghe Filip and Kauko Leiviskä. Large-scale complex systems. *pages 619–638. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.*
- [4] Kanglei Ren, Lei Lu and Jinxing Lin. output tracking control for networked control systems with network-induced delays. *In 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), pages 1416–1421. IEEE, 2018.*
- [5] AOUN Abdelkrim and NOUARI Abdallah. *Commande robuste des systèmes contrôlés en réseau (NCSs) de communication par l’approche LMI*. Université 20 Août 1955 Skikda Faculté de Technologie Département de Génie Electrique, 2020.
- [6] Khalid Abidi and Jian-Xin Xu. Iterative learning control for sampled-data systems: From theory to practice. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(7):3002–3015, 2010.
- [7] Carolina ALBEA-SANCHEZ. *Automatique: Commande des systèmes linéaires*. MC Université de Toulouse LAAS-CNRS, Toulouse, France.
- [8] Ludovic ANDRES. Influence de la déviation de la verticale sur les travaux topographiques réalisés dans le système rgf93. *Géodésie*, 2002.
- [9] Bhargav Appasani. Networked control system. *Scholarly Community Encyclopedia*, 01 Apr 2021.
- [10] Jean-Luc Archimbaud. Interconnexion et conception de réseaux. *Ecole d’ingénieurs réseaux*, 2002.

- [11] Yacine Aït-Sahalia. Estimating continuous-time models with discretely sampled data. August 13, 2006.
- [12] A. Bassong-Onana. Filtrage optimal des systèmes dynamiques discrets : Décentralisation et robustesse numérique. *Thèse de doctorat, université de Nancy 1*, 1992.
- [13] M. T. BENHABILES. TÉLÉcommunications fondamentales. *Université des Frères Mentouri Constantine 1*.
- [14] Abderazik Birouche. Contribution sur la synthèse d'observateurs pour les systèmes dynamiques hybrides. *HAL Open Science*, 21 Dec 2006.
- [15] Pierre BORNARD. Conduite d'un système de production-transport. *TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR*, 10 nov. 2000.
- [16] Aimene Boughrira. Contrôle distribué « dcs distributed control system » pour la réalisation d'un système de télé-contrôle scada. *UNIVERSITE « BATNA- 2 », FACULTE DE TECHNOLOGIE,DEPARTEMENT GENIE INDUSTRIEL*, 2019.
- [17] John C.Bellamy. Digital telephony third edition. *A Wiley-Interscience Publication by JOHN WILEY and ONS,IN*, 2000.
- [18] Antoine Chaillet. Systèmes commandés par réseaux.
- [19] Ph. Chevrel. Contribution à la commande robuste. *Habilitation À diriger des Recherches, IRCCyN, Ecole des Mines de Nantes*, 2004.
- [20] Fabien Claveau. Contribution à l'analyse et la commande structurée des grands systèmes. *université de Nantes*, 2005.
- [21] Jianguo Dai. A delay system approach to networked control systems with limited communication capacity. *Franklin Institute 347(7):1334-1352*, September 2010.
- [22] TEFFAHI Amine Ala Eddine and BOUFENAZ Zine Eddine. *Event-triggered control strategy for large-scale industrial systems via Fieldbus protocols*. UNIVERSITY OF AUGUST 20, 1955 SKIKDA Faculty of Technology Department : Petrochemistry, 2023.
- [23] Kevin Guelton Fayçal Bourahala, Mohamed Rouamel. Decentralized event-triggered control for networked t-s fuzzy large-scale systems.

- [24] Robin Fortin. Comprendre la complexité : introduction à la méthode d'edgar morin. *Presses Université Laval*, 2005.
- [25] Marcello Farina Francesca Boem, Ruggero Carli, Giancarlo Ferrari-Trecate, and Thomas Parisini. Distributed fault detection for interconnected large-scale systems: a scalable plug and play approach. *IEEE TCNS 18-0118-final*, 2019.
- [26] Ghazi Bel Haj Frej. Estimation et commande décentralisée pour les systèmes de grandes dimensions. *HAL Open Science*, 7 jan 2019.
- [27] Ghazi Bel Haj Frej. Estimation et commande décentralisée pour les systèmes de grandes dimensions. *HAL Open Science*, 7 Jan 2019.
- [28] VALÉRIE ET SYLVIA GILBERT. Centraliser ou ne pas centraliser, telle est la question. *Les affaires*, 07 oct 2019.
- [29] Alain GONZAGA. Les automates programmables industriels.
- [30] Kevin Guelton, Nouredine Manamanni, and Dalel Jabri. H-infinity decentralized static output feedback controller design for large scale takagi-sugeno systems. In *International Conference on Fuzzy Systems*, pages 1–7, 2010.
- [31] ABOU-KANDIL Hisham and JUNGERS Marc. Commande optimale multicritère. *introduction à la théorie des jeux. Hermès*, 2004.
- [32] Songlin Hu, Dong Yue, Chen Peng, Xiangpeng Xie, and Xiuxia Yin. Event-triggered controller design of nonlinear discrete-time networked control systems in its fuzzy model. *Applied Soft Computing*, 30:400–411, 2015.
- [33] Xiuxia Yin Huaipin Zhang, Dong Yue and Ji Chen. Adaptive model-based event-triggered control of networked control system with external disturbance. *IET control theory and applications*, 10(15):1956–1962, 2016.
- [34] K. Law J. Lynch. Decentralized control techniques for large-scale civil structural systems. *Engineering*, 2002.
- [35] Hafsa Jabeen. Mastering distributed control systems: A comprehensive guide to dcs architecture, components, and applications. *WEVOLVER*, 12 may,2023.

- [36] Dalel Jabri, Kevin Guelton, Djamel EC Belkhiat, and Nouredine Manamanni. Decentralized static output tracking control of interconnected and disturbed takagi–sugeno systems. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 30(2):225–238, 2020.
- [37] Mohammad Jamshidi. *Large-scale Systems: Modeling, Control, and Fuzzy Logic*. Prentice Hall, 1997.
- [38] Karolos M. Grigoriadis Javad Mohammadpour. *Efficient Modeling and Control of Large-Scale Systems*. Springer New York, NY, 2010.
- [39] Xiaofu Ji and Hongye Su. A note on equivalence between two integral inequalities for time-delay systems. *Automatica*, 53:244–246, 2015.
- [40] Xin-Chun Jia, Xiao-Bo Chi, Qing-Long Han, and Nan-Ning Zheng. Event-triggered fuzzy  $h_{\infty}$  control for a class of nonlinear networked control systems using the deviation bounds of asynchronous normalized membership functions. *Information Sciences*, 259:100–117, 2014.
- [41] Lijuan Zha Jinliang Liu, Yuda Wang, Xiangpeng Xie, and Engang Tian. An event-triggered approach to security control for networked systems using hybrid attack model. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 31(12):5796–5812, 2021.
- [42] Urs Gasser John Palfrey. The perils of highly interconnected systems. *MIT Technology Review*, July 30, 2012.
- [43] Manuel C. Voelkle Julian F. Lohmann, Steffen Zitzmann and Martin Hecht. A primer on continuous-time modeling in educational research: an exemplary application of a continuous-time latent curve model with structured residuals (ct-lcm-sr) to pisa data. *Methodology Open access*, 11 july 2022.
- [44] Ho Jun Kim, Geun Bum Koo, Jin Bae Park, and Young Hoon Joo. Decentralized sampled-data  $H_{\infty}$  fuzzy filter for nonlinear large-scale systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 273:68–86, 2015.
- [45] Emilia Fridman Kun Liu, Anton Selivanov. Survey on time-delay approach to networked control. *School of Automation, Beijing Institute of Technology, 100081 Beijing, P.R.China*, 2019.

- [46] Hong Ye Linda Bushnell. Networked control systems: Architecture and stability issues. *Springer Nature*, J2011.
- [47] Yuan Yuan Ling Zhao, Hao Xu and Hongjiu Yang. Stabilization for networked control systems subject to actuator saturation and network-induced delays. *Neurocomputing* 267(2017):354-361, 2017.
- [48] P. MAHEY. Méthodes de décomposition et décentralisation en programmation linéaire. *AFCET*, 1986.
- [49] Mejda Mansouri. Observation et commande des systèmes de grande dimension. *HAL Open Science*, 5 Apr 2013.
- [50] Jacob H. Martin. The impact of lsi (large-scale Integration) on system packaging. *MIT Instrumentation Laboratory, Cambridge, Mass. USA*.
- [51] Adrien Maudet. Interactions entre niveaux dans un modèle orienté agent de généralisation cartographique : Le modèle diogen. *HAL Theses*, 2016.
- [52] M.Jamshidi. Control systems, robotics, and automation – vol. xi – controls of large-scale systems. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*.
- [53] Ali Akbar Safavi Mojtaba Kordestani and Mehrdad Saif. Recent survey of large-scale systems: architectures, controller strategies, and industrial applications. *IEEE Systems Journal*, 15(4):5440–5453, 2021.
- [54] BOUGUERRA Faris Mr : BOUGUERRA Abderrahmen SOUADIA Tariq, ROUBACHE Bilal. Modélisation et commande d'un système hydraulique à trois réservoirs couplés. *Département de Génie Electrique – Faculté de technologie – Université Mohamed Boudiaf de M'Sila*, 2021-2022.
- [55] Mohammed M'SAAD. Systemes asservis echantillonnes. *École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Caen*, octobre 2019.
- [56] Fayçal Bourahala Nafir noureddine, Mohamed Rouamel and Samir Bouzoualegh. Delay-dependent stability improvement for networked control systems:a sampled data approach. *Department of Electrical Engineering, LRES Laboratory, 20Août 1955 University, Skikda, Algeria*, 1 march 2022.

- [57] KONISHI Nobuaki. System architecture of centum cs 3000. *Yokogawa Technical Report English Edition, No. 28*, 1999.
- [58] Mahdi Jalili Nozhatalzaman Gaeini, Ali Moradi Amani and Xinghuo Yu. Optimization of communication network topology in distributed control systems subject to prescribed decay rate. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 51(8):4277–4285, 2019.
- [59] PooGyeon Park, Jeong Wan Ko, and Changki Jeong. Reciprocally convex approach to stability of systems with time-varying delays. *Automatica*, 47(1):235–238, 2011.
- [60] Arnd Hartmanns Pedro R D’argenio, Juan A Fraire and Fernando Raverta. Comparing statistical and analytical routing approaches for delay-tolerant networks. *HAL Open science*, 2022.
- [61] Chen Peng, Qing-Long Han, and Dong Yue. To transmit or not to transmit: A discrete event-triggered communication scheme for networked takagi–sugeno fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(1):164–170, 2012.
- [62] Gaëlle Perdereau. Centralisation versus décentralisation de la fonction achat : Quel impact sur l’efficacité d’une entreprise industrielle multi-sites ? *Faculté de Droit, des Sciences Economiques et de Gestion Master II Management, Affaires Internationales*, 04/09/2014.
- [63] Aleksi Paaso Quan Zhou, Mohammad Shahidehpour, Shay Bahramirad, Ahmed Alabdulwahab, and Abdullah Abusorrah. Distributed control and communication strategies in networked microgrids. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 39(6):1646–1652, 2020.
- [64] Chiara Quioco. Qu’est-ce qu’un réseau centralisé et un réseau décentralisé ? *Gestion des terminaux*, juin 7,2004.
- [65] Hassane Alia Rene David. Discrete,continuous,and hybrid petri nets. *Springer*, 2005.
- [66] Yanzheng Zhu Rongni Yang, Guitong Li and Guo-Ping Liu. Event-triggered control for networked predictive control systems with time delay and external disturbance. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2023.
- [67] Henning Schmidt. Model based design of decentralized control configurations. 2002.

- [68] Dragoslav D Siljak. Decentralized control of complex systems. *Boston : Academic Press*, 1991.
- [69] L. Tambour. Méthodologie et flot semi-automatique d'aide à la conception et à la validation des macro-cellules asic dédiées au traitement du signal. *HAL Open science*, 6 Jan 2004.
- [70] Véronique Thomas-Vaslin. Le rôle des traces dans le système immunitaire : des anticorps au corps. *OpenEdition Books*.
- [71] Engang Tian, Dong Yue, and Yijun Zhang. Delay-dependent robust  $h_\infty$  control for t–s fuzzy system with interval time-varying delay. *Fuzzy sets and systems*, 160(12):1708–1719, 2009.
- [72] Marc Trestini. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. *HAL Open science*, 11 jan 2017.
- [73] Nilufer Tuptuk and Stephen Hailes. Security of smart manufacturing systems. *Journal of manufacturing systems*, 47:93–106, 2018.
- [74] H. Fujioka U. Jönsson, C.-Y. Kao. Low dimensional stability criteria for large-scale interconnected systems. *IEEE*, 2007.
- [75] Van-Phong Vu and Wen-June Wang. Decentralized observer-based controller synthesis for a large-scale polynomial t–s fuzzy system with nonlinear interconnection terms. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 51(6):3312–3324, 2019.
- [76] Van-Phong Vu and Wen-June Wang. Polynomial controller synthesis for uncertain large-scale polynomial t–s fuzzy systems. *IEEE transactions on cybernetics*, 51(4):1929–1942, 2019.
- [77] Huimin Wang and Guang-Hong Yang. Decentralized event-triggered  $h_\infty$  control for affine fuzzy large-scale systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 27(11):2215–2226, 2019.
- [78] Ahmed Yasser. Different types of control systems architecture. *Linkedin*, 13 juin 2020.

- [79] Vincent Comlan Gomez Yassine El Bahlouli, El Hadji mor Ndiaye, Vénunyé Claude Kondo Tokpovi, and Evarice Benoit Djieufack. Théories pédagogiques et approches d'enseignement et d'apprentissage. *Linkedin*, 8 déc 2023.
- [80] Yoshishige Murakami Yasunori Mitani, Kiichiro Tsuji. Coordinated stabilizing control for large-scale interconnected power systems, by superconducting magnetic energy storage unit and power system stabilizers. *Wiley online library*, 1993.
- [81] Dong Yue, Engang Tian, and Qing-Long Han. A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems. *IEEE Transactions on automatic control*, 58(2):475–481, 2012.
- [82] Xian-Ming Zhang, Qing-Long Han, and Xiaohua Ge. The construction of augmented lyapunov-krasovskii functionals and the estimation of their derivatives in stability analysis of time-delay systems: A survey. *International Journal of Systems Science*, 53(12):2480–2495, 2022.
- [83] Zhang Jin Zhang Heng, Peng Chen and Zhang Chu. Event-triggered control in networked control systems. A survey. In *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*, pages 3092–3097. *IEEE*, 2015.