

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابنة

Faculté : Sciences de L'ingénierat

Département : Electronique

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Analyse de la stabilité et la stabilisation d'un modèle de contrôle de la
température d'une serre agricole commandé en réseaux

Présenté par : HASNAOUI OUALID

Encadrant : GHERBI SOFIANE

Université badji mokhtar annaba

Jury de Soutenance :

Chaker karima	MCB	Université badji mokhtar annaba	Président
Gherbi sofiane	PR	Université badji mokhtar annaba	Encadrant
Ait izem tarek	MCB	Université badji mokhtar annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

ملخص

دفع التطور المتسارع لأنظمة الاتصالات وشبكات الكمبيوتر في العقود الأخيرة الباحثين إلى الاهتمام بأنظمة التحكم الشبكية. يتكون نظام التحكم المتصل بالشبكة من أجهزة استشعار ومشغلات ووحدات تحكم تتواصل عبر شبكات الاتصال. في هذه الرسالة، يتم تقديم طرق لتحليل استقرار واستقرار الأنظمة التي تتحكم فيها الشبكة مع تطبيق نموذج التحكم في درجة الحرارة لبيت زجاجي تتحكم فيه الشبكة.

الكلمات المفتاحية: أنظمة التحكم في الشبكة، الاستقرار، الاستقرار.

Abstarct :

The accelerated development of communications systems and computer networks in recent decades has prompted researchers to take an interest in networked control systems. A networked control system consists of sensors, actuators, and controllers that communicate through communication networks. In this dissertation, methods for analyzing the stability and stabilization of network-controlled systems are presented with application to a temperature control model of a network-controlled agricultural greenhouse.

Keywords: Network controlled systems, Stability, Stabilization, TRUETIME

Résume :

Le développement accéléré des systèmes de communications et des réseaux l'informatique au cours de ces dernières décennies ont incité les chercheurs à s'intéresser aux systèmes de contrôle en réseau. Un système de contrôle en réseau se compose de capteurs, d'actionneurs et de contrôleurs qui communiquent à travers des réseaux de communication. Dans ce mémoire, on présente des méthodes d'analyse de la stabilité et de stabilisation des systèmes commandés en réseau avec application sur un modèle de contrôle de la température d'une serre agricole commandé en réseau.

Mots Clés : Systèmes commandés en réseau, Stabilité, Stabilisation, TRUETIME

Remerciements

Je ne peux m'empêcher d'adresser toute ma reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont apporté leur concours de quelque nature que ce soit.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers M. GHERBI SOFIANE, qui a permis que ce travail s'accomplisse sous sa direction. Son encadrement, sa disponibilité et ses conseils m'ont été d'un grand apport.

Je tiens à remercier vivement M. AIT IZEM Tarek et MME CHAKER Karima, d'avoir bien voulu présider ma séance de soutenance. Qu'il soit assuré de mon hommage.

J'aimerais également exprimer toute ma gratitude envers mes amis qui se reconnaissent, pour leur soutien tout au long de mes études et dans ma vie quotidienne.

Je ne terminerai pas cet avant - propos sans adresser un grand merci pour tous les enseignants du département d'Electronique qui ont contribué à ma formation tout au long de ce cursus, et qui m'ont permis de faire mes premiers pas dans la recherche. Qu'ils soient assurés de toute ma gratitude.

Sommaire :

Table des matières.....	
Liste des figures	
Liste des abréviations.....	
Introduction générale.....	

1. Table des matières

Chapitre 1 : Modélisation des systèmes commandés en réseaux

I.1	Introduction.....	11
I.2	Systèmes de commande en réseau.....	11
I.3	Types de réseaux utilisés dans les SCR.....	13
I.4	Problèmes posés par l'utilisation du réseau dans les SCR.....	14
I.5	Modélisation du retard induit par le réseau.....	15
I.6	Modélisation des SCR par l'approche du retard distribué.....	16
I.7	Conclusion.....	19

Chapitre 2 : Analyse de la stabilité des systèmes commandés en réseaux

II.1	Introduction.....	21
II.2	Critère de stabilité des SCR modélisés par l'approche du retard distribué.....	21
II.3	Application pour l'analyse de la stabilité d'un système de contrôle de la température d'une serre agricole en réseau.....	22
II.4	Conclusion.....	26

Chapitre 3 : Stabilisation d'un système de contrôle de la température d'une serre agricole sous réseau Ethernet

III.1	Introduction.....	28
III.2	Le problème H^∞ optimal	28
III.3	Choix des fonctions de pondération.....	32
III.4	Synthèse d'une loi de commande H^∞ optimale pour le contrôle de la température d'une serre agricole en réseau	35
III.5	Conclusion.....	40
	Conclusion générale.....	41
	Bibliographie.....	42

2. Liste des figures

Figure I.1 Système de commande en réseau

Figure I.2 Configuration SCR (Capteurs/Contrôleurs)

Figure I.3 Configuration SCR (Capteurs/Contrôleurs)

Figure 1.4. Zone couverte par les différents réseaux

Figure 1.5. Zone couverte par les différents réseaux

Figure II.1 Schéma de commande du système de contrôle de la température à l'intérieur d'une serre agricole

Figure II.2 Réponse indicielle du système commandé par LQR

Figure III.1 Configuration du problème H_∞ standard

Figure III.2 Configuration de la sensibilité mixte

Figure III.3 Réponse indicielle du système bouclé avec $K_{hinf}(s)$

Figure III.4 Modèle Simulink avec TRUETIME

Figure III.5 Configuration du Nœud 1 du réseau

Figure III.6 Réponse indicielle du système sous réseau

Figure III.7 Réponse indicielle (scénario 1)

Figure III.8 Réponse indicielle (scénario 2)

Figure III.9 Réponse indicielle (scénario 3)

Figure III.10 Réponse indicielle (scénario 4)

3. Liste des abréviations

NCS	:	Networked Control system
SCR	:	Système Commandé en Réseau
WAN	:	Wide Area Network:
Man	:	Les réseaux métropolitains
LAN	:	Local Area Networks
MADB	:	Maximum allowable delay bound
RTT	:	Round trip time
LMI	:	Linear matrix inequalities
LQR	:	Linear quadratique automatic
ONES	:	les uns (1)
AN	:	Activity Network
CAN	:	Controller Area Network

Wireless, LAN ou WLAN : ce sont des réseaux sans connexions physiques visibles, appelés aussi réseaux longue distance (Réseaux locaux sans fils).

INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes de contrôle-commande temps-réel distribués à travers un réseau de communication ont connus un développement considérable ces dernières années, ils sont désormais utilisés dans divers domaines comme l'automobile, de l'aviation, la robotique mobile...etc. Ce type de systèmes offre plus de flexibilité pour un moindre coût. Dans les systèmes commandés en réseau SCR, tous les composants de la boucle de commande (capteur, actionneurs, contrôleurs) communiquent à travers un réseau de communication. Dans ce mémoire nous présentons une méthode d'analyse des SCR modélisé par l'approche du retard distribué, en effet, le retard de communication est le principal inconvénient de ce type de système, ensuite, nous présentons aussi une méthode robuste de stabilisation et commande de ce type de systèmes.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres comme suite :

Dans le premier chapitre, nous présentons des notions sur les SCR, leurs différents type, architectures et caractéristiques...etc., ainsi qu'une approche de modélisation de ce type de SCR dite du retard distribué.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une méthode d'analyse de la stabilité de ce type de systèmes modélisés par l'approche du retard distribué, cette méthode sera appliquée pour évaluer la stabilité d'un système de commande de la température d'une serre agricole en réseau.

Enfin, dan le troisième et dernier chapitre, nous présentons la méthode de commande robuste H_{∞} par l'approche de la sensibilité mixte, cette méthode sera appliquer pour la commande du système de contrôle de la température de la serre agricole, ensuite, on évaluera la robustesse de cette méthode en implémentons le système sous réseau Ethernet, et en le testons face a différents scénarios de perturbations induites par le réseau.

Chapitre 1

Modélisation des systèmes commandés en réseaux

I.1 Introduction

Les systèmes commandés en réseau SCR ou en anglais « Networked Control System » NCS ont connus un développement considérable ces dernières années, cela est dû aux nombreux avantages qu'ils offrent : réduction du coûts (moins de fils), flexibilité, facilite l'entretien, possibilité d'utilisés des réseau existant pour commander plusieurs systèmes...etc. Cependant, l'utilisation des réseaux introduit forcements des inconvénients comme les retards de transmission ainsi que les pertes potentielles d'informations.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les systèmes commandés en réseau, leurs différent type et structure, les pertes potentielles d'informations. Ces paramètres affecteront directement ou même réduiront les performances du système. Depuis plusieurs années, ces problèmes ont attiré l'attention de la communauté de l'automatisation. Plusieurs travaux ont été réalisés sur le sujet du contrôle du système de réseau.

I.2 Systèmes de commande en réseau

Dans un système de commande en réseau, les différents composants (capteurs, contrôleurs, actionneurs...etc.) communiquent via un canal de communication filaire ou non filaire comme le montre la figure suivante :

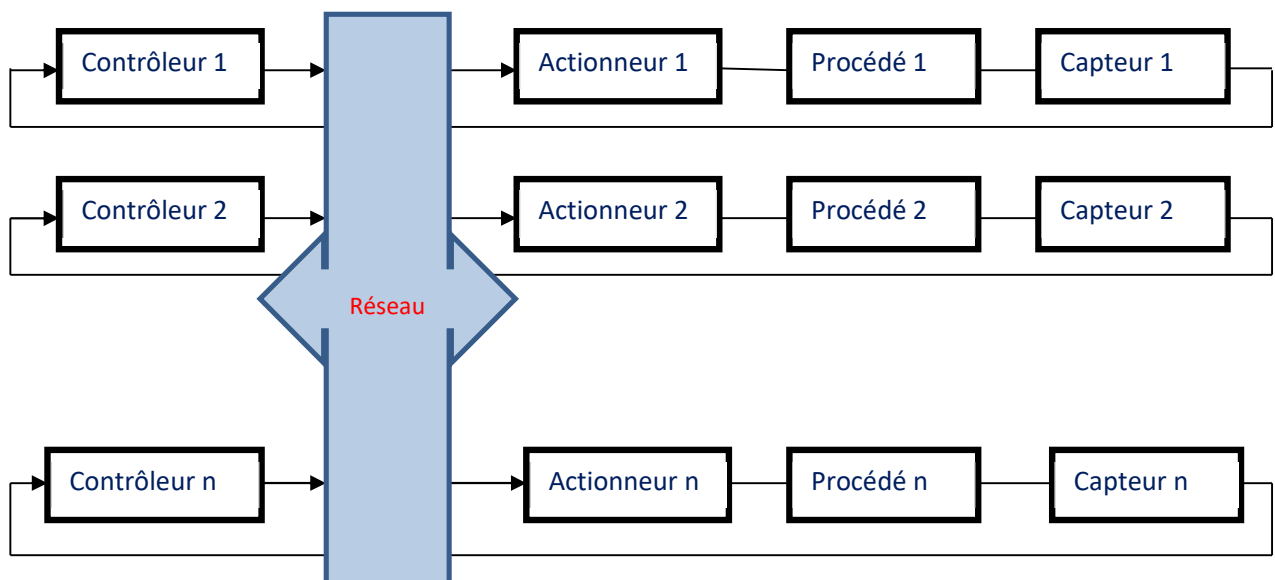


Figure I.1 Système de commande en réseau

La configuration des SCR précédente où le réseau est utilisé pour transmettre les signaux de mesure des capteurs vers les contrôleurs et des contrôleurs vers les actionneurs est la plus utilisée, cependant, d'autres configurations de SCR peuvent être envisagés selon l'utilisation du réseau pour transmettre les signaux dans la boucle de commande.

- **Réseau entre capteurs et contrôleurs** : Dans cette structure, les capteurs envoient les mesures (après traitement numérique) à travers le réseau utilisé comme le montre la figure suivante.

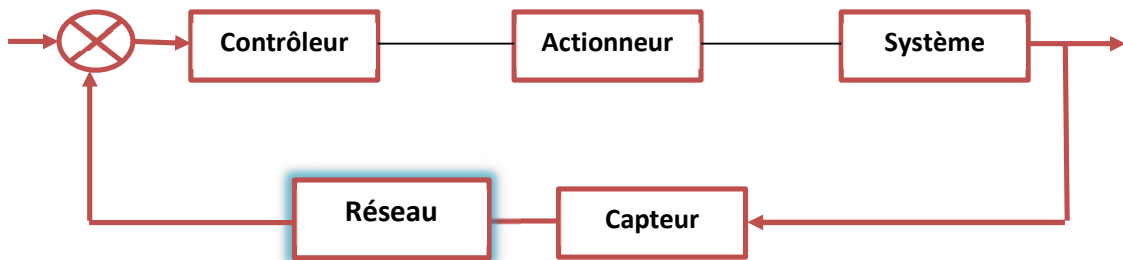


Figure I.2 Configuration SCR (Capteurs/Contrôleurs)

- **Réseau entre capteurs et contrôleurs** : Dans cette structure, les contrôleurs envoient les signaux de commande vers les actionneurs à travers le réseau utilisé comme le montre la figure suivante.

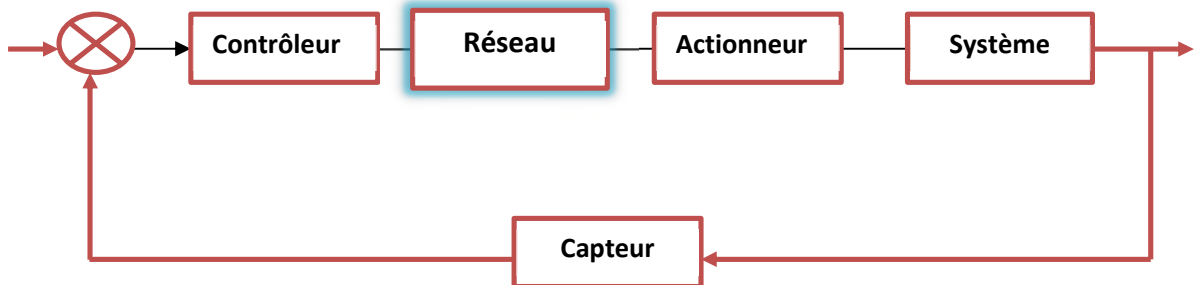


Figure I.3 Configuration SCR (Capteurs/Contrôleurs)

I.3 Types de réseaux utilisés dans les SCR

Plusieurs types de réseaux peuvent être utilisés dans les SCR selon leurs caractéristiques, leurs tailles ainsi que la zone couverte [1] :

I.3.1 LAN

LAN signifie (Local Area Network) ou réseau local, il s'agit d'un ensemble d'ordinateurs appartenant à une même organisation et reliés entre eux dans une petite aire géographique par un réseau, souvent à l'aide d'une même technologie (la plus répandue étant Ethernet). Le réseau local LAN s'étend entre 10 mètres et 10 kilomètres

I.3.2 MAN

MAN (Métropolitain Area Network) interconnecte plusieurs LAN géographiquement proches (au maximum quelques dizaines de kilomètre) à des débits importants. Ainsi un MAN permet à deux nœuds distants de communiquer comme s'ils faisaient partie d'un même réseau local. Un MAN est formé de commutateurs ou de routeurs interconnectés par des liens hauts débits (en général en fibre optique). Le réseau MAN s'étend entre 10 kilomètres et 100 kilomètres.

I.3.3 WAN

WAN (Wide Area Network ou réseau étendu) interconnecte plusieurs LANs à travers de grandes distances géographiques. Les débits disponibles sur un WAN résultent d'un arbitrage avec le coût des liaisons (qui augmente avec la distance) et peuvent être faibles. Les WAN fonctionnent grâce à des routeurs qui permettent de "choisir" le trajet le plus approprié pour atteindre un nœud du réseau. Le plus connu des WAN est Internet. Le réseau WAN s'étend sur plus de 100 kilomètres.

La figure suivante montre l'étendue des différents types de réseau.

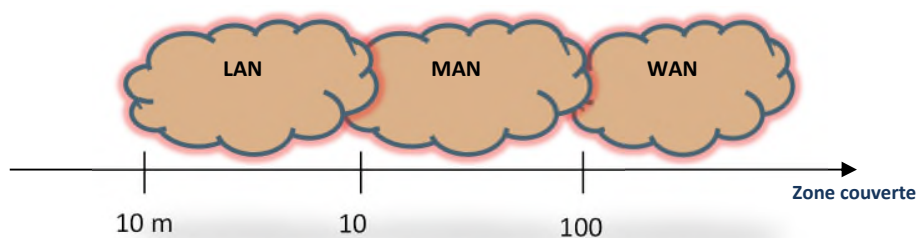


Figure 1.4. Zone couverte par les différents réseaux

I.4 Problèmes posés par l'utilisation du réseau dans les SCR

L'utilisation du réseau dans les SCR doit être considéré avec ses avantages et ses inconvénients, parmi ces derniers [2] :

I.4.1 Problèmes liés à la quantification et au codage

Avant d'être transmis sur le réseau, tout signal physique doit être converti en unités d'information, ceci est effectué les opérations de quantification, compression, codage...etc. Toutes ces opérations peuvent avoir des effets indésirables causés par l'approximation de longueur de mot finie.

I.4.2 Problèmes liés aux pertes de paquets

Il existe toujours un risque de pertes d'informations totales ou partielles lors de l'envoi de signaux en réseau, ces pertes sont le résultat d'erreurs au niveau de la couche physique du réseau (les pertes sont plus probables dans les réseaux sans fil), ils peuvent aussi être liés à la surcharge du réseau ou plus exactement les buffers. Un retard trop lent peut aussi être considéré comme perte de paquets surtout pour les applications en temps réel.

I.4.3 Problèmes liés au retard de transmission

Tous réseau introduit un temps supplémentaire pour la transmission et de traitement de l'information entre deux ou plusieurs nœuds. Ce retard dépend essentiellement des conditions dans lesquelles le réseau fonctionne à savoir : la charge du réseau et la qualité du canal de transmission. Ceci doit être pris en compte lors de la conception de contrôleurs dans les SCR, car il est bien connu dans la théorie de la commande que le retard influence négativement les performances du système commandé et peut même entraîner son instabilité.

I.4.4 Problèmes liés au débit

Chaque réseau de communication est limité par une bande passante qui se traduit par un nombre limité d'envoi d'informations par seconde. Cette limite peut poser quelques problèmes de performance du réseau [3].

I.5 Modélisation du retard induit par le réseau

Dans les SCR, les retards induits par le réseau peuvent être classés selon la direction du transfert de donnée, ils sont calculés comme suit [4] : du capteur vers le contrôleur $\tau^{sc} = t^{cs} - t^{se}$ et du contrôleur vers l'actionneur $\tau^{ca} = t^{rs} - t^{ce}$.

Avec t^{cs} est l'instant où le contrôleur commence le traitement du signal de mesure qui arrive, t^{se} est l'instant auquel le système distant encapsule la mesure dans un paquet pour être envoyé, t^{ce} est l'instant auquel le contrôleur principal encapsule le signal de contrôle dans un paquet à envoyer, t^{rs} est l'instant auquel le système distant démarre le traitement du signal de commande.

En plus, τ^{sc} et τ^{ca} sont composé des trois parties suivantes [4] :

- ✓ τ^W : le temps qui représente la mise en file d'attente en attendant la disponibilité du réseau avant qu'une source (contrôleur ou système distant) envoie un paquet,
- ✓ τ^F : le temps qui représente le moment où la source place un paquet sur le réseau,
- ✓ τ^P : le temps de propagation d'un paquet traversant un support physique, il dépend de la vitesse de transmission du signal et la distance entre la source et la destination.

La figure suivante représente la répartition de ces trois temporisations :

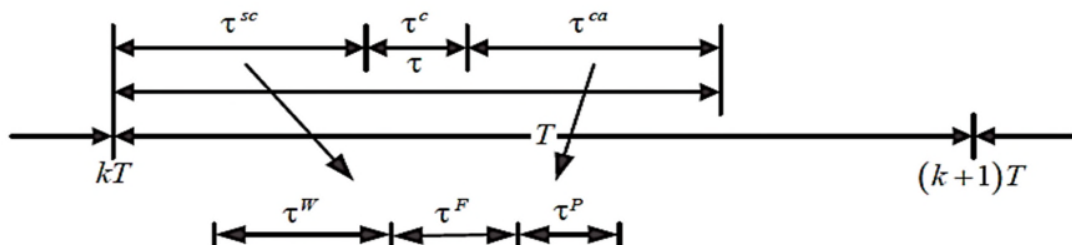


Figure 1.5. Zone couverte par les différents réseaux [4]

I.6 Modélisation des SCR par l'approche du retard distribué

La modélisation des SCR est une étape très importante pour pouvoir déterminer l'effet du retard de communication induit par le réseau sur la stabilité de la boucle de commande des SCR, et ainsi pouvoir analyser leurs stabilités et déterminer la marge du retard maximal admissible ou « maximum allowable delay bound MADB », et dans une deuxième phase concevoir des contrôleurs stabilisants. Il existe plusieurs approches pour la modélisation des SCR parmi

lesquelles [5] : le modèle discret augmenté avec le retard périodique du réseau, le modèle continu utilisant trois types de retards, le modèle floue...etc.

Dans ce mémoire, nous traitons la modélisation des SCR par l'approche du retard distribué, cette démarche est motivée par la nature non uniforme du retard induit par le réseau.

I.6.1 Distribution non uniforme du retard induit par réseau

Il est prouvé dans [6] que les retards réels induit par le réseau ne sont pas constants (ont un comportement irrégulier), pour illustrer cela, les auteurs ont mesuré les retards en boucle de différents nœuds (ou round time trip RTT) d'un réseau Ethernet pendant 24 heures, les résultats ont montré une distribution non uniforme des retards dans les réseaux $\tau(t)$ comme suit [6] :

- 50% de $\tau(t)$ sont dans l'intervalle inférieur [20 ms ($\tau(1)$) ; 38 ms ($\tau(2)$)], 50% sont dans l'intervalle de [38 ms ; 139 ms ($\tau(3)$)],
- 80% de $\tau(t)$ sont dans l'intervalle inférieur [20 ms ; 46 ms], 20% sont dans l'intervalle de [46 ms ; 139 ms], $(139 - 46) \text{ ms} > (46 - 20) \text{ ms}$,
- 90% de $\tau(t)$ sont l'intervalle inférieur [20 ; 53 ms], 10% seulement sont dans l'intervalle de [53 ms ; 139 ms].

L'approche du retard non distribué est venue du constat précédent, elle consiste à considérer le retard de communication $\tau(t)$ comme approximativement continu avec une limite supérieure, comme suit [5] :

$$\tau_1 \leq \tau(t) \leq \tau_3 < \infty ; \forall t \geq 0 \quad (I.1)$$

Comme expliquer précédemment, la probabilité que le retard de communication $\tau(t)$ soit petit est plus grande que celle qu'il soit grand, cela se traduit par les conditions [5] :

$$\begin{aligned} \tau_1 \leq \tau(t) \leq \tau_3 < \infty ; \forall t \geq 0 \\ \text{Prob} [\tau(t) \in (\tau_1, \tau_2)] = \delta \\ \text{Prob} [\tau(t) \in (\tau_2, \tau_3)] = 1 - \delta \end{aligned} \quad (I.2)$$

Où $\delta \in [0,1]$, $\text{Prob} [\tau(t) \in (\tau_1, \tau_2)]$ la probabilité pour que $\tau(t) \in (\tau_1, \tau_2)$ est égale à δ .

Donc, on peut dire que $\delta(t)$ est une variable stochastique liée à la qualité de service du réseau, pour la décrire, nous utiliserons la séquence distribuée de Bernoulli en raison de sa simplicité [5] :

$$\begin{cases} \text{prob} [\delta(t) = 1] = \mathbb{N}(\delta(t)) =: \bar{\delta} \\ \text{prob} [\delta(t) = 0] = 1 - \mathbb{N}(\delta(t)) =: 1 - \bar{\delta} \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

I.6.2 Modèle d'état des SCR par l'approche du retard distribué

Considérons le modèle d'état d'un SCR une classe de control suivante :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (\text{I.4})$$

$$x(t) = \varphi(t), \quad t \in (-\tau_3, -\tau_1) \quad (\text{I.5})$$

Avec : $\tau_1 = \inf_t(\tau(t))$ et $\tau_3 = \sup_t(\tau(t))$

A et B sont des matrices constantes de dimensions appropriées,

$\varphi(t)$ est la fonction définie les conditions initiales du système sur $t \in (-\tau_3, -\tau_1)$,

$x(t)$, $u(t)$ sont les vecteurs d'état et de commande respectivement.

Sois la loi de commande par retour d'état :

$$u(t) = K x(t - \tau(t)) \quad (\text{I.6})$$

Où K est le vecteur de gain par retour d'état, gain de rétroaction du contrôleur de réseau.

Il s'agit alors de déterminer K en prenons en compte la nature non uniforme du retard induit par le réseau en utilisant l'équation (I.2) comme suit [5] :

$$U(t) = \delta(t) K x(t - \tau_1(t)) + (1 - \delta(t)). K. x(t - \tau_2(t)) \quad (\text{I.7})$$

Avec : $\tau_1(t) = \delta(t).\tau(t)$ et $\tau_2(t) = [(1 - \delta(t))\tau(t)]$

Le modèle du système commandé en boucle fermée est obtenu en substituant l'équation (I.7) dans (I.4) comme suit [5]:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \delta(t).B.K.x(t - \tau_1(t)) + (1 - \delta(t)).B.K.x(t - \tau_2(t)) \quad (I.8)$$

$$x(t) = \varphi(t), \quad t \in (-\tau_3, -\tau_1)$$

On remarque que lorsque $\bar{\delta} = 0$ ou 1 et que la borne inférieure de retard τ_1 n'est pas considérée (c'est-à-dire que les caractéristiques de la distribution statistique du retard de communication du réseau $\tau(t)$ ne sont pas prises en compte), le modèle précédent devient :

$$\dot{x}(t) = A.x(t) + B.K.x(t - \tau(t)) \quad (I.9)$$

$$x(t) = \varphi(t), \quad t \in (-\tau_3, -\tau_1)$$

L'équation (I.8) peut être mise sous une forme plus appropriée comme suit [5] :

$$\dot{x}(t) = A.x(t) + \bar{\delta}(t).B.K.x(t - \tau_1(t)) + (1 - \bar{\delta}(t)).B.K.x(t - \tau_2(t)) + (\delta(t) - \bar{\delta}(t)).B.K.[x(t - \tau_1(t)) - x(t - \tau_2(t))] \quad (I.10)$$

Ou encore :

$$\dot{x}(t) = \varphi(t) + (\delta(t) - \bar{\delta}(t)).\phi(t) \quad (I.11)$$

Avec : $\varphi(t) = A(t) + \bar{\delta}(t).B.K.x(t - \tau_1(t)) + (1 - \bar{\delta}(t)).B.K.x(t - \tau_2(t))$

$$\phi(t) = B.K.[x(t - \tau_1(t)) - x(t - \tau_2(t))]$$

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les systèmes commandés en réseau, ainsi que leurs différents types, ensuite nous avons abordé le problème de la modélisation de ce type de systèmes après avoir illustré la nature non uniforme du retard induit par le réseau, enfin, nous avons présenté une méthode de modélisation des SCR par l'approche du retard distribué qui prend en compte la nature non uniforme du retard.

Chapitre 2

Analyse de la
stabilité des
systèmes
commandés en
réseaux

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'analyse de la stabilité des systèmes commandés en réseau SCR, il s'agit de trouver des critères de stabilité qui définissent le retard de communication maximal admis. Parmi ces critères, on présente un critère de stabilité développé par les auteurs de [5], ce critère est sous forme d'inégalités matricielles linéaires dérivé du théorème de stabilité des systèmes à retard de Lyapunov-Krasovskii, et appliqué sur les SCR modélisés par l'approche du retard distribué (le premier chapitre). Enfin, on appliquera ce critère pour évaluer la stabilité d'un système de contrôle de la température d'une serre agricole commandé par une loi de commande LQR et implémentée sous réseau Ethernet.

II.2 Critère de stabilité des SCR modélisés par l'approche du retard distribué

Nous avons présenté dans le premier chapitre une méthode de modélisation des SCR par l'approche du retard distribué [5], dans ce qui suit, nous allons présenter un critère de stabilité de ces derniers sous forme d'inégalités matricielles linéaires LMI (Linear Matrix Inequality). Ce critère est présenté par le théorème suivant [5] :

- **Théorème 1**

« Pour des constantes donnés $\tau_i \rightarrow (i = 1,2,3)$ et une matrice K , s'il existe des matrices $P > 0$, $Q_i > 0$, $R_i > 0$, $S_j > 0$ ($i = 1,2,3$; $j = 1,2$) avec des dimensions appropriées, de telle sorte que les LMI suivantes se vérifient, alors le système (I.11) est asymptotiquement stable.

$$\tilde{\Pi} = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} & \Pi_{13} \\ * & \Pi_{22} & 0 \\ * & * & \Pi_{33} \end{bmatrix} < 0 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

(l'équation (I.11) représente les SCR modéliser par l'approche du retrad distribué, elle est donnée dans le premier chapitre).

Les éléments de $\tilde{\Pi}$ sont donnés par :

$$\Pi^{11} = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} & \Sigma_{13} & 0 & \Sigma_{15} & 0 \\ * & \Sigma_{22} & \Sigma_{23} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & \Sigma_{33} & \Sigma_{34} & 0 & 0 \\ * & * & * & \Sigma_{44} & \Sigma_{45} & 0 \\ * & * & * & * & \Sigma_{55} & \Sigma_{56} \\ * & * & * & * & * & \Sigma_{66} \end{bmatrix}$$

$$\Pi_{12} = \text{diag}(A^t, 0, \bar{\delta}K^tB^t, 0, (1 - \bar{\delta})K^tB^t, 0) \cdot \text{Ones}(6,5) \cdot \Theta$$

$$\Pi_{13} = \bar{\delta}(1 - \bar{\delta}) \cdot \text{diag}(0, 0, K^tB^t, 0, -K^tB^t, 0) \cdot \text{Ones}(6,5) \cdot \Theta$$

$$\Pi_{22} = \text{diag}\{-R_1, -R_2, -R_3, -S_1, -S_2\}$$

$$\Pi_{33} = \bar{\delta} \cdot (1 - \bar{\delta}) \cdot \Pi_{22}$$

$$\Theta = \text{diag}\{\tau_1 R_1, \tau_2 R_2, \tau_3 R_3, (\tau_2 - \tau_1) S_1, (\tau_3 - \tau_2) S_2\}$$

Et

$$\Sigma_{11} = PA + A^tP + Q_1 + Q_2 + Q_3 - R_1 - R_2 - R_3$$

$$\Sigma_{12} = R_1, \Sigma_{13} = \bar{\delta} \cdot P \cdot B \cdot K + R_2, \Sigma_{14} = (1 - \bar{\delta}) \cdot P \cdot B + R_3$$

$$\Sigma_{22} = -Q_1 - R_1 - S_1, \Sigma_{23} = S_1$$

$$\Sigma_{33} = -2R_2 - 2S_1, \Sigma_{34} = R_2 + S_1$$

$$\Sigma_{44} = -Q_2 - R_2 - S_1 - S_2, \Sigma_{45} = S_2$$

$$\Sigma_{55} = -2R_3 - 2S_2, \Sigma_{56} = R_3 + S_2, \Sigma_{66} = -Q_3 - R_3 - S_2$$

(Ones (6,5) est une matrice avec des éléments ‘‘1’’ de dimension 6 lignes par 5 collones.

II.3 Application pour l’analyse de la stabilité d’un système de contrôle de la température d’une serre agricole en réseau

Dans ce qui suit, nous allons appliquer le critère précédent pour évaluer la stabilité d’un système de contrôle de la température à l’intérieur d’une serre agricole en réseau. Mais d’abord présentons ce système.

II.3.1 Présentation du système de contrôle de la température d’une serre agricole

Les systèmes de contrôle des serres agricoles ont connu un développement considérable ces dernières années, ces systèmes aide à garder un climat favorable à la bonne croissance des cultures. La température à l’intérieur d’une serre agricole est parmi les grandeurs climatiques les plus contrôler, notre modèle d’application est présenté dans [7] :

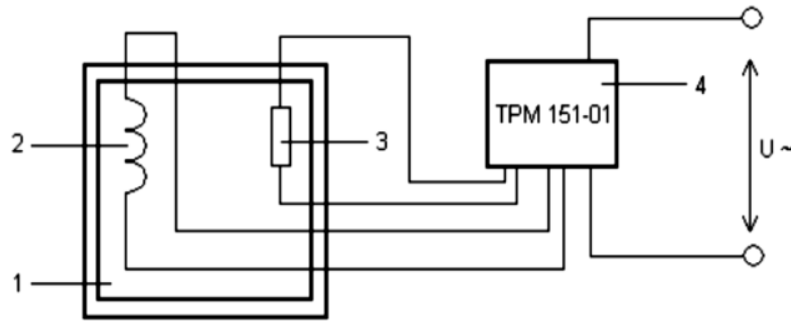


Figure II.1 Schéma de commande du système de contrôle de la température à l'intérieur d'une serre agricole [7]

Avec : 1 – La serre, 2 – Chauffage, 3 – capteur de température DTS-054, 4 – Contrôleur universel OWEN TPM 151.

L'entrée de ce système est une tension U appliquée aux bornes d'un contrôleur universel de type TPM 151, la sortie est la température à l'intérieur de la serre agricole mesurée à l'aide d'un capteur de type DTS-054. Les auteurs ont mesuré la température à l'intérieur de la serre agricole pendant une période en boucle ouverte (sans l'action du contrôleur), ensuite et en se servant de la « Identification Toolbox » de MATLAB, ils ont obtenu la fonction de transfert discrète suivante [7] :

$$H(q^{-1}) = \frac{t_{serre}(q)}{U(q)} = \frac{r_1 q^{-1} + r_2 q^{-2}}{1 - l_1 q^{-1} + l_2 q^{-2}} = \frac{0.2215 q^{-1} + 0.2215 q^{-2}}{1 - 1.384 q^{-1} + 0.3989 q^{-2}} \quad (\text{II.2})$$

Où t_{serre} est la température à l'intérieur de la serre agricole.

La fonction de transfert précédente est transformée dans le domaine de Laplace comme suit :

$$H(s) = \frac{t_{serre}(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s + b_1}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} = \frac{-0.5149 s + 67.9}{s^2 + 9.205 s + 2.192} \quad (\text{II.3})$$

II.3.2 Conception d'une loi de commande par retour d'état LQR

Considérons le modèle d'état d'un système linéaire :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Avec la paire A et B est commandable.

La loi de commande du régulateur quadratique linéaire (LQR) par retour d'état est conçue en minimisant le critère suivant [8] :

$$J = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} (x^T Q x + x^T R u) dt \quad (\text{II.5})$$

Avec Q et R sont des matrices de pondérations symétriques définies semi positive et positive respectivement.

La loi de commande optimale qui minimise le critère précédent est donnée par :

$$u = -R^{-1} B F x \quad (\text{II.6})$$

Avec F est une matrice symétrique définie positive solution de l'équation de Riccati suivante :

$$\dot{F} + F A + A^T F - F B R^{-1} B^T F + Q = 0 \quad (\text{II.7})$$

II.3.3 Application sur le système de contrôle de la température d'une serre agricole

Avant de concevoir la loi de commande LQR, il faut d'abord donner le modèle en espace d'état de notre système, la conversion de la matrice de transfert le représentant à donner les matrices d'état suivantes :

$$A = \begin{bmatrix} -9.2050 & -2.1920 \\ 1.0000 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 8 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [-0.0644 \quad 8.4875], D = 0 \quad (\text{II.8})$$

Le vecteur de gain K de la loi de commande (II.6) est trouvé en résolvant l'équation (II.7), cela est possible en utilisant l'instruction MATLAB « lqr », on a trouvé :

$$K = [0.1090 \quad 0.2505].$$

II.3.4 Tracé de la réponse indicielle du système commandé par LQR

Après plusieurs essais on a choisi les valeurs suivantes de Q et R :

$$Q = \begin{pmatrix} 6.1 & 0 \\ 0 & 6.1 \end{pmatrix} \text{ Et } R = 0.085.$$

La figure suivante présente la réponse indicielle du système de contrôle de la température de la serre agricole commandé par LQR.

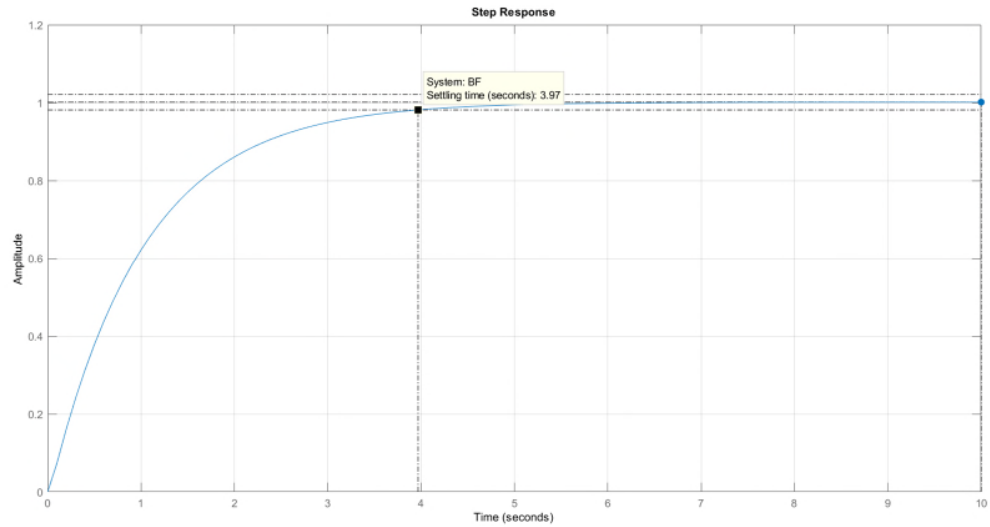


Figure II.2 Réponse indicielle du système commandé par LQR

On constate des performances temporelles appréciables (un temps de réponse de 4 secondes avec dépassement nul).

II.3.5 Application du théorème 1 pour l'analyse de la stabilité du système commandé en réseau

Maintenant, analysant la stabilité du système de commande de la température de la serre agricole, si celui-ci est implémenté en réseau. Pour cela, nous allons appliquer le théorème 1 en résolvant les LMI (II.1), cela est possible en utilisant la « LMI Toolbox » de MATLAB avec l'instruction « Feasp ». On a trouvé les résultats suivants :

>> Unfeasible for : soltau =1.0062

Donc le retard maximal admis pour que le système commandé en réseau avec le contrôleur LQR reste stable est $\tau_{\max} = 1.0061$ secondes.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le théorème de la stabilité des SCR modélisés par l'approche du retard distribué qui a été présenté dans le premier chapitre. Ensuite, nous avons

appliqué une méthode de conception d'une loi de commande optimale de type LQR sur un modèle de système de contrôle de la température d'une serre agricole. Enfin, nous avons appliqué le théorème précédent pour déterminer le retard maximal admis pour que le système commandé par la loi de commande LQR reste stable s'il est implémenté en réseau.

Chapitre 3

Stabilisation
d'un système de
contrôle de la
température
d'une serre
agricole sous
réseau Ethernet

III.1 Introduction

La stabilisation des systèmes commandés en réseaux SCR est un sujet qui intéresse beaucoup de chercheurs ces dernières années, il s'agit de trouver un contrôleur (ou une loi de commande) qui stabilise le système bouclé.

Dans le cas des SCR, cette loi de commande doit prendre en compte tous les aspects et contraintes introduites par l'utilisation du réseau (retards de communication, pertes de paquets ...etc.).

Dans ce chapitre, nous allons présenter une méthode de conception d'un contrôleur H_∞ robuste, ce contrôleur va être appliqué pour la commande de la température à l'intérieur d'une serre agricole sous réseau Ethernet.

III.2 Le problème H_∞ optimal

Le problème H_∞ consiste à concevoir un contrôleur robuste optimal qui assure la stabilité et les meilleures performances possible pour le système nominal (sans perturbations), mais aussi pour un ensemble de modèles incertains autour de ce dernier. La solution optimale d'un tel problème a été proposée dans les années 1980 dans les travaux de Doyle [9] et Zames [10].

III.2.1 Formulation du problème H_∞ standard

Le problème H_∞ optimal est une approche globale qui consiste à trouver un contrôleur optimal qui minimise la norme H_∞ d'un critère fréquentiel qui représente un cahier des charges en termes de robustesse de la stabilité et des performances [11]. La solution de ce problème est établie selon plusieurs configurations du système bouclé, parmi elles celle de la sensibilité mixte reste la plus utilisée.

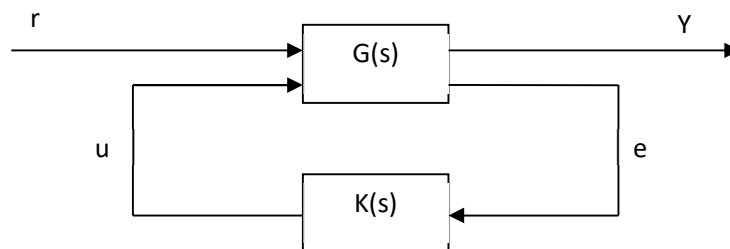


Figure III.1 Configuration du problème H_∞ standard

III.2.2 Problème de la sensibilité mixte

Les exigences en termes de stabilité et de performances désirées du système bouclé sont traduites dans une configuration du problème H_∞ optimal appelée sensibilité mixte, elle consiste à établir trois fonctions de pondérations [11] :

- ✓ La fonction de pondération de l'erreur $W_1(s)$ (pour spécifier les performances temporelles),
- ✓ La fonction de pondération du signal de la commande $W_2(s)$ (pour limiter l'énergie de la commande ainsi que les incertitudes additives),
- ✓ La fonction de pondération de la sortie $W_3(s)$ (pour assurer la stabilité quel que soit le gabarit des incertitudes inférieurs à $W_3(s)$).

La figure III.2 représente la configuration de la sensibilité mixte.

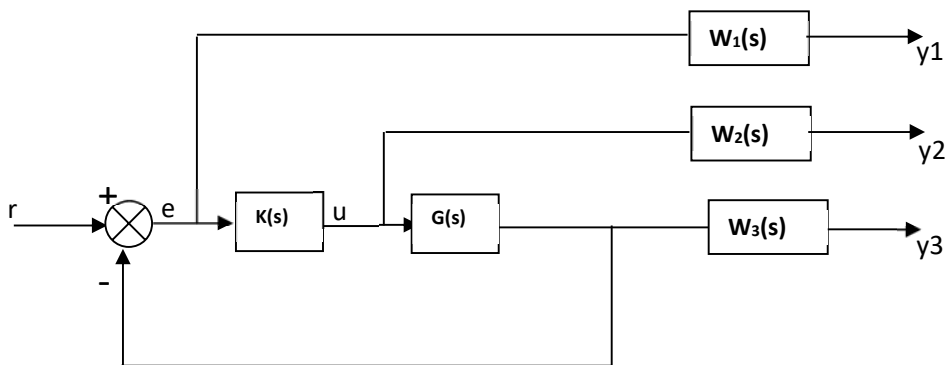


Figure III.2 Configuration de la sensibilité mixte

Avec r référence, e erreur, u signal de commande, (y_1, y_2, y_3) sorties respectives des trois fonctions de pondérations.

On a :

$$e = r - G.u \quad (\text{III.1})$$

$$y_1 = W_1.e = W_1.(r - G.u) \quad (\text{III.2})$$

$$y_3 = W_3.G.u \quad (\text{III.3})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_3(s) & -W_3(s)G(s) \\ 0 & W_1(s)G(s) \\ I & -G(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ u \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Ou encore :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \\ e \end{bmatrix} = P. \begin{bmatrix} r \\ u \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

$P(s)$ est la matrice de transfert du système augmenté qui englobe le système nominal ainsi que les fonctions de pondération, elle constitue un cahier des charges complet contenant toutes les informations requises pour la conception du contrôleur optimal [12]. La forme générale de $P(s)$ en espace d'état est donnée par [10] :

$$P(s) = \begin{bmatrix} A & B & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Le transfert entre $y(s)$ et $u(s)$ est donné par :

$$T_{yu}(s) = P_{11}(s) + P_{12}(s)K(s)[I - P_{22}(s)K(s)]^{-1}P_{21}(s) \quad (\text{III.7})$$

Où :

$$P_{ij}(s) = C_i(sI - A)^{-1}B_j + D_{ij}; i, j = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{III.8})$$

III.2.3 Conditions de robustesse dur la stabilité et les performances

Dans ce qui suit, nous allons établir des conditions de robustesse de la stabilité et des performances du système bouclé corrigé avec le contrôleur, mais avant cela, nous introduisons ci-après quelques notions nécessaires pour établir ces conditions.

A) Fonctions de sensibilité et la sensibilité complémentaire

Les fonctions de sensibilité et de sensibilité complémentaires sont des notions très importantes pour la compréhension du problème H^∞ , elles sont définies respectivement comme suit [12] :

✓ **Fonction de sensibilité S**

Elle est directement liée aux performances temporelles du système bouclé, c'est l'expression du transfert entre la sortie y et l'erreur e :

$$\frac{y}{e} = S(s) = \frac{1}{1+G(s)K(s)} \quad (\text{III.9})$$

On constate que la sensibilité est proportionnelle à l'erreur

✓ **La sensibilité complémentaire T**

Il s'agit en fait de la fonction de transfert en boucle fermée, son expression est donnée par :

$$\frac{y}{r} = T(s) = \frac{G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)} \quad (\text{III.11})$$

$T(s)$ est liée à la stabilité du système bouclé

❖ On constate que : $S + T = 1$, donc tout changement de T influe nécessairement sur S et vice-versa, d'où la notion de complémentarité.

B) Condition de robustesse de la stabilité

Elle est issue du théorème suivant [11] :

« Notant $\Delta(s)$ les incertitudes agissant sur le système, alors si le système sans perturbation ($\Delta(s) = 0$) est stable, tout système perturbé sera stable si et seulement si :

$$\left| \frac{G(s)K(s)}{1+G(s)K(s)} \right| < \left| \frac{1}{\Delta(s)} \right| \quad \text{ou} \quad |T(s)| < \left| \frac{1}{\Delta(s)} \right| \quad (\text{III.12})$$

Et

$$|\Delta(s)| < |W_3(s)| \quad (\text{III.13})$$

Donc :

$$\sigma_{\max}(T(s)) < \frac{1}{\sigma_{\max}|\Delta(s)|} \quad (\text{III.14})$$

C) Condition de robustesse des performances

Le système bouclé corrigé avec le contrôleur H_∞ conservera de bonnes performances temporelles malgré les incertitudes, s'il satisfait la condition de robustesse des performances suivante [11] :

$$|S(s)| < \left| \frac{1}{W_1(s)} \right| \quad (\text{III.15})$$

III.3 Choix des fonctions de pondération

Comme on l'a vu précédemment, les fonctions de pondération sont utilisées pour pondérer des signaux de la boucle fermée afin de garantir les performances désirées, ils peuvent être exprimées sous la forme de fonctions de transferts comme suit :

$$W(s) = \frac{a+bs}{c+ds} \quad (\text{III.16})$$

Avec a, b, c et d sont des réels positifs

Il existe plusieurs approches pour le choix de ses fonctions dans, celles basées sur des spécifications telles que la bande passante W_0 , le taux d'atténuation des perturbation A , la valeur maximum de la norme H_∞ M sont les plus utilisées, elles ont généralement la forme suivante [12] :

✓ Pour la matrice de pondération de l'erreur :

$$W_1(s) = \frac{s}{M + W_0} \frac{1}{s + W_0 \cdot A} \quad (\text{III.17})$$

- ✓ Pour la matrice de pondération de la sortie :

$$W_3(s) = \frac{\frac{s + W_0}{M}}{A \cdot s + W_0} \quad (\text{III.18})$$

La plupart du temps, la matrice de pondération du signal de commande n'est pas utilisée, mais parfois on l'exprime sous la forme d'un filtre traduisant des conditions sur le signal de commande.

III.4 Synthèse d'une loi de commande H_∞ optimale pour le contrôle de la température d'une serre agricole en réseau

Dans ce qui suit, on va appliquer la méthode détaillée dans les paragraphes précédent pour le système contrôle de la température d'une serre agricole en réseau, ce système ainsi que son modèle mathématique sont détaillés dans le deuxième chapitre. Les étapes à suivre pour synthétiser notre loi de commande H_∞ optimale sont les suivantes :

III.4.1 Choix des fonctions de pondération

Pour stabiliser notre système et pour obtenir des performances temporelles optimales, on a choisi les spécifications suivantes :

- ✓ Bande passante en boucle fermée désirée : $W_0 = 10$
- ✓ Taux d'atténuation désiré de la perturbation dans la bande passante : $A = \frac{1}{1000}$
- ✓ Valeur maximum désirée de la norme H_∞ : $M = 2$

Alors, nos fonctions de pondération seront comme suit :

$$W_1(s) = \frac{\frac{0.5s + 5}{2}}{0.001s + 10} \text{ et } W_3(s) = \frac{s}{12s + 0.012}$$

III.4.2 Contrôleur H_∞ obtenu

Le problème H_∞ optimal de la sensibilité mixte est résolu par différents logiciels dont MATLAB, de notre part, nous avons utilisé l'instruction "mixsyn" et nous avons obtenu la fonction de transfert suivante :

$$K_{hinf}(s) = \frac{4.334 \cdot 10^5 s^3 + 4.335 \cdot 10^{10} s^2 + 3.99 \cdot 10^{11} s + 9.501 \cdot 10^{10}}{s^4 + 1.188 \cdot 10^5 s^3 + 1.881 \cdot 10^9 s^2 + 1.37 \cdot 10^{11} s + 1.369 \cdot 10^{10}}$$

III.4.3 Réponse indicielle avec le contrôleur H_∞ obtenu

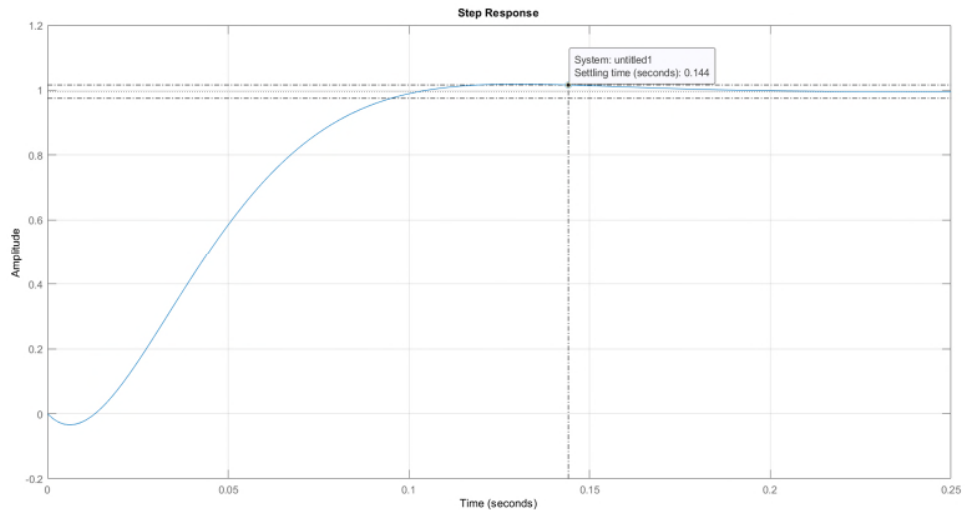


Figure III.3 Réponse indicielle du système bouclé avec $K_{hinf}(s)$

On remarque de très bonnes performances temporelles avec un temps de réponse de 0.144 secondes bien meilleur que celui obtenu avec la loi de commande LQR, avec cependant un léger dépassement dans le régime transitoire.

III.4.4 Implémentation du contrôleur H_∞ obtenu en réseau Ethernet

Dans ce qui suit, nous allons simuler l'implémentation du contrôleur obtenu sous réseau Ethernet en utilisant le logiciel TRUETME, ce logiciel est très utilisé par les chercheurs pour simuler les effets induits par les différents réseaux (pour plus de détail sur ce logiciel voir [14]). Nous avons donc réalisé le modèle de simulation sous environnement MATLAB/SIMULINK suivant :

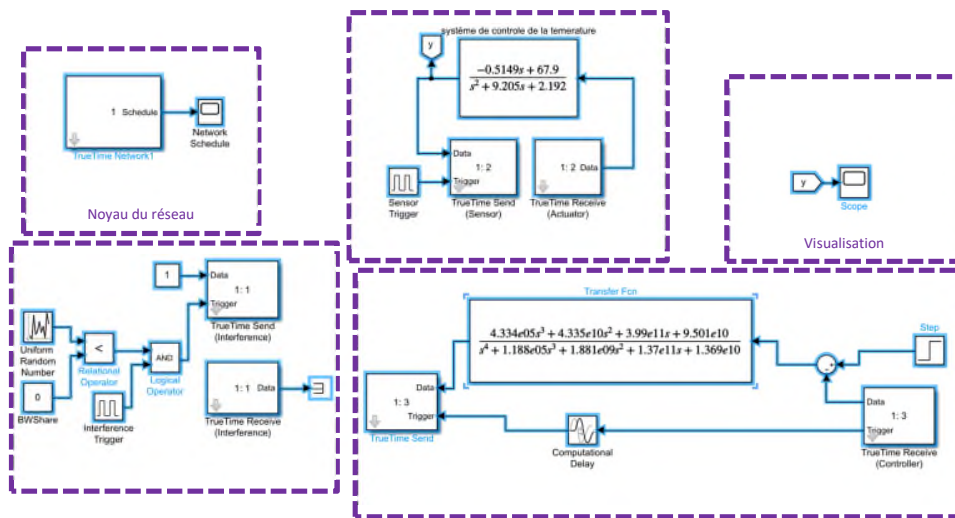


Figure III.4 Modèle Simulink avec TRUETIME

Le réseau est constitué de trois nœuds (voir la figure précédente), respectivement :

- ✓ Noyau du réseau (TRUETIME Network) c'est le bloc où on peut configurer notre réseau en termes de type, nombre de nœuds, vitesse de transmission...etc, et le plus important la probabilité de pertes de paquets (valeur en pourcentage) qui constitue l'une des inconvénients de l'utilisation du réseau. De notre part, nous avons choisi le réseau Ethernet, avec une vitesse de transmission de 80000 bit/s comme le montre la figure suivante :

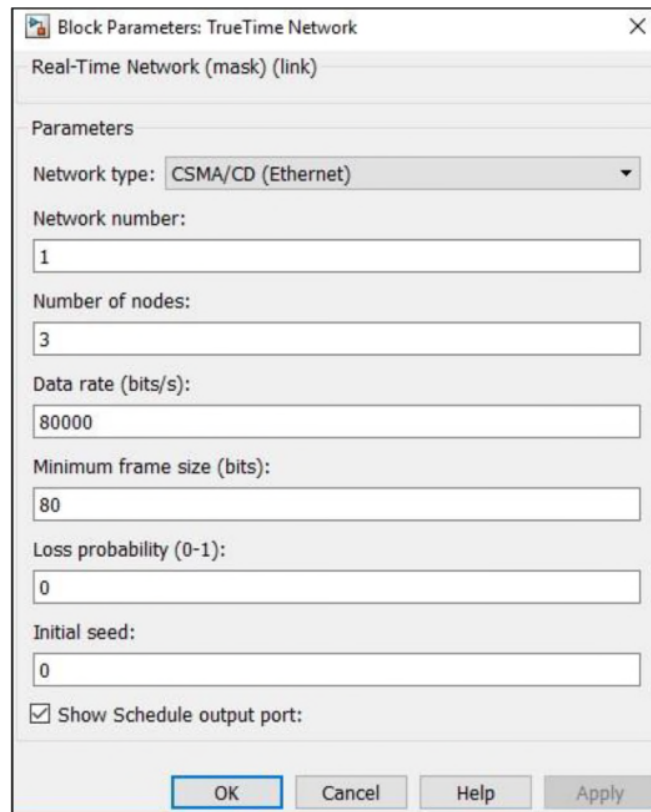


Figure III.5 Configuration du Nœud 1 du réseau

- ✓ NOEUD 1 il simule les différentes perturbations relatives aux réseaux, il inclut le block (BW. SHARE) qui représente le pourcentage de partage de la bande passante.
- ✓ NOEUD 2 représente le système éolien à commander (le système de contrôle de la température de la serre).
- ✓ NOEUD 3 représente le contrôleur
- ✓ Visualisation partie où on peut visualiser la réponse indicielle du système bouclé en réseau.

Tous ces blocks communiquent en réseau en utilisant les block TRUETIME SEND et TRUETIME SEND.

La figure suivante représente la réponse indicielle du système en réseau Ethernet avec un retard supplémentaire représentant le temps de calcul de l'algorithme de la loi de commande de 0.002 secondes.

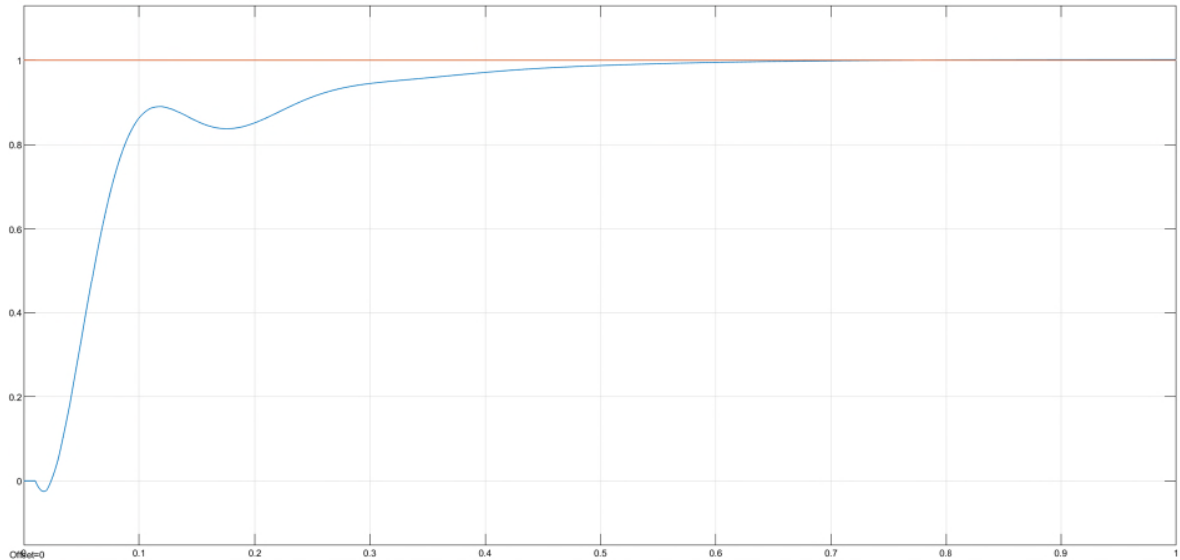


Figure III.6 Réponse indicielle du système sous réseau

On constate un léger déphasage à la phase transitoire correspondant au zéro instable du système en plus du retard introduit par le réseau.

A) Test de différents scénarios introduits par l'utilisation du réseau

Dans ce qui suit, on présente les résultats en termes de réponses indicielles du système bouclé en réseau avec différents scénarios de perturbations comme suit :

- **Scénario 1 : Probabilité de perte de paquets de 20%**

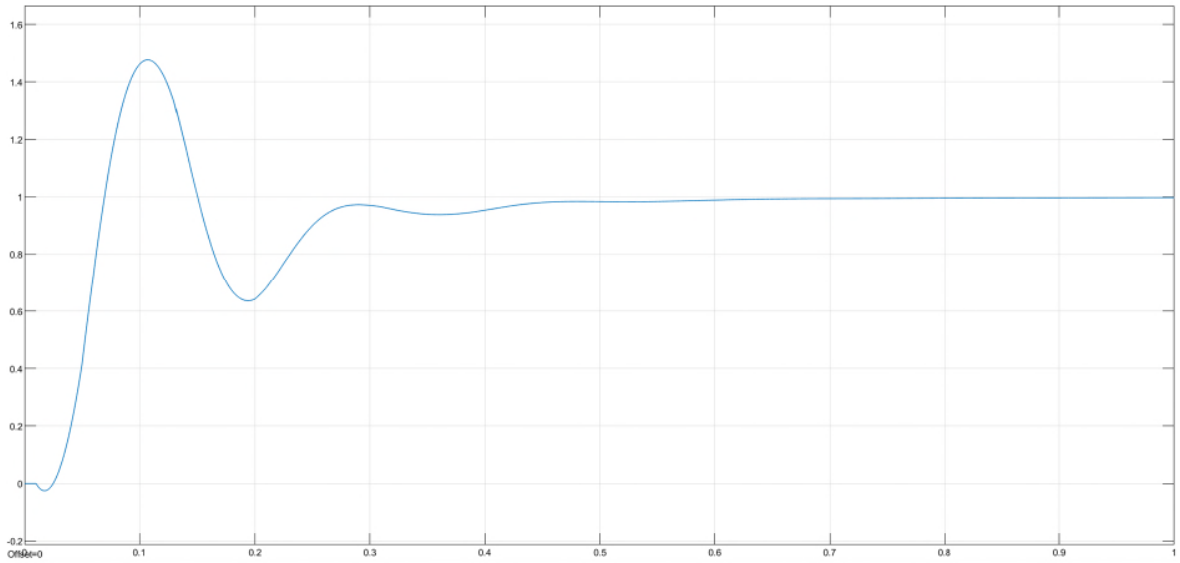


Figure III.7 Réponse indicielle (scénario 1)

On constate un dépassement de près de 50% dans le régime transitoire, c'est le résultat de la perte de paquets lors de la transmission des données.

➤ **Scénario 1 : Probabilité de perte de paquets de 50%**

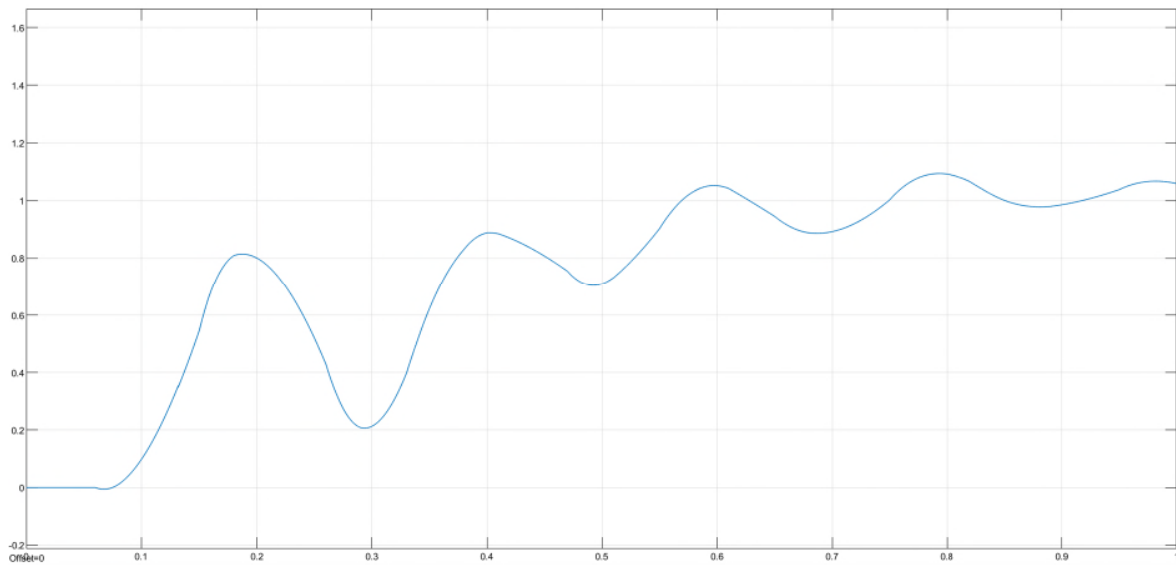


Figure III.8 Réponse indicielle (scénario 2)

On constate que le système est devenu complètement instable.

➤ **Scénario 3 : Partage de 20% de la bande passante**

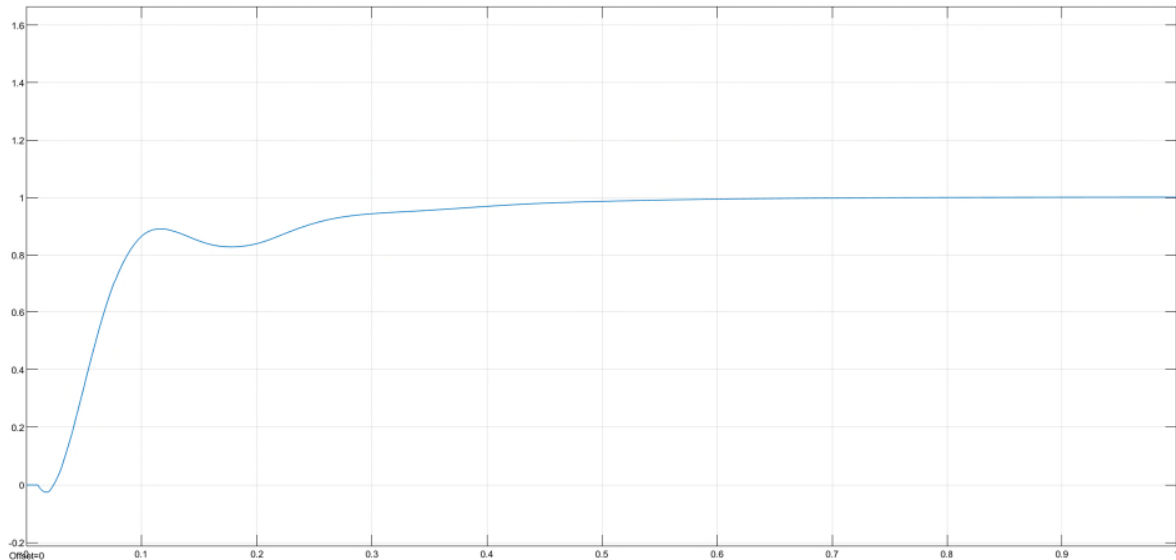


Figure III.9 Réponse indicielle (scénario 3)

Le partage de 20% de la bande passante n'influe pas sur la réponse du système.

➤ **Scénario 4 : Partage de 50% de la bande passante**

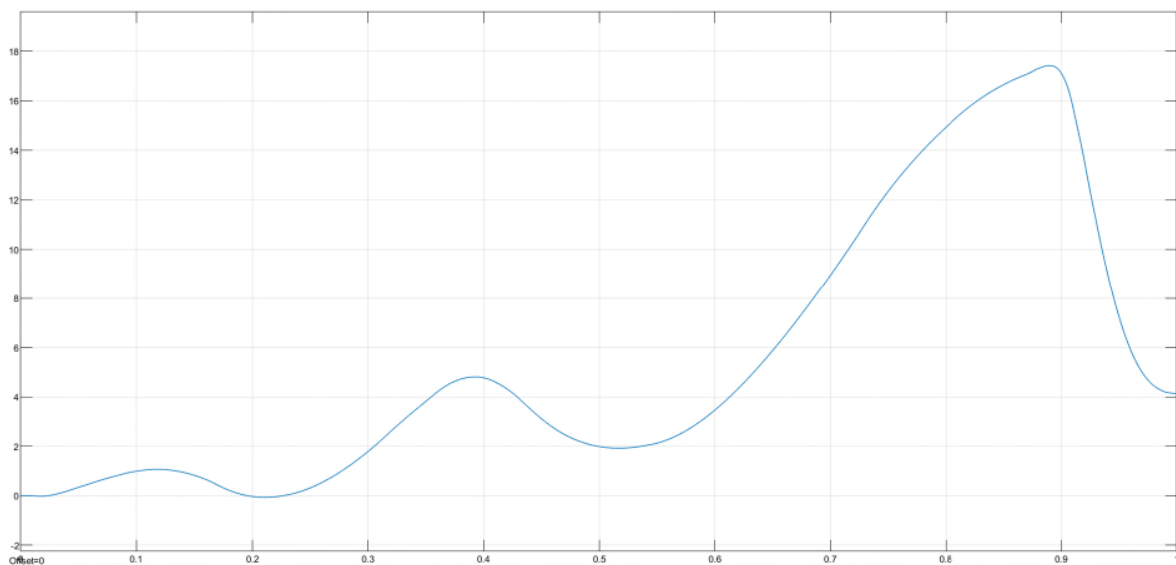


Figure III.10 Réponse indicielle (scénario 4)

Le partage de 50% de la bande passante rend le système complètement instable.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de commande robuste de notre système de contrôle de la température d'une serre agricole, l'implémentation du système corrigé sous réseau Ethernet a permis de constater une certaine robustesse vis-à-vis des perturbations introduites par le réseau (jusqu'à 20% de perte de paquets et de partage de la bande passante).

Conclusion générale

Les systèmes commandés en réseau SCR présentent de nombreux avantages en termes de coût, encombrement et facilité de l'entretien par rapport aux systèmes classiques (point à point). Malheureusement, tous les réseaux de communication introduisent un retard de communication, ce retard va influencer négativement sur la stabilité et les performances du système de commande des SCR. Dans ce mémoire, nous avons présenté une méthode de modélisation des SCR par l'approche du retard distribué, ensuite, nous avons présenté un théorème pour analyser la stabilité de ce type de systèmes, l'application de ce dernier sur un système de contrôle de la température d'une serre agricole a permis de mesurer le retard maximal admis pour que le système reste stable. Ensuite, nous avons appliqué une méthode de commande robuste H_∞ sur le système de contrôle de la température de la serre agricole, avant d'implémenter le système de commande sous réseau Ethernet pour pouvoir simuler son comportement face aux incertitudes introduites par le réseau (pertes de paquets, partage de la bande passante...etc.), les résultats trouvés ont montré que le contrôleur obtenu garde le système stable et robuste jusqu'à des pertes de paquets de 20% et un partage de la bande passante de 20%.

Bibliographie

- [1] Cédric FRAYSSINET. « Généralités sur les Réseaux », Formation I.S.N. IREM de Lyon, 2018/2019 [En ligne]. <http://www.bibenligne.org/index69.html> [consulté le 06 Juin 2021].
- [2] Rony GHOSTINE, « Influence des fautes transitoires sur la fiabilité d'un système commandé en réseau », thèse doctorat en automatique, Institut National Polytechnique de Lorraine, Juin 2008.
- [3] Amine MECHRAOUI, « Co-conception d'un système commande en réseau sans fil à l'aide de réseaux bayésiens distribués », thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Grenoble, Spécialité : AUTOMATIQUE-PRODUCTIQUE, 2010.
- [4] Yodyium Tipsuwan, Mo-Yuen Chow, «Control methodologies in networked control systems », Control Engineering Practice, Volume 11, Issue 10, 2003, Pages 1099-1111.
- [5] Chen Peng, Dong Yue, Engang Tian, Zhou Gu, « A delay distribution based stability analysis and synthesis approach for networked control systems, Journal of the Franklin Institute », Volume 346, Issue 4, 2009, Pages 349-365.
- [6] Y. Tipsuwan, M.Y. Chow, « Gain scheduling middleware: a methodology to enable existing controllers for networked control and teleoperation—part i: network control », IEEE Transactions on Industry Electronics 51 (6) (2004) 1218–1227.
- [7] Irina COJUHARI, Bartolomeu IZVOREANU, Dumitru MORARU, Aurel SPEIAN, Alexei ROMANOV, “Greenhouse Temperature Control System”, 11th International Conference on DEVELOPMENT AND APPLICATION SYSTEMS, Suceava, Romania, May 17-19, 2012, Pages 33-36.
- [8] R. M. Murray, « Control and Dynamical Systems CDS 110b, Lecture 2 – LQR Control », CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 11 January 2006.
- [9] J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar and B. A. Francis, "State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 34, no. 8, pp. 831-847, Aug. 1989.
- [10] G. Zames, ‘Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, multiplicative seminorms and approximate inverses’, IEEE Transactions on Automatic Control, AC-26:301–320, 1981.

- [11] G. Scorletti, V. Fromion, “Introduction à la Commande Multivariable des Systèmes : Méthodes de synthèse fréquentielle H_∞ ”, Université de Caen, France, 2003.
- [12] Huibert Kwakernaak, "MIXED SENSITIVITY DESIGN", IFAC Proceedings Volumes, Volume 35, Issue 1, 2002, Pages 61-66.
- [13] A. Layate, « Commande de systèmes multivariables avec et sans découpleurs », mémoire de master en Automatique et Informatique Industrielle, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019.
- [14] A.Cervin, D.Henriksson, M.Ohlin, “TRUETIME2.00 beta-Reference Manual”, Lund University. Sweden 2010.