

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE 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: Bounab Besma & Khoucha Tarek Nadhir

Thème:

**Commande en cascade en réseau robuste du système de turbine à gaz
sous Contraintes de communication et perturbations externes.**

Soutenu publiquement le : 09 / 07 / 2023 devant le jury composé de :

Président	Nafir NOURDDINE	U- 20 Août 1955-Skikda
Rapporteur	Mohamed ROUAMEL	U-20 Août 1955-Skikda
Examineur :	Kamel MENIGHED	U-20 Août 1955-Skikda
Examineur :	Fayçal BOURAHALA	U-20 Août 1955-Skikda

Promotion: 2022/2023

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, Je remercie Dieu qui nous a aidé à compléter ce mémoire.

puis Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à notre encadrants Dr. ROUAMEL MOHAMED pour nous 'avoir guidé et soutenu dans la préparation de ce travail ,Sa présence, ses commentaires et son engagement scientifique nous'ont beaucoup aidé tout le temps

De plus, je tiens également à remercier tous les enseignants qui nous ont fourni Outils nécessaires à la réussite de notre études de premier cycle.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude aux généreux parents pour avoir fourni les premières fondations Le soutien dont j'avais besoin pour nous rendre là où je suis maintenant.

Bounab Besma

Khoucha Tarek Nadhir

Abbreviations

BOZ	Bloquer d'Ordre Zéro
CPR	Compressor pressure ratio
fgc	Fuel gas critical values
igv	Inlet guide vane
LHV	Low heat value(MJ/kg)
LKF	Lyapunov Krasovskii Functionals
LMI	Linear Matrix Inequalities
NCS	
NCS	Networked Control Systems
OTC	Outlet temperature corrected (K)

Résumer :

le système de contrôle en réseau (NCSs) a été créé pour remplacer le contrôle traditionnel en raison de ses avantages telles que la réduction des coûts d'installation, une meilleure maintenabilité et une plus grande flexibilité, et parce que son application dans des domaines réels, comme chirurgie à distance, les Systèmes de transport intelligents et les smart grids il a reçu une grande attention, les entreprises industrielles se sont également empressés de l'appliquer à leurs systèmes complexes, comme les systèmes des turbines à gaz qui ont achevé un grand succès, Cependant, le contrôle des systèmes de turbines à gaz rencontre des problèmes tels que les retards et les pertes de paquets, ce qui peut dégrader les performances du système et entraîner une instabilité en boucle fermée, Dans ce contexte et pour répondre à ces questions, nous avons réalisé cette thèse où la principale contribution de cette thèse est basée sur la réduction de l'effet des imperfections induites par le réseau sur la stabilité du système turbine à gaz par le contrôle de la chambre de combustion et l'ajustement de la quantité de carburant et de gaz entrant dans la chambre, surveillant ainsi l'énergie générée par la turbine, dériver des conditions de stabilité robustes et moins conservatrices et synthétiser un nouveau contrôle robuste assurant la stabilité et les bonnes performances du système.

ملخص :

تم إنشاء نظام التحكم في الشبكة (NCSs) ليحل محل التحكم التقليدي بسبب مزاياه العديدة مثل تقليل تكاليف التثبيت، وزيادة قابلية الصيانة والمرونة، ولأنه حظي باهتمام كبير نظراً لتطبيقه في مجالات حقيقية مثل الجراحة عن بعد وانظمة النقل الذكية وشبكات الطاقة الذكية، لقد تسابقت الشركات الصناعية أيضاً لتطبيقه في أنظمتها المعقدة، مثل نظم التوربينات الغازية التي حققت نجاحاً كبيراً، ومع ذلك، يواجه التحكم في أنظمة التوربينات الغازية مشاكل مثل التأخير وفقدان البيانات، مما يمكن أن يؤدي إلى تدهور أداء النظام وبالتالي عدم استقرار الحلقة المغلقة في هذا الإطار و لمعالجة هذه المشاكل قمنا بإنجاز هذه الأطروحة اذ تعتمد المساهمة الرئيسية لهذه الأطروحة على تقليل تأثير العيوب التي تسببها الشبكة على استقرار نظام التوربينات الغازية من خلال التحكم في غرفة الاحتراق وضبط كمية الوقود والغاز التي تدخل الغرفة ، وبالتالي مراقبة الطاقة التي يولدها التوربين واشتقاق ظروف استقرار قوية وتوفير تحكم قوي جيد يضمن الاستقرار والأداء الجيد لنظام.

Abstract :

the networked control system (NCSs) has been created to replace the traditional control because of its advantages such as lower installation costs, better maintainability and greater flexibility, and because its application in real fields, such as remote surgery, intelligent transport systems and smart grids it has received great attention, industrial companies have also hastened to apply it to their complex systems, such as gas turbine systems which have achieved great success, However, the control of gas turbine systems encounters problems such as delays and packet losses, which can degrade system performance and lead to closed-loop instability. In this context and to answer these questions, we have carried out this thesis where the main contribution of this thesis is based on the reduction of the effect of the imperfections induced by the network on the stability of the gas turbine system by the control of the combustion chamber and the adjustment of the quantity of fuel and gas entering the chamber, thus monitoring the energy generated by the turbine, derive robust and less conservative stability conditions and synthesize a new robust control ensuring the stability and good performance of the system.

Sommaire

Remerciements	i
Abstract	v
Liste des figures	xi
1 Introduction générale	3
1.1 Revue historique	4
1.2 Notre contribution	8
1.3 Organisation du mémoires	8
2 Turbine a gaz et contrôle des systèmes sous réseaux de communication	11
2.1 Introduction du système de turbine à gaz	11
2.2 Les différentes parties du système turbine à gaz	12
2.2.1 Compresseur de lancement	12
2.2.2 Chambres de combustion	13
2.2.3 La section turbine	13
2.2.3.1 Corps de turbine :	14
2.2.3.2 Tuyère 1ère étage :	14
2.2.3.3 Tuyère 2ème étage :	15
2.2.3.4 Roues de turbine	15
2.2.4 Auxiliaires de la turbine :	16
2.3 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz	17
2.4 Domaines d'application de la turbine a gaz:	18
2.4.1 Domaines fixes (utilisation industrielle):	18
2.4.2 Domaines mobiles (aviation, maritime):	18

2.5	Différent type de turbine a Gaz	19
2.5.1	Selon le mode de construction:	19
2.5.1.1	La turbine à gaz à Mono-Arbre:	20
2.5.1.2	La Turbine à gaz Bi-Arbre :	20
2.5.2	Selon de mode de travail:	20
2.5.2.1	Turbine à action:	20
2.5.2.2	Turbine à réaction :	20
2.5.3	Selon le mode de fonctionnement thermodynamique:	21
2.5.3.1	Turbine à gaz à cycle fermé :	21
2.5.3.2	Turbine à gaz à cycle ouvert :	22
2.5.4	Selon de mode de production :	22
2.5.4.1	Les turbines à gaz simples :	23
2.5.4.2	Les turbines à gaz à cycle combiné :	23
2.5.4.3	Les turbines à gaz à récupération de chaleur :	23
2.5.4.4	Les turbines à gaz de petite taille :	23
2.5.4.5	Les turbines à gaz industrielles :	23
2.6	Avantages et Inconvénients des turbines à gaz:	24
2.6.1	Avantages:	24
2.6.2	Inconvénients:	24
2.7	La modélisation et les différentes boucles de contrôle dans le système de turbine à gaz	25
2.7.1	Boucle de contrôle de la combustion :	25
2.7.2	Boucle de contrôle de la température :	25
2.7.3	Boucle de contrôle de la pression :	25
2.7.4	Boucle de contrôle de la vitesse :	25
2.7.5	Outils de modélisation :	25
2.8	Développement du modèle de turbine à gaz	26
2.8.1	Modélisation de la turbine à gaz V94.2 (SGT5-2000E)	26
2.8.1.1	Modèle de compresseur	26
2.8.1.2	Modèle de vanne de régulation	28
2.8.1.3	Modèle de la chambre de combustion	29
2.8.1.4	Processus de refroidissement	30

2.8.1.5	Modèle de turbine	31
2.8.2	Turbomoteur GE T700	32
2.9	Introduction du contrôle des systèmes sur les réseaux de communication:	35
2.10	Aventages et inconvénients du contrôle sur les réseaux de communication:	36
2.11	Les composants de boucle de contrôle et l'architectures de contrôle sur	
	les réseau de communication	37
2.11.1	Les composants de boucle de contrôle en réseau de communication	37
2.11.1.1	Les capteurs:	37
2.11.1.2	Contrôleurs :	37
2.11.1.3	Bloquer d'Ordre Zéro (BOZ) :	38
2.11.1.4	Actionneurs :	39
2.11.1.5	Réseau de communication :	39
2.12	Les challenges induits par les réseau de communication:	41
2.12.1	simulation de retard de réseau indépendante	42
2.12.1.1	Délai induit par le réseau :	42
2.12.1.2	Modèle de délai mutuellement stochastique	43
2.12.1.3	Approche du système à retard d'entrée:	44
2.13	Techniques de contrôle robustes	45
2.13.1	H_{∞} control	46
2.13.2	Formulation du problème standard H_{∞}	46
2.14	Conclusion	48
3	Analyse de stabilité et conception de contrôle robuste des systèmes de tur-	
	bines à gaz contrôler sous réseau de communication	49
3.1	Introduction	49
3.2	Turbine a Gaz Cascade modèles	50
3.3	Principaux résultats	52
3.3.1	Stabilisation et Conception du contrôleur de retour d'état robuste	57
3.4	Simulation Numérique	59
3.4.1	Turbine à gaz V94.2 (SGT5-2000E)	59
3.4.1.1	Résultats de l'analyse de stabilité	61
3.4.1.2	Les résultats de conception de Contrôler	63
3.4.2	Turbo moteur GE T700	64

3.4.2.1 Résultats de l'analyse de stabilité	66
3.4.2.2 Les résultats de conception de Contrôler	67
3.5 Conclusion	69
References	73

Liste des figures

2.1	Forme générale d'une turbine à gaz [1].	12
2.2	exemple d'un compresseur axial [2].	13
2.3	La chambre de combustion d'un turbine à gaz [2].	14
2.4	La tuyère 1ère étage d'un turbine à gaz [5].	14
2.5	la Tuyère 2ème étage d'un turbine à gaz [5].	15
2.6	Les Roues de la turbine à gaz [5].	15
2.7	le Principe de fonctionnement de la turbine à gaz [60].	17
2.8	Application de turbine à gaz dans le domaine industrielle [8].	18
2.9	Application de turbine à gaz pour les machines entraînées (typiques) [5].	19
2.10	représente une turbine à gaz Turbine à gaz à un arbre et à deux arbres [5].	20
2.11	turbine à gaz à action [5].	21
2.12	turbine à gaz à réaction [9].	21
2.13	la différence entre un cycle fermé et un cycle ouvert de turbine à gaz [8].	22
2.14	schéma d'un turbines à gaz à cycle combiné [12].	24
2.15	schémas fonctionnel du système générateur de gaz/rotor en boucle ouverte [9].	33
2.16	le contrôle d'un système sur le réseau de communication [5].	35
2.17	Exemple d'un capteur de pression [9].	38
2.18	Exemple d'un Contrôleur industrielle [9].	38
2.19	Exemple d'une vanne de régulation pneumatique [9].	40
2.20	Structure directe d'une Ncs [2].	43
2.21	Formulation du problème standard H_∞ [4].	47
3.1	Commande cascade d'un turbine à gaz	50
3.2	Système de contrôle de turbine à gaz grande type V94.2 [30]	60

3.3 Trajectoires des États.	62
3.4 La perturbation externe $\omega(t)$.	62
3.5 Trajectoires des États.	63
3.6 La perturbation externe $\omega(t)$.	64
3.7 Système de contrôle du turbomoteur GE T700. [30]	65
3.8 Trajectoires des États de system 1.	66
3.9 Trajectoires des États de system 2.	67
3.10 La perturbation externe $\omega(t)$.	67
3.11 Trajectoires des États du système 1.	68
3.12 Trajectoires des États du système 2.	68
3.13 La perturbation externe $\omega(t)$.	69

Liste des Symboles

<i>Z</i>	Facteur de compressibilité
<i>W</i>	Puissance (MW)
<i>vt</i>	Valve throat
<i>vo</i>	Sortie de vanne
<i>valve</i>	Soupape de commande
<i>u</i>	Position de la tige de soupape
<i>turb</i>	Turbine
<i>temps</i>	Temperature
<i>T</i>	Temperature(C°)
<i>S</i>	Saturation
<i>pwr</i>	Puissance
<i>pos</i>	Position
<i>p</i>	Pression (kPa)
<i>p</i>	Pression constante
<i>n</i>	Valeur normale
<i>n</i>	Exposant de débit
<i>N</i>	Conditions normales
<i>L</i>	Coefficient
<i>K</i>	Coefficient
<i>gas</i>	Gaz chaud
<i>fric</i>	Friction
<i>flow</i>	Flux d'air
<i>f</i>	Couler

<i>ex</i>	Échappement
<i>eff</i>	Efficacité
<i>dis</i>	Décharge
<i>corr</i>	Correction
<i>cooling</i>	Air de refroidissement
<i>comp</i>	Compresseur
<i>chamber</i>	Chambre de combustion
<i>C</i>	Chaleur spécifique
<i>A/F</i>	Rapport air-carburant
τ	Constante de temps(s)
ρ	Densité spécifique(kg/m ³)
ω	Fréquence(rad/s)
γ	Le rapport des chaleurs spécifiques
η	Efficacité(%)
β	Facteur de correction
\dot{m}	Débit massique (kg/s)
\dot{q}	Taux de chaleur (W)
γ	Couple(N.m)
β	Facteur de correction
<i>p</i>	la pression
<i>v_i</i>	Valve inlet

Chapitre 1

Introduction générale

Les systèmes de contrôle classiques fournissent toutes les informations des capteurs à un emplacement central pour le traitement, les décisions sur la manière d'agir sont ensuite envoyées aux actionneurs. Dans cette configuration, tous les composants (contrôleurs, capteurs et actionneurs) sont généralement situés dans la même zone physique, et chacun d'eux est connecté séparément par un câblage électrique. Cette approche classique a été mise en œuvre avec succès dans l'industrie pendant des décennies. De nos jours la structure point à point classique répond à peine aux exigences de contrôle modernes telles que le contrôle décentralisé, le contrôle à distance, etc. Les réseaux de communication dans les systèmes de contrôle ont été une grande révolution, ils ont offert de nouveaux canaux pour échanger des données de contrôle entre les composants du système décentralisé, réduisant ainsi les coûts d'installation, de temps et de maintenance (en utilisant considérablement moins de fils, etc) et développant les capacités de l'ensemble du contrôle système. [23] [90]

En général, les systèmes de contrôle en réseau (NCS) Networked Control Systems sont des systèmes distribués dans l'espace où tous les composants de la boucle de rétroaction tels que les capteurs, les actionneurs et les contrôleurs sont connectés via un support de communication numérique en réseau limité. Ils ont attiré beaucoup d'attention, en particulier dans le domaine de l'industrie, en raison de nombreux avantages en termes de coût, de poids, d'installation et de maintenance. Ils ont été largement utilisés dans des systèmes de contrôle très complexes tels que les smart grids [6] [56], la robotique, les Systèmes de transport intelligents, les Systèmes de santé et également dans plusieurs systèmes industriels tels que les machines-outils, les systèmes de production automatisés et les turbines

à gaz qui ont achevé un grand succès. L'application du contrôle sous réseaux de communication sur les turbine à gaz est largement répandu.

Plus récemment, il a été appliqué à les systèmes de turbines à gaz où les turbines à gaz industrielles sont considérées comme l'un des moteurs principaux les plus importants largement utilisés pour produire de l'énergie et de l'électricité partout dans le monde, l'application de NCSs aux turbine à gaz est représentée par le contrôle de la chambre de combustion et l'ajustement de la quantité de carburant et de gaz entrant dans la chambre, surveillant ainsi l'énergie générée par la turbine, qu'il s'agisse d'énergie cinétique ou d'énergie thermique, et donc tous les fabricants de turbines cherchent à adopter le contrôle du réseau dans les systèmes de contrôle pour réduire le coût et l'effort de la maintenance [21].

Cependant, le contrôle sous réseaux de la turbine à gaz rencontré de nombreux problèmes en raison des défauts présents dans le réseau, tels que les retards et les pertes de paquets. Les performances de contrôle du système peuvent se dégrader et même conduire à une instabilité en boucle fermée, ou l'analyse de la stabilité des NCS est devenue l'un des sujets de recherche les plus difficiles pour de nombreux chercheurs.

1.1 Revue historique

L'histoire des systèmes de contrôle en réseau (NCS) remonte au début des années 1980, lorsque les chercheurs ont commencé à explorer l'utilisation des réseaux de communication numériques pour transmettre des signaux de contrôle entre une unité de contrôle et une station. Les premières stations de contrôle du réseau ont été mises en œuvre à l'aide de réseaux filaires, comme Ethernet et Token Ring [31, 71, 82]. Alors que le concept de NCS commençait à se développer en raison de son potentiel dans diverses applications, il a également posé de nombreux défis aux chercheurs pour obtenir un contrôle fiable et efficace. Ainsi, le domaine NCS a fait l'objet de recherches pendant des décennies et a donné lieu à de nombreux sujets de recherche importants. Une large branche de la littérature se concentre sur différentes stratégies de contrôle et cinématiques des actionneurs/véhicules adaptés au NCS [7, 22, 41, 83]. Un autre domaine de recherche important concernant NCS est l'étude de la structure de réseau nécessaire pour fournir un canal de communication fiable et sécurisé avec une bande passante suffisante, et le développement de protocoles

de communication de données pour les systèmes de contrôle [7], [39], [66], et parmi les travaux et les instituts et les laboratoires de recherche qui étudient la stabilité du NCS, nous mentionnons Les chercheurs commencent à identifier les principaux problèmes distinctifs du système de contrôle des réseaux, deux stratégies ont été classées pour résoudre ces problèmes dans NCS. Le premier s'appelle contrôle du réseau [36], qui se concentre sur les enquêtes sur les protocoles de communication et les qualités telles que les systèmes basés sur le réseau en temps réel ont de meilleurs environnements de réseau. Le second est appelé contrôle sur le réseau, qui se concentre sur les stratégies de contrôle sur les réseaux existants pour réduire l'impact des défauts non fiables générés par le réseau qui s'appuie sur les stratégies de contrôle du réseau existantes pour réduire l'impact des défaillances non fiables causées par les données du réseau qui se produisent lors de la transmission de l'usine distante au contrôleur ILC [20]. L'étude dans [91] étudie le problème de commande floue de rétroaction de sortie dynamique déclenchée par un événement adaptatif pour les NCS non linéaires soumis à la perte de paquets. Le contrôle prédictif du système de contrôle de réseau avec des abandons de paquets dans les canaux de retour et de transfert est présenté dans [64], introduisant une méthode de contrôle prédictif en réseau basée sur les données dans laquelle une séquence de prédictions d'incrément de contrôle est calculée dans le contrôleur, où le nombre de les abandons de paquets dans les deux canaux sont supposés être limités. Dans le cas où l'on considère deux imperfections induites par le réseau, il existe de nombreuses recherches dans la littérature, parmi lesquelles [49,70]], où dans les papiers [85,87], qui fait une étude de l'effet de l'erreur de quantification et la perte de paquets sur la stabilité des NCS sont traitées. Les auteurs dans [46] étudient le problème du contrôle de rétroaction de sortie H_∞ robuste basé sur l'observateur pour les systèmes de contrôle en réseau (NCS) avec des incertitudes aléatoires, une quantification dynamique et une perte de paquets, et Pour parvenir à des applications plus pratiques, plusieurs tentatives ont été faites pour aller au-delà des aspects théoriques de la recherche sur les NCCS, où Il a été appliqué à de nombreux systèmes industriels très complexes tels que les systèmes de turbines à gaz L'application de NCS sur les turbines à gaz est pour contrôler la combustion et ajuster la quantité de carburant et de gaz entrant dans la turbine. Cela permet de surveiller l'énergie générée par la turbine, qu'elle soit cinétique ou thermique. L'idée des turbines à gaz remonte à 1731, lorsque John Barber a proposé l'idée des turbines à air chaud. Le concept a été développé par Armangaud et Limal

en 1903-1905, avec l'utilisation d'un compresseur radial et d'une roue de turbine, ainsi qu'un refroidisseur d'eau pour produire de la vapeur supplémentaire. Sanford Moss a ensuite amélioré le système en pré-mélangeant la vapeur avec le flux de gaz pour éviter les chocs thermiques. Les idées d'Egidius Elling ont servi de base à la technologie moderne des turbines à gaz. Les premières turbines à gaz industrielles ont été construites en 1930, et la société Nuovo Pignone a commencé la production de turbines à gaz en 1961 en partenariat avec General Electric [21] [81] [51]. Dans ce contexte, certaines de ces études se sont concentrées sur la conception et l'application des NCCS aux systèmes de processus industriels. Les auteurs de [43] ont fait un contrôle H_∞ conçu pour les NCCS avec un retard incertain dans l'entrée de commande. Ils ont obtenu des conditions de stabilité pour un surchauffeur dans un système chaudière-turbine de centrale électrique, sur la base d'un modèle de données échantillonnées en temps discret, du théorème de Lyapunov et de la méthode d'inégalité matricielle linéaire (LMI). Les auteurs de [86] ont conçu un contrôleur de rétroaction d'état H_∞ pour un turbomoteur en utilisant un modèle de temporisation discret et une variable stochastique de Bernoulli pour afficher la perte de paquets aléatoire. Un système principal de contrôle de la température de la vapeur a été considéré comme exemple de simulation [26]. [26] a conçu un contrôleur de rétroaction de sortie ∞ pour un turbomoteur à l'aide d'un modèle à retard discret [48]. Xiaofeng et al. [86] ont conçu un contrôleur de rétroaction d'état ∞ pour un turbomoteur en utilisant un modèle de temporisation discret et une variable stochastique de Bernoulli pour afficher la perte de paquets aléatoire. Gu et al. [26] ont conçu une commande ∞ pour un NCCS avec des non-linéarités stochastiques, des défaillances d'actionneurs et un mécanisme adaptatif déclenché par un événement basé sur un modèle discret, et ont mis en œuvre les résultats pour un système chaudière-turbine. [47] ont utilisé un schéma de déclenchement hybride et ont conçu un contrôle ∞ pour un NCCS en tenant compte des saturations des actionneurs et des cyber attaques stochastiques. Un système de turbine à gaz a été considéré comme l'étude de cas. [29] a conçu un contrôle stochastique H_∞ à temps fini pour une classe de NCCS avec retards, perte de paquets et sous canaux limités. Ils ont utilisé un modèle en temps discret et une séquence blanche distribuée par Bernoulli et ont simulé les résultats pour un système chaudière-turbine de centrale électrique. [55] ont conçu un contrôle ∞ basé sur une analyse de passivité pour les NCCS en tenant compte des pertes de paquets aléatoires et des retards variant dans le temps à l'aide du théorème de Lya-

punov et d'un modèle discret. Ils [28] ont également étudié l'analyse de la délimitation et de la dissipativité en temps fini pour une classe de NCCS avec des retards temporels et des pertes de paquets stochastiques en utilisant le théorème de stabilité de Lyapunov et un modèle discret. Ils ont évalué les résultats à l'aide d'un système principal de température de la vapeur, Indépendamment des bonnes performances du plan basé sur des modèles en temps discret, la possibilité de perdre des informations sur les périodes d'échantillonnage reste un inconvénient majeur de la discrétisation classique. Cela peut également conduire à des systèmes compliqués en cas d'incertitudes et de non-linéarités dues à des retards importants ainsi qu'à des périodes d'échantillonnage variables dans le temps ou incertaines [32]. Cependant, étudier le NCS comme un système à temps continu dans de tels cas peut être une alternative plus appropriée, ce qui est également vrai pour les NCCS. En conséquence, diverses recherches ont été menées sur la base de modèles en temps continu. Santra et al. ont étudié l'analyse de passivité exponentielle pour un groupe de NCCS singuliers avec des retards variables dans le temps et des perturbations externes à l'aide de la fonction augmentée de Lyapunov-Krasovskii [73]. Murugesan et al. a conçu un contrôle dissipatif à déclenchement mixte pour un CCS singulier avec saturation des actionneurs et cyberattaques aléatoires [58]. Ils ont obtenu les résultats basés sur la théorie de Lyapunov-Krasovskii et l'approche LMI. Du et al. ont étudié la stabilité d'une classe de systèmes de contrôle en cascade singuliers avec des retards d'état et des perturbations [27]. Santra et al. a conçu un contrôle dissipatif tolérant aux pannes pour les NCCS singuliers avec différentiable et non différentiable retards variant dans le temps en utilisant la théorie de Lyapunov-Krasovskii [74]. Sakthival et al. étudié la commande tolérante aux pannes d'un NCCS singulier avec des pannes d'actionneurs aléatoires, incertaines retards et perturbations variables dans le temps utilisant un temps continu modèle [71]. De plus, il existe différentes techniques NCS proposées, qui pourraient être étendues pour NCCS pour analyser la stabilité et contrôler l'amélioration des performances. Il convient de noter que la conception du NCCS est toujours considérée comme un domaine de recherche ouvert, et selon les applications, des méthodes de modélisation innovantes pour les structures NCCS avec différentes positions de réseau peuvent être suggérées [42]. En raison de la configuration en cascade des boucles de régulation, l'analyse de la stabilité des NCCS serait un processus compliqué avec calculs lourds, qui peuvent causer des problèmes difficiles dans ce domaine, comme dans la mise en œu-

vre de Lyapunov-Krasovskii augmenté fonctionnelle (ALKF) ou envisageant des retards multiples [78].

1.2 Notre contribution

La conception de contrôle robuste des systèmes de contrôle en réseau des turbine a gaz (NCS) sous les contrainte du réseau et les perturbation externe est devenue un domaine d'étude crucial. Cependant, comme nous l'avons dit précédemment, la présence de retards induits par le réseau et les perturbation externe pose des défis importants à la stabilité et à l'efficacité de ces systèmes. les principales contributions de ce mémoire sont les suivantes :

- Obtenir une limite de retard induite par le réseau maximum admissible garantissant la stabilité et la stabilisation des turbine a gaz contrôler sous réseau. Nous avons utilisé l'idée d'aborder les NCS comme un système de données échantillonnées en construisant de nouveaux LKF comprenant des termes intégraux simples et doubles ainsi qu'un nouveau vecteur LKF augmenté, et également utilisé de nouveaux lemmes (Wirtinger et les lemmes réciproques étendus) pour estimer les dérivés du vecteur LKF que nous avons obtenus les conditions de calcul de stabilité et de contrôle.
- Obtenir un modélisation cascade du contrôle du combustions dans les chambre de combustion des différent type de turbine a gaz.
- Développer un contrôleur en réseau robuste contre les perturbation externe et ainsi améliorer la résilience du système contre les les perturbation externe.
- Vérifier la Condition obtenue sur le cas réel du système turbine a gaz contrôle en réseau.

1.3 Organisation du mémoires

Dans ce mémoire de recherche, nous abordons plusieurs chapitres qui couvrent divers aspects de l'analyse de stabilité et de la conception du contrôleur pour les systèmes de turbines à gaz en réseau soumis à des retards causés par des réseaux variant dans le temps et des perturbations externes. Dans le premier chapitre, nous introduisons le sujet en fournissant une introduction générale sur le système de contrôle en réseau et son application spécifique à la turbine à gaz. Nous discutons également de l'effet des perturbations sur les

systèmes industriels, soulignant l'importance d'un contrôle efficace pour maintenir des performances optimales. L'introduction est suivie d'une revue historique, où nous examinons l'évolution du contrôle de la turbine à gaz, en mettant l'accent sur le système de contrôle en réseau et le contrôle spécifique du système de turbine à gaz. Nous explorons les avancées passées et les différentes approches qui ont été utilisées, fournissant ainsi un contexte historique pour notre étude.

Le deuxième chapitre et début à une introduction détaillée du système de turbine à gaz. Nous examinons les différentes parties et composants du système, ainsi que les différents modèles et structures qui sont utilisés. De plus, nous discutons des différents modèle de chaque partie d'une turbine a gaz and boucles de contrôle qui sont mises en œuvre dans le système de turbine à gaz. Ensuite, nous allons passer à l'introduction du contrôle des systèmes sur les réseaux de communication. Nous analysons les avantages et les inconvénients de cette approche, ainsi que les composants de boucle de contrôle et les architectures spécifiques utilisées dans les systèmes de contrôle sur les réseaux de communication. Nous passons ensuite à la modélisation du retard induits par les réseaux de communication dans les systèmes de turbine à gaz. Nous examinons des aspects tels que la stabilité, et les performances de contrôle sous des réseaux de communication, en mettant en évidence les défis spécifiques auxquels les systèmes de turbine à gaz en réseau peuvent être confrontés. A la fin de cette chapitre nous avant introduire la technique du commande robuste H_∞ , leur définitions et représentation schématique et mathématique.

Dans Chapitre 3, nous allons proposer des condition de stabilité et de stabilisation à base des techniques de Lyapunov et le contrôle robuste avec H_∞ technique, en soulignant leur pertinence dans le contexte des systèmes de turbine à gaz en réseau. Nous explorons comment ces techniques peuvent être utilisées pour assurer la stabilité et les bonnes performances du système, en tenant compte des retards induit par le réseaux et des perturbations externes. En résumé, notre recherche vise à fournir de nouvelles conditions de stabilité et de conception du contrôleur pour les systèmes de turbines à gaz en réseau, afin de garantir leur stabilité et leurs performances face aux retards et aux perturbations externes.

Chapitre 2

Turbine a gaz et contrôle des systèmes sous réseaux de communication

Dans ce chapitre, nous abordons différents aspects liés aux systèmes de turbines à gaz. Nous commençons par une introduction du système de turbine à gaz, en expliquant ses différentes parties et leur fonctionnement. Ensuite, nous examinons les différents modèles et structures utilisés dans ces systèmes, ainsi que les techniques de modélisation et les boucles de contrôle associées. Par la suite, nous introduisons le contrôle des systèmes sur les réseaux de communication, en discutant de ses avantages et de ses inconvénients. Nous explorons également les composants de boucle de contrôle et les architectures de contrôle spécifiques utilisés dans les systèmes de turbines à gaz intégrés aux réseaux de communication

2.1 Introduction du système de turbine à gaz

Une turbine à gaz, ou plus exactement turbine à combustion (TAC) est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne [35]. Elle peut être considérée comme un système auto-suffisant. Sous sa forme la plus simple et comme représentée la figure 2.1, une turbine à gaz comprend un compresseur axial qui aspire l'air à la pression atmosphérique, une chambre de combustion, où l'air comprimé est réchauffé à pression constante par la combustion d'une certaine quantité de combustible (gaz naturel, gasoil ou kérosène) et enfin une turbine de détente des gaz jusqu'à l'air atmosphérique [40] [5]. Où, le rôle de turbine à gaz est de convertir l'énergie

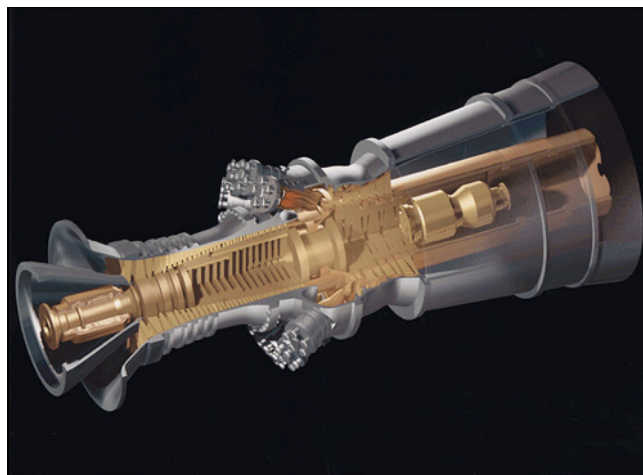


Figure 2.1: Forme générale d'une turbine à gaz [1].

thermique des gaz chauds en énergie mécanique sous forme de rotation. En ce jour les turbines à gaz jouent un rôle primordial dans le développement et le renforcement des capacités énergétiques de notre pays Elles sont utilisées dans la production de l'énergie électrique, aviation, traitement et transport des hydrocarbures et aussi dans l'industrie gazière, notamment la réinjection du gaz dans les gisements pétroliers et aussi pour l'entraînement des compresseurs centrifuges dans les stations de compression et du traitement du gaz naturel [75]. Les problèmes si que les turbomachines doivent travailler dans des conditions différentes en dehors de leur point de fonctionnement nominal et supporter des changements brutaux de conditions de fonctionnement. L'art de l'ingénieur consiste à trouver la solution optimale pour des exigences souvent contradictoires entre les paramètres aérodynamiques et structurels. L'ingénieur doit concevoir et dimensionner les éléments de la machine dans le but d'obtenir la meilleure performance avec des solutions de fabrication simples et économiques tout en garantissant la durée de vie et la fiabilité avec un minimum de risque [15].

2.2 Les différentes parties du système turbine à gaz

Un système de turbine à gaz se compose généralement des parties suivantes

Section compression, Section combustion , Section turbine et auxiliaires de la turbine.

2.2.1 Compresseur de lancement Le compresseur est de type axial du fait qu'il est capable de délivrer des débits d'air élevé, nécessaires pour obtenir une puissance

utile importante et cela dans un espace réduit. Il sert également à fournir une source d'air nécessaire pour refroidir les parois des directrices, des aubes et des disques de la turbine. En plus, le compresseur fournit de l'air pour le refroidissement de la turbine et pour l'étanchéité de l'huile de graissage des paliers [40]. Les composants principaux sont le rotor, Le stator, L'enveloppe d'admission, Le corps du compresseur, L'enveloppe d'évacuation du compresseur et Tubes d'interconnexion comme le figure 2.2 présente.

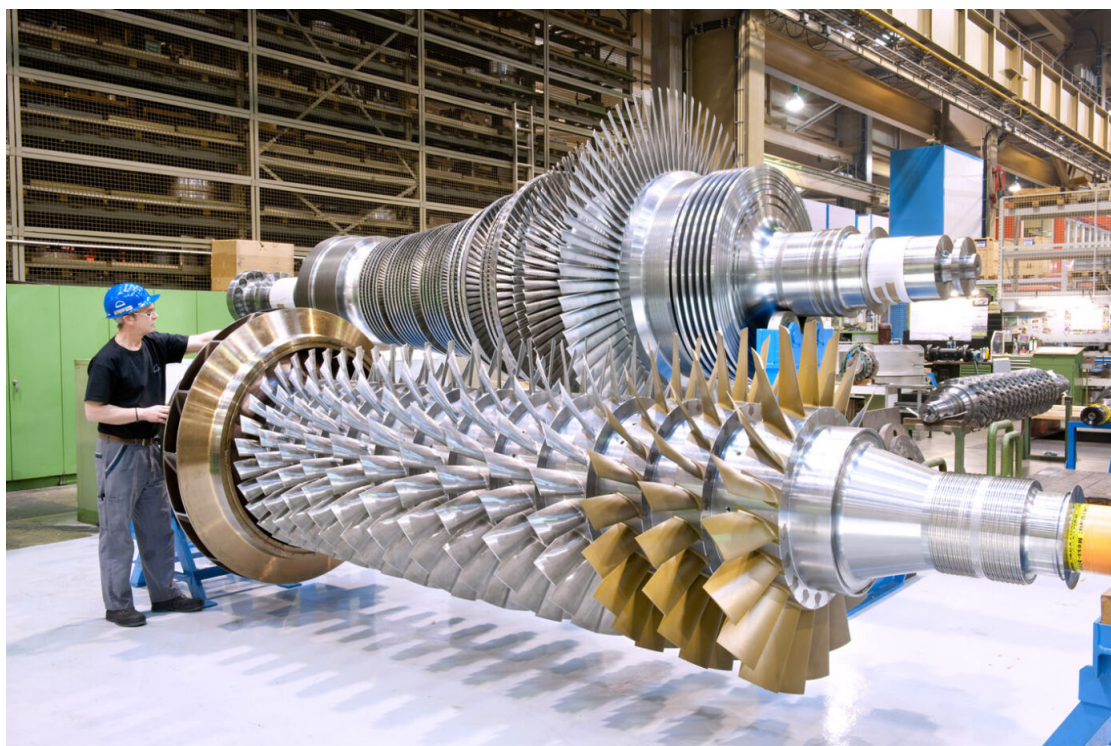


Figure 2.2: exemple d'un compresseur axial [2].

2.2.2 Chambres de combustion la figure 2.3 montre une vision sur la chambre de combustion d'un turbine où sa le rôle consiste à brûler un mélange de carburant et d'air et à délivrer les gaz issus de la combustion vers la turbine à des températures plus élevées. La température à l'entrée de la chambre de combustion dépend de la pression, de la charge et du type de moteur, en particulier pour les rapports de pression les plus bas [40] [67] [68]. Les conceptions des chambres des combustions se répartissent en trois catégories principales, Can-annulaire, Annulaire et la Chambre de combustion de type silo.

2.2.3 La section turbine est la partie où les gaz chauds venant de la section combustion sont convertis en énergie mécanique. Cette section comprend le Corps de

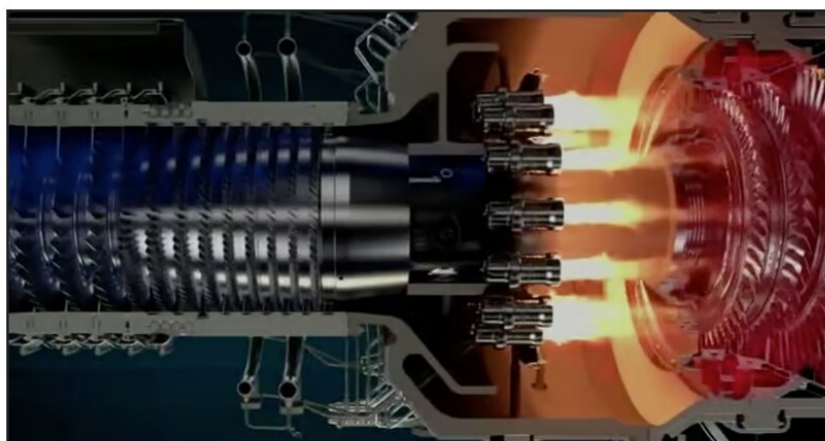


Figure 2.3: La chambre de combustion d'un turbine à gaz [2].

turbine, Tuyère 1ère étage, Tuyère 2ème étage (aubage réglable ou directrice), Roue de turbine 1ère étage (roue HP), Roue de turbine 2ème étage (roue BP).

2.2.3.1 Corps de turbine : C'est l'élément structurel principal de la turbine car il contient tous les organes qui constituent la voie d'écoulement des gaz depuis les chambres de combustion à travers les roues jusqu'à l'échappement.

2.2.3.2 Tuyère 1ère étage : Les gaz chauds à haute pression quittant les chambres de combustion passent par une pièce de transition et sont dirigés vers les aubes de la roue HP via la tuyère 1ère étage, est comme représente la figure 2.4 La tuyère comprend les segments d'aube directrice montés dans une bague de retenue, soutenue dans la veine des gaz chauds par un dispositif de fixation. Les tuyères sont soumises à des températures très élevées ce qui nécessite leur fabrication à partir d'alliages spéciaux, elles sont aussi refroidies avec de l'air de combustion [61] [62].

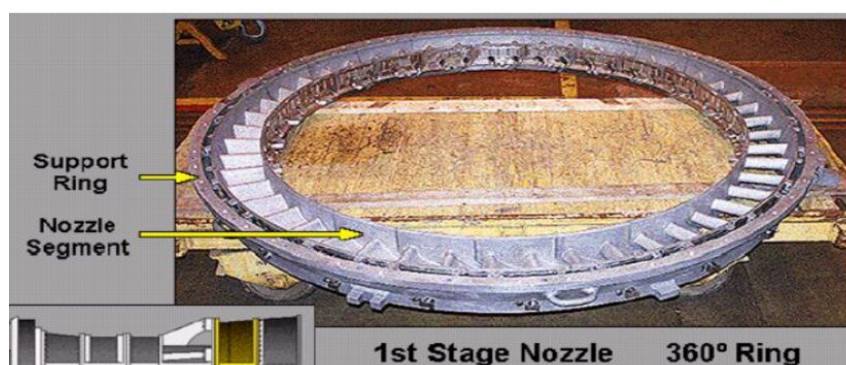


Figure 2.4: La tuyère 1ère étage d'un turbine à gaz [5].

2.2.3.3 Tuyère 2ème étage : La tuyère du second étage est comme illustré dans la figure 2.5 se compose d'aubes formant une directrice à angles variables dans l'espace circulaire de la veine des gaz chauds. Elle est insérée juste avant la roue BP. Ces aubes peuvent être variées en même temps grâce à un mécanisme qui comporte une bague de commande qui tourne sous l'action d'un cylindre hydraulique [61] [50].

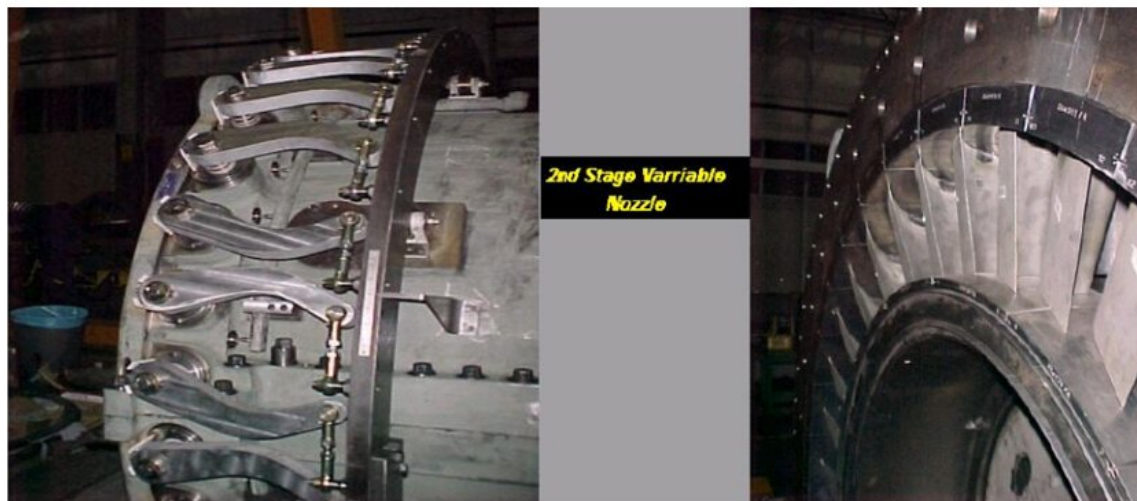


Figure 2.5: la Tuyère 2ème étage d'un turbine à gaz [5].

2.2.3.4 Roues de turbine comme montre la figure 2.6 La turbine comprend 2 roue HP et BP, la roue HP qui entraîne le compresseur axial et qui est directement boulonnée sur le demi-arbre arrière du rotor du compresseur de manière à former un rotor haute pression où est La roue HP (Haute Pression) est la première roue de la section de la turbine de la turbine à gaz. Elle est généralement exposée aux gaz à haute pression et à

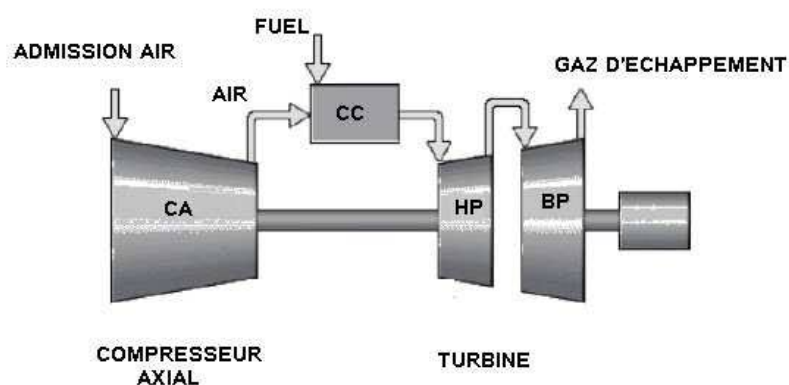


Figure 2.6: Les Roues de la turbine à gaz [5].

haute température provenant de la chambre de combustion. La roue HP est conçue pour convertir l'énergie thermique des gaz en énergie cinétique rotative. Elle est souvent de plus petite taille que la roue BP et tourne à des vitesses plus élevées. ,alors que La roue BP (Basse Pression) est la deuxième roue de la section de la turbine. Elle est généralement exposée aux gaz à une pression et une température moins élevées que la roue HP. La roue BP reçoit les gaz qui ont déjà été partiellement détendus par la roue HP. Son rôle principal est de poursuivre l'extraction de l'énergie des gaz et de la convertir en énergie mécanique rotative supplémentaire. La roue BP est généralement de plus grande taille que la roue HP et tourne à des vitesses plus basses,En combinant les roues HP et BP, la turbine à gaz est capable de maximiser l'efficacité de conversion de l'énergie thermique des gaz en énergie mécanique rotative. La rotation des roues HP et BP entraîne souvent un arbre de sortie commun, qui peut être utilisé pour entraîner divers équipements tels que des générateurs électriques, des compresseurs ou des pompes,Les 2 roues sont positionnées en ligne dans la turbine, mais sont mécaniquement indépendantes l'une de l'autre. Elles ont des aubes à queues longues coulées avec précision, et sont refroidies par l'air extrait du 10ème étage et par l'air de fuite d'étanchéité HP. Le volume de gaz augmente quand sa pression diminue en traversant la roue de turbine HP. Pour cela les pâles ou ailettes de la roue BP sont plus grandes que celles de la roue HP

2.2.4 Auxiliaires de la turbine : La turbine à gaz comprend un certain nombre de systèmes de commande, de protection et des auxiliaires associés au fonctionnement correct de la turbine. Les systèmes de commande comprennent généralement les dispositifs nécessaires à la commande de la turbine pour le démarrage normal, le fonctionnement et la mise en charge. Ils comprennent également les fonctions de commande de vitesse, de température, commande de lancement et commande de combustible [61]. Les systèmes de protection sont ceux nécessaires à assurer la protection pour un lancement et une mise à l'arrêt normaux ainsi qu'à éviter des incidents en cas de mauvais fonctionnement ou de conditions anormales ou d'urgence. Ces conditions anormales peuvent être le résultat d'un défaut mécanique ou d'une défaillance dans le système de commande. Ces systèmes comprennent, un système de gaz combustible, un Système d'huile de graissage, un Système d'huile hydraulique, un Système d'huile de commande, un Système d'huile d'étanchéité et un Système d'air d'étanchéité et de refroidissement.

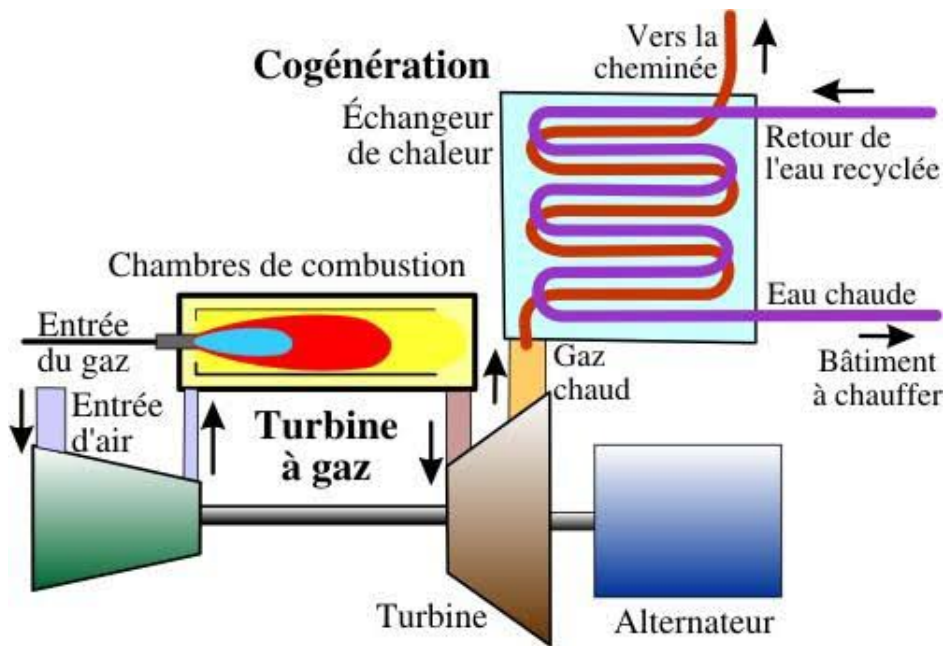


Figure 2.7: le Principe de fonctionnement de la turbine à gaz [60].

2.3 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz

La turbine à gaz fonctionne de la manière suivante : tout d'abord, le rotor du compresseur haute pression est initié à une vitesse de 20% à l'aide d'un dispositif de démarrage. Ensuite, de l'air atmosphérique est aspiré et comprimé par un compresseur axial. Ce dernier refoule l'air comprimé dans la chambre de combustion, où le combustible est introduit pour former un mélange d'air comprimé et de gaz sous pression. Ce mélange est ensuite acheminé vers la première roue de la turbine haute pression (HP), où l'énergie thermique des gaz chauds produits dans la chambre de combustion se transforme en énergie mécanique. Cette énergie mécanique fait tourner l'arbre de la turbine, fournissant ainsi l'énergie nécessaire à la compression de l'air par le compresseur directement relié à la section turbine. De plus, cette énergie mécanique est également utilisée pour alimenter une machine couplée, telle qu'un alternateur ou un compresseur centrifuge, permettant ainsi de générer de l'énergie utile [15] [67] [15] la figure 2.7 résume la fonctionnement d'un turbine a gaz [40].

2.4 Domaines d'application de la turbine a gaz:

Les turbines à gaz sont en effet largement utilisées dans de nombreux domaines, à la fois fixes et mobiles. Elles sont réputées pour leur efficacité énergétique élevée et leur flexibilité d'utilisation. Voici quelques informations supplémentaires sur leur utilisation dans les secteurs industriels, de l'aviation et maritime

2.4.1 Domaines fixes (utilisation industrielle): Les turbines à gaz ont une très grande utilité dans l'industrie du fait qu'elles sont des appareils pour la production de l'énergie mécanique, Elles peuvent être utilisées pour transmission électrique pour la production d'énergie électrique, Entraînement des compresseurs, Entraînement des pompes, entraînement des alternateurs et aussi pour un Procédés industriels particuliers [37] comme représente la figure 2.8.

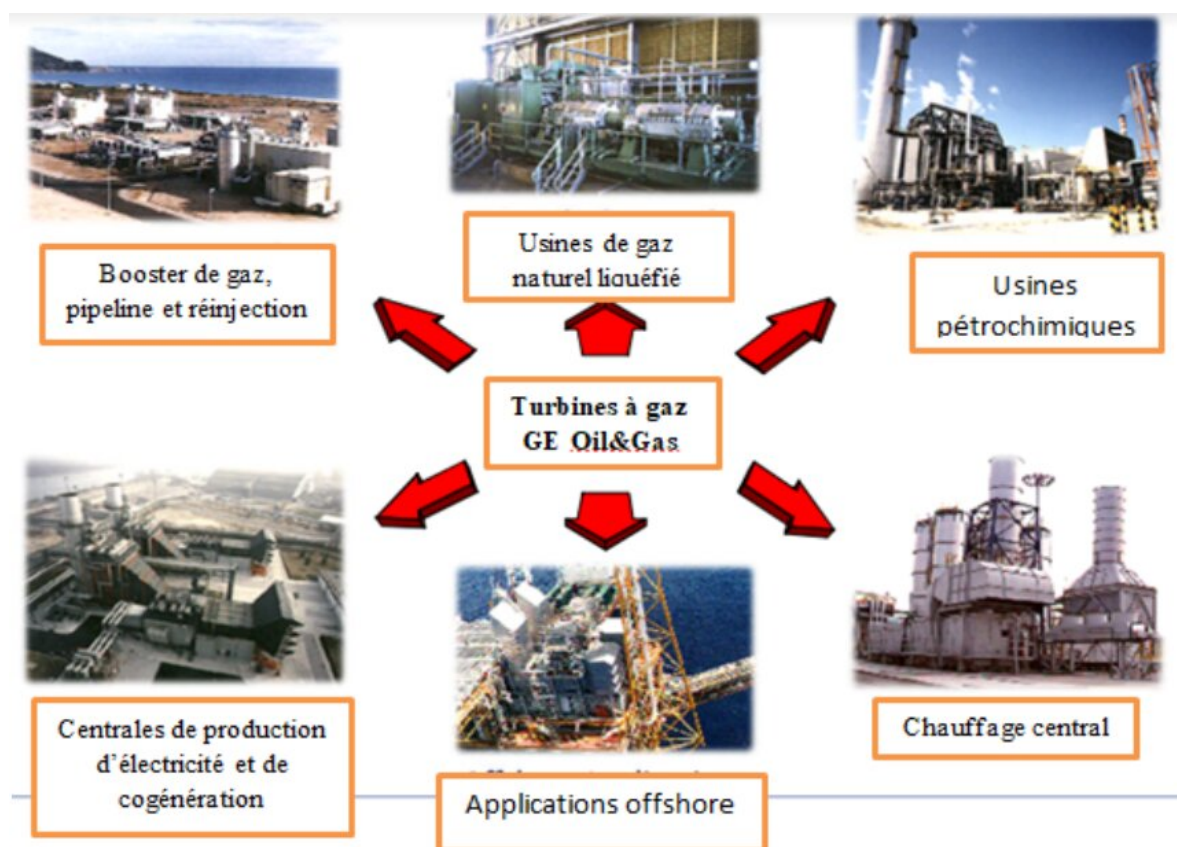


Figure 2.8: Application de turbine à gaz dans le domaine industrielle [8].

2.4.2 Domaines mobiles (aviation, maritime): Les turbines type aviation (turbo réacteur) également appelée turbine « jet », sa conception est différente de celle

des turbines industrielles. Ou il constituées d'un réacteur générateur de gaz chaud suivi d'une turbine de détente (en place de la tuyère) permettant de produire l'énergie mécanique, Il s'agit donc d'une turbine à 2 arbres utilisant les techniques aérodynamiques très répandues [61]. Ils comprennent aussi les domaines de chemins de fer et Traction routière comme représente la figure 2.9.

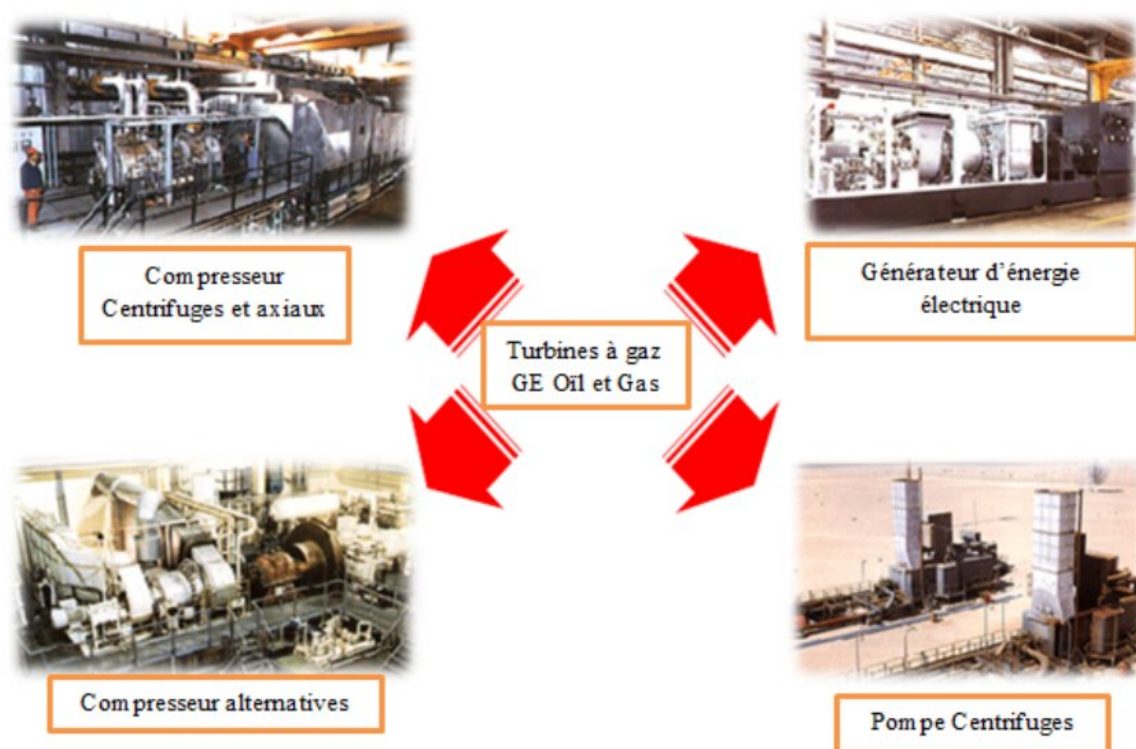


Figure 2.9: Application de turbine à gaz pour les machines entraînées (typiques) [5].

2.5 Différent type de turbine a Gaz

Parmi les divers types de turbines, qui sont classifiées en fonction de leur mode de construction ,de leur mode de travaille ,de leur mode de fonctionnement thermodynamique et de leur mode de production, nous avons présenté la comme suit:

2.5.1 Selon le mode de construction: on peut catégoriser les turbine a gaz selon le mode de construction en deux catégories,Les turbines à gaz à Mono-Arbre et Les Turbines à gaz Bi-Arbre.

2.5.1.1 La turbine à gaz à Mono-Arbre: Dans ces machines Le compresseur et les sections de la turbine se composent d'un seul rotor simple, où il est produit l'énergie pour entraîner le compresseur ainsi que l'énergie pour entraîner la charge Pour les machines qui fonctionnent à vitesse constante telle que les alternateurs les turbines à gaz à un seul arbre est aptes à l'entraînement, pour cela, ont utilisé dans la génération d'énergie électrique.

2.5.1.2 La Turbine à gaz Bi-Arbre : La turbine à gaz se compose de deux roues turbines indépendantes mécaniquement. La roue turbine HP, est rigidement raccordée au compresseur et l'entraîne. tandis que la roue BP deuxième étage sert à entraîner l'organe récepteur (ex : les compresseurs). Le but des roues turbines non reliés est de permettre aux deux roues de fonctionner à des vitesses différentes pour satisfaire aux exigences de charge variable de l'organe récepteur comme représente la figure 2.10 [60].

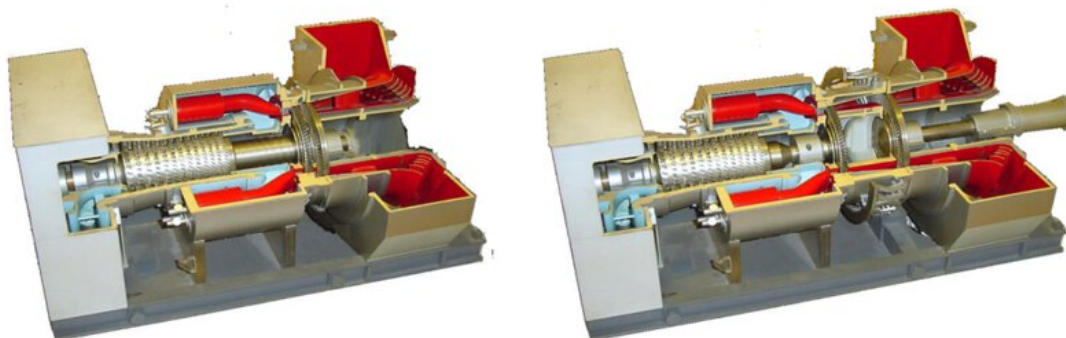


Figure 2.10: représente une turbine à gaz Turbine à gaz à un arbre et à deux arbres [5].

2.5.2 Selon de mode de travail: Selon le mode de travail, les turbines peuvent être classées en deux types la turbine à action et la turbine à réaction.

2.5.2.1 Turbine à action: Le principe de fonctionnement d'une turbine à action, est que la transformation thermodynamique du fluide se fait uniquement entre aubages fixes Où Les aubes mobiles ont un rôle à jouer, c'est de transformer l'énergie cinétique acquise par la détente en travail mécanique communiqué au rotor, L'évolution des gaz dans la roue se fait sans variation de pression statique.comme représente la figure 2.11

2.5.2.2 Turbine à réaction : La dilatation se produit dans les canaux fixes et mobiles des turbines à réaction, Où une partie de l'énergie thermique est transformée dans la roue



Figure 2.11: turbine à gaz à action [5].

en énergie cinétique et mécanique L'évolution des gaz dans la roue se fait avec variation de la pression statique [60] comme représente la figure 2.12.



Figure 2.12: turbine à gaz à réaction [9].

2.5.3 Selon le mode de fonctionnement thermodynamique: Selon le mode de fonctionnement thermodynamique, il existe deux différents types de turbines, sont couramment utilisés : la turbine à gaz à cycle fermé et la turbine à gaz à cycle ouvert.

2.5.3.1 Turbine à gaz à cycle fermé : Une turbine à gaz à cycle fermé est un type de turbine où l'air atmosphérique entrant dans le compresseur subit une augmentation de température et de pression, L'air comprimé à haute pression et température est ensuite dirigé vers un échangeur de chaleur où il est chauffé par une source externe [7] ensuite, cet air à haute pression et température est introduit dans la turbine pour subir une détente,

généralisant ainsi de la puissance. Dans ce type de turbine à gaz à cycle fermé, la puissance est produite grâce à l'expansion du fluide de travail à haute pression à travers la turbine. Contrairement aux turbines à gaz à cycle ouvert, le fluide de travail d'échappement n'est pas rejeté dans l'atmosphère. Au lieu de cela, il est refroidi dans une chambre de refroidissement, puis réacheminé pour un fonctionnement continu du système. Ce cycle est qualifié de "fermé" car le même fluide de travail est réacheminé vers le compresseur avant la fin du processus. [1]

2.5.3.2 Turbine à gaz à cycle ouvert : La turbine à gaz à cycle ouvert dont l'aspiration et le refoulement s'effectuent directement dans l'atmosphère, ce type de turbines qui est le plus répandu se divise en deux classes, turbine à cycle simple c'est une turbine utilisant un seul fluide pour la production d'énergie mécanique après la détente les gaz possédant encore un potentiel énergétique sont perdus dans l'atmosphère à travers la cheminée [67]. Turbine à cycle avec régénération, les pertes de chaleur causées par les gaz d'échappement sont les plus importantes dans l'installation de turbine à gaz. Pour cela le rendement des installations de turbine à gaz peut être augmenté, en conduisant les gaz d'échappement dans un échangeur thermique où ils réchauffent l'air sortant du compresseur avant son entrée dans les chambres de combustion. On récupère une partie de chaleur sensible de ces gaz qui se trouvait perdue dans l'atmosphère [76], comme représente la figure 2.13.

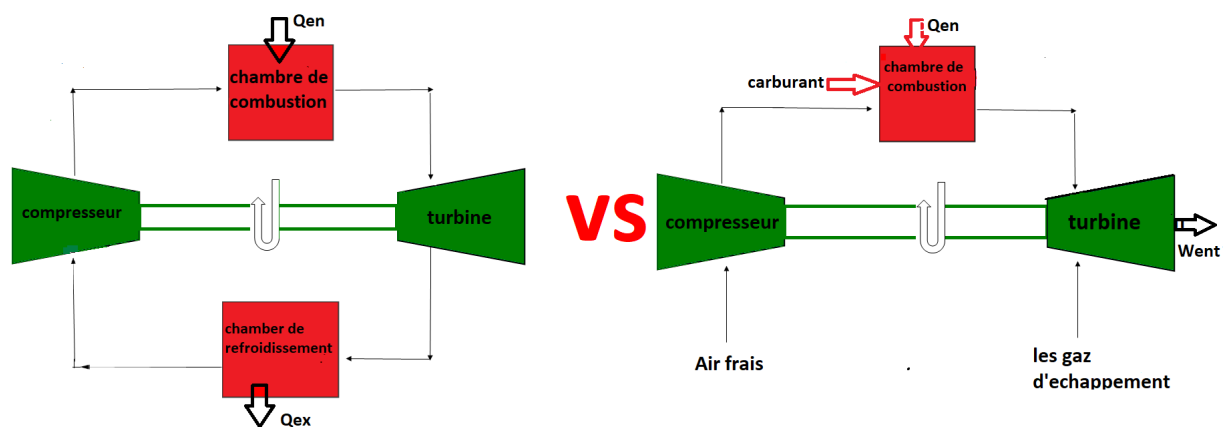


Figure 2.13: la différence entre un cycle fermé et un cycle ouvert de turbine à gaz [8].

2.5.4 Selon de mode de production : Selon le mode de production, les turbines à gaz se déclinent en différents types qui répondent à des besoins spécifiques Voici

quelques-uns des types couramment utilisés :

2.5.4.1 Les turbines à gaz simples : Les turbines à gaz simples, connues également sous le nom de turbines à gaz à cycle ouvert, sont des dispositifs de conversion d'énergie qui exploitent un cycle ouvert. Dans ce type de turbine, de l'air ambiant est aspiré et comprimé à haute pression dans le compresseur. Ensuite, du carburant est injecté et brûlé dans la chambre de combustion, générant ainsi des gaz chauds à température élevée. Ces gaz sont ensuite dirigés vers la turbine, où ils se détendent en passant à travers les pales, entraînant une rotation. La rotation de la turbine est utilisée pour entraîner un générateur ou une machine, produisant de l'électricité ou fournissant de l'énergie mécanique. Les gaz d'échappement sont ensuite rejetés dans l'atmosphère après avoir traversé la turbine. Les turbines à gaz simples sont couramment utilisées dans diverses applications telles que la production d'électricité, les centrales électriques, l'aviation, la marine et les véhicules terrestres à grande vitesse.

2.5.4.2 Les turbines à gaz à cycle combiné : Ce modèle de turbine à gaz utilise la chaleur résiduelle de la combustion pour produire de la vapeur, qui est ensuite utilisée pour alimenter une turbine à vapeur [76] [21]. Ce processus permet d'augmenter l'efficacité de la centrale électrique comme représentée la figure 2.14

2.5.4.3 Les turbines à gaz à récupération de chaleur : Ce modèle utilise la chaleur résiduelle de la turbine à gaz pour produire de la vapeur, qui est ensuite utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude [3].

2.5.4.4 Les turbines à gaz de petite taille : Ces turbines sont utilisées pour la production d'électricité dans des installations industrielles de petite taille, ainsi que pour la co-génération et la production de chaleur à haute température pour les processus industriels

2.5.4.5 Les turbines à gaz industrielles : Ces turbines sont utilisées dans l'industrie pétrolière et gazière pour la compression de gaz naturel et le pompage de pétrole, ainsi que pour la production d'électricité dans les centrales électriques de secours.

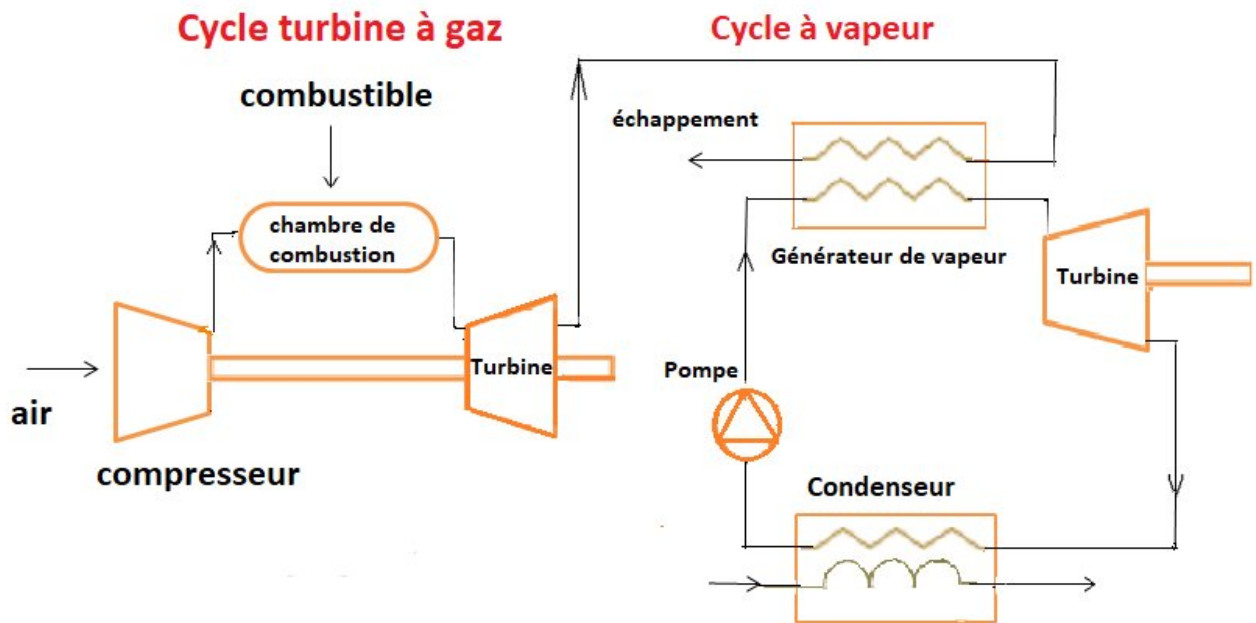


Figure 2.14: schéma d'un turbines à gaz à cycle combiné [12].

2.6 Avantages et Inconvénients des turbines à gaz:

Les turbines à gaz sont des dispositifs mécaniques largement utilisés dans divers domaines. Elles sont connues pour leurs nombreux avantages, mais elles présentent également certains inconvénients. Nous le résumons ci-dessous.

2.6.1 Avantages: Facile à installer, elle fonctionne avec différents types de carburant, La sécurité de fonctionnement est très élevée, Facile à maintenir, Mise en marche rapide, Amélioration du rendement et suppression du fluide intermédiaire et aussi la Génération simultanée d'électricité et de chaleur utilisable soit directement, soit indirectement dans les procédés industriels.

2.6.2 Inconvénients: Inapproprié aux faibles puissances, le Coût de fabrication élevé, La pression de travail est Faible, la Consommation de carburant constamment élevée, Elle est Bruyante et aussi il y a une Difficulté d'obtenir des matériaux résistants aux hautes températures.

2.7 La modélisation et les différentes boucles de contrôle dans le système de turbine à gaz

La modélisation et les boucles de contrôle sont des éléments cruciaux dans le fonctionnement efficace d'un système de turbine à gaz, Voici une liste des principales boucles de contrôle et des outils de modélisation utilisés dans les systèmes de turbine à gaz:

2.7.1 Boucle de contrôle de la combustion : Ce système de contrôle utilise des capteurs pour mesurer la température de la chambre de combustion et ajuste la quantité de carburant injecté afin de maintenir une combustion efficace et stable. Il peut également être utilisé pour régler la quantité d'air aspiré par le compresseur en vue d'optimiser la combustion.

2.7.2 Boucle de contrôle de la température : Ce système de contrôle utilise des capteurs pour mesurer la température de la turbine et le régule la quantité d'air de refroidissement pour maintenir la température à un niveau optimal et le empêche les dommages causés par la chaleur.

2.7.3 Boucle de contrôle de la pression : Ce système de contrôle utilise des capteurs pour mesurer la pression de l'air aspiré et ajuste la vitesse du compresseur pour maintenir la pression à un niveau optimal pour la combustion chaleur.

2.7.4 Boucle de contrôle de la vitesse : Ce système de contrôle utilise des capteurs pour mesurer la vitesse de la turbine et ajuste la quantité de carburant injecté pour maintenir une vitesse constante et optimale. [44]

2.7.5 Outils de modélisation : des outils de modélisation tels que Les simulations de dynamique des fluides (CFD) sont utilisées pour modéliser le fonctionnement d'un système de turbine à gaz et optimiser son efficacité. Ces modèles peuvent être utilisés pour simuler les flux d'air et de gaz à travers divers composants d'une turbine à gaz, ainsi que pour prédire l'impact des modifications de conception sur les performances de la turbine. [33]

2.8 Développement du modèle de turbine à gaz

Le modèle de turbine à gaz V94.2 (SGT5-2000E) est une turbine développée par General Electric (GE) qui est couramment utilisée dans l'industrie de la production d'électricité, Elle est également connue sous le nom de turbomoteur GE T700 dans le domaine de l'aviation. Cette turbine à gaz est appréciée pour ses performances élevées et sa fiabilité.

2.8.1 Modélisation de la turbine à gaz V94.2 (SGT5-2000E) : Dans cette section, chaque composant de la turbine à gaz est modélisé individuellement. Ensuite, ils sont combinés pour former le modèle de l'unité de turbine à gaz.

2.8.1.1 Modèle de compresseur IGV est le principal mécanisme de contrôle du débit massique entrant dans la section de compression. À la position minimale des IGV, indiquée par "0", environ 70% du débit d'air nominal est autorisé à entrer dans le compresseur. Cette valeur peut varier en fonction des conditions environnementales et est réglée individuellement par le fabricant pour chaque turbine [18]. Le débit d'air de compression peut être obtenu comme suit

$$\dot{m}_{comp} = \dot{m}_{comp,corr} f(x) = (0.7 + 0.3 * x * \exp^{-L_{ign} S}) \quad (2.1)$$

La quantité d'air traversant la section de compresseur peut être obtenue par l'équation (2.1), dans laquelle le débit massique est lié à la différence de pression entre son entrée et sa sortie.

$$\dot{m}_{comp,corr} = k \frac{k_{comp}}{\sqrt{T_{comp,in}}} \sqrt{\frac{p_{comp,dis} - p_{comp,in}}{\rho_{air}}} \left(\frac{1}{\tau_{com,flow} S + 1} \right) \quad (2.2)$$

Le coefficient K_{comp} est un paramètre inconnu pour calculer le débit de refoulement du compresseur ($a_0 = K_{comp}$). Ce paramètre ne peut pas être estimé tant que toutes les équations de bilan de masse et d'énergie ne sont pas définies. Dans l'équation (2.2), le facteur de correction K a été pris en compte pour traiter les variations de température et de pression d'entrée par rapport aux conditions standard ainsi que la vitesse de rotation du compresseur par rapport à la valeur nominale qui a été définie dans [45].

$$K = \left(\frac{p_{comp,in}}{p_{iso}} \right) \left(\frac{T_{iso}}{T_{comp,in}} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (2.3)$$

Les variations de vitesse de rotation du rotor peuvent également affecter indirectement les performances du compresseur en modifiant le couple du compresseur alors que la charge est constante [63]. Le couple du rotor, Γ , peut être obtenu en fonction de la fréquence du rotor et de la puissance mécanique, comme $W_{comp} = \omega\Gamma$. Le rapport de pression du compresseur, CPR, a été défini comme une fonction du couple appliqué à son rotor, Γ , comme suit

$$CPR = a_1 \left(\exp^{-L_{CPR} S} \gamma \right)^{b_1} \left(\frac{T_{iso}}{T_{comp.in}} \right) \quad (2.4)$$

où a_1 et b_1 sont des paramètres inconnus, qui seront obtenus par une optimisation GA basée sur des données expérimentales provenant d'un système réel. Les effets des variations de température ont également été pris en compte par un facteur de correction. La température de sortie de la section compresseur peut être calculée comme suit

$$T_{comp.dis} = T_{comp.in} \left(1 + \frac{1}{\eta_{comp}} \left(\left(\frac{p_{comp.dis}}{p_{comp.in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right) \left(\frac{-L_{comp,temp} S}{\tau_{comp,temp} S + 1} \right) \quad (2.5)$$

En déviant les conditions de fonctionnement des conditions nominales, l'efficacité du compresseur axial tombe en dessous de l'efficacité nominale [24] [16]. L'efficacité du compresseur est une fonction non linéaire du rapport de pression du compresseur et de la vitesse non dimensionnelle du rotor [2]. Une équation a été proposée pour calculer l'efficacité du compresseur, η_{comp} , en fonction de CPR, de sorte que les réponses du modèle de température du compresseur dans l'équation (2.5) ont été ajustées sur les réponses transitoires du système réel.

$$\eta_{comp} = \left(a_2 (CPR)^{b_2} \exp(-c_2 * CPR) \right) \left(\frac{T_{iso}}{T_{comp.in}} \right)^{0.5} \left(\frac{1}{\tau_{comp,eff} S + 1} \right) \quad (2.6)$$

dans lequel a_2 , b_2 et c_2 sont des paramètres inconnus. La consommation d'énergie de la section compresseur a été calculée comme la différence entre l'énergie thermique d'entrée et de sortie, comme suit :

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_{comp} * \left(c_p (T_{comp.dis}) \cdot T_{comp.dis} - c_{p,wet} (T_{comp.in}) \cdot T_{comp.in} \left(\frac{1}{\tau_{comp,pwr} S + 1} \right) \right) \quad (2.7)$$

La valeur de la chaleur spécifique a été calculée pour l'air sec et l'air humide à la sortie et à l'entrée de la section compresseur, respectivement [10]. Les valeurs de la chaleur

spécifique peuvent être estimées sur la base de corrélations précises en fonction de la température et de l'humidité [19] [77].

2.8.1.2 Modèle de vanne de régulation Malgré le comportement non linéaire et compliqué des vannes de contrôle, dans de nombreuses études, les actionneurs et les vannes de contrôle sont présentés uniquement sous forme de diagrammes de blocs simples avec des réponses linéaires [79]. Afin d'estimer la quantité précise de chaleur libérée dans chaque chambre de combustion, il est nécessaire de connaître la pression exacte du gaz combustible et le débit avant les brûleurs. Le débit du gaz combustible peut être obtenu en considérant la vanne de contrôle comme une buse isentropique [80]. Nous avons

$$\dot{q}_{fg} = y_{valve} k_{valve} \left(\frac{1}{\tau_{fg} s + 1} \right) \sqrt{\frac{\gamma}{1 - \gamma} \frac{p_{vi}}{\rho_{fg}} \left(\left(\frac{p_{vt}}{p_{vi}} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_{vt}}{p_{vi}} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)} \quad (2.8)$$

Pour les vannes avec un rapport de pression élevé de p_{vo}/p_{vi} , le rapport de pression de la gorge (p_{vt}/p_{vi}) peut être obtenu comme suit [80],

$$\frac{p_{vt}}{p_{vi}} = \frac{1}{\vartheta_{fric}^2} \left(\frac{p_{vo}}{p_{vi}} - 1 \right) + 1 \quad (2.9)$$

Les vannes de contrôle utilisées dans ce modèle de turbine à gaz sont des vannes de type à pourcentage égal. Les données expérimentales des réponses des vannes de contrôle montrent que les variations de rapport de pression sont proportionnelles à la position de la vanne. Dans les vannes à pourcentage égal, la relation entre la position de levée de la vanne et l'ouverture de la vanne est obtenue comme suit [80]

$$y_{valve} = R_{valve}^{(u_{pos} * e^{-L_{pos} s - 1})} \quad (2.10)$$

En conditions nominales / à pleine charge, les vannes de contrôle installées sur ce type de turbine ne sont ouvertes qu'à 65% . Une fois ouverte, le débit de gaz commence à augmenter. Ainsi, cela provoque une augmentation de pression après la vanne de contrôle et, par conséquent, il y a une chute de pression considérable dans la conduite de gaz principale avant la vanne de contrôle (pression d'entrée de la station de régulation, p_{skid}) [57] . Une relation générale pour estimer le débit de gaz passant à travers une conduite est présentée dans l'équation (2.11). Cette relation peut être réécrite pour estimer les

changements de pression dans la conduite comme suit,

$$\dot{q}_{fg}^n = k_f \sqrt{\frac{p_{fg0}^2 - p_{skid}^2}{Z_{fg} T_{fg}}} \Rightarrow p_{skid} = \sqrt{p_{fg0}^2 - \exp^{-L_{fg}s} \dot{q}^n K_f^{-1} \sqrt{Z_{fg} T_{fg}^2}} \quad (2.11)$$

Le facteur de compressibilité du gaz combustible peut être obtenu en fonction de la pression réduite (p_{fg}/p_{fgc}) et de la température réduite (T_{fg}/T_{fgc}) comme suit [72],

$$Z_{fg} = 1 + 0.257 \left(\frac{p_{fg}}{p_{fgc}} \right) - 0.533 \left(\frac{p_{fg}}{p_{fgc}} \right) \left(\frac{T_{fgc}}{T_{fg}} \right) \quad (2.12)$$

Comme les vannes de régulation sont complètement fermées, la pression de la conduite de carburant p_{fg0} est d'environ 2200 kPa. Les paramètres $a_3 = K_{valve}$, $b_3 = \vartheta_{fric}$, $c_3 = K_f$, $d_3 = R_{valve}$ et $e_3 = n$ sont des paramètres inconnus qui devraient être définis en fonction des données expérimentales.

2.8.1.3 Modèle de la chambre de combustion Environ 92% du débit d'air total provenant de la section compresseur entre dans la chambre de combustion où la chaleur dégagée par la combustion du carburant est transférée au fluide de travail [5]. Le bilan thermique pour le processus de combustion peut être exprimé comme suit [17],

$$\tau_{comp} \dot{m}_{comp} C_{p,gas} (T_{comp}) \frac{dT_{comp}}{dT} = \dot{m}_{air} T_{air} C_{p,air} (T_{air}) + \dot{m}_{fg} T_{fg} C_{p,fg} (T_{fg}) + \dot{q}_{fuel} - \dot{m}_{comp} T_{comp} C_{p,gas} (T_{comp}) \quad (2.13)$$

dans lequel

$$\dot{m}_{comp} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fg} \quad (2.14)$$

donc, on a

$$T_{comp} = \frac{\dot{m}_{air} T_{air} C_{p,air} (T_{air}) + \dot{m}_{fg} T_{fg} C_{p,fg} (T_{fg}) + \dot{q}_{fuel}}{\dot{m}_{comp} C_{p,gas} (T_{comp}) (\tau_{comp} s + 1)} \quad (2.15)$$

Pour une grande chambre de type silo, la constante de temps τ_{comb} peut être considérée comme le temps requis pour remplir la chambre. En raison des variations de pression et de température des gaz, la masse totale à l'intérieur de la chambre de combustion peut changer. Pour résoudre ce problème, un facteur de correction est pris en compte et la relation pour estimer la constante de temps est modifiée comme suit [17],

$$\tau_{comp} = \frac{M_{chamber}}{\gamma \dot{m}_{ngas}} = \frac{V_{chamber}}{\gamma \dot{m}_{ngas}} * \rho_{gas} * \left(\frac{p_{chamber}}{p_{chamberN}} \right) \left(\frac{T_{chamberN}}{T_{chamber}} \right) \quad (2.16)$$

La chaleur dégagée par la combustion du carburant peut être obtenue à partir de l'équation

$$\dot{q}_{fuel} = \dot{q}_{fg} \rho_{fg} \eta_{comp} \frac{LHV}{1 + A F} \quad (2.17)$$

La densité réelle du gaz combustible devrait être estimée afin de calculer la chaleur libérée par la combustion, qui peut être affectée par la pression, la température et la compressibilité du gaz.

$$\rho_{fg} = \left(\frac{p_{fg}}{p_{fgN}} \right) \left(\frac{T_{fgN}}{T_{fg}} \right) \left(\frac{Z_{fgN}}{Z_{fg}} \right) \rho_{fgN} \quad (2.18)$$

2.8.1.4 Processus de refroidissement L'air nécessaire au processus de refroidissement est fourni par un compresseur qui représente souvent une partie importante du débit massique de la turbine [54] [38]. Le débit d'air de refroidissement maximal pour la turbine V94.2 est d'environ 3% du débit massique global pour chaque processus de refroidissement. Cependant, la quantité d'air fournie pour le processus de refroidissement dépend de la charge et peut varier de 0,5 à 3% à mesure que la charge est augmentée de la charge partielle à la charge complète. Le processus de mélange pour les gaz chauds et le flux d'air de refroidissement pour estimer la température des gaz à l'entrée et à la sortie de la section de turbine peut être exprimé comme suit [17],

$$T_{turb,in} = \frac{\dot{m}_{comp} c_{p,gas} (T_{comp}) T_{comp} + \dot{m}_{cooling,1} c_{p,air} (T_{cooling,1}) T_{cooling,1}}{(\dot{m}_{comp} + m_{cooling,1}) c_{p,gas} (T_{turb,in}) (\tau_{cooling,1} s + 1)} \beta_{cooling,1} \quad (2.19)$$

$$T_{turb,ex} = \frac{\dot{m}_{turb,out} c_{p,gas} (T_{turb,out}) T_{turb,out} + \dot{m}_{cooling,2} c_{p,air} (T_{cooling,2}) T_{cooling,2}}{(\dot{m}_{turb,out} + m_{cooling,2}) c_{p,gas} (T_{turb,ex}) (\tau_{cooling,2} s + 1)} \beta_{cooling,2} \quad (2.20)$$

Les expériences montrent qu'à faible charge, la température des gaz chauds avant et après la section de turbine est respectivement d'environ 80(K) plus élevée et de 75(K) plus basse que les valeurs qu'elles devraient avoir afin de correspondre aux réponses de puissance générées sur les données expérimentales. Ces écarts dépendent des temps de résidence des gaz chauds à chaque section, qui pourraient être considérés comme la fonction du débit d'air. Lors du premier processus de refroidissement, en raison de faibles débits, les gaz chauds restent plus longtemps autour des pales de turbine tandis que le transfert de chaleur vers l'échappement de la turbine est faible. Malgré le faible débit de carburant, la température d'entrée de la turbine augmente et la température de sortie diminue. Pour

faire face à ces conditions, le facteur de correction $\beta_{cooling}$ refroidissement est défini en fonction du débit d'air

$$\beta_{cooling,i} = f(\dot{m}_{hotgas}) \quad (2.21)$$

Les fonctions permettant d'estimer le débit d'air de refroidissement (qui a été considéré identique pour le stator et le rotor) ainsi que les fonctions de correction permettant de compenser les effets du débit d'air sur les températures de la turbine sont les suivantes :

$$\dot{m}_{cooling} = \dot{m}_{comp} * (a_4 + b_4 * \dot{m}_{comp}) 0.5 \sim 3\% \text{ of } \dot{m}_{comp} \quad (2.22)$$

$$\dot{m}_{air} = \dot{m}_{comp} * (a_5 + b_5 * \dot{m}_{comp}) 97 \sim 92\% \text{ of } \dot{m}_{comp} \quad (2.23)$$

$$\beta_{cooling,1} = a_6 + b_6 * \dot{m}_{comb} 80K \sim 55K \quad (2.24)$$

$$\beta_{cooling,2} = a_7 + b_7 * \dot{m}_{turb,in} - 77K \sim 0K \quad (2.25)$$

Pour les processus de refroidissement 1 et 2, nous avons,

$$m_c = \dot{m}_{comp} + \dot{m}_{cooling1} \quad (2.26)$$

$$m_{turb,ex} = \dot{m}_{m_{turb,in}=\dot{m}_{comp}+\dot{m}_{cooling1}} + \dot{m}_{cooling2} \quad (2.27)$$

Les paramètres a_4 à a_7 et b_4 à b_7 sont inconnus et doivent être obtenus par optimisation.

2.8.1.5 Modèle de turbine Les gaz chauds des deux chambres de combustion, après le premier processus de refroidissement (la température $T_{turb,in}$ est d'environ 1352 K), se dirigent vers la section de turbine, se dilatent et libèrent l'énergie thermique pour la génération d'énergie. La température de sortie de la section de turbine peut être estimée par l'équation (2.28).

$$T_{turb,out} = T_{turb,in} \left(1 - \eta_{turb} \left(1 - \left(\frac{p_{turb,in}}{p_{turb,out}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \right) \left(\frac{1}{\tau_{turb,out} s + 1} \right) \quad (2.28)$$

La température de sortie de la turbine est mesurée par six capteurs montés à 360° degrés autour de la section transversale circulaire de la turbine, mais aucun d'entre eux ne montre les mêmes valeurs. Pour résoudre ce problème, la température de sortie corrigée (connue sous le nom de OTC) est définie comme la différence entre la moyenne de toutes

les valeurs de température mesurées et λ en fonction de la température d'entrée du compresseur et de la vitesse de rotation de la turbine, comme suit [18],

$$OTC = (T_{turb,ave} - \lambda(T_{comp,in}, \omega)) + 273.15 \quad (2.29)$$

dans lequel toutes les températures doivent être exprimées en "C°". Les plages de variation de l'efficacité de la section turbine, contrairement à la section compresseur, sont très limitées. Il convient de noter que l'efficacité de la turbine à gaz varie en fonction du rapport de pression et de la vitesse sans dimension du rotor; cependant, à la vitesse de rotation nominale, il existe une relation presque linéaire entre l'efficacité et le rapport de pression [69]. Ainsi, lorsque la turbine fonctionne à sa vitesse de rotation nominale, l'efficacité de la turbine peut être considérée comme une fonction linéaire du rapport de pression avec un facteur de correction sur la fréquence, comme suit

$$\eta_{turb} = \left(a_8 + b_8 * \left(\frac{p_{turb,in}}{p_{turb,out}} \right) \left(\frac{1}{\tau_{turb,eff}^s + 1} \right) \right) * \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (2.30)$$

où a_8 et b_8 sont des paramètres inconnus. Le deuxième processus de mélange entre l'air de refroidissement du rotor et les gaz chauds de sortie de la turbine se produit après la section de la turbine lorsque la température des gaz ($T_{turb,ex}$) atteint environ 820(K) en conditions de pleine charge. En estimant la température d'échappement de la turbine, il est possible de trouver la puissance générée, comme suit comme représente la figure 2.15

$$\dot{W}_{turb} = (\dot{m}_{turb,in} C_p (T_{turb,in}) T_{turb,in} - \dot{m}_{turb,ex} C_p (T_{turb,ex}) T_{turb,ex}) \left(\frac{1}{\tau_{turb,gen}^s + 1} \right) \quad (2.31)$$

2.8.2 Turbomoteur GE T700 dans ce sous-section on utilisé un Turbomoteur GE T700. La figure 2.15 montre le diagramme simplifié. Les entrées du générateur de gaz étaient la valeur de consigne de la vitesse de la turbine de puissance, N_p , et le débit de carburant, W_F . Les sorties étaient la vitesse du générateur de gaz, N_G , le couple moteur transmis par l'arbre de la turbine de puissance, Q_S , la pression de décharge statique du compresseur, P_{S3} , et la température d'admission de la turbine de puissance, T_{45} . Le processus de conception du régulateur commence par un modèle linéarisé de l'espace d'état du système. Les lois de contrôle travaillent essentiellement pour maintenir N_p constant à la consigne en modulant W_F . Le contrôle réalise cela en planifiant une vitesse nominale

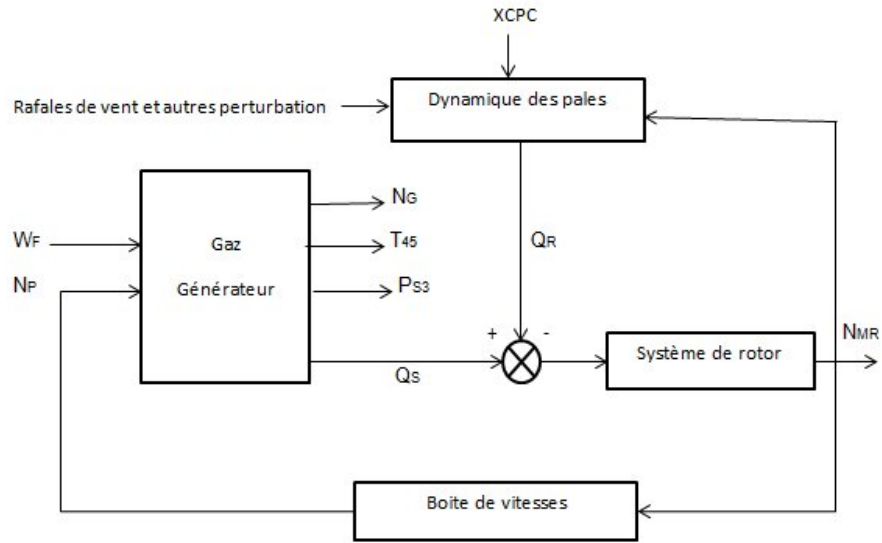


Figure 2.15: schémas fonctionnel du système générateur de gaz/rotor en boucle ouverte [9].

N_G en fonction de $XCPC$, P_1 et T_1 . Le contrôle ajuste cette demande de N_G pour ajuster isochroniquement N_p à l'entrée N_p définie. La position de l'ALP limite le N_G maximal autorisé, tandis que la commande limite davantage la valeur maximale de T_{45} . La commande limite le taux d'accélération / décélération de N_G en fonction de la limite W_{FP}/P_{S3} programmée de N_G planifié. Le DEC discuté ici a un réseau, qui est inséré dans le contrôleur du générateur de gaz et le générateur de gaz.

La description ci-dessus illustre que la structure de contrôle du GE T700 est une structure de contrôle en cascade, où la sortie de processus primaire souhaitée ne peut être contrôlée que par la sortie de processus de commande secondaire.

Installation primaire. La représentation d'espace d'état du système de rotor est fournie par l'équation suivante [59] [9]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_1 x_1(t) + B_1 y_2(t) \\ y_1(t) = C_1 x_1(t) \end{cases} \quad (2.32)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{J_T} \\ 0 & -\frac{DAM}{J_{MR}} & \frac{1}{J_{MR}} \\ KMR \frac{DMR * DAM}{J_{MR}} & -KMR - \frac{DMR}{J_T} & -\frac{DMR}{J_{MR}} \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} \frac{2}{J_T} \\ 0 \\ \frac{2 * DMR}{J_T} \end{bmatrix}, C_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\dot{x}_1(t) = \begin{bmatrix} \dot{N}_P \\ \dot{N}_{MR} \\ \dot{Q}_{MR} \end{bmatrix}, x_1(t) = \begin{bmatrix} N_P \\ N_{MR} \\ Q_{MR} \end{bmatrix}, y_1(t) = N_p, y_2(t) = q_s$$

Installation secondaire. Le modèle linéaire en temps continu du générateur de gaz est présenté comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_2(t) = A_2 x_2(t) + B_2 u(t) + B_3 \omega(t) \\ y_2(t) = C_2 x_2(t) \end{cases} \quad (2.33)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_G} \frac{\delta Q_G}{\delta N_G} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2DMR}{J_T} \frac{\delta Q_P}{\delta N_G} & 0 & 0 & 0 & \frac{2DMR}{J_T} \frac{\delta Q_P}{\delta N_P} \\ \frac{\delta T_{45}}{\delta N_G} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\delta P_{S3}}{\delta N_G} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{J_G} * \frac{\delta Q_P}{\delta N_G} & -\frac{1}{J_G} & 0 & 0 & \frac{2}{J_G} \frac{\delta Q_P}{\delta N_P} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_G} \frac{\delta Q_G}{\delta W_F} \\ \frac{2DMR}{J_T} \frac{\delta Q_P}{\delta W_F} \\ \frac{\delta T_{45}}{\delta W_F} \\ \frac{\delta P_{S3}}{\delta W_F} \\ \frac{2}{J_T} \frac{\delta Q_P}{\delta W_F} \end{bmatrix} C_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\dot{x}_2(t) = \begin{bmatrix} \dot{N}_G \\ \dot{Q}_S \\ \dot{T}_{45} \\ \dot{P}_{S3} \\ \dot{N}_P \end{bmatrix}, x_2(t) = \begin{bmatrix} N_G \\ Q_S \\ T_{45} \\ P_{S3} \\ N_P \end{bmatrix}, u(t) = W_F$$

où $w(t)$ est un signal de bruit blanc de processus exogène appartenant à $l_2[0, \infty)$ et la matrice des paramètres de bruit B_3 devrait être utilisée comme paramètres de conception pour obtenir des caractéristiques de réponse en fréquence du système souhaitables [59]. Parmi les objectifs de notre thèse est de chercher à étudier le contrôle des turbines à gaz à travers les réseaux de communication pour cela, et dans la première partie de ce chapitre, nous avons commencé par donner un aperçu des turbines à gaz, et nous avons également mentionné les principales parties de la turbines à gaz et leur fonctionnement, et nous avons donné différents modèles et structures utilisés dans ces systèmes, en plus des techniques de modélisation et des boucles de contrôle associées et Il est nécessaire dans cette partie de parler sur les Systèmes de contrôle de réseau de communication et la détection de composants de boucle de contrôle et les architectures de contrôle spécifiques utilisés dans les systèmes de turbines à gaz intégrés aux réseaux de communication et aussi En outre,

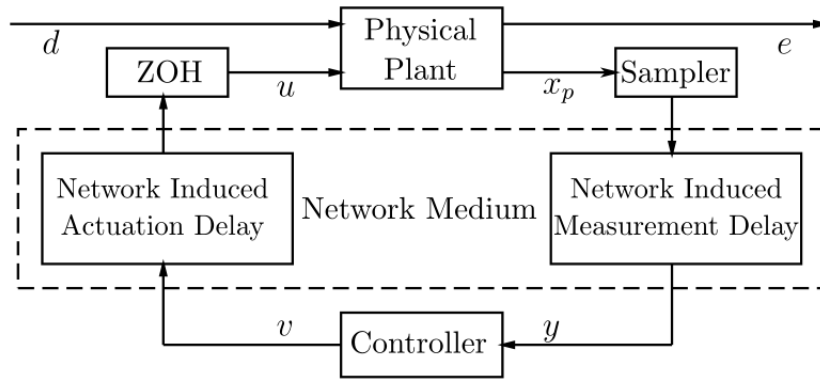


Figure 2.16: le contrôle d'un système sur le réseau de communication [5].

nous examinerons les avantages et les inconvénients de cette technologie.

2.9 Introduction du contrôle des systèmes sur les réseaux de communication:

Les systèmes de contrôle en réseau et comme représente la figure 2.16 sont connus (NCS) sont des systèmes spatialement distribués dans lesquels tous les composants de la boucle de contrôle de rétroaction tels que les capteurs, les actionneurs et les contrôleurs sont connectés via un support de réseau de communication numérique limité et un seul nœud est autorisé à partager des données sur le canal de communication et Parmi les nombreux avantages offerts par les réseaux de contrôle le coûts d'installation réduits, une maintenabilité améliorée, une flexibilité accrue, Ils sont utilisés dans de nombreux systèmes réels tels que les systèmes de chauffage urbain, l'automatisation des grandes usines, les réseaux de capteurs, Systèmes de transport intelligents, téléchirurgie, et la robotique, Cependant, les performances de contrôle du système peuvent se dégrader et entraîner une instabilité en boucle fermée en raison des retards du réseau et de la perte de paquets, en fait, de nombreux chercheurs dans ce domaine ont fait de grands progrès pour aborder la stabilité du NCS, où le problème principal est de réduire le conservatisme du critère de stabilité asymptotique et d'assurer le retard maximal autorisé.

2.10 Avantages et inconvénients du contrôle sur les réseaux de communication:

Parmi les principaux avantages des systèmes de contrôle en réseau, réduction efficacement la complexité du système, car il est possible de réduire la complexité des systèmes de contrôle en les connectant au réseau de communication, et ce dernier permet de stocker les données sur un seul serveur, ce qui réduit la complexité des systèmes de contrôle. De plus, les contrôleurs de réseau permettent un partage efficace des données du réseau, car de nombreux paramètres de la station peuvent être échangés facilement, ce qui aide à concevoir des algorithmes de contrôle. Il intègre également des informations pour prendre des décisions intelligentes sur une grande surface physique, plus de cela, il supprime les fils inutiles, il est aujourd'hui possible de transférer des données sans fil à très haut débit. La mise en réseau est facile à mettre à l'échelle en ajoutant des capteurs, des actionneurs et des contrôleurs supplémentaires, en réduisant les coûts de maintenance et sans modifications structurelles importantes du système. Plus important encore, il relie l'interface cyber physique à l'espace physique, ce qui rend l'exécution des tâches à distance facilement accessible, les systèmes de contrôle de réseau sont largement connus dans plusieurs domaines réels tels que le domaine des systèmes d'alimentation distribués, de la robotique, des véhicules aériens sans pilote (UAV), des automobiles, de l'exploration spatiale, de l'exploration terrestre, de l'automatisation des unités industrielles (e.g, les turbine a gaz) de la résolution de problèmes et du dépannage à distance, des environnements dangereux, des avions, production, contrôle d'usine, et bien plus encore. De plus en plus d'applications NCS apparaissent chaque jour [8, 13]. -NCS a également de nombreux problèmes telle que la perte de capacité à chronométrer les données entrantes, de sorte que l'échantillonnage ne peut pas être utilisé de manière uniforme, Outre la perte d'intégrité des données, des données peuvent être perdues pendant le processus de transmission, de sorte que des informations complètes ne peuvent pas être fournies. En plus de la latence de connexion, au niveau des stations de contrôle du réseau distant, en raison de la latence de connexion, l'action de contrôle peut ne pas être effectuée avec effet immédiat. Sans oublier la complexité et la congestion, à mesure que le nombre de nœuds augmente, la complexité du système de communication augmente, ce qui entraîne une congestion et un retard. Par conséquent, le déploiement dans une industrie avec des dizaines de milliers de

capteurs et d'actionneurs peut être une tâche difficile [13].

2.11 Les composants de boucle de contrôle et l'architectures de contrôle sur les réseaux de communication

Lorsqu'il s'agit de contrôler un système sur un réseau de communication, il existe plusieurs composants clés de boucle de contrôle qui sont utilisés pour surveiller et réguler le fonctionnement du système, Ces composants garantissent que les informations de contrôle sont transmises de manière efficace et fiable entre les différents nœuds du réseau.

2.11.1 Les composants de boucle de contrôle en réseau de communication Le NCSs typique se compose des éléments de base suivants un capteur, un contrôleur, Bloquer d'Ordre Zéro, un actionneur, un Réseau de communication.

2.11.1.1 Les capteurs: Les capteurs mesurent différentes grandeurs physiques d'un système, incluant des capteurs électroniques, des biocapteurs et des capteurs chimiques. Les nœuds capteurs représentent les appareils les plus simples du réseau. Étant donné que leur quantité est souvent bien supérieure à celle des actionneurs ou des puits, il est nécessaire qu'ils soient abordables afin de respecter un budget énergétique très limité. Par conséquent, ils fonctionnent généralement avec des capacités de détection, de calcul et de communication restreintes, de manière distribuée, Ces contraintes doivent être prises en considération lors de l'analyse et de la conception des NCS (Systèmes de Capteurs en Réseau). Le capteur dans NCS est un capteur intelligent capable de détecter, d'échantillonner et de quantifier le signal de mesure avant de le transmettre via un réseau de communication au contrôleur, cela signifie également que le capteur joue un rôle important dans les systèmes en réseau [11] la figure ci-dessous donne un exemple sur les capteurs 2.17

2.11.1.2 Contrôleurs : Le contrôleur dans un système en réseau joue un rôle crucial dans la boucle fermée, Il reçoit le signal de mesure des capteurs et le manipule en fonction des entrées nécessaires afin de conduire la variable du processus vers la valeur de consigne souhaitée, Le contrôleur gère les changements de consigne définis par les opérateurs, ainsi



Figure 2.17: Exemple d'un capteur de pression [9].

que les perturbations du système et les incertitudes liées à la variable du processus, dues à des forces internes et externes. Cette opération est répétée jusqu'à ce que la variable du processus atteigne la consigne, Dans les systèmes de contrôle en réseau, le contrôleur est généralement mis en œuvre sous forme de traitement du signal à temps discret (ordinateur ou processeur), Il diffère du capteur en ce sens qu'il s'agit d'un traitement de signal apériodique, il attend l'occurrence d'un événement où Le signal de commande (la sortie du régulateur) est transmis au prochain équipement de la boucle de régulation sous forme numérique via le même canal de communication, Le contrôleur en réseau ne peut pas traiter les signaux en même temps que le capteur envoie les informations, en raison de l'utilisation du canal de communication par un nœud de contrôle différent (engorgement). Il doit donc attendre son tour pour transmettre son signal, ce qui entraîne des retards dans la réception des signaux et peut éventuellement causer des pertes ou des désordres dans les signaux reçus alors Ces phénomènes induits par le réseau affectent les performances et peuvent provoquer l'instabilité des systèmes de contrôle en réseau, nécessitant ainsi la résolution de ces imperfections lors de la conception des boucles du système de contrôle. [14] comme représente la figure 2.18



Figure 2.18: Exemple d'un Contrôleur industrielle [9].

2.11.1.3 Bloquer d'Ordre Zéro (BOZ) : Le Bloquer d'Ordre Zéro (BOZ) est un dispositif ou un algorithme qui convertit un signal à temps discret en un signal à temps con-

tinu en maintenant chaque valeur d'échantillon pendant un intervalle d'échantillonnage spécifique. Dans le contexte des boucles de régulation en réseau, le rôle du BOZ est de convertir le signal numérique provenant du contrôleur en un signal analogique pour manipuler le système physique continu. Dans les systèmes de contrôle en réseau, les BOZ reçoivent le signal discret au temps $t_k + \tau_k$, puis le convertissent en une forme continue en le maintenant jusqu'au prochain instant d'échantillonnage $t_{k+1} + \tau_{k+1}$ (où k est un nombre entier), qui est déterminé par un événement plutôt que par le temps lui-même (l'événement se produit lorsque le contrôleur transmet le signal, généralement après un délai arbitraire de temps d'échantillonnage $t_k + \tau_k$). La précision du BOZ dépend de la fréquence d'échantillonnage, où lorsque $(t_{k+1} + \tau_{k+1}) - (t_k + \tau_k) = h$ (où h est l'intervalle de temps d'échantillonnage), la sortie du BOZ se rapproche du signal continu exact.

2.11.1.4 Actionneurs : Un actionneur est un élément de la boucle de régulation chargé de déplacer le système tout en respectant ses limites de sécurité et sa plage de fonctionnement. Par exemple, il peut ouvrir une vanne. Les actionneurs nécessitent une source d'énergie et un signal de commande, ce dernier étant transmis par le contrôleur. Dans les systèmes de commande en réseau (NCS), le signal de commande provient spécifiquement du BOZ, qui représente un faible courant ou une faible tension. Lorsqu'ils reçoivent un signal de commande, les actionneurs transforment cette énergie en mouvement mécanique (limité en termes de mouvements ou de position). La réponse des actionneurs peut être soit linéaire soit rotative. Les actionneurs linéaires convertissent généralement l'énergie en mouvement linéaire, utilisé principalement pour des applications de positionnement où ils possèdent généralement des fonctions de poussée et de traction. En revanche, les actionneurs rotatifs transforment l'énergie en mouvement rotatif et sont couramment utilisés pour contrôler divers types de vannes, comme les vannes à bille ou les vannes papillon. La figure ci-dessus montre un exemple d'une vanne de régulation 2.19

2.11.1.5 Réseau de communication : La mise en place d'un système en réseau dépend largement des paramètres de performance du réseau de communication, tels que la quantification, le débit de transmission, les retards, les pertes de paquets. Lorsqu'un signal est transmis sur un réseau numérique, il est échantillonné, encodé au format numérique, puis transmis à l'équipement suivant dans une boucle fermée. Les données reçues doivent être décodées par les récepteurs, ce qui entraîne des retards et des pertes de paquets dans



Figure 2.19: Exemple d'une vanne de régulation pneumatique [9].

la boucle de retour. Par ailleurs, la distribution aléatoire des composants de la boucle de régulation affecte les caractéristiques de propagation des canaux de communication, voire peut bloquer les liaisons de communication, entraînant ainsi la perte de paquets en transit à travers le réseau. De plus, les retards de transmission importants causés par la concurrence entre les nœuds entraînent également des pertes de paquets. Par conséquent, les protocoles de transmission fiables tels que TCP ne sont pas toujours adaptés aux NCS, car les données qui sont retransmises deviennent obsolètes et peuvent ne pas être utiles, Il est donc fondamental d'étudier l'impact du réseau sur la boucle de contrôle dans les NCS. Les réseaux de communication peuvent également être classés en deux groupes en fonction du support de transport des données les réseaux câblés et les réseaux sans fil , Les réseaux câblés offrent de nombreux avantages tels qu'une grande fiabilité, une large bande passante et une sécurité élevée, mais ils réduisent la flexibilité et la mobilité en revanche, les réseaux sans fil offrent une grande flexibilité et mobilité, mais ils présentent des inconvénients tels qu'une bande passante limitée et une fiabilité réduite. [14]

2.12 Les challenges induits par les réseaux de communication:

Les découvertes actuelles de la théorie de la communication et de l'information ne peuvent pas apporter de réponses immédiates aux nombreux problèmes posés par le contrôle des réseaux dans lesquels des questions telles que le retard et la causalité sont d'une importance fondamentale. La puissance de Shannon est définie comme la limite supérieure globale des schémas de communication classiques, qui ne prennent généralement pas en compte l'utilisation du message transmis, et peuvent être atteints sous plusieurs hypothèses limitantes. Quant au code de réalisation de capacité, il est suffisamment long pour entraîner un retard important, car il n'est pas très pratique pour les systèmes de contrôle par rétroaction en temps réel. Les messages retardés peuvent ne pas être utiles, car les informations à transmettre satisfont la propriété d'approximation, qui nécessite généralement que la source de l'information satisfasse certaines statistiques de propriété, telles que la restabilité et l'invariance. Apparemment, les informations générées par un système dynamique typique peuvent facilement. En ce qui concerne la causalité, elle n'est pas prise en compte, car notez que nous ne nous soucions que des systèmes causaux où la sortie dépend des entrées passées et présentes mais pas des entrées futures, et donc les codes non causaux ne peuvent pas être utilisés pour concevoir un contrôle par rétroaction pour les systèmes causaux. Ainsi, il n'y a pas de limites à la complexité du codage, on s'attend donc à ce que l'on ne puisse pas atteindre la capacité de Shannon présentée dans la théorie de l'information standard dans la pratique, en raison des limites de la complexité du codage et des exigences de temps réel et de causalité dans le système de contrôle. Les progrès récents du codage causal peuvent éclairer cette direction de recherche, d'un autre côté, il y a un manque d'interprétation physique des résultats sur le contrôle des réseaux dans le contexte de la théorie de l'information. À ce jour, il a été démontré qu'une série de conditions sont à la fois nécessaires et suffisantes pour la stabilité des systèmes en réseau dans les différents modèles de canaux. Cependant, la question de la mise en œuvre des réseaux de communication est rarement évoquée par la communauté du contrôle. Au lieu de la capacité de Shannon, de nouveaux concepts de capacité sont nécessaires dans le domaine du contrôle des réseaux de communication, qui devraient servir à des fins de contrôle de la communication. Il est clair que la capacité proposée par Sahai et Mitter à

tout moment prometteur dans cette voie de recherche, en bref, l'une des tâches immédiates des NCS est de combler le fossé entre les Théorie de l'information et théorie du contrôle [11].

2.12.1 simulation de retard de réseau indépendante

2.12.1.1 Délai induit par le réseau : induit par le réseau est la plus importante imperfection produite par les systèmes de contrôle réseau, qui varie de manière aléatoire comme observé par de nombreux chercheurs. À partir de la figure 2.20, nous remarquons qu'il existe deux types de délais temporels. Le premier est un délai de capteur à contrôleur, qui représente le temps entre l'échantillonnage du signal par les capteurs et sa réception par le contrôleur. Le deuxième est un délai de contrôleur à actionneur, qui représente le temps entre la génération du signal de contrôle et sa disponibilité sur l'actionneur. Les sources de ces délais sont généralement le résultat de la bande passante limitée des données, du trafic réseau et des protocoles réseau [84]. Cependant, ces deux types de délais ne sont généralement pas traités séparément et seul le délai aller-retour est pris en compte. En pratique, différents types de réseaux de communication sont utilisés dans les systèmes de contrôle en réseau, ce qui entraîne des variations dans les caractéristiques du délai induit par le réseau. Ces variations sont les suivantes : des délais constants bornés dans les réseaux de service cyclique (par exemple, Toking-Ring, Toking-Bus) [12] ; des délais aléatoires et non bornés dans les réseaux d'accès aléatoire (par exemple, Ethernet, CAN) [52] ; des délais non bornés pour les paquets de données de plus faible priorité et des délais bornés pour les paquets de données de plus haute priorité dans les réseaux à ordre de priorité (par exemple, DeviceNet) [53]. Les délais induits par le réseau peuvent être obtenus en utilisant la technique des horodatages et ont été modélisés en tant que délais constants, délais aléatoires mais bornés, délais stochastiques indépendants et délais aléatoires régis par un processus de Markov. La modélisation des systèmes de contrôle en réseau avec des délais constants a été présentée dans de nombreuses études existantes, où le délai est généralement égal au délai maximum induit par le réseau dans le système (délai de capteur à contrôleur ou délai de contrôleur à actionneur), et cela peut être réalisé en introduisant un tampon plus long que le délai critique [65]. De plus, l'hypothèse de délais constants produit un bon modèle des systèmes de contrôle en réseau uniquement lorsque les délais introduits sont beaucoup plus courts que la constante de temps de traite-

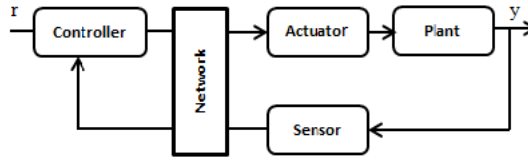


Figure 2.20: Structure directe d'une Ncs [2].

ment, mais l'étude du cas où la période d'échantillonnage est plus longue que les délais est plus compliquée. Par conséquent, les systèmes de contrôle en réseau peuvent être traités comme un système déterministe sur lequel de nombreuses méthodes de contrôle déterministes peuvent être appliquées. La boucle fermée sur les systèmes de contrôle en réseau avec un délai constant est représentée comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + BKx(t - \tau), \\ y(t) = Cx(t) + DKx(t - \tau), \\ x(t) = \phi(t), \forall t \in [-\tau, 0]. \end{cases} \quad (2.34)$$

où $\tau(t) = \tau_{sc} + \tau_{ca} + \tau_c$ représente le délai total induit par le réseau, τ_{sc} , τ_{ca} et τ_c étant respectivement les délais de capteur à contrôleur, de contrôleur à actionneur et de traitement. L'équation $|sI - A - BK \exp^{-\tau s}| = 0$: est utilisée pour revenir à la fonction de transfert du système. Cette équation est transcendante, ce qui la rend très difficile à résoudre. Par conséquent, il serait pratique de se débarrasser du délai dans l'équation caractéristique, de manière à pouvoir appliquer des techniques d'analyse et de conception conventionnelles.

2.12.1.2 Modèle de délai mutuellement stochastique Dans les systèmes de contrôle en réseau, le délai induit par le réseau est influencé par de nombreux facteurs stochastiques tels que la charge du réseau, la concurrence entre les nœuds et la congestion du réseau. Par conséquent, le délai a tendance à être stochastique. Ainsi, le délai constant et les méthodologies de contrôle déterministes correspondantes ont du mal à satisfaire les exigences de performance du système. Le modèle de délai stochastique peut être divisé en deux catégories : le modèle dans lequel les délais dépendent de manière probabiliste et le modèle dans lequel les délais sont mutuellement indépendants. Le modèle de délai mutuellement indépendant et stochastique est souvent appliqué à la modélisation et au

contrôle des systèmes de contrôle en réseau avec des délais aléatoires lorsque la dépendance probabiliste est inconnue [34] On peut modéliser le délai stochastique induit par le réseau à l'aide de la distribution de signaux en utilisant un processus de Bernoulli, qui est décrit comme suit : Le délai stochastique induit par le réseau est divisé en deux délais et son intervalle en sous-intervalles :

$$\tau(t) = \tau_1(t) + \tau_2(t). \quad (2.35)$$

où

$$\begin{cases} \tau_1(t) = \sigma(t)\tau(t) \\ \tau_2(t) = (1 - \sigma(t))\tau(t) \end{cases} \quad (2.36)$$

avec $\tau(t) \in [\tau_{min}, \tau_{max}]$ et $(\tau_{max} \geq \sigma_{min} > 0)$, où τ_{max} et τ_{min} sont respectivement la borne supérieure et la borne inférieure du délai induit par le réseau, et σ est un processus de Bernoulli décrivant la distribution du délai.

$$\sigma(t) = \begin{cases} 1 \text{ si } t \in \omega_1 = t : \tau(t) \in [\tau_{min}, \tau_{med}) \\ 0 \text{ si } t \in \omega_2 = t : \tau(t) \in [\tau_{med}, \tau_{min}) \end{cases} \quad (2.37)$$

avec $\tau_{med} \in [\tau_{min}; \tau_{max}]$, paramètre à choisir afin de tirer parti de la distribution du délai. À partir de l'équation (2.37), on peut remarquer que le délai induit par le réseau $\tau(t)$ change aléatoirement et la probabilité de $\tau \in \omega_1(t)$ et $\tau \in \omega_2(t)$. De plus, il est évident que $\omega_1 \cup \omega_2 = [\tau_{min}; \tau_{max}]$ et $\omega_1 \cap \omega_2 = \emptyset$ Par conséquent, la dynamique en boucle fermée s'exprime comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + \sigma(t)BKx(t - \tau_1(t)) + (1 - \sigma(t))BKx(t - \tau_2(t)), \\ y(t) = Cx(t) + \sigma(t)DKx(t - \tau_1(t)) + (1 - \sigma(t))DKx(t - \tau_2(t)), \\ x(t) = \phi(t), \forall t \in [-\tau_{max}, \tau_{min}]. \end{cases} \quad (2.38)$$

2.12.1.3 Approche du système à retard d'entrée: Dans l'approche du délai d'entrée, les NCS (Systèmes de Contrôle en Réseau) sont modélisés comme un système avec un délai variable dans le temps, où le délai variable dans le temps inclut le délai entre le capteur et le contrôleur, le délai entre le contrôleur et l'actionneur, le délai de calcul, ainsi

que la perte de paquets représentée comme un délai. Cette approche a été développée également pour résoudre le problème de synchronisation du réseau complexe en tenant compte de l'échantillonnage du signal. Le principal et important problème dans cette approche consiste à déterminer la limite supérieure maximale admissible (LSMA) du délai de transmission, qui garantit la stabilité et les bonnes performances des NCS. De plus, la détermination de la limite supérieure maximale admissible du délai de transmission est un facteur important pour les applications pratiques. Par conséquent, la boucle fermée des NCS est décrite par le système variable dans le temps suivant, avec une entrée. délai :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + BKx(t - \tau), \\ x(t) = \phi(t), \tau(t) \in [-\tau_M, \tau_m]. \end{cases} \quad (2.39)$$

avec:

$$\begin{cases} 0 \leq \tau_m \leq \tau(t) \leq \tau_M \text{ ou } (\tau_M + (\eta + 1)h \text{ si perte de paquets}); \\ \tau_m > 0, \tau_M > 0, \eta \geq 0. \end{cases} \quad (2.40)$$

où τ_m , τ_M et η sont respectivement la valeur supérieure, la valeur inférieure et le nombre de pertes de paquets. Une condition suffisante de stabilité de ces NCS est dérivée en se basant sur une fonction de Lyapunov appropriée et est présentée en utilisant la méthode LMI

2.13 Techniques de contrôle robustes

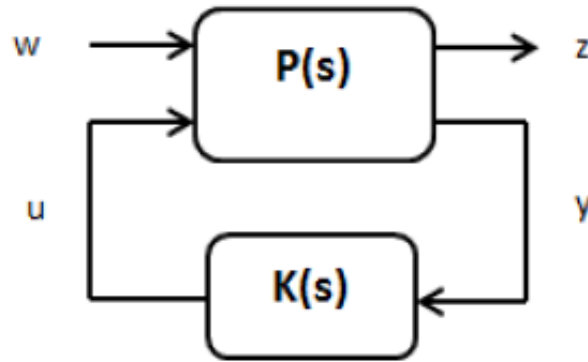
il y a toujours un écart entre le comportement d'un système physique réel et le modèle mathématique du système, principalement en raison de plusieurs facteurs tels que les erreurs d'identification, les variations des paramètres du système, les non-linéarités, les hypothèses simplificatrices, la présence de retards, etc. Les phénomènes physiques ne peuvent pas être entièrement traduits par des modèles mathématiques. En effet, les systèmes réels ont essentiellement un comportement dynamique non linéaire qui est approximé à l'aide de plusieurs modèles linéaires autour de plusieurs points d'équilibre. Ces facteurs sont appelés incertitudes. Le domaine du contrôle qui synthétise des régulateurs garantissant non seulement les performances souhaitées, mais les maintient également malgré les incertitudes mentionnées précédemment, est appelé "contrôle robuste". Ce do-

maine a connu une croissance rapide dans l'environnement industriel, où il est un outil précieux pour l'analyse et la conception de systèmes de contrôle en raison de sa nature appliquée et de sa pertinence pour les problèmes pratiques d'un ingénieur en automatisme. En effet, le contrôle est généralement conçu sur la base d'un modèle idéalisé et simplifié du système réel, et pour fonctionner correctement, il doit être robuste aux imperfections du modèle, à l'incertitude des systèmes et aux perturbations externes. Par conséquent, les ingénieurs doivent créer des lois de contrôle qui satisfont aux deux exigences mentionnées ci-dessus. Toute synthèse d'une loi de contrôle robuste doit donc tenir compte, lors de son développement, non seulement du modèle nominal, mais aussi d'un ensemble de modèles incertains afin de garantir la stabilité et d'obtenir les performances souhaitées en boucle fermée pour tous ces modèles. Cette tâche peut parfois être compliquée car il existe plusieurs types d'incertitudes (structurées ou non structurées) qui peuvent agir sur le système réel à plusieurs endroits de la boucle (entrée, sortie ou autres). On dira alors qu'un système est robuste s'il reste stable et maintient les performances souhaitées en présence de ces diverses incertitudes.

2.13.1 H_∞ control Parmi les méthodes de conception de régulateurs robustes, la technique H_∞ est certainement la plus utilisée et confirmée. Dans cette méthode, le régulateur est obtenu en minimisant la norme H_∞ d'un critère dans le domaine fréquentiel en tenant compte des exigences de robustesse en termes de stabilité et de performance. Cette approche a été développée dans les années 1980 grâce aux travaux de chercheurs tels que [88] et [89]. [25]. La norme H_∞ peut être expliquée simplement comme l'amplification maximale d'énergie pour l'ensemble des signaux d'entrée, où pour un système à entrée unique et sortie unique, la norme $H_\infty \|G\|_1$ équivaut à la magnitude maximale dans le diagramme de Bode de sa fonction de transfert. Dans le contrôle H_∞ , la performance à optimiser est définie en termes de minimisation de la norme H_∞ de la fonction de transfert en boucle fermée. Ce type de problème d'optimisation est également appelé problème de min-max (la norme H_∞ cherche à minimiser le pire scénario possible).

2.13.2 Formulation du problème standard H_∞ La configuration du problème standard H_∞ est représentée schématiquement par [2.21], où ω est un vecteur

de signaux représentant des entrées externes telles que des signaux de référence, des perturbations, du bruit, u est le vecteur de commandes, z est le vecteur de coût. Ces

Figure 2.21: Formulation du problème standard H_∞ [4]

éléments sont des signaux représentant les sorties des fonctions (ou matrices) de pondération choisies pour caractériser le bon fonctionnement du système, y sont les vecteurs des signaux ou mesures de sortie disponibles pour générer les commandes. Le but est de synthétiser une loi de commande $u = K(s)y$ qui minimise l'effet des signaux ω sur les signaux du vecteur z (problème de rejet des perturbations). Ces deux ensembles de signaux étant supposés d'énergie finie, l'impact de ω sur z peut être mesuré par $\frac{\|z\|_2}{\|\omega\|_2}$ et dans le pire des cas, ce rapport sera donc, $\sup_{U \neq 0} \frac{\|z\|_2}{\|\omega\|_2} = \|T_{z\omega}\|_\infty$ est le transfert entre z et ω . A noter que, selon le schéma de la figure 2.21, le transfert $T_{z\omega}$ peut s'exprimer sous la forme d'une Transformation Fractionnelle Linéaire LFT inférieure telle que $F_l(P; K)$. Le problème H_∞ optimal consiste à trouver un régulateur stabilisant en minimisant la norme H_∞ du transfert de T_{yz} ou sous la forme mathématique suivante :

$$\min \|F_l(P; K)\|_\infty, K \text{ stabilisons} \quad (2.41)$$

Il n'y a pas de formule analytique pour résoudre ce problème et sa solution n'est pas unique. C'est pourquoi ce problème est traité sous sa forme sous-optimale exprimée comme suit : Étant donné $\gamma > 0$, trouver un contrôleur stabilisateur qui assure :

$$\|F_l(P; K)\|_\infty < \gamma \quad (2.42)$$

Ce problème est résolu par différentes méthodes dont la plus courante reste l'approche par les équations de Riccati ou l'approche par inégalités affines (LMI) introduite récemment.

2.14 Conclusion

Ce chapitre aborder divers aspects du système de turbine à gaz et du contrôle des systèmes via des réseaux de communication. En rassemblant ces sujets, il devient évident que la turbine à gaz est une technologie énergétique complexe, composée de multiples parties interconnectées qui jouent un rôle crucial dans sa performance. De plus, l'évolution des technologies a permis l'introduction du contrôle des systèmes via des réseaux de communication, offrant des avantages tels que la flexibilité et la gestion centralisée, mais également des défis tels que la latence et la sécurité des données. Comprendre les différents modèles, structures, boucles de contrôle et défis liés à ces systèmes est essentiel pour leur conception, leur optimisation et leur maintenance. L'intégration efficace de la communication réseau dans les systèmes de turbine à gaz nécessite une prise de décision éclairée, en évaluant soigneusement les avantages et les inconvénients de cette approche. Dans ce contexte, l'utilisation de techniques de contrôle robustes, telles que le contrôle H_∞ , peut être envisagée pour atténuer les effets des perturbations et des incertitudes liées aux réseaux de communication. Le contrôle H_∞ est une approche qui vise à concevoir des contrôleurs robustes qui minimisent l'impact des perturbations externes tout en assurant une performance optimale du système. En combinant ces connaissances, il est possible de développer des systèmes de turbine à gaz avancés, intégrant des contrôles efficaces et optimisés via des réseaux de communication pour répondre aux besoins de l'industrie énergétique moderne.

Chapitre 3

Analyse de stabilité et conception de contrôle robuste des systèmes de turbines à gaz contrôler sous réseau de communication

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions l'analyse de stabilité et la conception du contrôleur pour les systèmes de turbines à gaz en réseau soumis à des retards causés par des réseaux variant dans le temps et des perturbations externes. Pour cela, nous fournissons de nouvelles conditions de stabilité sous forme d'inégalité matricielle linéaire (LMI) en utilisant la méthode fonctionnelle de Lyapunov-Krasovskii (LKF) avec des termes intégraux doubles. L'objectif principal est de stabiliser le système de contrôle des flux de gaz qui maintient les bonnes performances du système de turbine à gaz soumis aux réseaux variant dans le temps et aux perturbations externes. La solution des conditions de stabilité proposées permet le calcul de la borne supérieure maximale admissible pour les retards induits par le réseau et la minimisation de l'effet des perturbations externes sur le système étudié, ce qui garantit sa stabilité et ses bonnes performances.

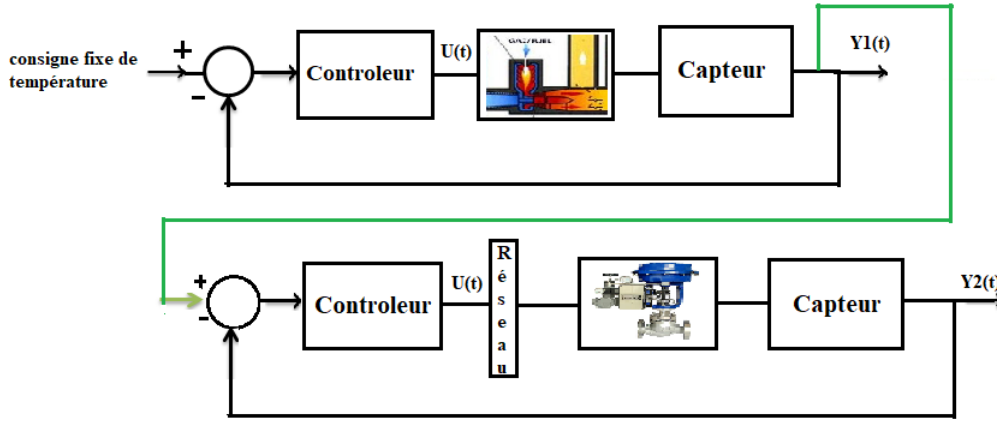


Figure 3.1: Commande cascade d'un turbine à gaz

3.2 Turbine a Gaz Cascade modèles

La représentation d'état d'un NCS général, sous contrainte du perturbations externes, peut être représenté comme suit [3.1](#)

$$\text{Plant 1: } \begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_1 x_1(t) + B_1 y_2(t) \\ y_1(t) = C_1 x_1(t) + C_3 \omega(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\text{Plant 2: } \begin{cases} \dot{x}_2(t) = A_2 x_2(t) + B_2 u_2(t) + B_3 \omega(t) \\ y_2(t) = C_2 x_2(t) + C_4 \omega(t) \end{cases} \quad (3.2)$$

Les plantes primaires et secondaires sont décrites respectivement par les équations [3.1](#) et [3.2](#). Ici, $x_1(t) \in R^{n_1}$ est le vecteur d'état de la plante primaire ; $y_1(t) \in R^{q_1}$ est la sortie de la plante primaire ; $y_2(t) \in R^{q_2}$ est la sortie de la plante secondaire ; $\omega(t) \in R_d$ est la perturbation externe ; $x_2(t) \in R^{n_2}$ est le vecteur d'état de la plante secondaire et $u_2(t) \in R^p$ est le vecteur d'entrée de commande. Les matrices $A_1, B_1, C_1, C_3, A_2, B_2, C_2, B_3$ et C_4 sont des matrices constantes réelles connues avec des dimensions appropriées. En considérant la Figure [2.16](#), afin d'étudier les effets du retard induit par le réseau et de la perte de paquets, il est proposé de considérer l'entrée de commande secondaire comme

étant $u_2(t - \tau(t)) = K_1 x_1(t - \tau(t)) + K_2 x_2(t - \tau(t))$, $t \in i_k h + \tau_k$, $k = 1, 2, \dots$; dans lequel, h est la période d'échantillonnage, i_k , $k = 1, 2, 3, \dots$ sont des entiers tels que $i_1, i_2, i_3, \dots \subset 0, 1, 2, 3, \dots$, τ_k est le retard temporel qui représente le temps entre l'instant $i_k h$ où les données sont échantillonnées à partir de la plante et l'instant où les données sont transférées de l'actionneur à la plante, et $\tau(t)$ est le retard temporel variant dans le temps, qui est défini comme suit [31]

$$\tau(t) = t - i_k h \quad (3.3)$$

Maintenant, si l'on considère les relations suivantes,

$$t_{k+1} - t_k = \tau_{k+1} - \tau_k + h \quad (3.4)$$

$$\tau_m \leq \tau(t) \leq \tau_M \quad (3.5)$$

t_k est l'instant de mise à jour actuel, t_{k+1} représente l'instant de mise à jour suivant, τ_m et τ_M sont les bornes inférieure et supérieure du délai, respectivement, Sur la base des hypothèses ci-dessus, un modèle en temps continu affecté par le délai et la perte de données est recommandé pour le NCCS dans l'équation [3.6]

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_1 x_1(t) + B_1 C_2 x_2(t) + B_1 C_4 \omega(t) \\ \dot{x}_2(t) = A_2 x_2(t) + B_2 K_1 x_1(t - \tau(t)) + B_2 K_2 x_2(t - \tau(t)) + B_3 \omega(t) \\ y_1(t) = C_1 x_1(t) + C_3 \omega(t) \end{cases} \quad (3.6)$$

Les équations du système dans l'équation [3.6] peuvent être transformées en le modèle suivant.

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + BKX(t - \tau(t)) + \bar{B}\omega(t) \\ Y(t) = CX(t) + \bar{C}\omega(t) \end{cases} \quad (3.7)$$

dans lesquelles,

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 C_2 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix}, \\ K = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \end{bmatrix}, \bar{C} = C_3, B = \begin{bmatrix} B_1 C_4 \\ B_3 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \end{bmatrix}, \\ \dot{X}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix}, X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \\ Y(t) = y_1(t), X(t - \eta(t)) = \begin{bmatrix} x_1(t - \tau(t)) \\ x_1(t - \tau(t)) \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

En se basant sur le modèle proposé, l'objectif de cet chapitre est de déterminer les gains de retour d'état pour les systèmes soumis à une contrainte bornée de norme H_∞ . Dans la section suivante, cela est expliqué plus en détail.

3.3 Principaux résultats

Le but de ce travail est d'abord de proposer de nouvelles conditions de stabilité relâchées basées sur LMI pour la dynamique en boucle fermée (2.5) (et par conséquent pour (2.28) aussi) en considérant le gain K connu. Ensuite, une procédure de convexification sera proposée pour concevoir le contrôleur à retour d'état K lorsqu'il est a priori inconnu. De plus, le SNC considéré est soumis à des perturbations externes $\omega(t) \in L_2[0, \infty)$, ainsi, pour des raisons de robustesse, l'approche proposée doit satisfaire aux exigences suivantes:

- La dynamique en boucle fermée NCS (3.7), sans perturbations externes ($\omega(t) = 0$), est asymptotiquement stable.
- Sous des conditions initiales nulles et avec $\omega(t) \neq 0$, le modèle NCS (3.7) satisfait la contrainte H_∞ suivante:

$$\|y(t)\|_2 < \gamma \|\omega(t)\|_2 . \quad (3.8)$$

Alors, le critère de rejet de perturbation H_∞ peut être exprimé comme suit:

$$J = \int_0^\infty (y^T(s)y(s) - \gamma^2 \omega^T(s)\omega(s)) ds < 0 . \quad (3.9)$$

où le scalaire $\gamma > 0$ désigne le niveau d'atténuation des perturbations (indice de performance) à minimiser.

Theorem 3.1 : Laisser $i \in \mathcal{I}_2$ et $j \in \mathcal{I}_3$. Pour des scalaires donnés $\tau_i > 0$ tel que $\tau_1 \leq \tau(t) \leq \tau_2$ et matrice de retour d'état K , le modèle NCS (3.7) sous les contraintes du retard induit par le réseau et les perturbations externes est GAS s'il existe des matrices définies positives symétriques P, S, Q_i et R_j (in $\mathbf{R}^{n \times n}$), matrice réelle \mathcal{T}_j (in $\mathbf{R}^{5n \times n}$) de sorte que les conditions d'LMI suivantes s'appliquent à la fois $q = 1$ et $q = 2$:

$$\begin{bmatrix} R_2 & S_1 \\ * & R_2 \end{bmatrix} > 0 \quad \begin{bmatrix} R_3 & S_2 \\ * & R_3 \end{bmatrix} > 0 \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=1}^3 \Phi_i + \Xi^q + \mathcal{H}_e(\mathcal{T}\mathcal{G}) + \mathcal{D}^T \mathcal{D} < 0 \quad (3.11)$$

où:

$$\mathcal{G} = \begin{bmatrix} A & 0 & BK & 0 & -I & B_w \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

$$\Phi_1 = \mathcal{H}_e(e_1 P e_5^T) + e_1(Q_1 + Q_2)e_1^T - e_2 Q_1 e_2^T - e_4 Q_2 e_4^T \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 = & e_5(\tau_1^2 R_1 + \tau_2^2 R_2 + (\tau_2 - \tau_1)^2 R_3)e_5^T + \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_2^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_1 & R_1 \\ \star & -R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_2^T \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_4^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_2 & R_2 - S_1 & S_1 \\ \star & -2R_2 + S_1 + S_1^T & R_2 - S_1 \\ \star & \star & -R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_4^T \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} e_2^T \\ e_3^T \\ e_4^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_3 & R_3 - S_2 & S_2 \\ \star & -2R_3 + S_2 + S_2^T & R_3 - S_2 \\ \star & \star & -R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2^T \\ e_3^T \\ e_4^T \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\Phi_3 = -\gamma^2 e_6 e_6^T, \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \Xi^1 = & - \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_1^T - e_3^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{N}_{11} & \hat{N}_{12} & \hat{N}_{13} \\ * & \hat{N}_{22} & \hat{N}_{23} \\ * & * & \hat{N}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_1^T - e_3^T \end{bmatrix} + (\tau_M - \tau_m) \mathcal{H} \left(\begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_1^T - e_3^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{N}_{11} & \hat{N}_{12} & \hat{N}_{13} \\ * & \hat{N}_{22} & \hat{N}_{23} \\ * & * & \hat{N}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_5^T \\ 0 \\ e_5^T \end{bmatrix} \right) \\ & + e_5^T(t) N_2 e_5 + \frac{1}{\tau_m} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -\hat{N}_2 & \hat{N}_2 \\ * & -\hat{N}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\Xi^2 = - \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_1^T - e_3^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{N}_{11} & \hat{N}_{12} & \hat{N}_{13} \\ * & \hat{N}_{22} & \hat{N}_{23} \\ * & * & \hat{N}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_1^T - e_3^T \end{bmatrix} + \frac{1}{\tau_M} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -\hat{N}_2 & \hat{N}_2 \\ * & -\hat{N}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \end{bmatrix},$$

Proof 3.1 *Considérez le candidat LKF suivant:*

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t) \quad (3.16)$$

Avec

$$\begin{aligned} V_1(t) &= x^T(t)Px(t) + \int_{t-\tau_1}^t x(s)^T Q_1 x(s) ds + \int_{t-\tau_2}^t x^T(s)Q_2 x(s) ds \\ V_2(t) &= \tau_1 \int_{-\tau_1}^0 \int_{t+v}^t \dot{x}(s)^T R_1 \dot{x}(s) ds dv + \tau_2 \int_{-\tau_2}^0 \int_{t+s}^t \dot{x}(s)^T R_2 \dot{x}(s) ds dv \\ &+ (\tau_2 - \tau_1) \int_{-\tau_2}^{-\tau_1} \int_{t+v}^t \dot{x}(s)^T R_3 \dot{x}(s) ds dv \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$V_3(t) = (\tau_2 - \tau(t)) \left(\xi^T(t) N_1 \xi(t) + \int_{t-\tau(t)}^t \dot{x}(s)^T N_2 \dot{x}(s) ds \right) \quad (3.18)$$

Avec $\xi(t) = \text{col}\{x(t), x(t - \tau(t)), \int_{t-\tau(t)}^t \dot{x}(s) ds\}$ Le fonctionnel du Lyapunov Krasovskii proposé est positive si $P > 0$, $Q_1 > 0, Q_2 > 0$, $R_1 > 0$, $R_2 > 0$, $N > 0$ et $S > 0$. Ensuite, le système de contrôle en réseau avec le retard induit par le réseau est globalement asymptotique si

$$\dot{V}(t) = \dot{V}_1(t) + \dot{V}_2(t) + \dot{V}_3(t) \quad (3.19)$$

Premièrement on cherche a calculer la dérivée de $V_1(t)$ comme:

$$\dot{V}_1(t) = 2x(t)^T P \dot{x}(t) + x^T(t)(Q_1 + Q_2)x(t) - x^T(t-\tau_1)Q_1 x(t-\tau_1) - x^T(t-\tau_2)Q_2 x(t-\tau_2) \quad (3.20)$$

donc on peu écrit $\dot{V}_1(t)$ comme

$$\dot{V}_1(t) = \zeta^T(t) \Phi_1 \zeta(t) \quad (3.21)$$

avec Φ_1 est défini dans Théorème 1 et:

$$\zeta(t) = \begin{bmatrix} x(t) & x(t - \tau_1) & x(t - \tau(t)) & x(t - \tau_2) & \dot{x}(t) & \omega(t) \end{bmatrix}$$

Maintenant, concentrons-nous sur la dérivée temporelle du $V_2(t)$, on a

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) = & \dot{x}^T(t)(\tau_1^2 R_1 + \tau_2^2 R_2 + (\tau_2 - \tau_1)^2 R_3)\dot{x}(t) - \tau_1 \int_{t-\tau_1}^t \dot{x}^T(s)R_1\dot{x}(s)ds - \tau_2 \int_{t-\tau_2}^t \dot{x}^T(s)R_2\dot{x}(s)ds \\ & - (\tau_2 - \tau_1) \int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1} \dot{x}^T(s)R_3\dot{x}(s)ds \end{aligned} \quad (3.22)$$

On utilise la méthode de Jensen's (Lemma 1 in Annexe A) pour estimer les intégrales résultant de la dériver du $V_2(t)$:

$$-\tau_1 \int_{t-\tau_1}^t \dot{x}^T(s)R_1\dot{x}(s)ds \leq \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau_1) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_1 & R_1 \\ \star & -R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau_1) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Appliquer sur Le deuxième intégral

$$-\tau_2 \int_{t-\tau_2}^t \dot{x}^T(s)R_2\dot{x}(s)ds \leq \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau(t)) \\ x(t-\tau_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_2 & R_2 - S_1 & S_1 \\ \star & -2R_2 + S_1 + S_1^T & R_2 - S_1 \\ \star & \star & -R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau(t)) \\ x(t-\tau_2) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Appliquer sur Le troisième intégral

$$-(\tau_2 - \tau_1) \int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1} \dot{x}^T(s)R_3\dot{x}(s)ds \leq \begin{bmatrix} x(t-\tau_1) \\ x(t-\tau(t)) \\ x(t-\tau_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_3 & R_3 - S_2 & S_2 \\ \star & -2R_3 + S_2 + S_2^T & R_3 - S_2 \\ \star & \star & -R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t-\tau_1) \\ x(t-\tau(t)) \\ x(t-\tau_2) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Alors on peut écrit $\dot{V}_2(t)$ comme:

$$\dot{V}_2(t) = \zeta^T(t)\Phi_2\zeta(t) \quad (3.26)$$

avec Φ_2 est défini dans Théorème 1

Enfin nous avons concerner avec la dériver de $V_3(t)$ comme suit:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3(t) = & - \left(\theta^T(t)\mathcal{N}_1\theta(t) + \int_{t-\tau(t)}^t \dot{x}^T(s)N_2\dot{x}(s)dsd\lambda \right) \\ & + (\tau_M - \tau(t)) \left(2\theta^T(t)\mathcal{N}_1\dot{\theta}(t) + \dot{x}^T(t)N_2\dot{x}(t) \right) \end{aligned} \quad (3.27)$$

On utilise la méthode de Jensen's (Lemma 1 in Annexe A) pour estimer les intégrales résultant de la dériver du $V_3(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3(t) \leq & (\tau_M - \tau(t)) \left(2\theta^T(t)N_1\dot{\theta}(t) + \dot{x}^T(t)N_2\dot{x}(t) \right) - \\ & \left(\theta^T(t)N_1\theta(t) - \frac{1}{\tau(t)} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau(t)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -N_2 & N_2 \\ * & -N_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau(t)) \end{bmatrix} \right). = \end{aligned} \quad (3.28)$$

on peu escrit $\dot{V}_3(t)$ comme:

$$\dot{V}_3(t) = \zeta^T(t)\Xi(\tau(t))\zeta(t) \quad (3.29)$$

avec

$$\begin{aligned} \Xi(\tau(t)) = & - \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_1^T - e_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} \\ * & N_{22} & N_{23} \\ * & * & N_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_3 \\ e_1 - e_3 \end{bmatrix} + (\tau_M - \tau(t)) \mathcal{H} \left(\begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_1^T - e_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} \\ * & N_{22} & N_{23} \\ * & * & N_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_5 \\ 0 \\ e_5 \end{bmatrix} \right. \\ & \left. + e_5^T(t)N_2e_5 \right) + \frac{1}{\tau(t)} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -N_2 & N_2 \\ * & -N_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Alors depuis (3.26)-(3.41) la formule finale de $\dot{V}(t)$ est écrit comme:

$$\dot{V}(t) \leq \zeta^T(t) \left(\Phi_1 + \Phi_2 + \Xi(\tau(t)) \right) \zeta(t) < 0 \quad (3.30)$$

Réécrivons le modèle du NCS avec le retard induit par le réseau et la perturbation externe comme: $\mathcal{G}\zeta_1(t) = 0$, with

$$\mathcal{G} = \begin{bmatrix} A & 0 & BK & 0 & -I & B_w \end{bmatrix}.$$

En appliquant le lemme de Finsler la boucle fermée NCS (3.7) est asymptotiquement stable si $\exists \mathcal{T} \in \mathbb{R}^{6n \times n}$ tel que :

$$\dot{V}(t) \leq \zeta^T(t) \left(\Phi_1 + \Phi_2 + \Xi(\tau(t)) + \mathcal{H}(\mathcal{T}\mathcal{G}) \right) \zeta(t) < 0 \quad (3.31)$$

Maintenant, discutons des performances de H_∞ définies dans la section 2. Il est bien connu que l'analyse des performances et de la stabilité de H_∞ peut être dérivée de la

condition suivante:

$$\dot{V}(t) + y^T(s)y(s) - \gamma^2 w^T(s)w(s) < 0. \quad (3.32)$$

À partir de (3.33), l'inégalité (3.32) peut être réécrite comme:

$$\dot{V}(t) \leq \zeta^T(t) (\Phi_1 + \Phi_2 + \Xi(\tau(t)) + \mathcal{H}(\mathcal{T}\mathcal{G})) \zeta(t) + y^T(s)y(s) - \gamma^2 w^T(s)w(s) < 0, \quad (3.33)$$

$$y^T(t)y(t) = \zeta(t)^T \mathcal{D}^T \mathcal{D} \zeta(t) \quad (3.34)$$

ou

$$\mathcal{D} = \begin{bmatrix} C & 0 & 0 & 0 & 0 & D_w \end{bmatrix}.$$

Par conséquent, la condition (3.34) devient:

$$\dot{V}(t) \leq \zeta^T(t) (\Phi_1 + \Phi_2 + \Xi(\tau(t)) + \mathcal{H}(\mathcal{T}\mathcal{G}) + \mathcal{D}^T \mathcal{D}) \zeta(t) - \gamma^2 w^T(s)w(s) < 0, \quad (3.35)$$

Ensuite, en appliquant le lemme d'approximation (Lemme 2 dans l'annexe) à l'équation (3.35) avec

$$-\gamma^2 w^T(t)w(t) = \zeta^T(t) \Phi_3 \zeta(t).$$

Où Φ_3 est donné dans Théorème 1. On obtient les conditions exprimées dans le théorème 1. Ceci achève la preuve.

3.3.1 Stabilisation et Conception du contrôleur de retour d'état robuste

Dans cette section, basée sur le théorème 1, le problème de contrôleur robuste H_∞ de NCS (2.5) utilisant le contrôleur de retour d'état sera étudié. Le résultat principal est proposé dans le théorème suivant.

Theorem 3.2 : Laisser $i \in \mathcal{I}_2$ et $j \in \mathcal{I}_3$. Pour des scalaires donnés $\tau_i > 0$ tel que $\tau_1 \leq \tau(t) \leq \tau_2$ et retour d'état matrice de gain du contrôleur K , le modèle NCS avec Pour des tel que donnés induit un retard est GAS s'il existe des matrices définies positives symétriques P , S , Q_i et R_j (in $\mathbf{R}^{n \times n}$), matrice réelle \mathcal{T}_j (in $\mathbf{R}^{5n \times n}$) de sorte que les conditions d'LMI suivantes s'appliquent à la fois $q = 1$ et $q = 2$:

$$\begin{bmatrix} R_2 & S_1 \\ * & R_2 \end{bmatrix} > 0 \quad \begin{bmatrix} R_3 & S_2 \\ * & R_3 \end{bmatrix} > 0 \quad (3.36)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 \Phi_i + \Xi^q + \mathcal{H}_e(X) & \tilde{\mathcal{D}}^T \\ \star & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (3.37)$$

Ou:

$$X = \begin{bmatrix} AX & 0 & BF & 0 & -X & B_w \end{bmatrix}, \quad (3.38)$$

$$\tilde{\mathcal{D}}^T = \begin{bmatrix} CX & 0 & 0 & 0 & 0 & D_w \end{bmatrix}, \quad (3.39)$$

$$\Phi_1 = \mathcal{H}_e(e_1 P e_5^T) + e_1(Q_1 + Q_2)e_1^T - e_2 Q_1 e_2^T - e_4 Q_2 e_4^T \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 = & e_5(\tau_1^2 R_1 + \tau_2^2 R_2 + (\tau_2 - \tau_1)^2 R_3) e_5^T + \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_2^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_1 & R_1 \\ \star & -R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_2^T \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_4^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_2 & R_2 - S_1 & S_1 \\ \star & -2R_2 + S_1 + S_1^T & R_2 - S_1 \\ \star & \star & -R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_4^T \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} e_2^T \\ e_3^T \\ e_4^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -R_3 & R_3 - S_2 & S_2 \\ \star & -2R_3 + S_2 + S_2^T & R_3 - S_2 \\ \star & \star & -R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2^T \\ e_3^T \\ e_4^T \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\Phi_3 = -\gamma^2 e_8 e_8^T, \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} \Xi^1 = & - \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_1^T - e_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{N}_{11} & \hat{N}_{12} & \hat{N}_{13} \\ * & \hat{N}_{22} & \hat{N}_{23} \\ * & * & \hat{N}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_3 \\ e_1 - e_3 \end{bmatrix} + (\tau_M - \tau_m) \mathcal{H} \left(\begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_1^T - e_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{N}_{11} & \hat{N}_{12} & \hat{N}_{13} \\ * & \hat{N}_{22} & \hat{N}_{23} \\ * & * & \hat{N}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_5 \\ 0 \\ e_5 \end{bmatrix} \right) \\ & + e_5^T(t) N_2 e_5 + \frac{1}{\tau_m} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -\hat{N}_2 & \hat{N}_2 \\ * & -\hat{N}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_3 \end{bmatrix} \\ \Xi^2 = & - \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \\ e_1^T - e_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{N}_{11} & \hat{N}_{12} & \hat{N}_{13} \\ * & \hat{N}_{22} & \hat{N}_{23} \\ * & * & \hat{N}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_3 \\ e_1 - e_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{\tau_M} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_3^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -\hat{N}_2 & \hat{N}_2 \\ * & -\hat{N}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_3 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

Proof 3.2 soit $D_X = \text{diag}(X^T, X^T, X^T, X^T, X^T, I, X^T)$ avec $X \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Prenant la congruence de (3.11) par D_X , avec les changements de variables $\hat{\mathcal{P}} = X^T \mathcal{P} X$, $\hat{Q}_1 = X^T Q_1 X$, $\hat{Q}_2 = X^T Q_2 X$, $\hat{R}_1 = X^T R_1 X$, $\hat{R}_2 = X^T R_2 X$, $\hat{S} = X^T S X$, $\hat{N}_1 = X^T N_1 X$ et $F = KX$. Ensuite, en appliquant le complément de Shur, nous obtenons les LMI exprimés dans le théorème 2. Ceci termine la preuve.

Theorem 3.3 *En utilisant le théorème 2 et en fixant la borne de retard induite par le réseau, nous pouvons obtenir le niveau d'atténuation optimal γ en résolvant le problème d'optimisation sous contrainte suivant:*

$$\begin{aligned} & \min \gamma^2 \\ & \text{s.t.} \begin{cases} X > 0, \bar{P} > 0, \bar{R}_i > 0, \bar{Q}_i > 0, \bar{S}_j > 0. (i \in \mathcal{I}_3, j \in \mathcal{I}_2), \\ LMI \text{ (3.36) et (3.37)}. \end{cases} \end{aligned} \quad (3.43)$$

3.4 Simulation Numérique

Grâce au développement de nouvelles technologies de mise en réseau industrielle, il est possible de connecter des capteurs, des actionneurs et des contrôleurs via une structure distribuée dans les systèmes de contrôle modernes.

3.4.1 Turbine à gaz V94.2 (SGT5-2000E) Une turbine à gaz V94.2 (SGT5-2000E) a été considérée comme le premier système d'étude. Les données requises pour identifier le modèle de turbine à gaz sont acquises sur la base des performances réelles du système dans des conditions de fonctionnement nominales. Des informations détaillées sur l'unité de turbine à gaz, les conditions d'expérience et le processus d'acquisition de données sont présentées au chapitre 2.

La figure 3.2 considérée est présentée la structure du système de contrôle en réseau pour la turbine à gaz. Comme le montre la figure 3.2, la puissance générée et la température de sortie de la turbine à gaz sont les deux principales variables, qui pourraient être réglées en contrôlant la position de la vanne de régulation du gaz combustible (FGCV) et la position de l'aube directrice d'entrée (IGV). Les modèles d'espace d'états pour le système de turbine à gaz sont développés comme un système "par unité". La température ambiante est également considérée comme une perturbation, où les variables intermédiaires sont considérées comme le rapport de pression du compresseur (CPR) et le débit d'air. Le modèle de turbine à gaz dans les représentations d'espace d'état est exprimé dans les deux systèmes suivants:

$$\text{Plant 1:} \begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_1 x_1(t) + B_1 y_2(t) \\ y_1(t) = C_1 x_1(t) + D_{w1} \omega(t) \end{cases} \quad (3.44)$$

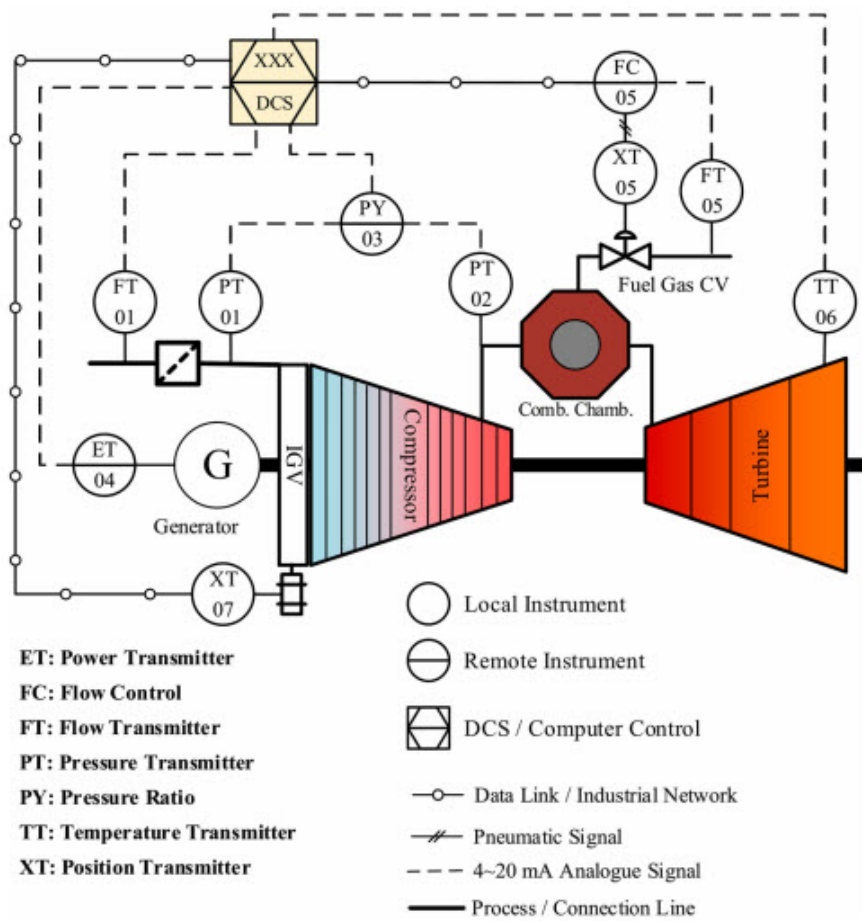


Figure 3.2: Système de contrôle de turbine à gaz grande type V94.2 [30]

$$\text{Plant 2: } \begin{cases} \dot{x}_2(t) = A_2 x_2(t) + B_2 u(t) + B_w \omega(t) \\ y_2(t) = C_2 x_2(t) + D_{w2} \omega(t) \end{cases} \quad (3.45)$$

Avec

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.38288 & -0.027912 \\ -0.23586 & -0.049392 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} -0.052953 & -0.062172 \\ 0.29024 & -0.42252 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0.36058 \\ 0.28057 \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0.17311 \\ 0.081067 \end{bmatrix}, B_w = \begin{bmatrix} 0.02 \\ 0.02 \end{bmatrix}, C_1 = C_2 = \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}^T, D_{w1} = D_{w2} = 0.1.$$

Les modèles linéaires du groupe turbine à gaz sont identifiés autour de la charge nominale. Étant donné que l'exposition aux perturbations est inévitable dans un tel système, une configuration en cascade serait une structure appropriée pour minimiser les effets de changements indésirables dans les conditions de fonctionnement. Concernant le modèle de turbine à gaz,

- Premièrement, nous avons considéré que les gains du contrôleur de retour d'état sont connue ,donc en résolvant les LMI résultants dans le théorème 1 pour calculer le maximum retard induit par le réseau acceptable.
- Lorsque les gains du contrôleur de retour d'état ne sont pas connus, nous avons calculé en résolvant les LMI résultants dans le théorème 2.
- Ensuite, l'indice de performance minimum H_∞ , γ , sont déterminés pour les gains spécifiques du contrôleur, sur la base du théorème 3.

3.4.1.1 Résultats de l'analyse de stabilité L'objectif est de trouver la limite supérieure maximale autorisée τ_M (notée $\text{maux}(\tau_M)$ du retard induit par le réseau garantissent que le NCS considéré est globalement asymptotiquement stable) .

En fixant le niveau d'atténuation H_∞ prescrit à $\gamma = 0.13$, et avec les paramètres $\tau_m = 0.1$, les gains de contrôle inspirés de [30] sont

$$K_1 = \begin{bmatrix} -1.7016 & -0.1295 \end{bmatrix}, K_2 = \begin{bmatrix} -5.0144 & -0.0775 \end{bmatrix}$$

, les conditions du théorème [3.1] ont été résolus via la Matlab LMI Toolbox cela fournit une valeur maximale de $\tau_M = 0.73$ s. En supposant $h = 10$ ms, le délai maximal autorisé induit par le réseau est de $\bar{\tau} = \tau_M - h = 720$ ms. Les simulations suivantes sont effectuées

avec la condition initiale $x_1(0) = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}^T$, $x_2(0) = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}^T$ et un signal de perturbation externe défini comme

$$\begin{cases} \omega(t) = \sin(0.5t) & \text{Ou } t \in [5, 20] \\ \omega(t) = 0 & \text{Autrement} \end{cases} \quad (3.46)$$

Les trajectoires d'état du système en boucle fermée et la perturbation externe sont tracées respectivement dans la Fig. (3.3) et la Fig. 3.4.

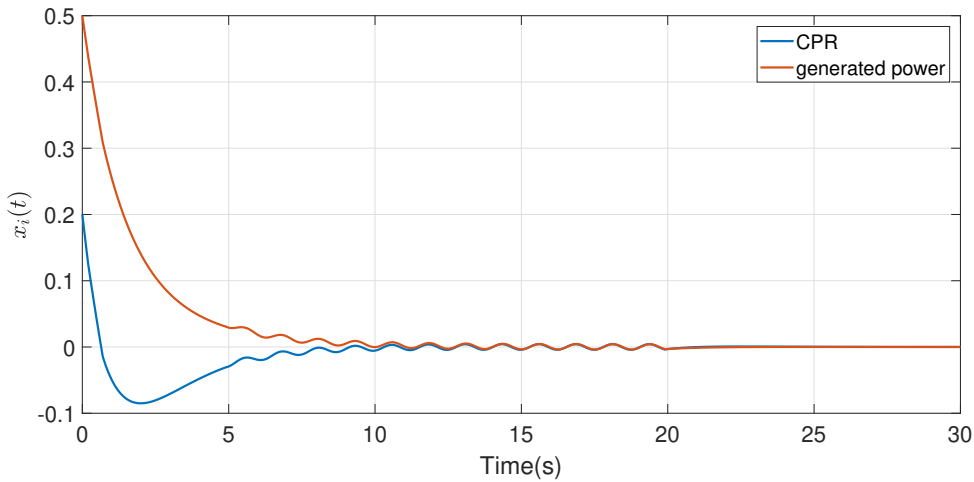


Figure 3.3: Trajectoires des États.

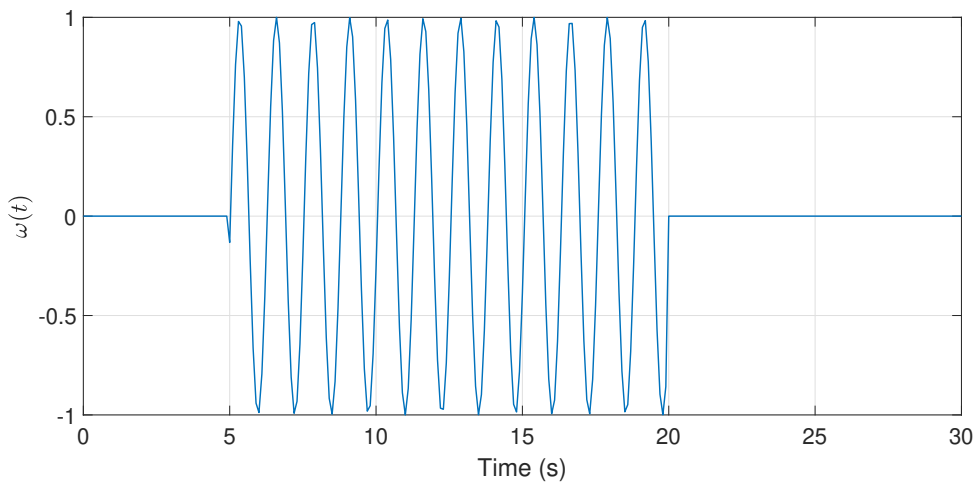


Figure 3.4: La perturbation externe $\omega(t)$.

Comme prévu, pour ces deux simulations, le NCS (3.7) est asymptotiquement stabilisé par la loi de commande en réseau.

3.4.1.2 Les résultats de conception de Contrôler L'objectif est de trouver un contrôleur sous réseau garantissent que le NCS considéré est globalement asymptotiquement stable .

supposons que $\varepsilon_1 = 10$, $\varepsilon_2 = 5$, et le niveau d'atténuation H_∞ prescrit à $\gamma = 0.13$, et avec les paramètres $\tau_m = 0.1$, les conditions du Théorème 3.2 ont été résolues via la Matlab LMI Toolbox, fournissant une valeur maximale de $\tau_M = 0.82 s$, ainsi que les gains du contrôleur sont:

$$K_1 = \begin{bmatrix} -7.9641 & 0.2512 \end{bmatrix}, K_2 = \begin{bmatrix} -3.2280 & 0.0743 \end{bmatrix}$$

En supposant $h = 10 ms$, le délai maximal autorisé induit par le réseau est de $\bar{\tau} = \tau_M - h = 720 ms$. Les simulations suivantes sont effectuées avec la condition initiale $x_1(0) = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}^T$, $x_2(0) = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}^T$ et un signal de perturbation externe défini comme

$$\begin{cases} \omega(t) = \sin(0.2t) & \text{Ou } t \in [5, 20] \\ \omega(t) = 0 & \text{Autrement} \end{cases} \quad (3.47)$$

Les trajectoires d'état du système en boucle fermée et la perturbation externe sont tracées respectivement dans la fig .(3.5) la Fig.3.6

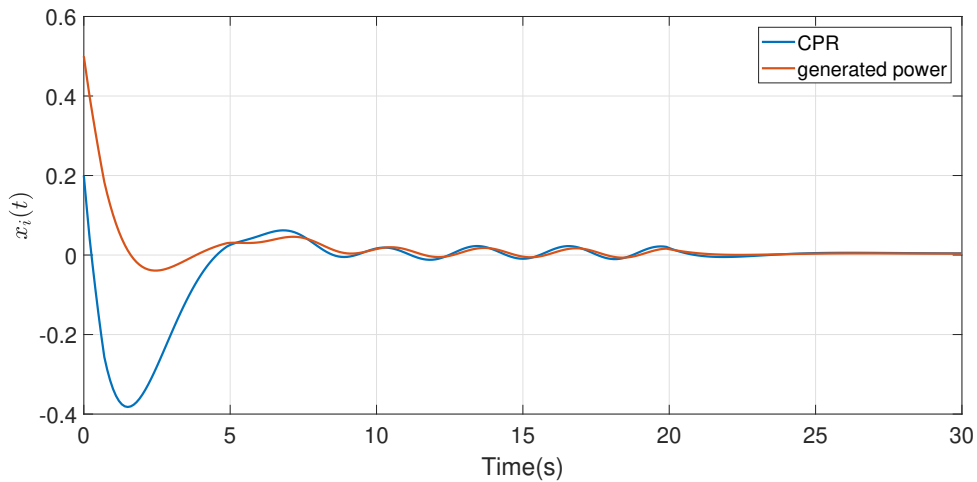


Figure 3.5: Trajectoires des États.

Nous observons que le NCS en boucle fermée conçu est correctement stabilisé et atteint l'origine. Cela confirme l'efficacité de la conception de contrôleur de données échantillonnées en réseau proposée pour NCS.

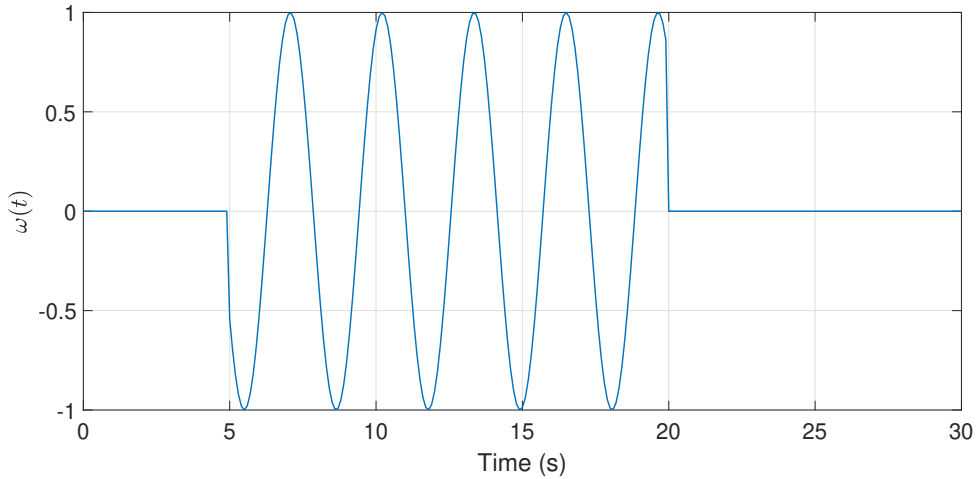


Figure 3.6: La perturbation externe $\omega(t)$.

3.4.2 Turbo moteur GE T700 Un turbo moteur à turbine à gaz GE T700 est considéré comme une étude de cas considérée dans le chapitre 2. Les séries de T700 sont des turbomoteurs bien connus utilisés pour la production d'énergie dans les hélicoptères. Sur la figure 3.7, la structure du moteur et les points de mesure pour contrôler l'unité sont présentés. La vitesse du générateur de gaz, NG , et l'arbre de la turbine de puissance, Q_s , sont la sortie principale du moteur, qui sont régulées par la position de la soupape de commande de carburant (FCV) et le point de consigne de la vitesse de la turbine de puissance, NP . La représentation de l'espace d'état de la turbine est donnée dans l'équation (3.48) et équation (3.49). Les variables d'état pour x_1 sont respectivement la vitesse de la turbine de puissance, la vitesse des pales du rotor principal et le couple du rotor. De plus, la vitesse du générateur de gaz, le couple de l'arbre moteur, la température d'entrée de la turbine de puissance, la pression de décharge statique du compresseur et la valeur de consigne de la vitesse de la turbine de puissance sont les variables d'état de x_2 , respectivement. Les modifications des conditions environnementales telles que la vitesse du vent et la température ambiante sont considérées comme des perturbations.

$$\text{Plant 1: } \begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_1 x_1(t) + B_1 y_2(t) \\ y_1(t) = C_1 x_1(t) + D_{w1} \omega(t) \end{cases} \quad (3.48)$$

$$\text{Plant 2: } \begin{cases} \dot{x}_2(t) = A_2 x_2(t) + B_2 u(t) + B_w \omega(t) \\ y_2(t) = C_2 x_2(t) + D_{w2} \omega(t) \end{cases} \quad (3.49)$$

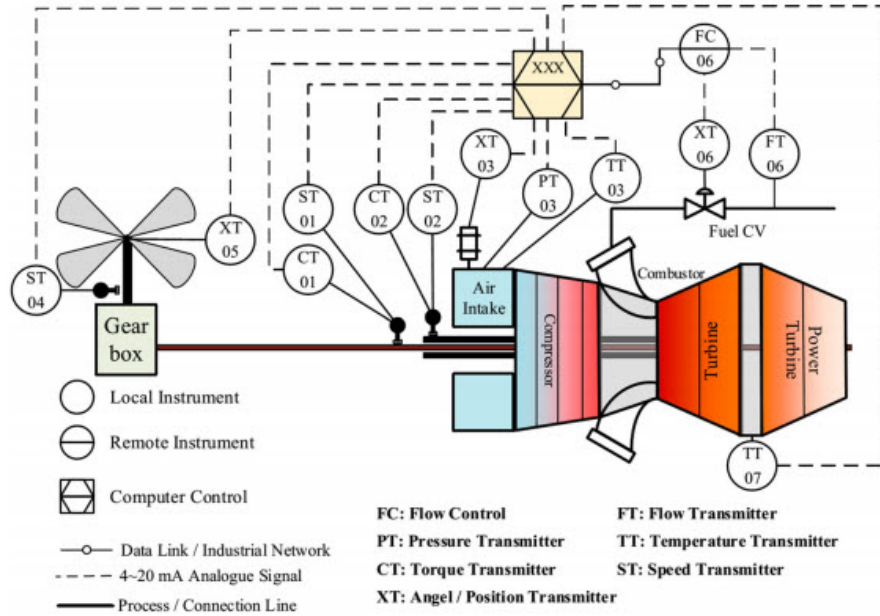


Figure 3.7: Système de contrôle du turbomoteur GE T700. [30]

Avec

$$A_2 = \begin{bmatrix} -126.8 & 27.04 & 12.36 & 22.17 & 16.72 \\ 54.67 & 57.21 & -77.02 & -76.21 & 50.81 \\ -336.6 & 223.3 & -130.7 & -83.32 & 172.1 \\ 161.2 & 2.459 & -21.8 & -63.09 & 1.799 \\ 62.42 & -73.55 & -104.2 & -91.44 & -102.3 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} -11.7 \\ 44.24 \\ 53.56 \\ 17.45 \\ 59.35 \end{bmatrix}, B_w = \begin{bmatrix} 0.02 \\ 0.02 \\ 0.02 \\ 0.02 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0 & 0 & -285.7143 \\ 0 & -0.4533 & 9.0662 \\ 5.2650 & -5.2131 & -42.5958 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 571.4286 \\ 0 \\ 82.5714 \end{bmatrix}, C_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T, D_{w1} = D_{w2} = 0.$$

Les principaux objectifs définis dans cet exemple sont:

- Premièrement, nous avons considéré que les gains du contrôleur de retour d'état sont connus, donc en résolvant les LMI résultants dans le théorème 1 pour calculer le maximum retard induit par le réseau acceptable.
- Lorsque les gains du contrôleur de retour d'état ne sont pas connus, nous avons calculé en résolvant les LMI résultants dans le théorème 2.
- Ensuite, l'indice de performance minimum H_∞ , γ , sont déterminés pour les gains spécifiques du contrôleur, sur la base du théorème 3.

3.4.2.1 Résultats de l'analyse de stabilité L'objectif est de trouver la limite supérieure maximale autorisée τ_M (notée $\text{maux}(\tau_M)$ du retard induit par le réseau garantissent que le NCS considéré est globalement asymptotiquement stable).

En fixant le niveau d'atténuation H_∞ prescrit à $\gamma = 0.2$, et avec les paramètres $\tau_m = 0.01$, les gains de contrôle inspirés de [30] sont

$$K_1 = \begin{bmatrix} -0.2231 & -0.1436 & 1.0663 \end{bmatrix}, K_2 = \begin{bmatrix} -1.4499 & -2.4913 & 0.8891 & 0.7474 & -0.171 \end{bmatrix}$$

, les conditions du théorème 3.1 ont été résolus via la Matlab LMI Toolbox cela fournit une valeur maximale de $\tau_M = 0.2$ s. En supposant $h = 10$ ms, le délai maximal autorisé induit par le réseau est de $\bar{\tau} = \tau_M - h = 190$ ms. Les simulations suivantes sont effectuées avec la condition initiale $x_1(0) = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.2 \end{bmatrix}^T$, $x_2(0) = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.1 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}^T$ et un signal de perturbation externe défini comme

$$\begin{cases} \omega(t) = 0.1 \sin(5t) & \text{Ou } t \in [1, 3] \\ \omega(t) = 0 & \text{Autrement} \end{cases} \quad (3.50)$$

Les trajectoires d'état du système en boucle fermée et la perturbation externe sont tracées respectivement dans la fig (3.8) et la Fig.3.9 et la Fig.3.10.

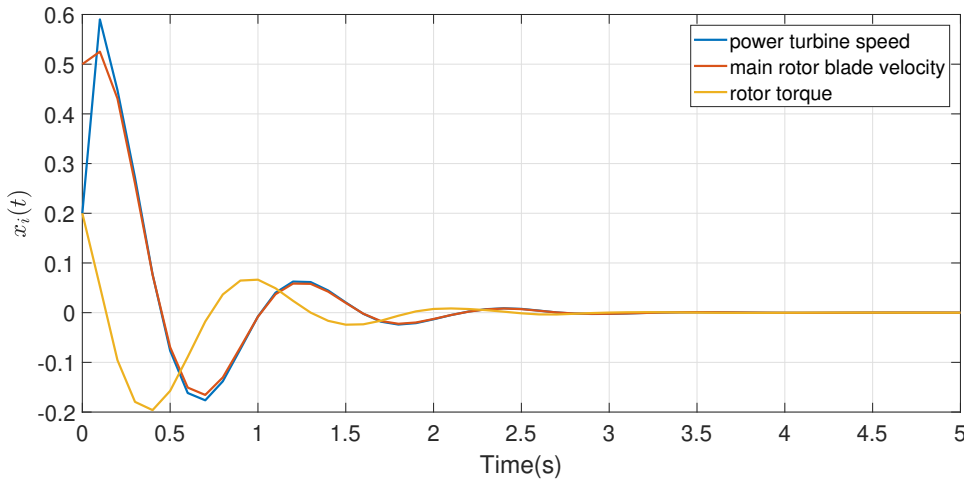


Figure 3.8: Trajectoires des États de system 1.

Comme prévu, pour ces deux simulations, le NCS (3.7) est asymptotiquement stabilisé par la loi de commande en réseau.

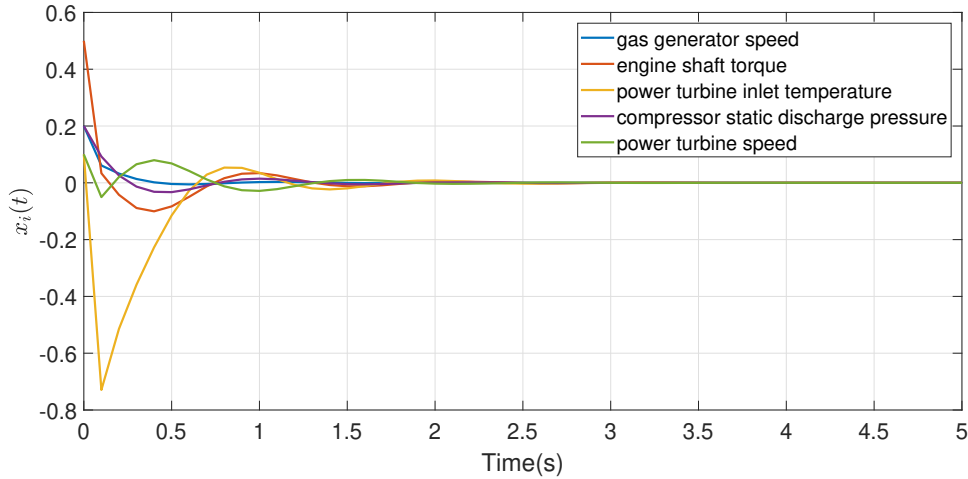
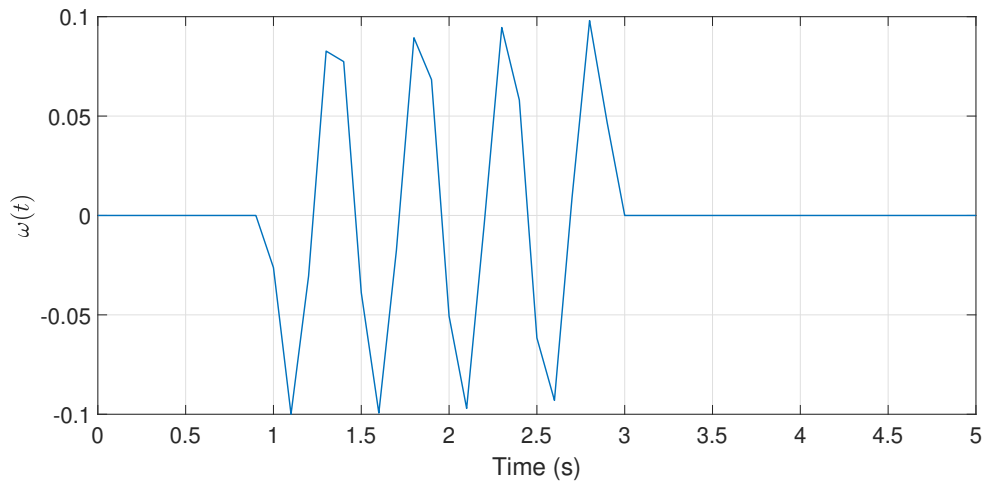


Figure 3.9: Trajectoires des États de system 2.

Figure 3.10: La perturbation externe $\omega(t)$.

3.4.2.2 Les résultats de conception de Contrôler L'objectif est de trouver un contrôleur sous réseau garantissant que le NCS considéré est globalement asymptotiquement stable .

supposons que $\varepsilon_1 = 20.5$, $\varepsilon_2 = 10.3$, et le niveau d'atténuation H_∞ prescrit à $\gamma = 2$, et avec les paramètres $\tau_m = 0.01$, les conditions du Théorème 3.2 ont été résolues via la Matlab LMI Toolbox, fournissant une valeur maximale de $\tau_M = 0.18 s$, ainsi que les gains du contrôleur sont:

$$K_1 = \begin{bmatrix} -0.0087 & 0.0086 & 0.0007 \end{bmatrix}, K_2 = \begin{bmatrix} -0.4591 & 1.5663 & -1.2238 & -1.2340 & 1.2665 \end{bmatrix}$$

En supposant $h = 10 \text{ ms}$, le délai maximal autorisé induit par le réseau est de $\bar{\tau} = \tau_M - h = 170 \text{ ms}$. Les simulations suivantes sont effectuées avec la condition initiale $x_1(0) = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.2 \end{bmatrix}^T$, $x_2(0) = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.1 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}^T$ et un signal de perturbation externe défini comme

$$\begin{cases} \omega(t) = 0.1 \sin(5t) & \text{Ou } t \in [1, 3] \\ \omega(t) = 0 & \text{Autrement} \end{cases} \quad (3.51)$$

Les trajectoires d'état du système en boucle fermée et la perturbation externe sont tracées respectivement dans la fig (3.11) et la Fig 3.12 et la Fig 3.13.

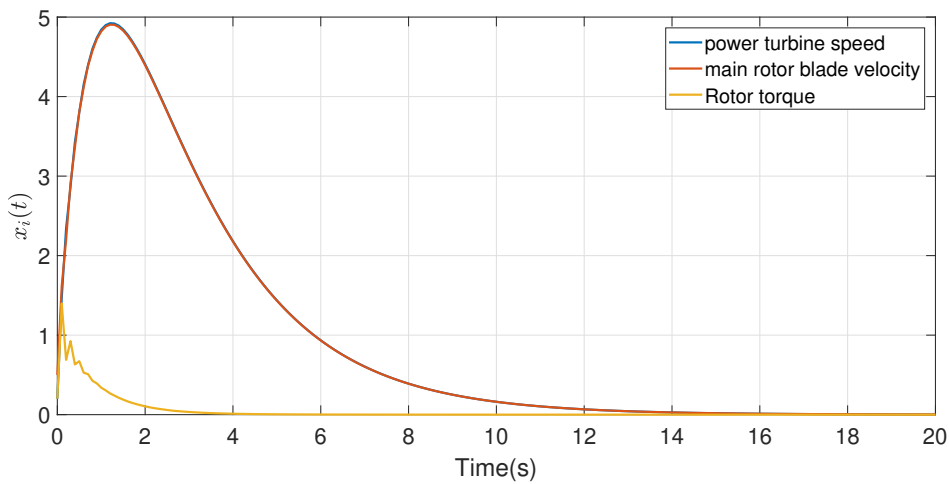


Figure 3.11: Trajectoires des États du système 1.

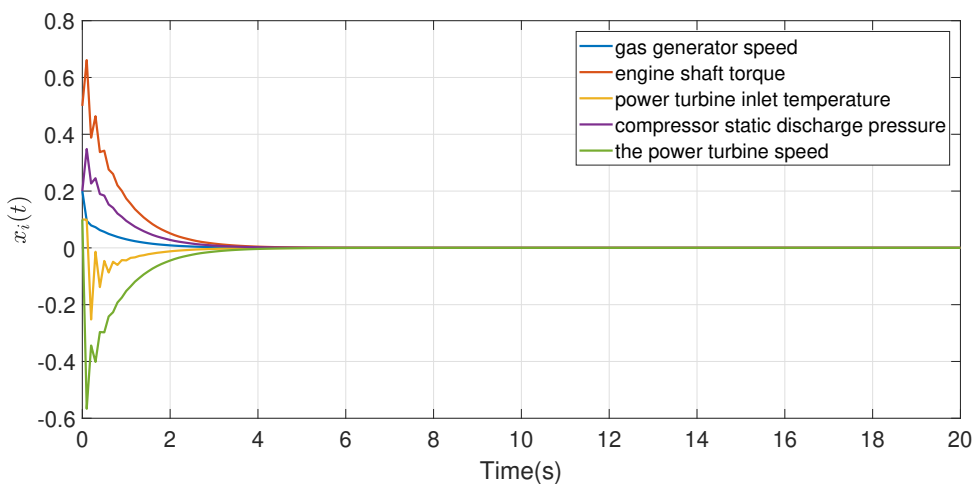


Figure 3.12: Trajectoires des États du système 2.

Nous observons que le NCS en boucle fermée conçu est correctement stabilisé et atteint l'origine. Cela confirme l'efficacité de la conception de contrôleur de données échantil-

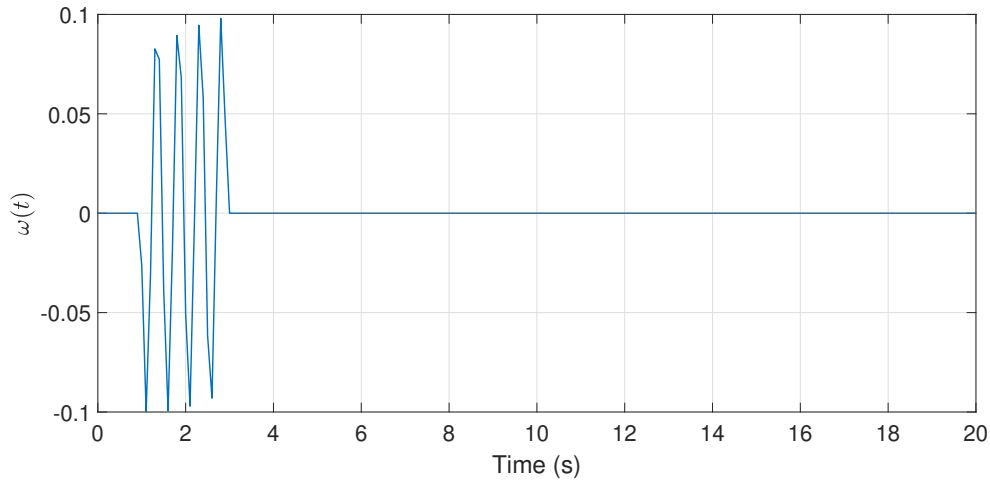


Figure 3.13: La perturbation externe $\omega(t)$.

lonnées en réseau proposée pour NCS.

3.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre s'est concentré sur l'analyse de stabilité et la conception d'un contrôleur robuste pour les systèmes de turbines à gaz en réseau. Les nouvelles conditions de stabilité proposées, basées sur la méthode LKF et les inégalités matricielles linéaires (LMI), ont permis d'obtenir des résultats significatifs. L'objectif principal était de stabiliser le système de contrôle des flux de gaz pour maintenir les performances optimales des turbines à gaz face aux défis des réseaux variant dans le temps et des perturbations externes. Les résultats ont montré que les conditions de stabilité ont joué un rôle crucial dans la détermination de la borne supérieure maximale admissible pour les retards induits par le réseau, tout en minimisant l'impact des perturbations externes sur le système. En mettant en œuvre ces résultats, un contrôleur de retour d'état robuste spécifiquement adapté aux turbines à gaz a été conçu et des simulations numériques ont confirmé son efficacité sur le modèle de turbine à gaz étudié. Ces résultats significatifs ouvrent la voie à des améliorations substantielles dans le domaine des turbines à gaz, renforçant l'efficacité et la fiabilité dans des environnements complexes. L'analyse de stabilité et la conception d'un contrôleur robuste sont cruciales pour garantir la stabilité et les performances optimales du système dans des conditions changeantes des réseaux de communication. Ces résultats offrent des perspectives prometteuses pour des développements futurs visant à maximiser l'efficacité opérationnelle et à améliorer la fiabilité des turbines à gaz dans des

environnements réseau.

Conclusions générale

En conclusion, ce mémoire a exploré divers aspects du système de turbine à gaz et du contrôle des systèmes via des réseaux de communication. Il a été démontré que la turbine à gaz est une technologie énergétique complexe, composée de plusieurs composants inter-connectés qui jouent un rôle crucial dans sa performance. L'introduction du contrôle des systèmes via des réseaux de communication présente des avantages tels que la flexibilité et la gestion centralisée, mais également des défis tels que la limitation de la bande passante, les retards et les pertes de paquets, ainsi que les protocoles de planification et l'échantillonnage variable, qui peuvent avoir un impact sur les performances du système. Il est essentiel de comprendre les différents modèles, structures, boucles de contrôle et défis associés à ces systèmes pour leur conception, leur optimisation et leur maintenance.

L'intégration efficace de la communication réseau dans les systèmes de turbine à gaz nécessite une prise de décision éclairée, en évaluant attentivement les avantages et les inconvénients de cette approche. Dans ce contexte, l'utilisation de techniques de contrôle robustes telles que le contrôle H_∞ , les conditions de stabilité proposées basées sur la méthode LKF et les inégalités matricielles linéaires (LMI) a permis d'obtenir des résultats significatifs pour atténuer les effets des perturbations et des incertitudes liées aux réseaux de communication. Ce type de contrôle vise à concevoir des contrôleurs robustes qui minimisent l'impact des perturbations externes tout en assurant des performances optimales du système.

En combinant ces connaissances, il est possible de développer des systèmes de turbine à gaz avancés, intégrant des contrôles efficaces et optimisés via des réseaux de communication pour répondre aux besoins de l'industrie énergétique moderne. Pour résumer, ce mémoire s'est concentré sur l'analyse de stabilité et la conception d'un contrôleur robuste pour les systèmes de turbines à gaz en réseau. Les nouvelles conditions de stabilité proposées ont permis d'obtenir des résultats significatifs, en stabilisant le système de con-

trôle des flux de gaz pour maintenir les performances optimales des turbines à gaz face aux défis des réseaux variant dans le temps et des perturbations externes.

Les résultats ont démontré que les conditions de stabilité jouent un rôle crucial dans la détermination de la borne supérieure maximale admissible pour les retards induits par le réseau, tout en minimisant l'impact des perturbations externes sur le système. Un contrôleur de retour d'état robuste spécifiquement adapté aux turbines à gaz a été conçu et les simulations numériques ont confirmé son efficacité sur le modèle de turbine à gaz étudié. Ces résultats significatifs ouvrent la voie à des améliorations substantielles dans le domaine des turbines à gaz, renforçant l'efficacité et la fiabilité dans des environnements complexes.

L'analyse de stabilité et la conception d'un contrôleur robuste sont cruciales pour garantir la stabilité et les performances optimales du système dans des conditions changeantes des réseaux de communication. Ces résultats offrent des perspectives prometteuses pour des développements futurs visant à maximiser l'efficacité opérationnelle et à améliorer la fiabilité des turbines à gaz dans des environnements réseau.

References

- [1] T Adefarati and RC Bansal. Energizing renewable energy systems and distribution generation. In *Pathways to a smarter power system*, pages 29–65. Elsevier, 2019.
- [2] Pirooska Ailer, Imre Sánta, Gábor Szederkényi, and Katalin M Hangos. Nonlinear model-building of a low-power gas turbine. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 29(1-2):117–135, 2001.
- [3] Lotfi Akroum. *Amélioration du taux de récupération de l’isobutane du complexe de Skikda CP2K*. PhD thesis, 2017.
- [4] AC Alkidas. The application of availability and energy balances to a diesel engine. 1988.
- [5] Mohammad Ameri and Behnam Tahvildar. V94. 2 gas turbine thermodynamic modeling for estimation of power gained by fog system in iran power plants. *Int. J. Energy Eng*, 1:33–43, 2011.
- [6] S Massoud Amin and Bruce F Wollenberg. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE power and energy magazine*, 3(5):34–41, 2005.
- [7] Brian DO Anderson. A system theory criterion for positive real matrices. *SIAM Journal on Control*, 5(2):171–182, 1967.
- [8] Brian DO Anderson and Sumeth Vongpanitlerd. *Network analysis and synthesis: a modern systems theory approach*. Courier Corporation, 2013.
- [9] Hamid Asgari, XiaoQi Chen, and Raazesh Sainudiin. Considerations in modelling and control of gas turbines—a review. In *The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation*, pages 84–89. IEEE, 2011.

- [10] Alireza Bahadori and Hari B Vuthaluru. Estimation of air specific heat ratio at elevated pressures using simple predictive tool. *Energy conversion and management*, 52(2):1526–1532, 2011.
- [11] John Baillieul and Panos J Antsaklis. Control and communication challenges in networked real-time systems. *Proceedings of the IEEE*, 95(1):9–28, 2007.
- [12] Lei Bao, Mikael Skoglund, and Karl Henrik Johansson. Encoder~ decoder design for event-triggered feedback control over bandlimited channels. In *2006 American Control Conference*, pages 4183–4188. IEEE, 2006.
- [13] B Ross Barmish and EI Jury. New tools for robustness of linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(12):2525–2525, 1994.
- [14] Sathyam Bonala, Bidyadhar Subudhi, and Sandip Ghosh. On delay robustness improvement using digital smith predictor for networked control systems. *European Journal of Control*, 34:59–65, 2017.
- [15] Meherwan P Boyce. *Gas turbine engineering handbook*. Elsevier, 2011.
- [16] Meherwan P Boyce. 10-combustors. *Gas Turbine Engineering Handbook (Fourth Edition)*, Butterworth-Heinemann, Oxford, pages 427–490, 2012.
- [17] Ricardo Chacartegui, David Sánchez, A Muñoz, and T Sánchez. Real time simulation of medium size gas turbines. *Energy Conversion and Management*, 52(1):713–724, 2011.
- [18] Ali Chaibakhsh and Saeed Amirkhani. A simulation model for transient behaviour of heavy-duty gas turbines. *Applied Thermal Engineering*, 132:115–127, 2018.
- [19] Ali Chaibakhsh and Ali Ghaffari. Steam turbine model. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(9):1145–1162, 2008.
- [20] Haifei Chen, Jinfeng Gao, Ting Shi, and Renquan Lu. h_∞ control for networked control systems with time delay, data packet dropout and disorder. *Neurocomputing*, 179:211–218, 2016.

- [21] David J Taylor Olivier Crabos. Ge power systems gas turbine and combined cycle products technology-experience-innovation. *Gas turbine and Combined Cycle-GE Power Systems*, 2003.
- [22] Soura Dasgupta, Ganapathy Chockalingam, BDO Anderson, and Minyue Fe. Lyapunov functions for uncertain systems with applications to the stability of time varying systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 41(2):93–106, 1994.
- [23] Lei Ding, Qing-Long Han, and Ge Guo. Network-based leader-following consensus for distributed multi-agent systems. *Automatica*, 49(7):2281–2286, 2013.
- [24] Sydney Lawrence Dixon and Cesare Hall. *Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery*. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [25] John Doyle, Keith Glover, Pramod Khargonekar, and Bruce Francis. State-space solutions to standard h_2 and h_∞ control problems. In *1988 American Control Conference*, pages 1691–1696. IEEE, 1988.
- [26] Zhaoping Du, Wenrong Yuan, and Songlin Hu. Discrete-time event-triggered h_∞ stabilization for networked cascade control systems with uncertain delay. *Journal of the Franklin Institute*, 356(16):9524–9544, 2019.
- [27] Zhaoping Du, Dong Yue, and Songlin Hu. H_∞ stabilization for singular networked cascade control systems with state delay and disturbance. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2):882–894, 2013.
- [28] Arezou Elahi and Alireza Alfi. Finite-time h_∞ control of uncertain networked control systems with randomly varying communication delays. *ISA transactions*, 69:65–88, 2017.
- [29] Arezou Elahi and Alireza Alfi. Stochastic h_∞ finite-time control of networked cascade control systems under limited channels, network delays and packet dropouts. *ISA transactions*, 97:352–364, 2020.
- [30] Nasim Ensansafat, Ali Chaibakhsh, and Ali Jamali. Enhancing disturbance rejection performance for a class of networked cascade control systems: an h_∞ approach. *International Journal of Control*, 96(1):223–237, 2023.

- [31] Arash Farnam and Reza Mahboobi Esfanjani. Improved stabilization method for networked control systems with variable transmission delays and packet dropout. *ISA transactions*, 53(6):1746–1753, 2014.
- [32] Emilia Fridman. *Introduction to time-delay systems: Analysis and control*. Springer, 2014.
- [33] Sana Gaaloul. *Interoperabilite basee sur les standards Modelica et composant logiciel pour la simulation energetique des systemes de batiment*. PhD thesis, Universite de Grenoble, 2012.
- [34] Yuan Ge, Qigong Chen, Ming Jiang, and Yiqing Huang. Modeling of random delays in networked control systems. *Journal of Control Science and Engineering*, 2013:8–8, 2013.
- [35] Renaud Gicquel. *Systemes energetiques*, volume 1. Presses des MINES, 2009.
- [36] Rachana Ashok Gupta and Mo-Yuen Chow. Networked control system: Overview and research trends. *IEEE transactions on industrial electronics*, 57(7):2527–2535, 2009.
- [37] Ismahane HAFFI-RASSO, Hanane LOUAHCHE, and Linda AMNACH. *Evaluation de l'efficacité des politiques de formation et recrutement de l'entreprise. Cas de l'entreprise SONATRACH-HBK période d'étude (2013-2016)*. PhD thesis.
- [38] Je-Chin Han, Sandip Dutta, and Srinath Ekkad. *Gas turbine heat transfer and cooling technology*. CRC press, 2012.
- [39] Didier Henrion. Linear matrix inequalities for robust strictly positive real design. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 49(7):1017–1020, 2002.
- [40] DJEDDOU HESSEM. Etude thermodynamique et amélioration de turbine à gaz de type pgt25.
- [41] CV Hollot, Lin Huang, and Zhong-Ling Xu. Designing strictly positive real transfer function families: A necessary and sufficient condition for low degree and structured

- families. In *Robust Control of Linear Systems and Nonlinear Control: Proceedings of the International Symposium MTNS-89, Volume II*, pages 215–227. Springer, 1990.
- [42] Congzhi Huang, Yan Bai, and Xinli Li. Fundamental issues in networked cascade control systems. In *2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pages 3014–3018. IEEE, 2008.
- [43] Congzhi Huang, Yan Bai, and Xiangjie Liu. H-infinity state feedback control for a class of networked cascade control systems with uncertain delay. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 6(1):62–72, 2009.
- [44] Hussein Ibrahim. *Étude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé*. Université du Québec à Chicoutimi, 2010.
- [45] Bartosz Kowalczyk, Cezary Kowalczyk, Radosław Mateusz Rolf, and Krzysztof Badyda. Model of an ansaldo v94. 2 gas turbine from lublin wrotków combined heat and power plant using gatecycle™ software. *Journal of Power Technologies*, 94(3):190–195, 2014.
- [46] Min Li, Feng Shu, Duyu Liu, and Shouming Zhong. Robust h_∞ control of ts fuzzy systems with input time-varying delays: A delay partitioning method. *Applied Mathematics and Computation*, 321:209–222, 2018.
- [47] Jinliang Liu, Lili Wei, Xiangpeng Xie, Engang Tian, and Shumin Fei. Quantized stabilization for t–s fuzzy systems with hybrid-triggered mechanism and stochastic cyber-attacks. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 26(6):3820–3834, 2018.
- [48] Xiaofeng Liu, Yanxi Li, and Xu Sun. Design of distributed engine control systems with uncertain delay. *Plos one*, 11(9):e0163545, 2016.
- [49] Merid Lješnjanić, Dragan Nešić, and Daniel E Quevedo. Robust stability of a class of networked control systems. *Automatica*, 73:117–124, 2016.
- [50] Yves Loranchet. *Mise en oeuvre des turbines à gaz dans l'industrie*. Ed. Techniques Ingénieur, 1992.

- [51] Norman B Macintosh, Teri Shearer, and Angelo Riccaboni. A levinasian ethics critique of the role of management and control systems by large global corporations: The general electric/nuovo pignone example. *Critical Perspectives on Accounting*, 20(6):751–761, 2009.
- [52] Magdi S Mahmoud, SZ Selim, and Peng Shi. Global exponential stability criteria for neural networks with probabilistic delays. *IET control theory & applications*, 4(11):2405–2415, 2010.
- [53] MS Mahmoud, SZ Selim, P Shi, and MH Baig. New results on networked control systems with non-stationary packet dropouts. *IET Control Theory & Applications*, 6(15):2442–2452, 2012.
- [54] Sonny Martin, Iain Wallace, and Declan G Bates. Development and validation of a civil aircraft engine simulation model for advanced controller design. *Transactions of the ASME-A-Engineering for Gas Turbines and Power*, 130(5):51601–51700, 2008.
- [55] K Mathiyalagan, Ju H Park, and R Sakthivel. New results on passivity-based h_∞ control for networked cascade control systems with application to power plant boiler–turbine system. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 17:56–69, 2015.
- [56] Cai Meng, Tianmiao Wang, Wusheng Chou, Sheng Luan, Yuru Zhang, and Zengmin Tian. Remote surgery case: robot-assisted teleneurosurgery. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004*, volume 1, pages 819–823. IEEE, 2004.
- [57] M Mohitpour and Andrew Jenkins. Pipeline operations.
- [58] Sathishkumar Murugesan and Yen-Chen Liu. Mixed-triggered reliable control for singular networked cascade control systems with randomly occurring cyber attack. *arXiv preprint arXiv:1903.01024*, 2019.
- [59] Ebrahim Najimi and Mohammad Hossein Ramezani. Robust control of speed and temperature in a power plant gas turbine. *ISA transactions*, 51(2):304–308, 2012.
- [60] METALLAOUI NASSIM. mémoire de master[Étude thermodynamique de la turbine à gaz ms7001ea au niveau du complexe gnl1k deskikda. 2016/2017.

- [61] ILIAS NESRAOUI. *mémoire de fin d' étude ANALYSE ET SIMULATION DE REFROIDISSEMENT DES AUBES D'UNE TURBINE A GAZ*. PhD thesis.
- [62] Christophe Nicolet, Bob Greiveldinger, Jean Jacques Herou, Basile Kawkabani, Philippe Allenbach, Jean-Jacques Simond, and Francois Avellan. High-order modeling of hydraulic power plant in islanded power network. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4):1870–1880, 2007.
- [63] Gordon C Oates. *Aerothermodynamics of gas turbine and rocket propulsion*. Aiaa, 1997.
- [64] Zhong-Hua Pang, Guo-Ping Liu, Donghua Zhou, and Dehui Sun. Data-based predictive control for networked nonlinear systems with network-induced delay and packet dropout. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(2):1249–1257, 2015.
- [65] Antonis Papachristodoulou and Stephen Prajna. On the construction of lyapunov functions using the sum of squares decomposition. In *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002.*, volume 3, pages 3482–3487. IEEE, 2002.
- [66] Vijay V Patel and Kanti B Datta. Classification of units in $h/sub/spl infin//$ and an alternative proof kharitonov's theorem. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 44(5):454–458, 1997.
- [67] MM Rahman, Thamir K Ibrahim, and Ahmed N Abdalla. Thermodynamic performance analysis of gas-turbine power-plant. *International journal of the physical sciences*, 6(14):3539–3550, 2011.
- [68] MM Rahman, Thamir K Ibrahim, MY Taib, MM Noor, and Rosli A Bakar. Thermal analysis of open-cycle regenerator gas-turbine power-plant. *Fuel*, 200(4):2, 2010.
- [69] AMY Razak. *Industrial gas turbines: performance and operability*. Elsevier, 2007.
- [70] Hongru Ren, Renquan Lu, Junlin Xiong, and Yong Xu. Optimal estimation for discrete-time linear system with communication constraints and measurement quantization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 50(5):1932–1942, 2018.

- [71] Rathinasamy Sakthivel, Murugesan Sathishkumar, Yong Ren, and OM Kwon. Fault-tolerant sampled-data control of singular networked cascade control systems. *International Journal of Systems Science*, 48(10):2079–2090, 2017.
- [72] Sepehr Sanaye and Javad Mahmoudimehr. Technical assessment of isothermal and non-isothermal modelings of natural gas pipeline operational conditions. *Oil & Gas Science and Technology–Revue d’IFP Energies nouvelles*, 67(3):435–449, 2012.
- [73] Srimanta Santra, R Sakthivel, K Mathiyalagan, and S Marshal Anthoni. Exponential passivity results for singular networked cascade control systems via sampled-data control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 139(3), 2017.
- [74] Srimanta Santra, Rathinasamy Sakthivel, Yan Shi, and K Mathiyalagan. Dissipative sampled-data controller design for singular networked cascade control systems. *Journal of the Franklin Institute*, 353(14):3386–3406, 2016.
- [75] Meinhard T Schobeiri and Seyed M Ghoreyshi. The ultrahigh efficiency gas turbine engine with stator internal combustion. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 138(2), 2016.
- [76] SHARIKET KAHRABA SKIKDA. Notions de base du cycle combine et vue d’ensemble de l’installation-phase ii. 2016/2017.
- [77] Joseph Mauk Smith, Hendrick C Van Ness, Michael M Abbott, and Mark Thomas Swihart. *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. McGraw-Hill Singapore, 1949.
- [78] Jian Sun and Jie Chen. A survey on lyapunov-based methods for stability of linear time-delay systems. *Frontiers of Computer Science*, 11:555–567, 2017.
- [79] Mohammad Reza Bank Tavakoli, Behrooz Vahidi, and Wolfgang Gawlik. An educational guide to extract the parameters of heavy duty gas turbines model in dynamic studies based on operational data. *IEEE Transactions on power systems*, 24(3):1366–1374, 2009.
- [80] Philip J Thomas. *Simulation of industrial processes for control engineers*. Elsevier, 1999.

- [81] Abderraouf Trabelsi. *Conception d'un logiciel de dimensionnement de gazoducs: application: gazoduc GR4 reliant le champ de production de rhourde nous au CNDG Hassi R'mel*. PhD thesis, 2009.
- [82] Fei-Yue Wang and Derong Liu. *Networked control systems*. Springer, 2008.
- [83] Long Wang and Wensheng Yu. Robust spr synthesis for low-order polynomial segments and interval polynomials. In *Proceedings of the 2001 American Control Conference.(Cat. No. 01CH37148)*, volume 5, pages 3612–3617. IEEE, 2001.
- [84] Yu-Long Wang and Qing-Long Han. Modelling and controller design for discrete-time networked control systems with limited channels and data drift. *Information Sciences*, 269:332–348, 2014.
- [85] Zhiyu Xi. Mean-square stability of networked control systems with event driven state quantisation and packet loss. *IET Control Theory & Applications*, 12(7):980–984, 2018.
- [86] Liu Xiaofeng, Li Yanxi, and Sun Xu. Design of h_∞ state feedback controller for gas turbine engine distributed control with random packet-dropouts. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, pages 7587–7592. IEEE, 2017.
- [87] Jingjing Yan. Event-driven control for ncss with logarithmic quantization and packet losses. *Journal of Control Science and Engineering*, 2017, 2017.
- [88] George Zames. Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses. *IEEE Transactions on automatic control*, 26(2):301–320, 1981.
- [89] George Zames and Bruce Francis. Feedback, minimax sensitivity, and optimal robustness. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 28(5):585–601, 1983.
- [90] Xian-Ming Zhang and Qing-Long Han. Network-based h_∞ filtering using a logic jumping-like trigger. *Automatica*, 49(5):1428–1435, 2013.
- [91] Zhenxing Zhang, Hongjing Liang, Chengwei Wu, and Choon Ki Ahn. Adaptive event-triggered output feedback fuzzy control for nonlinear networked systems

with packet dropouts and actuator failure. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 27(9):1793–1806, 2019.