

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE DJILALI BOUNAAMA KHEMIS-MILIANA



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes
En Vue de l'Obtention du Diplôme

MASTER

En

« ÉLECTROTECHNIQUE »

Option

« ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE »

THEME:

***Etude Comparative des Différentes Structures de
Contrôle d'un Système Multivariable***

Réalisé par:

Mr. SETTAOUI Nabil

Mr. YEDDER Fatih

Encadré par:

Dr. LAYATE Zakaria

Année universitaire: 2022/2023

Résumé

Vue que les systèmes modernes deviennent de plus en plus interconnectés et complexes, la prise en compte des interactions entre plusieurs variables entrées/sorties d'un système est devenue essentielle pour un contrôle efficace et optimal. Les systèmes multivariables sont désormais largement répandus dans divers secteurs industriels tels que l'automobile, l'aérospatiale, la chimie, la robotique et bien d'autres.

Notre objectif était d'explorer les défis et les complexités associés aux systèmes multivariables et d'étudier différentes méthodes de découplage ainsi que des techniques d'optimisation basé sur le régulateur *PID* pour le contrôle de ces systèmes. En étudiant ces systèmes spécifiques, nous souhaitions obtenir des informations sur l'efficacité des méthodes de découplage dans la réduction des interactions entre les variables entrées/sorties et l'amélioration des performances du système. De plus, nous cherchions à évaluer l'impact de l'optimisation par *PID* sur le contrôle et la stabilité du système de séchage des céréales.

Dans notre travail, nous avons choisi le système de séchage des céréales et la colonne de distillation comme objets de recherche en raison de leur importance et de leur large application dans divers secteurs industriels d'où, le système de séchage des céréales est essentiel dans l'industrie alimentaire pour éliminer l'humidité des produits céréaliers, tandis que la colonne de distillation joue un rôle primordial dans les processus chimiques pour la séparation des mélanges liquides.

Mots-clés: Découplage - Multivariable - Contrôle - PID - Optimisation.

Abstract

As modern systems become increasingly interconnected and complex, considering the interactions between multiple inputs/outputs system's variables has become essential for effective and optimal control. Multivariable systems are now widely used in various industrial sectors such as automotive, aerospace, chemistry, robotics, and many others.

Our goal was to explore the challenges and complexities associated with multivariable systems and study different decoupling methods as well as based *PID* controller optimization techniques for controlling these systems. By studying these specific systems, we aimed to gain insights into the effectiveness of decoupling methods in reducing interactions between inputs/outputs variables and improving system performance. Additionally, we sought to evaluate the impact of *PID* optimization on the control and stability of the cereal drying system.

In this work, we chose the cereal drying system and the distillation column as research objects due to their importance and widespread application in various sectors, while the cereal drying system is crucial in the food industry for removing moisture from cereal products, the distillation column plays a vital role in chemical processes for separating liquid mixtures.

Key-words: Decoupling - Mulvariable - Control - PID - Optimization.

ملخص

مع تزايد ترابط الأنظمة الحديثة وتعقيداتها، أصبح مراعاة التفاعلات بين متغيرات الأنظمة متعددة المداخل والمخارج أمرًا أساسيًا لضبط فعال وأمثل. أصبحت الأنظمة المتعددة المتغيرات مستخدمة على نطاق واسع الآن في مختلف القطاعات الصناعية مثل صناعة السيارات و الطيران و الكيمياء و الروبوتات و غيرها.

كان هدفنا استكشاف التحديات والتعقيدات المرتبطة بالأنظمة المتعددة المتغيرات ودراسة طرق التفكير المختلفة وتقنيات التحسين تركز على نظام PID في التحكم بهذه الأنظمة. من خلال دراسة هذه الأنظمة المحددة، كنا نسعى للحصول على نظرة عميقة حول فعالية طرق التفكير في تقليل التفاعلات بين متغيرات المداخل و المخارج وكذا تحسين أداء النظام. بالإضافة إلى ذلك، كنا نسعى لتقييم تأثير تحسين PID على التحكم و الاستقرار لنظام تجفيف الحبوب.

في هذا العمل، اخترنا نظام تجفيف الحبوب وعمود التقطير كمحوري بحث نظرا لأهميتهما وتطبيقاتهما الشائع في مختلف القطاعات الصناعية حيث يعتبر نظام تجفيف الحبوب أمرًا حاسمًا في صناعة الأغذية لإزالة الرطوبة من منتجات الحبوب، بينما يلعب عمود التقطير دورًا حيويًا في العمليات الكيميائية لفصل المخاليط السائلة.

الكلمات المفتاحية: الفصل - متعدد المتغيرات - التحكم - PID - التحسين.

REMERCIEMENTS

- ❖ *Nous exprimons notre gratitude à Dieu de nous avoir donné la force pour accomplir cette tâche.*
- ❖ *Nous souhaitons remercier nos chers parents respectifs pour leurs aide et leurs soutien depuis que nous nous souvenons.*
- ❖ *Nos sincères remerciements vont également à notre respecté docteur, Mr. LAYATE Zakaria, d'avoir accepté de superviser notre projet de fin d'étude et d'avoir proposé ce sujet qui nous a ouvert les portes à de tels domaines dans lesquels nous souhaitons poursuivre nos recherches. Nous sommes reconnaissants de son soutien, de ses remarques pertinentes, de son encouragement, mais surtout de sa patience à notre égard.*
- ❖ *Nous exprimons également notre sincère reconnaissance à tous les enseignants du Département des Sciences et de la Technologie pour leurs efforts tout au long de notre période d'études, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre travail.*
- ❖ *Nous tenons à remercier tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail et de participer à notre soutenance.*
- ❖ *Un grand merci à nos camarades de classe du Master Promo 2022/2023 pour tout ce qu'ils ont apporté.*

Settaoui Nabil & Yedder Fatih

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à.....

- ❖ *Mes très chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*
- ❖ *A mes frères, Mohammed, Ben Ahmed, Hammouda et Djalal.*
- ❖ *A mes très chères nièces, Illine , Aicha et mon neveu petit Fatih,*
- ❖ *A mes amis, Boualam, Abderezak et Rezki et à tous ceux qui ont contribué,*

..... Je vous dis merci.

Fatih

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à.....

- ❖ *Mes très chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*
- ❖ *Mes frères, Houssein et Akram et à mes chères sœurs.*
- ❖ *Mes amis Ahmed, Kabir et Aymen.*
- ❖ *Tous ceux qui ont contribué.*

..... Je vous dis merci.

Nabil

SOMMAIRE

Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	

INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I	
I.1 Introduction.....	03
I.2 Définition d'un système.....	03
I.3 Grandeurs de décomposition d'un système.....	04
I.3.1 Grandeur d'entrée.....	04
I.3.2 Grandeur de sortie.....	04
I.4 Les systèmes multivariables.....	05
I.4.1 Définition d'un système multivariable.....	05
I.4.2 Différentes types des systèmes multivariables.....	05
I.4.2.1 Système SISO.....	05
I.4.2.2 Système SIMO.....	06
I.4.2.3 Système MISO.....	07
I.4.2.4 Système MIMO.....	08
I.4.3 Présentation des systèmes multivariables.....	09
I.4.4 Configuration des systèmes multivariables bouclés.....	09
I.5 Analyse des systèmes multivariables par les valeurs singulières.....	10
I.5.1 Décomposition en valeurs singulière d'une matrice.....	11
I.5.2 Fonctionnalité des valeurs singulières.....	13
I.6 Norme H_{∞} d'un système multivariable.....	14
I.6.1 Définition de la norme H_{∞}	14
I.6.2 La norme H_{∞} dans les systèmes <i>SISO</i>	15
I.6.3 La norme H_{∞} dans les systèmes <i>MIMO</i>	15
I.7 Conclusion	16
CHAPITRE II	
II.1 Introduction.....	17
II.2 Couplage et découplage d'un système multivariable.....	17
II.2.1 Définition d'un système couplé.....	17
II.2.2 Définition d'un système découplé.....	18
II.2.3 Mesure du découplage d'un système multivariable.....	18
II.3 Méthode de découplage linéaires	19
II.3.1 Découplage dynamique.....	19
II.3.2 Découplage statique.....	20
II.3.3 Découplage inversé.....	21
II.4 Nombre de conditionnement.....	22

II.5	Application du découplage sur des systèmes présentant un couplage	22
II.5.1	Application sur un système de séchage.....	22
II.5.1.1	Présentation du système	22
II.5.1.2	Analyse sans découplage du système	23
II.5.1.3	Application des techniques de découplage sur le système.....	25
A	Application du découplage dynamique	25
B	Application du découplage inversé.....	26
C	Application du découplage statique.....	28
II.5.2	Application sur un système de distillation	30
II.5.2.1	Présentation du système	30
II.5.2.2	Analyse sans découplage du système	31
II.5.2.3	Application des techniques de découplage sur le système .	32
A	Application du découplage dynamique	32
B	Application du découplage inversé.....	34
C	Application du découplage statique.....	35
II.6	Test de stabilité avec nombre de conditionnement.....	37
II.7	Conclusion	38

CHAPITRE III

III.1	Introduction.....	39
III.2	Structure du système de commande.....	39
II.2.1	Système de commande en boucle ouverte.....	39
II.2.2	Système de commande en boucle fermée.....	39
III.3	Le régulateur <i>PID</i>	40
III.3.1	Généralité	40
III.3.2	Fonction de transfert d'un régulateur <i>PID</i>	41
III.4	Méthode de calcul des paramètres optimaux du régulateur <i>PID</i>	42
III.4.1	Méthode d'erreur quadratique intégrale <i>ISE</i>	42
III.4.2	Méthode d'erreur absolue intégrale <i>IAE</i>	42
III.4.3	Méthode d'erreur quadratique de temps intégrale <i>ITSE</i>	43
III.4.4	Méthode d'erreur absolue de temps Integral <i>ITAE</i>	43
III.5	Optimisation par la méthode " <i>Nelder-Mead</i> "	43
III.5.1	Etapas de l'algorithme de <i>Nelder-Mead</i>	44
III.6	Détermination des paramètres du régulateurs <i>PID</i> par la méthode <i>Ziegler-Nichols</i>	45
III.6.1	Méthode 1 de réglage de <i>Ziegler-Nichols</i> pour courbe de réponse à un échelon en forme de " <i>S</i> ".....	46
III.6.2	Méthode 2 de Réglage de <i>Ziegler-Nichols</i>	46
III.6.3	Application sur le système de séchage des céréales.....	47
II.6.3.1	Réglage <i>PID</i> en mode de découplage dynamique.....	48
II.6.3.2	Réglage <i>PID</i> en mode de découplage inversé.....	49
II.6.3.3	Réglage <i>PID</i> en mode de découplage statique.....	52
III.7	Conclusion	54
	CONCLUSION GENERAL.....	55

Liste des Figures

CHAPITRE I

Figure.I.1	Système multivariable.....	05
Figure.I.2	Système SISO.....	06
Figure.I.3	Système SIMO.....	06
Figure.I.4	Système MISO.....	07
Figure.I.5	Système MIMO.....	08

CHAPITRE II

Figure.II.1	Principe d'un système couplé.....	17
Figure.II.2	Principe d'un système découplé.....	18
Figure.II.3	Découplage dynamique d'un système multivariable	19
Figure.II.4	Découplage statique d'un système multivariable	20
Figure.II.5	Découplage inversé d'un système multivariable	21
Figure.II.6	Système de séchage des céréales	23
Figure.II.7	Structure d'un système du séchage des céréales couplé	23
Figure.II.8	Représentation du couplage pour Entrée 1 = 1 et Entrée 2 = 0.....	24
Figure.II.9	Représentation du couplage pour Entrée 1 = 0 et Entrée 2 = 1.....	24
Figure.II.10	Structure d'un système de séchage des céréales avec découplage dynamique.....	25
Figure.II.11	Représentation du découplage dynamique pour Entrée1=1 et Entrée2=0..	26
Figure.II.12	Représentation du découplage dynamique pour Entrée1=1 et Entrée2=0..	26
Figure.II.13	Structure d'un système du séchage des céréales avec découplage inversé.....	27
Figure.II.14	Représentation du découplage inverse pour Entrée1=1 et Entrée2=0.....	27
Figure.II.15	Représentation du découplage inverse pour Entrée1=0 et Entrée2=1.....	27
Figure.II.16	Structure d'un système du séchage des céréales avec découplage statique.....	28
Figure.II.17	Représentation du découplage statique pour Entrée1=1 et Entrée2=0.....	29
Figure.II.18	Représentation du découplage statique pour Entrée1=0 et Entrée2=1.....	29
Figure.II.19	Colonne de distillation d'eau	30
Figure.II.20	Structure d'un système de distillation d'eau sans découplage.....	31
Figure.II.21	Représentation du couplage pour Entrée1=1 et Entrée2=0.....	31
Figure.II.22	Représentation du couplage pour Entrée1=0 et Entrée2=1.....	32
Figure.II.23	Structure d'un système du distillation avec découplage dynamique.....	33
Figure.II.24	Représentation de découplage dynamique pour Entrée1=0 et Entrée2=1..	33
Figure.II.25	Représentation de découplage dynamique pour Entrée1=0 et Entrée2=1..	33

Figure.II.26	Structure d'un système de distillation avec découplage inversé.....	34
Figure.II.27	Représentation de découplage inverse pour Entrée1=1 et Entrée2=0.....	34
Figure.II.28	Représentation de découplage inverse pour Entrée1=0 et Entrée2=1.....	35
Figure.II.29	Structure d'un système de distillation avec découplage statique	36
Figure.II.30	Représentation de découplage statique pour Entrée1=1 et Entrée2=0.....	36
Figure.II.31	Représentation de découplage statique pour Entrée1=0 et Entrée2=1.....	36

CHAPITRE III

Figure.III.1	Structure de commande en boucle fermée.....	40
Figure.III.2	Système de contrôle <i>PID</i> à rétroaction.....	40
Figure.III.3	Structuration de la méthode de <i>Nelder-Mead</i>	44
Figure.III.4	Indication des points utilisés dans la méthode de <i>Nelder-Mead</i>	45
Figure.III.5	Courbe de réponse en forme de "S".....	46
Figure.III.6	Oscillation soutenue avec une période P_{cr}	47
Figure.III.7	Réglage par <i>PID</i> du système de séchage des céréales en mode de découplage dynamique.....	48
Figure.III.8	Réponses en boucle ouverte et fermée du système en mode de découplage dynamique.....	48
Figure.III.9	Réglage par <i>PID</i> du système de séchage des céréales en mode de découplage inversé.....	50
Figure.III.10	Réponses en boucle ouverte et fermée du système en mode de découplage inversé.....	50
Figure.III.11	Réglage par <i>PID</i> du système de séchage des céréales en mode de découplage statique.....	52
Figure.III.12	Réponses en boucle ouverte et fermée du système en mode de découplage statique.....	52

Liste des Tableaux

Tableau .II.1	Tableau représente le nombre de condition dans les deux systèmes.....	37
Tableau .III.1	Règle de réglage de Ziegler-Nichols basée sur la réponse à une échelon	46
Tableau .III.2	Règle de réglage de Ziegler-Nichols en La deuxième méthode.....	47
Tableau .III.3	Paramètres du contrôleur avec découplage dynamique.....	49
Tableau .III.4	Performances du système régulé par <i>PID</i> en mode de découplage dynamique.....	49
Tableau .III.5	Paramètres du contrôleur <i>PID</i> pour le découplage inversé	51
Tableau .III.6	Performances du système régulé par <i>PID</i> en mode de découplage inversé	51
Tableau .III.7	Paramètres du contrôleur <i>PID</i> pour le découplage statique	53
Tableau .III.8	Performances du système régulé par <i>PID</i> en mode de découplage statique.....	53

Liste des Abréviation

(A, B)	Matrice reliant les entrée aux sorties
x	Vecteur qui représente l'état interne du système
U	Vecteur d'entée de dimension $(e \times 1)$
V	Vecteur de sortie de dimension $(s \times 1)$
e	Nombre d'entrées de système
s	Nombre de sortie du système
SISO	Single input single output
SIMO	Single input multiple output
MISO	Multiple input single output
MIMO	Multiple input multiple output
$H(s)$	Fonction de transfert pour les systèmes ayant plusieurs entrées
$H_{ij}(s)$	Fonction de transfert entre le sortie de class j et l'entrée de class i
Y_i	Vecteur de sortie
U_i	Vecteur d'entrée
q	Nombre d'entrée
p	Nombre de sorties
DVS	Décomposition en valeurs singulière
A'	Matrice transposé
λ	Valeurs propres
v	Vecteur propres
$X(0)$	Vecteur initial non nul
$Y(i)$	Valeurs scalaire
$(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$	Valeurs singulière
(u_1, u_2, u_3)	Valeur singulière gauche
(v_1, v_2, v_3)	Valeur singulière droite
$\sum$	Matrice diagonale
U	Matrice singulière gauche
V	Matrice singulière droite
H_∞	H infinie
$G(s)$	Matrice de transfert
M	Petite constant
$\ G(j\omega)\ _\infty$	Norme induit
ω	Fréquence
$H_\infty \ \cdot\ _\infty$	Norme matricielle induit
$\ \cdot\ _\infty$	Norme matricielle infinie
$D(s)$	Matrice de transfert de découpleur
PI	Proportionnel intégral
PID	Proportionnel intégral dérivé
$S(t)$	Loi de commande
$S(p)$	Loi de commande après transformée de la place
k_p	Gain proportionnel

k_I	Gain intégral
k_D	Gain dérivé
N	Coefficient de filtre
ISE	Indice d'erreur (integral square error)
IAE	Indice d'erreur (Integral absolut error)
$ITSE$	Indice d'erreur (Integral of time multiple by square error)
$ITAE$	indice d'erreur (Integral of time multiplied by absolute error)
(B, G, W)	Point d'un triangle de la méthode de Nelder-Mead
m	Point milieu
E	Point d'expansion
(C_1, C_2)	Point de contraction
R	Point de réduction
t	Temps
L	Temps de retard
T	Instant de temps
K_{cr}	Augmenter jusqu'à ce qu'une oscillation en régime permanent se produise
P_{cr}	Période d'oscillation soutenue

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes multivariables jouent un rôle de plus en plus important dans l'ingénierie et la technologie. Avec le développement des systèmes complexes et interconnectés, la prise en compte des interactions entre de multiples variables est devenue nécessaire pour assurer un contrôle efficace et optimal de ces systèmes. Les systèmes multivariables sont devenus courants dans plusieurs applications industrielles telles que l'automobile, l'aérospatiale, la chimie, la robotique...etc [1].

La principale caractéristique des systèmes multivariables est qu'ils impliquent plusieurs entrées et plusieurs sorties interdépendantes, où chaque variable d'entrée peut affecter plusieurs variables de sortie. Cela représente un défi important pour les ingénieurs et les chercheurs du domaine de contrôle des systèmes industriels, car le maintien d'une stabilité, d'une précision et de performances optimales dans de telles configurations devient plus compliqué que dans le cas des systèmes à entrée et sortie uniques [2].

Les difficultés associées aux systèmes multivariables résident principalement dans la compréhension et la gestion des interactions entre les différentes variables. Les changements d'une variable peuvent entraîner des complexités des interactions qui peuvent causer des problèmes tels qu'un couplage indésirable, des oscillations, une réponse lente et de mauvaises performances globales du système [3]. Pour cette raison, ils nécessitent des méthodes de contrôle bien conçues. De plus, les systèmes multivariables présentent souvent des effets linéaires et non linéaires, de retard et phases transitoires, ce qui complique beaucoup leur contrôle. Par conséquent, l'identification précise des modes dynamiques et des propriétés du système devient une tâche critique dans la conception de stratégies de contrôle efficaces pour ces cas[4].

Dans cette étude, nous aborderons les défis inhérents aux systèmes multivariables, en mettant l'accent sur la compréhension des interactions complexes entre les variables et les difficultés rencontrées pour assurer un contrôle optimal. Nous passerons par différentes approches et techniques utilisées pour éliminer ou limiter ces difficultés, en insistant sur l'importance de bien concevoir des stratégies de contrôle pour assurer le découplage, la stabilité, la performance et la fiabilité des systèmes multivariables.

Dans le premier chapitre, nous avons étudié les systèmes multivariables en général. Nous soulignons l'importance de comprendre les interactions complexes entre les différentes variables d'un système et les défis qui en découlent. Les systèmes multivariables présentent des dynamiques interdépendantes qui nécessitent une approche spécifique pour les contrôler efficacement. La première partie pose des bases solides pour de futures recherches.

Dans le deuxième chapitre, nous nous concentrons sur les méthodes de découplage dynamique, statique et inversé. Ces méthodes ont été étudiées en détail, mettant en évidence leurs raisons d'être, leurs avantages et leurs limites. Nous observons que chaque méthode de découplage a des caractéristiques et des conditions d'application spécifiques. La connaissance de ces méthodes est essentielle pour choisir la méthode la plus appropriée pour chaque système étudié.

Le troisième chapitre se concentre sur l'optimisation des système multivariables en se basant sur les régulateurs de type Proportionnel - Intégrale - Dérivé (*PID*). Nous avons présenté dans cette partie, différentes méthodes pour régler les paramètres du régulateur (*PID*) en tenant compte des interactions entre les différentes variables du système. Nous soulignons l'importance de l'expérimentation, de l'analyse des résultats et de l'itération pour obtenir un réglage *PID* optimal. En outre, nous abordons les défis spécifiques de l'utilisation d'un contrôleur *PID* dans les systèmes multivariables, tels que la nécessité de trouver des compromis entre l'objectif de contrôle et les interactions entre les variables.

Enfin, nous clôturons notre travail par une conclusion générale où nous présentons notre approche méthodologique, les résultats que nous avons obtenus et les perspectives envisagées pour poursuivre nos travaux.

CHAPITRE I

NOTIONS ET GENERALITES SUR LES SYSTEMES MULTIVARIABLES

CHAPITRE I

Notions et Généralités sur les Systèmes Multivariables

I.1 Introduction

Les notions généralisées sur les systèmes multivariables sont importantes en ingénierie et en sciences appliquées. Un système multivariable est un système qui implique plusieurs entrées et sorties. Les entrées sont les signaux qui agissent sur le système, tandis que les sorties sont les signaux qui en résultent. Les systèmes multivariables peuvent être utilisés pour modéliser une grande variété de phénomènes physiques, tels que les systèmes électromécaniques, les systèmes de contrôle, les systèmes de communication et bien d'autres.

L'étude des systèmes multivariables implique la compréhension de notions telles que la stabilité, la commande, la régulation et aussi l'optimisation.

I.2 Définition d'un système

Un système se compose d'un ensemble d'éléments qui ont des fonctions ou des types similaires d'où ces éléments sont organisés en parties ordonnées dont chacune obéissant à ses propres lois. Le comportement d'un système réel peut être représenté par l'ensemble des relations qui le composent, et un modèle mathématique de ce système peut être construit pour en faciliter l'analyse [1]:

- Equations différentielles;
- Fonction de transfert;
- Représentation dans l'espace d'état.

Un Système est un ensemble de composants interconnectés travaillant ensemble pour atteindre un objectif spécifique. On peut le définir comme un ensemble d'éléments ou de composants qui sont réunis de manière organisée pour atteindre un objectif global ou un objectif spécifique [2].

I.3 Grandeurs de décomposition d'un système

Les grandeurs de décomposition d'un système désignent les variables ou grandeurs qui sont utilisées pour décrire le comportement du système [3]. Ces grandeurs peuvent être classées en deux catégories principales: Les grandeurs d'entrée et les grandeurs de sortie.

I.3.1 Grandeurs d'entrée

Les grandeurs d'entrée sont les grandeurs qui sont appliquées au système pour le faire fonctionner [4]. Elles sont souvent considérées comme des paramètres du système et peuvent inclure des signaux électriques, des signaux de commande, des forces mécaniques, des températures, des pressions, des débits, des concentrations,...etc.

I.3.2 Grandeurs de sortie

Les grandeurs de sortie, en revanche, sont les grandeurs qui résultent du comportement du système. Elles représentent les mesures ou les observations qui sont utilisées pour évaluer la performance du système ou pour le réglage des paramètres d'entrée [5]. Les grandeurs de sortie peuvent inclure des mesures de position, de vitesse, de pression, de température, de débit, de concentration,...etc.

En fonction du type de système considéré, les grandeurs de décomposition peuvent également inclure des grandeurs internes telles que des états ou des variables cachées qui ne sont pas directement mesurables. Ces grandeurs internes peuvent être utilisées pour modéliser le comportement du système et ainsi pour prédire ses performances [3].

Il faut bien noter que, dans un système multivariable, il peut y avoir plusieurs entrées et plusieurs sorties, et les relations entre elles peuvent être plus complexes. Dans ce cas, nous pouvons utiliser des matrices ou des vecteurs pour représenter les entrées et les sorties. Par exemple, dans un système à deux entrées et deux sorties, nous pouvons utiliser le vecteur d'entrée u et le vecteur de sortie y , avec des équations telles que:

$$y = Ax + Bu \tag{I.1}$$

Où,

A et B : Matrices reliant les entrées aux sorties;

x : Vecteur qui représente l'état interne du système.

En résumé, les grandeurs de décomposition d'un système sont les variables ou grandeurs qui sont utilisées pour modéliser et décrire son comportement. Les grandeurs d'entrée sont les paramètres appliqués au système, tandis que les grandeurs de sortie sont les mesures ou les observations résultant du comportement du système.

I.4 Systèmes multivariables

I.4.1 Définition d'un système multivariable

Un système multivariable est un système dans lequel une ou plusieurs entrées peuvent affecter simultanément une ou plusieurs sorties. Ou, dont un changement dans une variable d'entrée peut entraîner une modification simultanée de plusieurs variables de sortie, et vice versa [6].

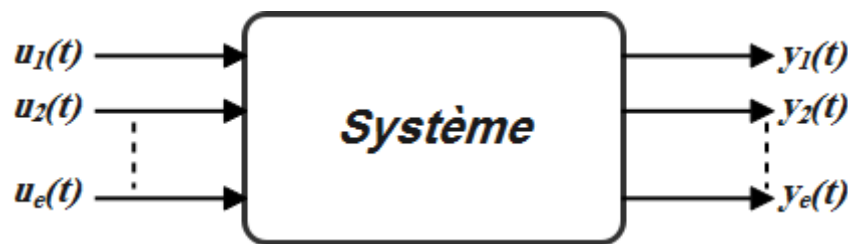


Figure I.1. Système multivariable [7].

Avec:

$u = [u_1, u_2, \dots, u_e]$: Vecteur des entrées (commandes) de dimension $(e \times 1)$.

$y = [y_1, y_2, \dots, y_s]$: Vecteur des entrées (commandes) de dimension $(s \times 1)$.

Où,

e : Nombre d'entrées du système;

s : Nombre de sorties du système.

I.4.2 Différents types des systèmes multivariables

I.4.2.1 Système SISO (Single Input Single Output)

Un système *SISO* est un système de contrôle qui a un signal unique d'entrée et un signal unique de sortie. Ces systèmes sont connus pour leur simplicité de conception et d'analyse, et sont souvent utilisés comme base pour des systèmes de contrôle complexes [6].

Un exemple de système *SISO* dans le domaine industriel est un système de contrôle de température pour un four. Ce système a une entrée qui est le débit de combustible et une sortie qui est la température du four. La température est mesurée à l'aide d'un thermocouple et comparée à la consigne de température désirée. Si la température mesurée est inférieure à la consigne, le régulateur augmente le débit de combustible pour augmenter la température, et si la température mesurée est supérieure à la consigne, le régulateur diminue le débit de combustible pour diminuer la température [8].

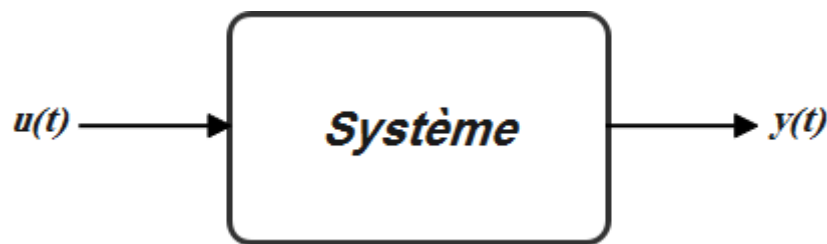


Figure I.2. Système *SISO* [7].

I.4.2.2 Système *SIMO* (Single Input Multiple Output)

Un système *SIMO* est un système dynamique possédant une entrée unique et plusieurs sorties. Dans ce cas, le système reçoit un signal en entrée et produit plusieurs signaux de sortie en réponse à celui-ci. Les systèmes *SIMO* sont souvent utilisés dans les applications de contrôle industriel où une seule entrée (comme un signal de commande ou une mesure de capteur) est utilisée pour contrôler plusieurs sorties (comme des actionneurs ou des indicateurs). L'analyse des systèmes *SIMO* peut se faire par le biais de diverses techniques, telles que, les fonctions de transfert, les représentations par modèles d'état, ainsi que les méthodes de réponse en fréquence [9].

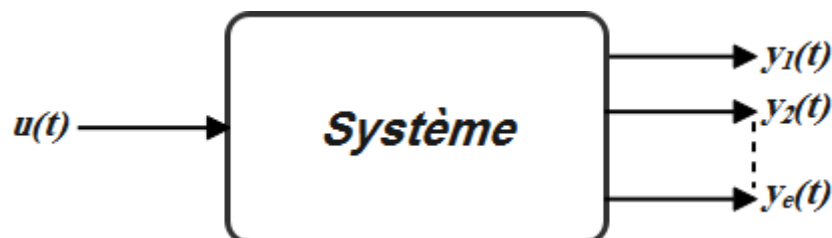


Figure I.3. Système *SIMO* [7].

I.4.2.3 Système MISO (Multiple Input Single Output)

L'acronyme *MISO*, signifie une catégorie de systèmes multivariables équipés de plusieurs entrées et d'une seule sortie. Ces types de systèmes sont largement utilisés dans de nombreux domaines, tels que les systèmes de contrôle [10].

Dans un système *MISO*, les entrées sont indépendantes et peuvent affecter la sortie de différentes manières. Dans ces systèmes, les entrées peuvent également interagir entre elles et ce qui peut compliquer leurs analyse et contrôle [11].

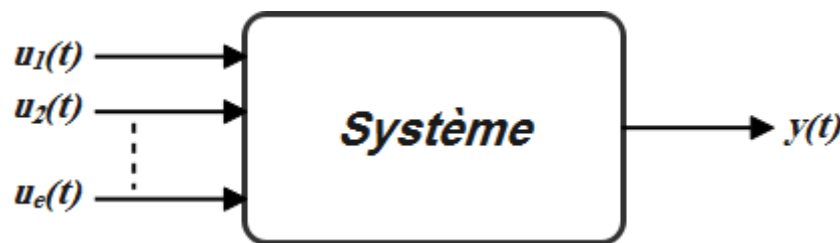


Figure I.4. Système *MISO* [7].

Les systèmes *MISO* sont couramment utilisés dans les applications de contrôle, tels que le contrôle des bras robotiques ou le contrôle de la température d'un réacteur chimique. Dans ces applications, il peut y avoir plusieurs entrées, telles que la position, la vitesse et l'accélération, qui affectent une seule sortie, telle que la position du bras robotique ou la température du réacteur [12].

En traitement du signal, les systèmes *MISO* sont utilisés pour filtrer ou manipuler des signaux qui ont plusieurs canaux d'entrée et un seul canal de sortie. Par exemple, dans la reconnaissance vocale, les systèmes *MISO* peuvent être utilisés pour séparer la voix d'un locuteur du bruit de fond, ou pour distinguer différents locuteurs dans une conversation [13]. Les systèmes *MISO* sont utilisés aussi pour le contrôle de la puissance dans les systèmes électriques de grande taille, tels que les réseaux électriques, les centrales électriques et les convertisseurs de puissance [14].

Dans l'ensemble, les systèmes *MISO* sont une classe importante des systèmes multivariables qui ont de nombreuses applications dans divers domaines ainsi que leur analyse et leur contrôle sont essentiels pour le développement des technologies avancées.

I.4.2.4 Système MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Un système *MIMO* fait référence à un type de système en théorie du contrôle qui possède plusieurs entrées et plusieurs sorties [15]. En d'autres termes, le système a plusieurs signaux d'entrée et produit plusieurs signaux de sortie.

Dans un système *MIMO*, les entrées et les sorties sont toutes interdépendantes [15], ce qui signifie que les changements dans une entrée peuvent affecter toutes les sorties, et les changements dans une sortie peuvent affecter toutes les entrées.

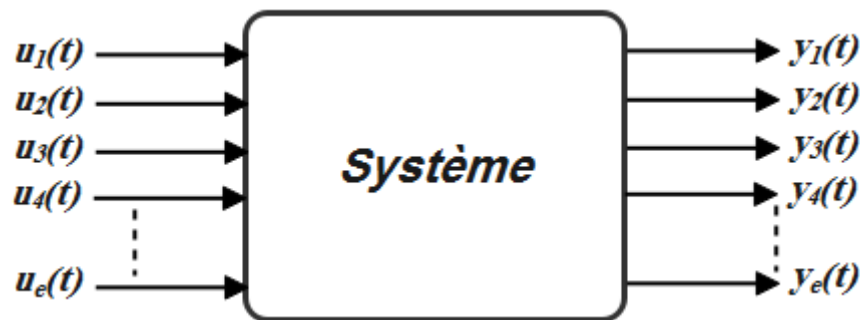


Figure1.5- système MIMO [7].

En théorie du contrôle, l'analyse et la conception de systèmes *MIMO* multivariables peuvent être plus complexes que les systèmes à entrée unique et à sortie unique (*SISO*), en raison du nombre accru de variables et de l'interdépendance entre elles [16]. Cependant, les systèmes *MIMO* offrent également une plus grande flexibilité et un meilleur contrôle, car ils peuvent contrôler simultanément plusieurs entrées et sorties [17].

Les applications des systèmes *MIMO* multivariables se trouvent dans un large éventail de domaines, notamment la robotique, l'aérospatiale, l'industrie agro-alimentaire, le génie chimique et les télécommunications et autres.

La technologie *MIMO* a été largement utilisée dans divers systèmes multivariables en raison de ses fonctionnalités supérieures telles que des taux de transmission de données élevés, des capacités anti-interférences robustes et une stabilité exceptionnelle. La technologie offre de vastes perspectives d'application, dans les processus de fabrication, les systèmes *MIMO* sont utilisés pour le contrôle et l'optimisation des processus tels que le contrôle de la température, de la pression et du débit afin d'améliorer la qualité du produit et de réduire les déchets [18].

I.4.3 Représentation des systèmes multivariables par matrice de transfert

La fonction de transfert d'un système est une représentation mathématique qui décrit comment ce système réagit à une entrée (entrée unique). Elle est souvent notée $H(s)$, où " s " est une variable complexe qui représente la fréquence [5]. La matrice de fonction de transfert est une généralisation de la fonction de transfert pour les systèmes ayant plusieurs entrées et sorties, elle prend cette forme [18]:

$$H(s) = \begin{bmatrix} H_{11} & \dots & H_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{q1} & \dots & H_{qp} \end{bmatrix} \quad (I.2)$$

Où,

$H_{ij}(s)$ (avec, $i = 1, \dots, \dots, q$ et $j = 1, \dots, \dots, p$) est la fonction de transfert entre le sortie de classe j et l'entrée de classe i , et elle est déterminée par la relation ci-dessous [18]:

$$H_{ij}(s) = \frac{Y_j}{U_i} = \frac{z_q s^q + z_{q-1} s^{q-1} + \dots + z_0}{a_p s^p + a_{p-1} s^{p-1} + \dots + a_0} e^{-\tau s} \quad (I.3)$$

Et,

Y_j : Vecteur de sortie;

U_i : Vecteur d'entrée;

q : Nombre d'entrées;

p : Nombre de sorties.

Dans ce contexte, la matrice de fonction de transfert $H(s)$ est construite en déterminant la fonction de transfert $H_{ij}(s)$ pour chaque combinaison d'entrée i et de sortie j du système. En d'autres termes, chaque élément de la matrice de transfert correspond à la fonction de transfert qui décrit la réponse de la sortie j à l'entrée i .

I.4.4 Configuration des systèmes multivariables bouclés

Un système multivariable bouclé est un système de contrôle qui implique plusieurs entrées et plusieurs sorties, où les sorties sont interconnectées entre elles et les entrées sont également interconnectées. Le but du contrôle est de réguler les sorties en ajustant les entrées de manière à atteindre un objectif commun [19].

La configuration des systèmes multivariables bouclés implique la conception d'un système de contrôle qui peut maintenir les variables de sortie d'un processus à des niveaux souhaités malgré les perturbations.

Voici les étapes générales pour configurer un système de contrôle multivariable bouclé [20]:

- **Modélisation du processus:** La première étape consiste à modéliser le processus à l'aide d'équations mathématiques qui décrivent les relations entre les variables d'entrée et de sortie;
- **Identification des interactions:** Il est important d'identifier les interactions entre les différentes variables de sortie. Les interactions peuvent être positives ou négatives, et peuvent influencer la manière dont le système de contrôle doit être conçu;
- **Choix des capteurs:** Les capteurs appropriés doivent être choisis pour mesurer les variables de sortie du processus. Les capteurs doivent être suffisamment précis pour fournir des données fiables pour la commande;
- **Conception du contrôleur:** En fonction de la complexité du processus, différents types de contrôleurs peuvent être utilisés. Les contrôleurs PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) sont souvent utilisés pour les systèmes simples, tandis que les contrôleurs plus avancés tels que les régulateurs multivariables peuvent être nécessaires pour les systèmes plus complexes;
- **Réglage du contrôleur:** Une fois que le contrôleur est conçu, il doit être réglé pour répondre aux exigences de performance du processus. Les techniques de réglage telles que la méthode de Ziegler-Nichols peuvent être utilisées pour déterminer les paramètres optimaux du contrôleur.
- **Mise en œuvre et test:** Une fois que le contrôleur est réglé, il peut être mis en œuvre dans le système réel. Le système de contrôle doit ensuite être testé pour s'assurer qu'il peut maintenir les variables de sortie à des niveaux souhaités en présence de perturbations.

1.5 Analyse des systèmes multivariables par des valeurs singulières

L'analyse des valeurs singulières fournit un outil précieux pour comprendre le comportement et les propriétés des systèmes multivariables. En analysant les valeurs singulières, on peut également identifier les variables redondantes ou inutiles. Par ailleurs, les variables qui ont des valeurs singulières faibles peuvent être éliminées sans affecter de manière significative la réponse globale, ce qui conduit à des modèles plus efficaces et simplifiés [22].

I.5.1 Décomposition en valeurs singulières d'une matrice

La décomposition en valeurs singulières (DVS) d'une matrice est une technique mathématique utilisée pour factoriser une matrice en trois parties: une matrice unitaire, une matrice diagonale et la transposée de la matrice unitaire. La matrice diagonale contient les valeurs singulières de la matrice d'origine, qui sont triées par ordre décroissant et peuvent être utilisées pour analyser les propriétés de la matrice.

Voici les étapes de la décomposition en valeurs singulières d'une matrice [21].

1. Commencez avec une matrice A de taille $m \times n$.

1. $A =$ Calculez le produit de A et de sa transposée ($A \cdot A'$) (I.4)

2. Calculez les valeurs propres et les vecteurs propres de $A \cdot A'$.

Et dans ce qui suit, on représente les étapes pour calculer les valeurs propres et les vecteurs propres d'une matrice A :

- Déterminez la dimension de la matrice A et choisissez un vecteur initial non nul $x(0)$ de cette dimension;
- Calculez le produit $A * x(0) = A_x(0)$;
- Calculez la norme de $A_x(0)$, $\|A_x(0)\|$;
- Calculez la suite de vecteurs $x(i)$ en utilisant la relation:

$$x(i) = A_x(i - 1) / \|A_x(i - 1)\| \quad (\text{I.5})$$

- Calculez la suite des valeurs scalaires $\gamma(i)$ en utilisant la relation:

$$\gamma(i) = x(i)' A_x(i) \quad (I.6)$$

- Répétez les étapes 2 à 5 jusqu'à ce que $\gamma(i)$ converge vers une valeur donnée ou que le nombre d'itérations maximales soit atteint;
 - Une fois que vous avez trouvé les valeurs propres γ et les vecteurs propres correspondants x , vous pouvez les trier par ordre décroissant en fonction de leurs valeurs absolues.
3. Calculez les valeurs singulières et les vecteurs singuliers de A . Tandis que les valeurs singulières de A sont les racines carrées des valeurs propres de $A \cdot A'$ triées en ordre décroissant, les vecteurs singuliers gauches de A sont les vecteurs propres de $A \cdot A'$ normalisés par les valeurs singulières ainsi que les vecteurs singuliers droits de A sont les vecteurs propres de $A' \cdot A$ normalisés par les valeurs singulières.
 4. Formez la matrice diagonale Σ , où les entrées diagonales sont les valeurs singulières.
 5. Formez la matrice singulière gauche U , où les colonnes sont les vecteurs singuliers gauches.
 6. Formez la matrice singulière droite V , où les colonnes sont les vecteurs singuliers droits.
- Ainsi, la SVD de la matrice A est:

$$A = U \Sigma V' = [u_1 \ u_2 \ u_3] * [\sigma_1 \ 0 \ 0] * [v_1 \ v_2]'$$

$$A = [u_1 \ \sigma_1 \ v_1 + u_2 \ \sigma_2 \ v_2 \ u_1 \ \sigma_1 \ v_2 + u_2 \ \sigma_2 \ v_2] \quad (I.7)$$

Notez que les valeurs singulières sont triées par ordre décroissant et que les vecteurs singuliers gauches et droits correspondants sont également disposés en conséquence.

I.5.2 Fonctionnalités des valeurs singulières

Dans la décomposition en valeurs singulières (DVS), les valeurs singulières sont des valeurs qui représentent la "force" ou l'"importance" de chaque composante principale (ou vecteur singulier) dans les données. Ces valeurs sont réelles et non négatives, et peuvent être obtenues en calculant les valeurs propres d'une matrice dérivée des données d'origine [21].

Les valeurs singulières peuvent fournir des informations utiles sur la structure cachette des données représentées par la matrice qui est décomposée. Elles peuvent nous aider à identifier les composantes les plus importantes pour expliquer la variabilité des données, ce qui peut être utile pour la modélisation et l'analyse des systèmes multivariables. De plus, les valeurs singulières peuvent être utilisées pour obtenir une approximation de la matrice originale de rang inférieur, ce qui peut être utile pour compresser ou réduire la dimensionnalité de jeux de données à haute dimension [22].

Enfin, le rapport de la plus grande valeur singulière à la plus petite valeur singulière d'une matrice (connu sous le nom de nombre de conditionnement) peut fournir des informations sur la condition de la matrice. Un grand nombre de conditionnement indique que la matrice est mal conditionnée, ce qui signifie qu'elle est sensible aux petites perturbations et peut ne pas être fiable pour les calculs numériques [22].

Les valeurs singulières de la décomposition en valeurs singulières possèdent plusieurs propriétés importantes qui les rendent utiles pour une variété d'applications. Voici quelques unes des propriétés clés [23]:

- Non-négativité: Les valeurs singulières sont toujours des nombres réels non négatifs;
- Ordonnées: Les valeurs singulières sont disposées par ordre décroissant. La première valeur singulière est la plus grande, et chaque valeur suivante est plus petite que celle d'avant;
- Variance: Les valeurs singulières peuvent être utilisées pour calculer la quantité de variance expliquée par chaque composante principale;
- Orthogonalité: Les vecteurs singuliers gauche et droit sont orthogonaux entre eux, ce qui signifie qu'ils forment une base orthonormale;

- Approximation de rang réduit: La somme des carrés des valeurs singulières est égale à la somme des carrés des entrées de la matrice originale. Cette propriété peut être utilisée pour calculer une approximation de rang réduit de la matrice originale;
- Norme de la matrice: La plus grande valeur singulière d'une matrice est égale à sa norme, qui est le facteur d'étirement maximal de la matrice.

En résumé, les valeurs singulières dans la décomposition en valeurs singulières (SVD) peuvent fournir des informations sur la structure des données, nous aider à fournir des informations sur la condition de la matrice.

I.6 Norme H_∞ d'un système multivariable

I.6.1 Définition de norme H_∞

Pour tout système linéaire invariant dans le temps représenté par une matrice de transfert $G(s)$, la norme H_∞ est définie comme la plus petite constante M qui assure que la norme induite $\|G(j\omega)\|_\infty$ est bornée par M pour toutes les fréquences ω . La norme H_∞ est une norme matricielle qui mesure la plus grande amplification possible du système en réponse à une entrée donnée tout en garantissant que les sorties restent bornées. La valeur singulière maximale de $G(s)$ sur l'axe imaginaire représente la norme matricielle induite $H_\infty \| \cdot \|_\infty$ [24].

Pour toutes les fréquences ω , $\|G(j\omega)\|_\infty \leq M$

Où,

$\| \cdot \|_\infty$ est la norme matricielle infinie.

Un système est constitué d'un ensemble de signaux S , qui permet de décrire les relations entre les entrées et les sorties. Ces relations peuvent être exprimées sous différentes formes telles que des fonctions de transfert ou des représentations d'état. En continu, si l'on prend en considération un signal de sortie $y = H(u)$ où u représente l'entrée, on peut en déduire que H est la fonction de transfert qui décrit le comportement du système [25]:

$$y(t) = Hu(t) = h \cdot u = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau)u(\tau)d\tau \quad (I.8)$$

I.6.2 La norme H_∞ dans les systèmes SISO

La norme H_∞ permet de mesurer l'amplification maximale possible d'un signal d'entrée exogène à une sortie contrôlée, en prenant en compte tous les signaux ayant une énergie donnée. Elle caractérise la capacité d'un système à résister aux perturbations structurées en domaine fréquentiel. Pour un système SISO linéaire et invariant dans le temps, la norme H_∞ correspond à la valeur singulière maximale de la fonction de transfert sur une plage de fréquence spécifiée, qui permet de déterminer l'amplification maximale de tout signal d'entrée soumis à la contrainte de la norme H_∞ sur son énergie. La norme H_∞ est utilisée de manière étendue en ingénierie de contrôle pour le contrôle robuste et le filtrage, et a conduit à de nombreux résultats et applications significatifs [26,27].

$$\|G\|_{H_\infty} = \max(|G(j\omega)|)$$

En d'autres termes, la norme H_∞ d'un système SISO est la plus grande valeur possible de la fonction de transfert $G(s)$ telle que:

- La sortie $y(t)$ soit bornée pour toute entrée bornée $u(t)$;
- Le système reste stable pour toute entrée bornée $u(t)$.

I.6.3 La norme H_∞ dans les systèmes MIMO

La norme H_∞ dans un système MIMO mesure l'amplification maximale de l'énergie d'une entrée à une sortie pour tous les signaux, tout en respectant une contrainte d'énergie imposée à l'entrée. Cette norme est une quantité scalaire qui capture le comportement global du système face à toutes les perturbations structurées possibles. Elle peut être calculée à l'aide de différentes techniques, telles que l'algorithme de micro-synthèse (μ -synthèse) ou les inégalités matricielles linéaires. La norme H_∞ est essentielle pour la conception de systèmes de contrôle robustes capables de gérer des perturbations structurées et des incertitudes de modèle [27, 28].

$$\|G\|_{H_\infty} = \sup \sigma(G(j\omega)) = \sup \sqrt{\lambda(G^*(-j\omega)G(j\omega))}$$

En d'autres termes, la norme H_∞ d'un système MIMO est la plus grande valeur possible de la fonction de transfert $G(s)$ telle que:

- la sortie $y(t)$ soit bornée pour toute entrée bornée $u(t)$;
- le système reste stable pour toute entrée bornée $u(t)$.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné des notions de bases et des généralités sur les systèmes multivariables. Et puis, nous avons présenté en détail les définitions sur les différentes parties de la décomposition des systèmes en générale. Par la suite, nous avons abordé les différents types des systèmes multivariables selon la multiplicité des entrées et/ou des sorties. Nous avons également mis en évidence la représentation par matrice de transfert des systèmes multivariables et les démarches de configuration de leurs systèmes de contrôle bouclé ainsi que leurs décomposition en valeurs singulières. Enfin, nous avons spécifié la norme H_{∞} pour les systèmes *SISO* et les systèmes *MIMO*.

CHAPITRE II

CONTROLE DES SYSTEMES MULTIVARIABLES PAR LES TECHNIQUES DE DECOUPLAGE

CHAPITRE II

Contrôle des Systèmes Multivariables par les Techniques de Découplage

II.1 Introduction

Les systèmes multivariables nécessitent un contrôle efficace pour assurer leur régulation. Cependant, l'action de commande sur une entrée peut avoir un impact sur les sorties de manière non désirée, ce qui pose un défi pour les ingénieurs. Les techniques de découplage sont des méthodes avancées de contrôle multivariable qui visent à minimiser les interactions entre les entrées et les sorties pour améliorer la performance globale du système. Elles comprennent des algorithmes de commande qui réduisent l'impact des interactions, tels que les méthodes de découplage de la commande directe et les méthodes de découplage basées sur la commande indirecte. Les ingénieurs utilisent ces techniques dans divers domaines tels que les processus industriels, les systèmes de contrôle de vol et les systèmes de production d'énergie pour optimiser la réponse globale du système et minimiser les effets des interactions entre les entrées et les sorties.

II.2 Couplage et découplage

II.2.1 Définition d'un système couplé

Un système couplé est constitué de plusieurs sous-systèmes interconnectés qui ont des influences réciproques sur leur comportement respectif. Ainsi, le fonctionnement de chaque sous-système dépend non seulement de ses propres caractéristiques, mais également des caractéristiques des autres sous-systèmes avec lesquels il est couplé. En somme, les sous-systèmes d'un système couplé sont interdépendants et leur comportement global est complexe [33].

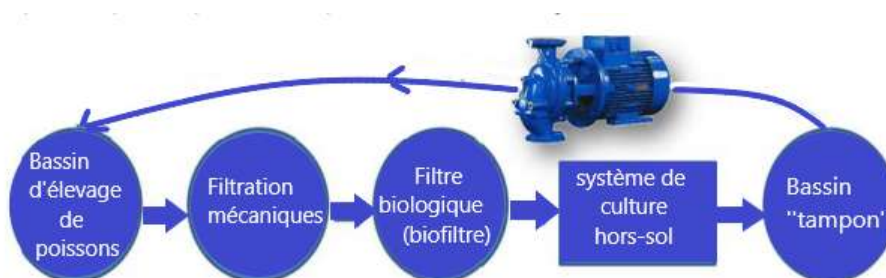


Figure II.1 Principe d'un système aquaponiques couplé [34].

II.2.2 Définition d'un système découplé

Dans un système découplé, les interactions entre les différentes entrées et sorties sont réduites ou éliminées à un niveau acceptable. Ainsi, chaque entrée ne provoque d'effet que sur sa propre sortie, sans impacter les autres sorties [35].

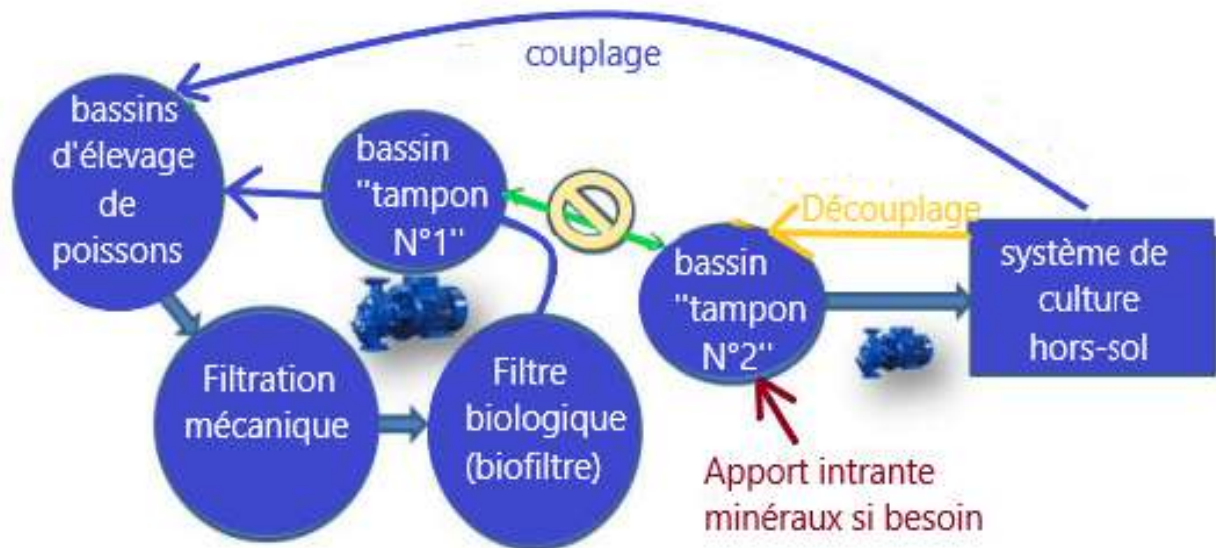


Figure II.2 Principe d'un système aquaponiques découplé [34].

II.2.3 Mesure du découplage d'un système multivariable

Le découplage d'un système multivariable évalue la capacité de ce dernier à isoler les interactions entre les différentes entrées et sorties. Les indicateurs utilisés pour évaluer le niveau de découplage comprennent notamment le gain de couplage, le temps de réponse de couplage, l'erreur de suivi de référence croisée et les indices de conditionnement. Ces mesures sont utiles pour déterminer si le niveau de découplage est suffisant pour répondre aux exigences particulières de l'application[23].

Ces mesures permettent de déterminer si le niveau de découplage est suffisant pour les besoins spécifiques de l'application. En outre, il existe des méthodes de conception pour optimiser le découplage d'un système multivariable, telles que la conception de commandes décentralisées ou la conception de matrices de transfert décomposables. Ces méthodes permettent de réduire les interactions entre les différentes entrées et sorties du système, ce qui améliore la stabilité et la performance globale [37].

II.3 Méthodes de découplage linéaire

Le découplage des systèmes multivariables fait référence au processus de conception d'un système de contrôle qui permet le contrôle indépendant de chaque variable, même lorsqu'elles sont couplées ensemble. Voici quelques méthodes de découplage des systèmes multivariables:

II.3.1 Découplage dynamique

Le découplage dynamique est utilisé lorsque les variables dans un système ont des dynamiques interdépendantes qui s'affectent mutuellement. Pour obtenir un désaccouplement dans cette situation, un système de contrôle est conçu qui tient compte de l'interdépendance entre les variables et applique un contrôle de rétroaction pour désaccoupler le système. Cette méthode est souvent utilisée dans les systèmes complexes qui sont en constante évolution.

Le découplage dynamique consiste à concevoir un contrôleur qui utilise les informations de la dynamique du système pour générer des entrées découplées [36].

Dans la figure ci-dessous, on représente en diagramme de blocs d'un processus de découplage dynamique pour un système multivariable:

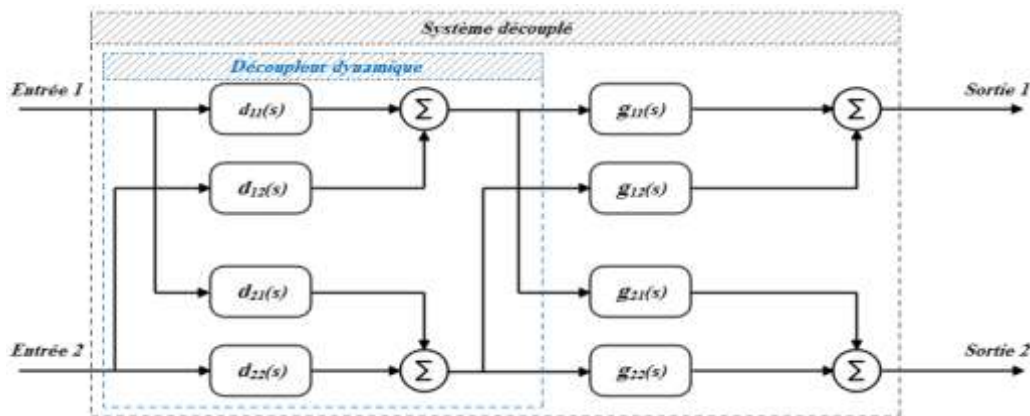


Figure II.3 Découplage dynamique d'un système multivariable [39]

Avec;

$$D(s) = \begin{bmatrix} d_{11}(s) & d_{12}(s) \\ d_{21}(s) & d_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (II.1)$$

et

$$d_{11} = 1, \quad d_{12} = -\frac{g_{12}}{g_{11}}, \quad d_{21} = -\frac{g_{21}}{g_{22}} \quad \text{et} \quad d_{22} = 1.$$

Après l'application de découplage dynamique, on peut tirer la matrice concernée à partir du schéma de la figure II.3 qui devient comme suite:

$$G = \begin{bmatrix} (g_{11} * d_{11} + g_{12} * d_{21}) & (g_{11} * d_{12} + g_{12} * d_{22}) \\ (g_{21} * d_{11} + g_{22} * d_{21}) & (g_{21} * d_{12} + g_{22} * d_{22}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

II.3.2 Découplage statique

Le découplage statique, en revanche, est utilisé pour éliminer le couplage à l'état stationnaire entre les variables dans un système. Cette méthode consiste à concevoir un système de contrôle qui annule les termes de couplage croisé dans la fonction de transfert du système, ce qui permet de désaccoupler le système à l'état stationnaire. Cette méthode est souvent utilisée lorsque le système est relativement statique et que les dynamiques ne sont pas significatives.

Le découplage statique consiste à calculer une matrice de gain statique qui transforme les sorties en des variables d'entrée qui ne sont pas affectées par les autres entrées [36].

Voici une représentation en diagramme de blocs d'un processus de découplage statique pour un système multivariable:

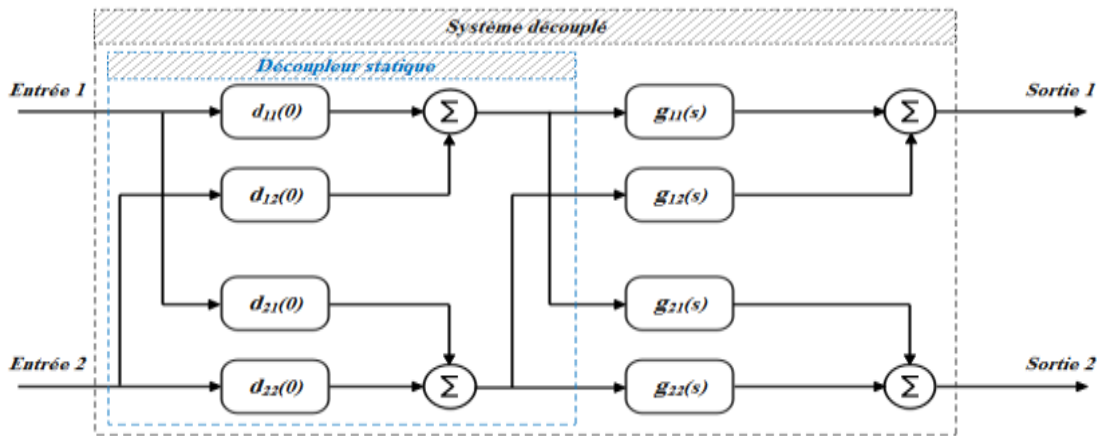


Figure II.4 Découplage statique d'un système multivariable [41]

Avec;

$$D(0) = \begin{bmatrix} d_{11}(0) & d_{12}(0) \\ d_{21}(0) & d_{22}(0) \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

et

$$d_{11}(0) = d_{11}(s) = 1, \quad d_{12}(0) = -\frac{g_{12}(0)}{g_{11}(0)}, \quad d_{21}(0) = -\frac{g_{21}(0)}{g_{11}(0)} \quad \text{et} \quad d_{22}(0) = d_{22}(s) = 1.$$

Après l'application de découplage statique, la matrice de transfert du système sera décrite comme suite:

$$G(s) = \begin{bmatrix} (g_{11} * d_{11} + g_{12} * d_{21}) & (g_{11} * d_{12} + g_{12} * d_{22}) \\ (g_{21} * d_{11} + g_{22} * d_{21}) & (g_{21} * d_{12} + g_{22} * d_{22}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

II.3.3 Découplage inverse

Le découplage inverse consiste à concevoir un contrôleur qui compense les dynamiques interdépendantes d'un système. Le contrôleur prend l'état actuel du système en entrée et produit un signal de contrôle qui annule les termes de couplage croisé dans le système. Cette méthode est généralement utilisée lorsque le système a des dynamiques hautement interdépendantes et qu'elle nécessite une stratégie de contrôle sophistiquée pour obtenir le désaccouplement. L'inverse dynamique consiste à calculer une matrice de gain inverse qui transforme les sorties en des variables d'entrée qui ne sont pas affectées par les autres entrées, et qui peut être utilisée pour concevoir un contrôleur [38].

Voici une représentation en diagramme de blocs d'un processus de découplage inverse pour un système multivariable:

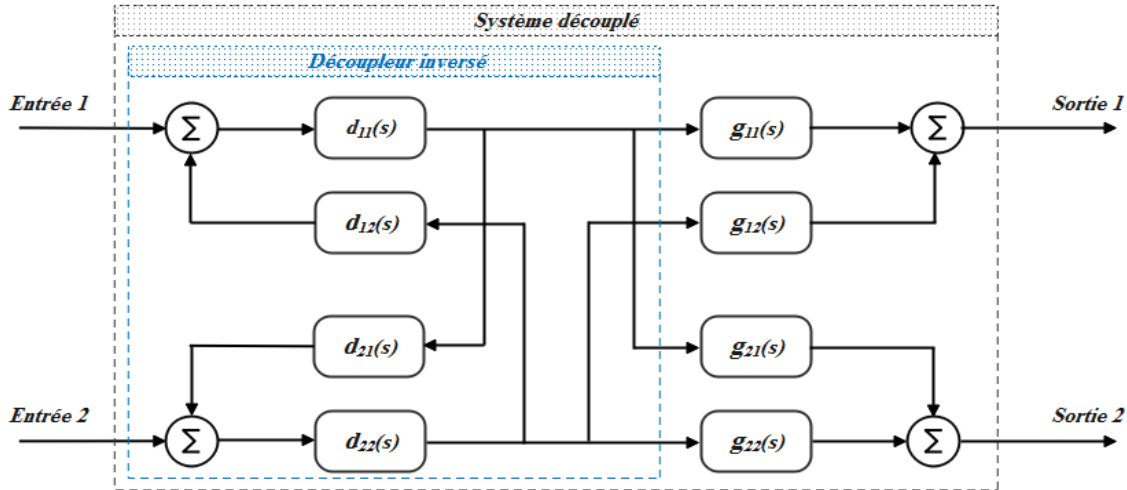


Figure II.5 Découplage inverse d'un système multivariable [40]

Avec;

$$D(s) = \begin{bmatrix} d_{11}(s) & d_{12}(s) \\ d_{21}(s) & d_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

et

$$d_{11} = 1, \quad d_{12} = -\frac{g_{12}}{g_{11}}, \quad d_{21} = -\frac{g_{21}}{g_{22}} \quad \text{et} \quad d_{22} = 1.$$

Après l'application de découplage dynamique la matrice concernée est comme suit:

$$G(S) = \begin{bmatrix} (g_{11} * d_{11} + g_{12} * d_{21}) & (g_{11} * d_{12} + g_{12} * d_{22}) \\ (g_{21} * d_{11} + g_{22} * d_{21}) & (g_{21} * d_{12} + g_{22} * d_{22}) \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

Où, le découpleur $D(s)$ va prendre la forme suivante:

$$D(s) = \begin{bmatrix} \frac{g_{11} * g_{22}}{g_{11} * g_{22} - g_{12} * g_{21}} & \frac{-g_{12} * g_{22}}{g_{11} * g_{22} - g_{12} * g_{21}} \\ \frac{-g_{21} * g_{11}}{g_{11} * g_{22} - g_{12} * g_{21}} & \frac{g_{11} * g_{22}}{g_{11} * g_{22} - g_{12} * g_{21}} \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

II.4 Nombre de conditionnement

La notion de nombre de conditionnement est importante dans l'étude des systèmes multivariables. Cela permet de quantifier la sensibilité du système à des perturbations ou à des erreurs numériques. En d'autres termes, cela nous donne une idée de la stabilité numérique du système.

Le nombre de conditionnement est généralement défini comme le rapport entre la plus grande et la plus petite valeur singulière de la matrice de transfert du système. Plus le nombre de conditionnement est élevé, plus le système est sensible aux perturbations et plus sa stabilité numérique est faible. En revanche, un nombre de conditionnement faible et proche de 1 indique que le système est plus robuste aux perturbations et plus stable numériquement. Il est donc important de calculer le nombre de conditionnement d'un système pour évaluer sa fiabilité et sa stabilité numérique, en particulier dans les applications où des erreurs de calcul peuvent avoir des conséquences graves, telles que la conception de contrôleurs pour les systèmes physiques [42].

II.5 Application du découplage sur des systèmes présentant un couplage

II.5.1 Application sur un système de séchage des céréales

II.5.1.1 Présentation du système

Le processus de séchage des céréales ou des grains est un système complexe et instable avec des caractéristiques multivariées, non linéaires et variables dans le temps. Les méthodes de contrôle traditionnelles sont peu pratiques pour atteindre un contrôle idéal en raison de la relation complexe entre la température et l'humidité, ce qui rend difficile la construction de modèles mathématiques précis. En conséquence, ce mémoire présente des concepts de découplage et une méthode de contrôle pour réaliser une régulation indépendante de la

température et de l'humidité du système. L'analyse de simulation correspondante est effectuée à l'aide du logiciel MatLab/Simulink. En outre, la matrice de transfert pour les variables de température et d'humidité pendant le processus de séchage des grains représenté par la figure ci-dessous peut être obtenu à l'aide de la formule (II.8) [43] :



Figure II.6 Système de séchage des céréales

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{20e^{-0.02s}}{(0.5s+1)(s+1)} & \frac{-20e^{-0.02s}}{(3s+1)(2s+1)} \\ \frac{10e^{-0.02s}}{(s+1)(5s+1)} & \frac{-20e^{-0.02s}}{(1.5s+1)(s+1)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

II.5.1.2 Analyse sans découplage du système

Dans la conception suivante, nous avons essayé de structurer le système dont nous avons parlé précédemment en utilisant le logiciel MatLab/Simulink, et nous essaierons de voir les effets de chaque entrée sur la sortie opposée.

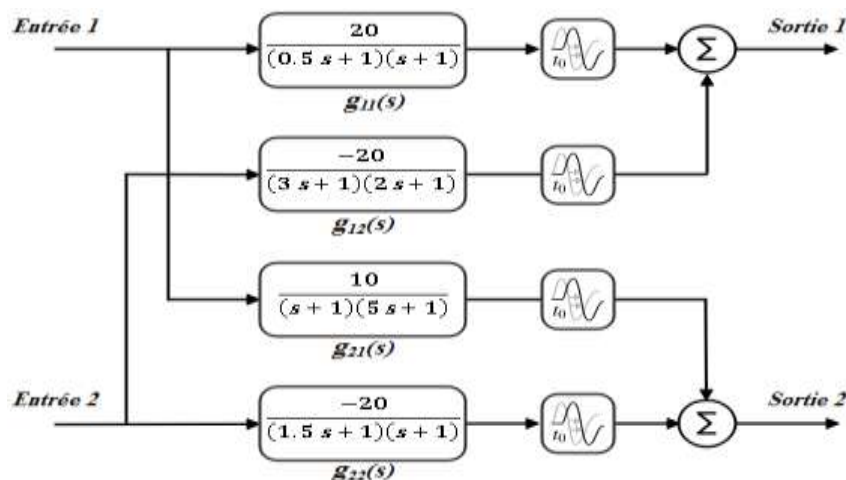


Figure II.7 Structure d'un système du séchage des céréales couplé

Après la réalisation du système en mode couplée, on a sorti avec ces deux graphes en dessous, noter que dans le premier cas on a donné une valeur à la première entrée (1) et on a pris la deuxième entrée comme nulle (0) et nous avons fait l'inverse dans le second cas.

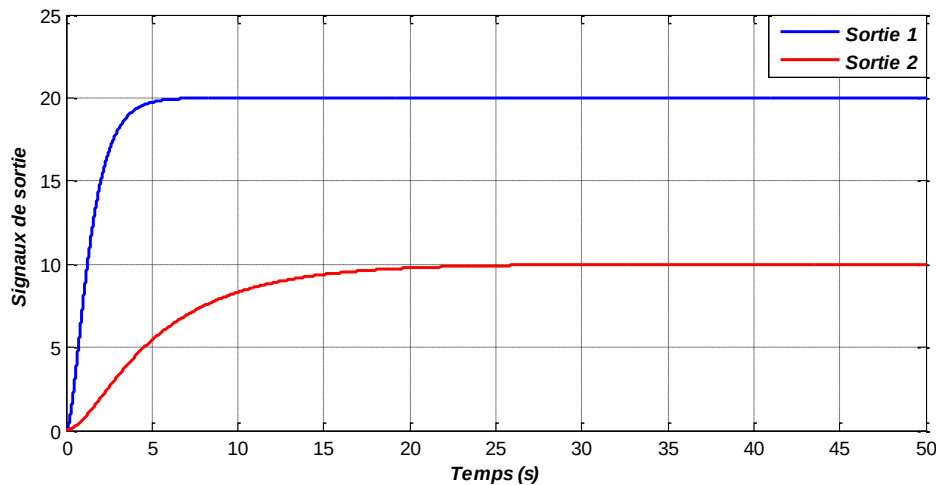


Figure II.8 Représentation du couplage pour **Entrée 1 = 1** et **Entrée 2 = 0**

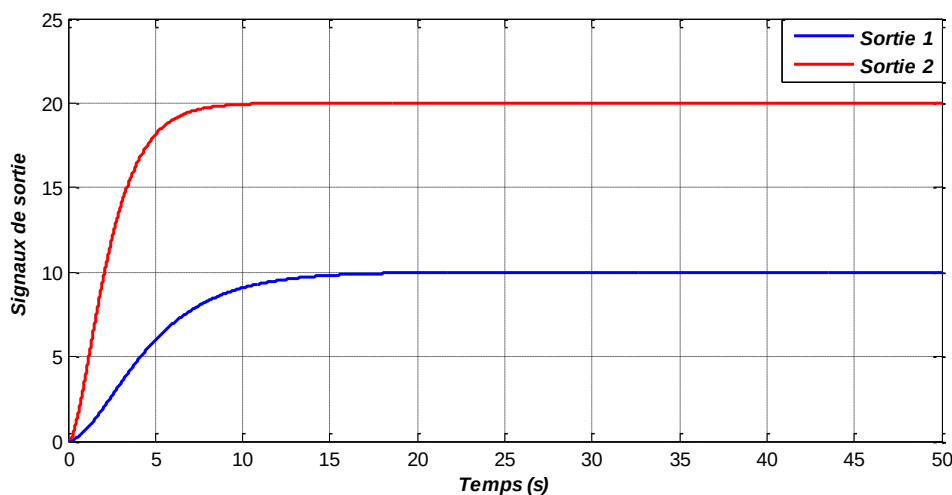


Figure II.9 Représentation du couplage pour **Entrée 1 = 0** et **Entrée 2 = 1**

Selon les résultats obtenus, d'après les graphes de la figure II.8, on constate que, malgré que nous n'avons donné aucune valeur à la deuxième entrée (Entrée 2=0), la sortie 2 est infectée par l'entrée 1. Et la même chose s'est produite lors de la deuxième essai, lorsque nous avons donné à la première entrée la valeur 0, on remarque une influence considérable dans la première sortie et cela indique que les entrées n'affectent pas seulement leurs propres sorties, mais qu'elles affectent également les sorties opposées et cela signifie que le système est couplé.

Dans les prochains titres, nous allons voir quelques méthodes qui traitent ce problème et font en sorte que chaque entrée n'affecte que sa propre sortie.

II.5.1.3 Application des techniques de découplage sur le système

A. Application du découplage dynamique

Cette conception montre la première méthode de découplage dans laquelle on utilise un découpleur $D(s)$ dans lequel ses organes sont calculés à l'aide de ces équations suivantes [34]:

$$D(s) = \begin{bmatrix} d_{11}(s) & d_{12}(s) \\ d_{21}(s) & d_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Où;

$$d_{11}(s) = 1 ;$$

$$d_{12}(s) = -\frac{g_{12}(s)}{g_{11}(s)} = -\left(\frac{10e^{-0.02s}}{6s^2+5s+1} * \frac{0.5s^2+1.5s+1}{20e^{-0.02s}}\right) = \frac{10s^2+30s+20}{120s^2+100s+20} ;$$

$$d_{21}(s) = -\frac{g_{21}(s)}{g_{22}(s)} = -\left(\frac{10e^{-0.02s}}{5s^2+6s+1} * \frac{1.5s^2+2.5s+1}{20e^{-0.02s}}\right) = \frac{-15s^2-25s-10}{-100s^2-120s-20} ;$$

$$d_{22}(s) = 1.$$

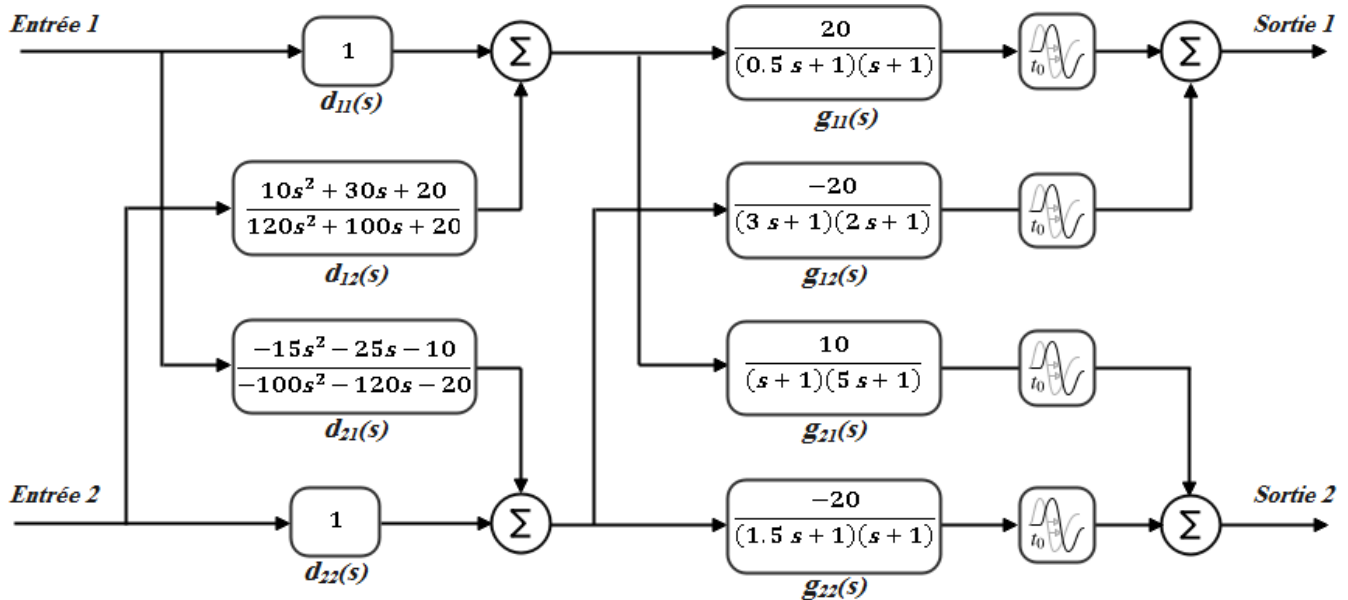
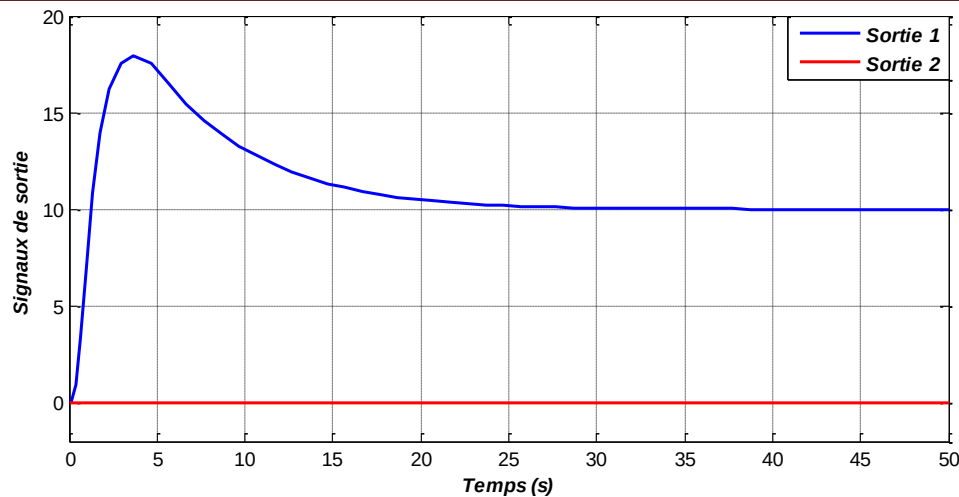
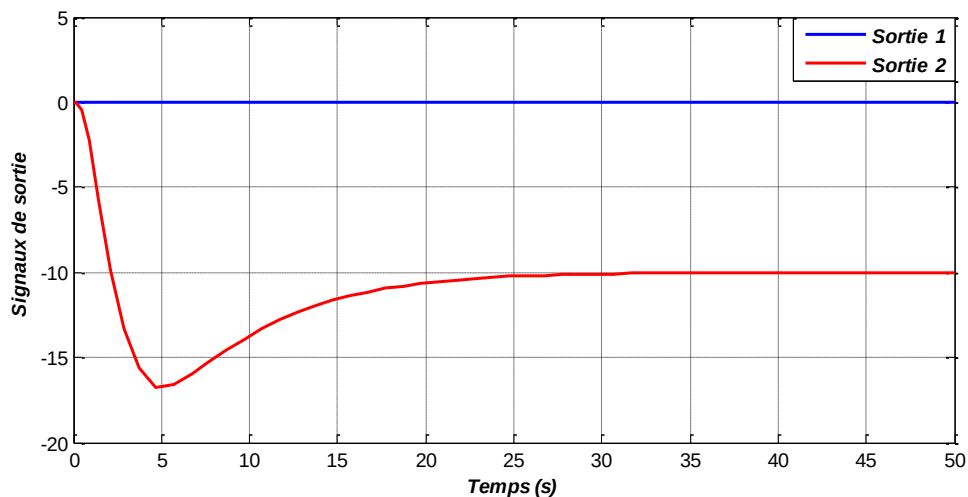


Figure II.10 Structure d'un système de séchage des céréales avec découplage dynamique

Figure II.11 Représentation du découplage dynamique pour **Entrée 1 = 1** et **Entrée 2 = 0**Figure II.12 Représentation du découplage dynamique pour **Entrée 1 = 0** et **Entrée 2 = 1**

Contrairement à la première essai (système était couplé), nous avons remarqué sur la figure II.11, que même si nous donnons une valeur à la première entrée, elle ne s'affiche que sur sa propre sortie (sortie 1) et n'affecte pas l'autre sortie (sortie 2), et cela signifie que l'entrée à laquelle nous avons donné une valeur a développé une amplitude relative à cette valeur, tandis que la deuxième sortie n'a été pas affectée par l'excitation de la première entrée. Et sur la figure II.12, on remarque que l'excitation appliquée sur la deuxième entrée (entrée 2) n'affecte que la deuxième sortie (sortie 2), alors que la première sortie est nulle suivant sa excitation.

B. Application du découplage inversé

Cette conception montre la deuxième méthode de découplage, il s'agit d'un découpleur constitué par les mêmes éléments du découpleur dynamique (d_{11} , d_{12} , d_{21} et d_{22}), la seule différence est la direction de circulation des données où on remarque sur la figure II.13 qu'elle est inversée par rapport au sens des données du découpleur dynamique.

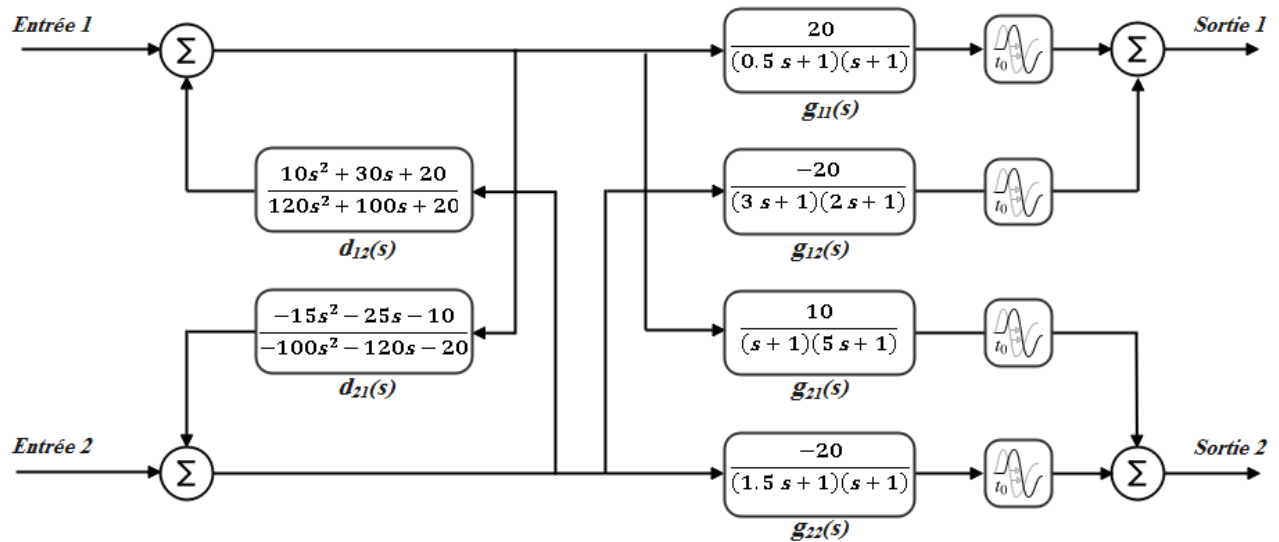
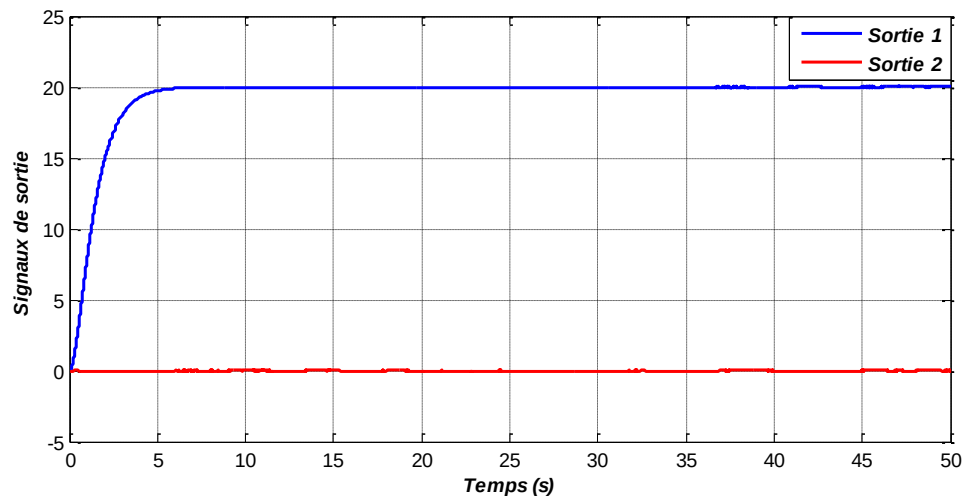
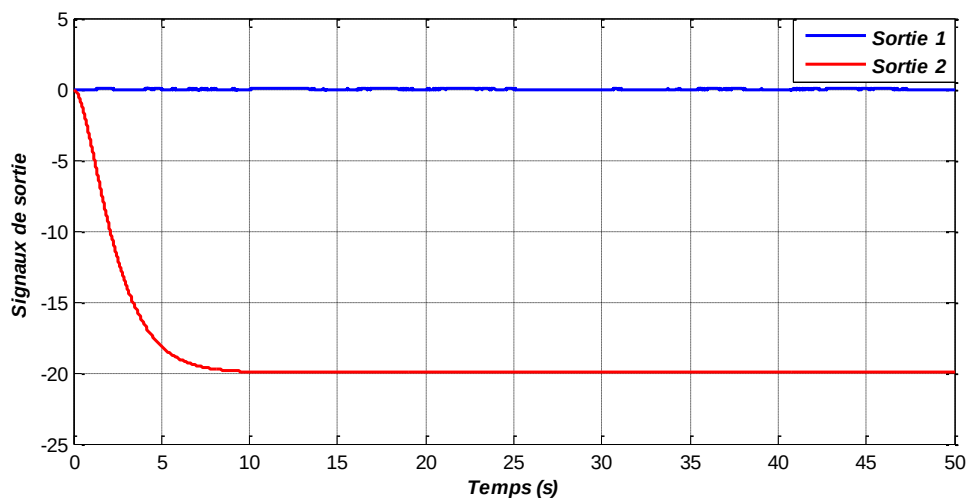


Figure II.13 Structure d'un système du séchage des céréales avec découplage inverse

Figure II.14 Représentation du découplage inverse pour $Entrée\ 1 = 1$ et $Entrée\ 2 = 0$ Figure II.15 Représentation du découplage inverse pour $Entrée\ 1 = 0$ et $Entrée\ 2 = 1$

Après la réalisation du découplage inversé sur la modèle de séchage des grains présenté sur la figure II.13, on a remarqué que le découpleur séparait les effets des entrées sur les sorties opposées (figure II.14 et figure II.15). Mais nous avons constaté que ce type de découpleur donne de meilleurs résultats et performances sur le système de séchage, que les autres types et cela se traduit par l'absence de dépassement et temps de réponse réduit.

C. Application de découplage statique

Le découpleur statique est constitué des mêmes composantes que les découpleurs mentionnés précédemment (dynamique et statique), mais sa structure est identique à celle de découpleur dynamique, la seule différence réside dans les fonctions d_{12} et d_{21} où l'on considère à l'état stationnaire, c'est-à-dire on considère $s = 0$.

Donc:

$$D(0) = \begin{bmatrix} d_{11}(0) & d_{12}(0) \\ d_{21}(0) & d_{22}(0) \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

d'où;

$$d_{11}(0) = 1, d_{12}(0) = -\frac{g_{12}(0)}{g_{11}(0)} = 1, d_{21}(0) = -\frac{g_{21}(0)}{g_{22}(0)} = \frac{1}{2} \text{ et } d_{22}(0) = 1.$$

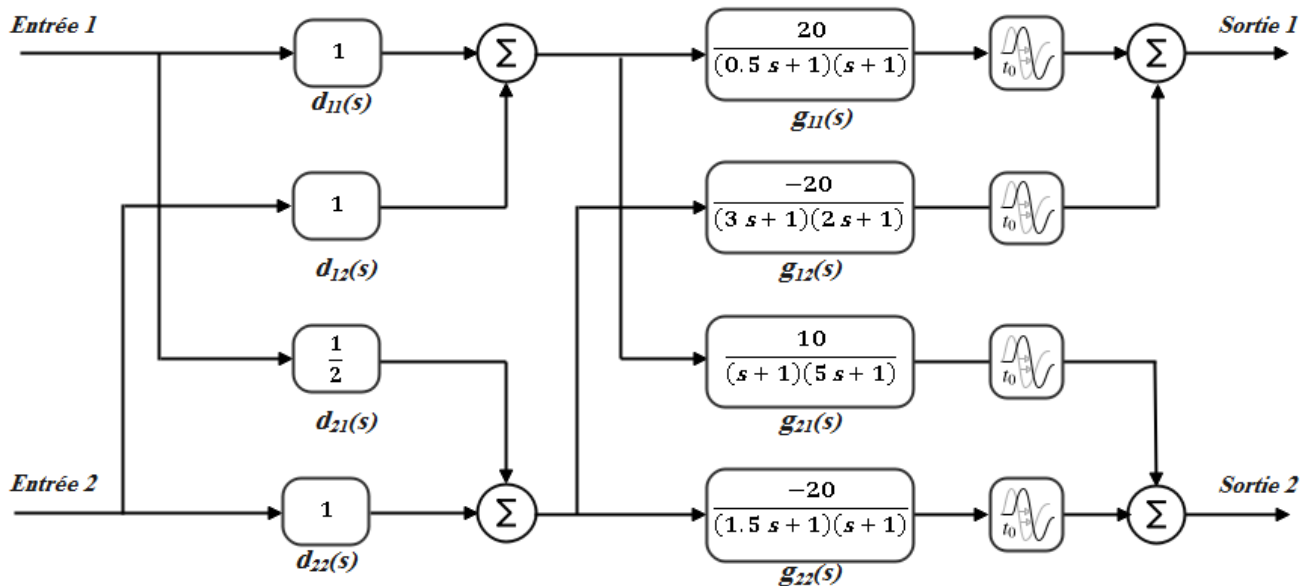
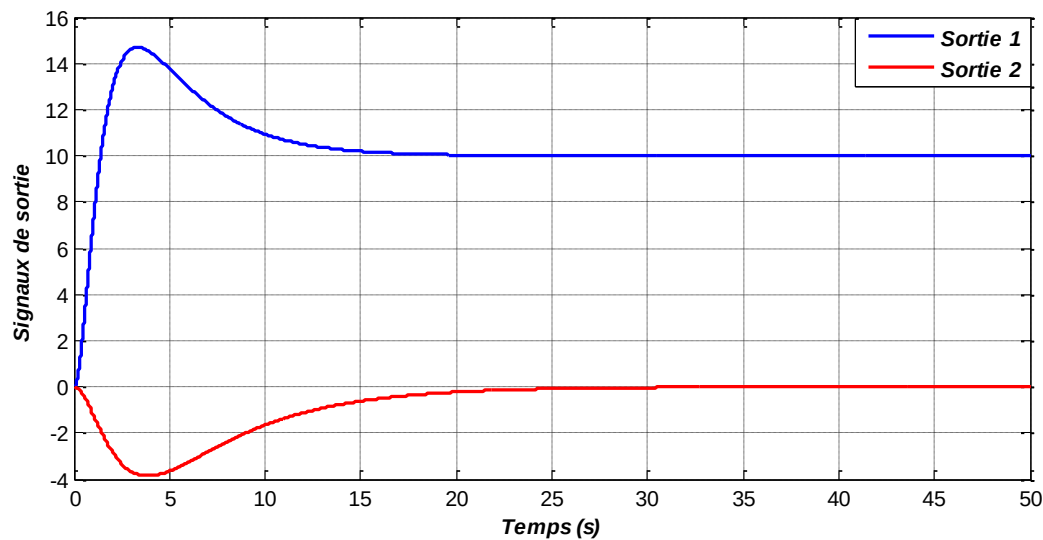
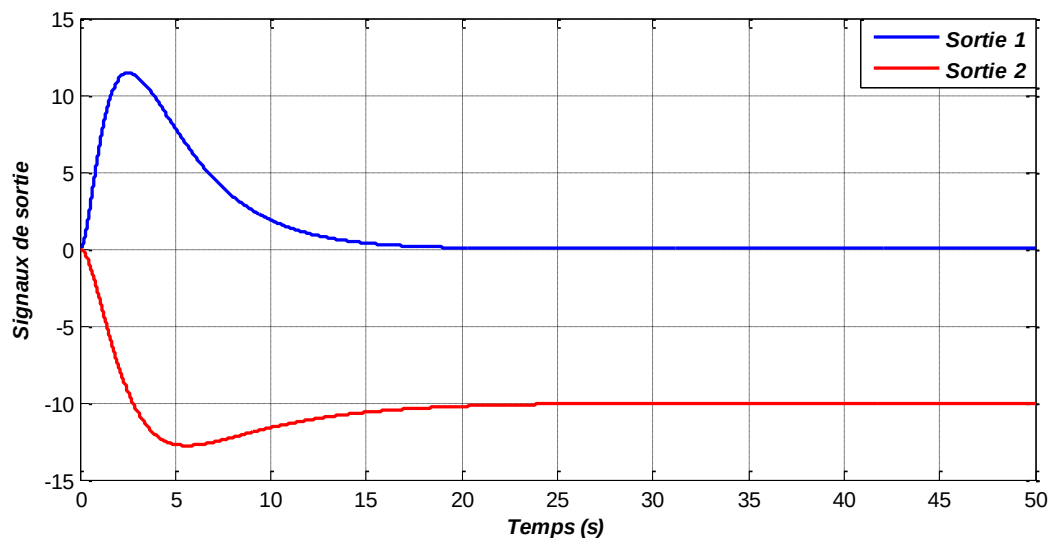


Figure II.16 Structure d'un système du séchage des céréales avec découplage statique

Figure II.17 Représentation du découplage statique pour **Entrée 1 = 1** et **Entrée 2 = 0**Figure II.18 Représentation du découplage statique pour **Entrée 1 = 0** et **Entrée 2 = 1**

Après la simulation du découplage statique, nous avons constaté que ce mode de découplage a assuré la séparation des effets des entrées de systèmes de séchage des céréales sur les sorties opposées. De plus, nous avons constaté que ce type de découpleur fournit des résultats presque similaires à ceux du découpleur dynamique. Par exemple, dans la figure II.7, on remarque qu'après l'excitation de l'entrée 1 du système par une valeur égale à 1, on observe que la sortie correspondante (sortie 1) réagit à cet effet. Par contre, la deuxième sortie n'a aucune réaction avec cette excitation sauf qu'une oscillation instantanée au début et après elle se stabilise à la valeur zéro et ce que le système est découplé.

II.5.2 Application sur un système de distillation

II.5.2.1 Présentation du système

La distillation est un procédé de séparation basé sur phénomènes physiques et chimiques permettant la transformation d'un mélange de substances en deux ou plusieurs composants distincts dont l'objectif peuvent être; la purification où des impuretés doivent être extraites du composé d'intérêt, soit la concentration pour l'élimination d'une partie du solvant et fractionnement et la séparation d'un mélange complexe en plusieurs mélanges différents. Dans la distillation, la séparation des constituants d'un mélange homogène se réalise sous l'effet de la chaleur ou d'une faible pression où les substances se vaporisent successivement, et la vapeur obtenue est liquéfiée pour donner le distillat [44]

Pour découpler les variables de sortie d'une colonne de distillation en utilisant les méthodes de découplage cités précédemment, la première étape consiste à obtenir un modèle mathématique du système présenté par sa matrice de transfert qui doit inclure toutes les entrées et sorties pertinentes, ainsi que tout effet de couplage entre elles [45]. Une fois que le modèle a été obtenu, l'inverse de la matrice de transfert du système peut être calculé, ce qui donne la matrice de découplage $D(s)$.



Figure II.19 Colonne de distillation d'eau

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s+1} & \frac{-18.9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s+1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s+1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

II.5.2.2 Analyse sans découplage du système

Dans cette partie, nous avons tenté de valider le modèle du système de distillation en utilisant le Matlab/Simulink en vue de vérifier l'impact de chaque entrée sur les sorties du système, la structure de simulation est illustrée par la figure II.20 ci-dessous.

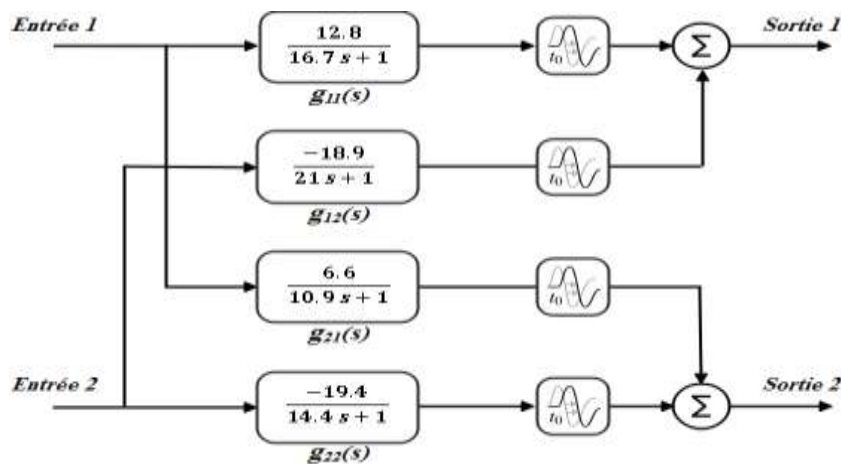


Figure II.20 Structure d'un système de distillation d'eau sans découplage

Une fois le système couplé réalisé, nous avons obtenu les graphes des figure II.21 et II.22 représentant les deux essais en mode couplé. Dans le premier cas, nous avons attribué une valeur à la première entrée et pris la deuxième entrée comme étant nulle, tandis que nous avons fait l'inverse dans le second cas.

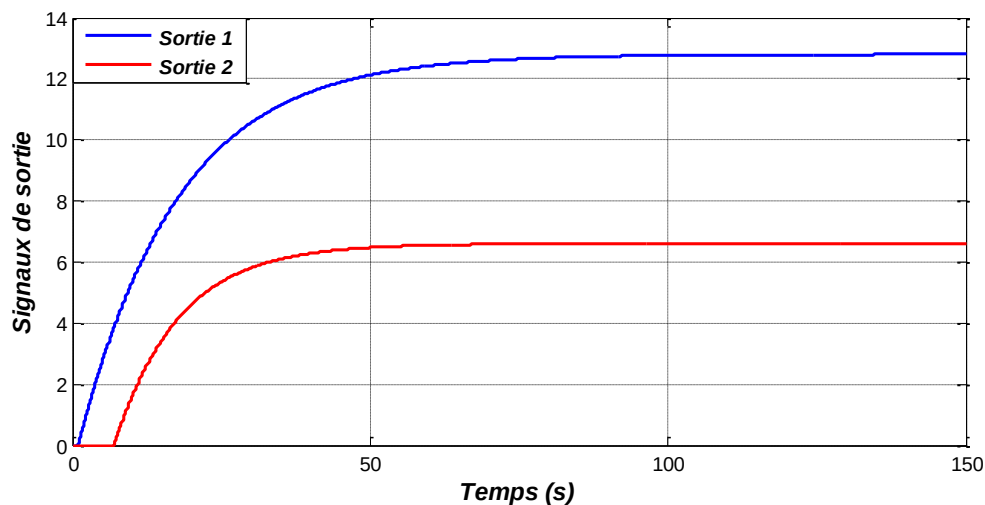
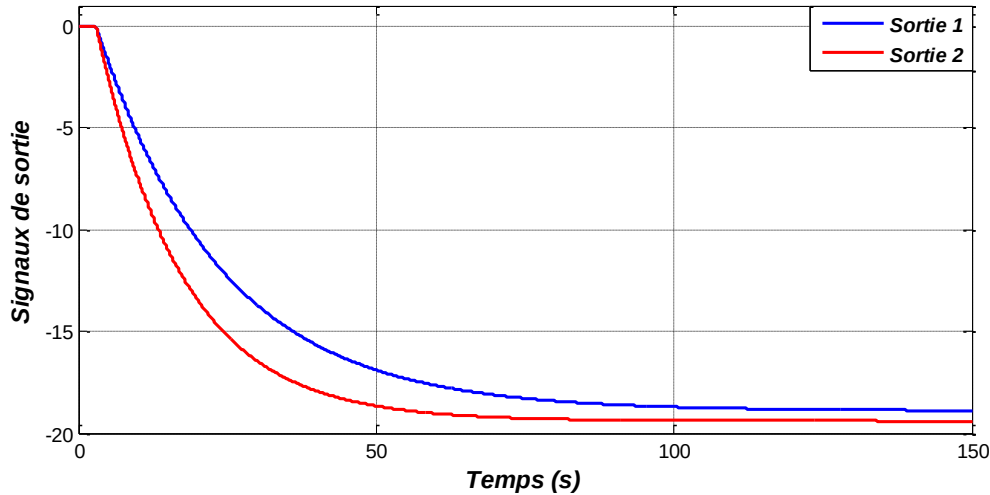


Figure II.21 Représentation du couplage pour **Entrée 1 = 1** et **Entrée 2 = 0**

Figure II.22 Représentation du couplage pour *Entrée 1 = 0* et *Entrée 2 = 1*

En analysant les graphes obtenus, nous avons observé que même si en ne donnant aucune valeur à la deuxième entrée du système, la deuxième sortie a légèrement évolué selon la figure II.21. De même, lors de la deuxième essai où nous avons donné une valeur de 0 à la première entrée, on remarque une évolution significative de la première sortie. Ceci suggère que les entrées n'affectent pas seulement leur propres sorties, mais également la sortie opposée et cela implique que le système est couplé. Pour cela nous allons appliquer des méthodes de découplage garantissant que chaque entrée n'affecte que sa propre sortie.

II.5.2.3 Application des techniques de découplage sur le système

A. Application du découplage dynamique

Cette conception montre la première méthode de découplage dans laquelle on utilise un découpleur dont lequel ses organes sont calculés à l'aide des équations suivantes [39]:

$$D(s) = \begin{bmatrix} d_{11}(s) & d_{12}(s) \\ d_{21}(s) & d_{22}(s) \end{bmatrix}$$

Avec :

$$d_{11}(s) = 1 ;$$

$$d_{12}(s) = -\frac{g_{12}(s)}{g_{11}(s)} = -\left(\frac{-18.9e^{-3s}}{21s+1} * \frac{16.7s+1}{12.8e^{-s}}\right) = \frac{315.63s+18.9}{268.8s+12.8} ;$$

$$d_{21}(s) = -\frac{g_{21}(s)}{g_{22}(s)} = -\left(\frac{6.6}{10.9s+1} * \frac{14.4s+1}{-19.4}\right) = \frac{-95.04s-6.6}{-211.46s-19.4} ;$$

$$d_{22}(s) = 1.$$

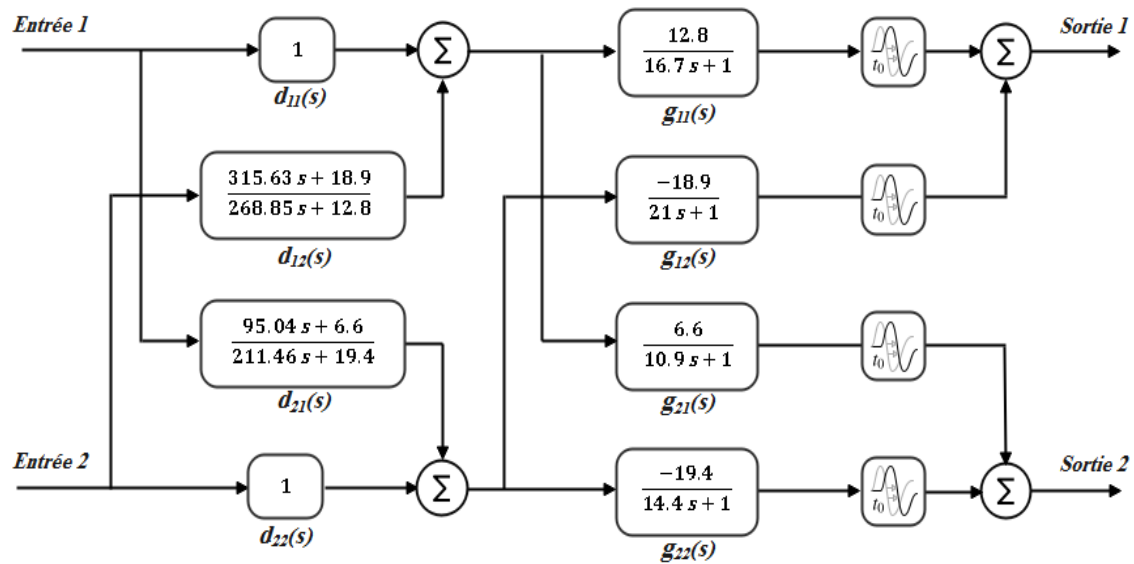
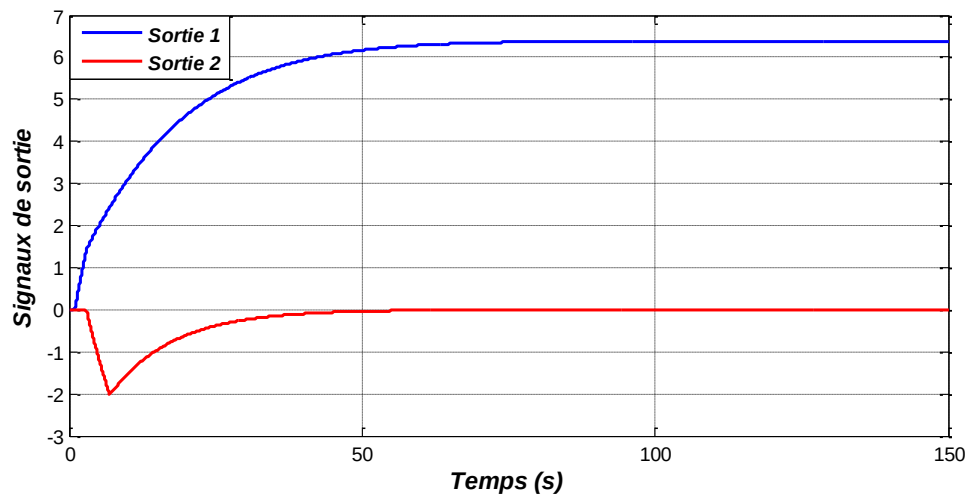
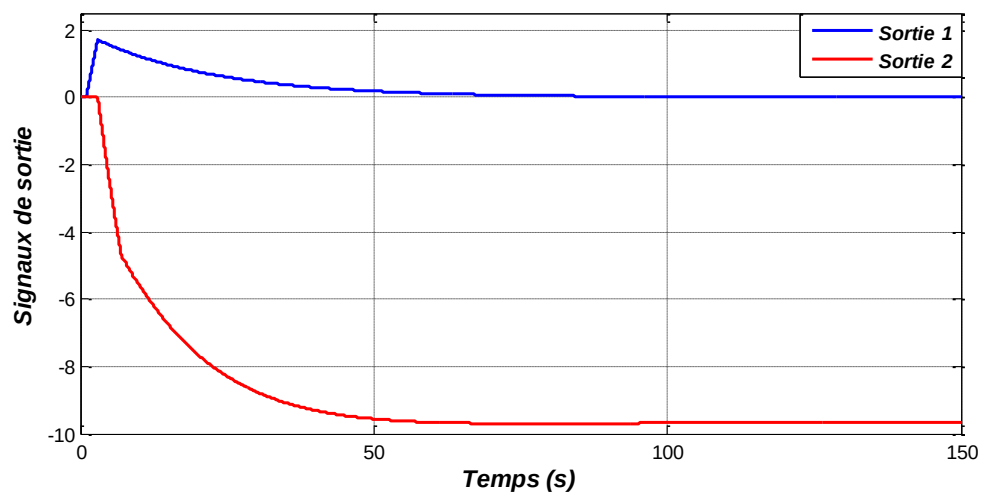


Figure II.23 Structure d'un système de distillation avec découplage dynamique

Figure II.24 Représentation de découplage dynamique pour **Entrée 1 = 1** et **Entrée 2 = 0**Figure II.25 Représentation de découplage dynamique pour **Entrée 1 = 0** et **Entrée 2 = 1**

Dans cette essai, nous avons constaté qu'en donnant une valeur à la première entrée et en laissant la deuxième entrée sans valeur (0), la première entrée affecte uniquement sa propre sortie et nous avons également remarqué que la deuxième sortie est affectée pendant un certain temps avant de se stabiliser à zéro qu'est la valeur de son entrée.

B. Application du découplage inverse

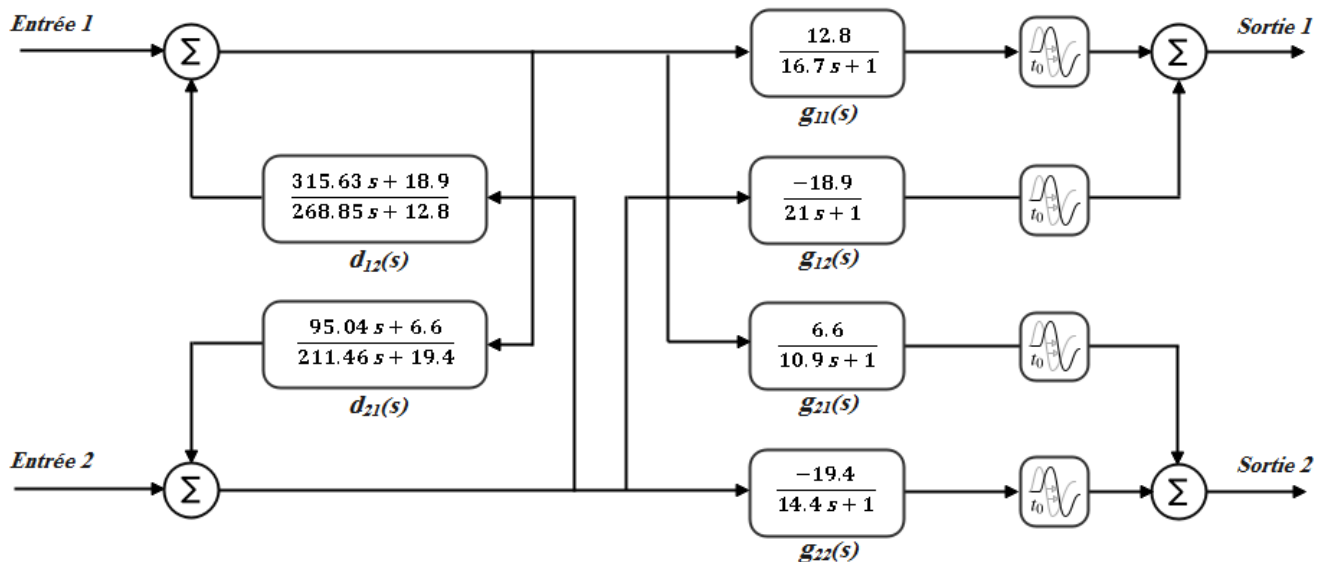


Figure II.26 Structure d'un système du distillation avec découplage inversé

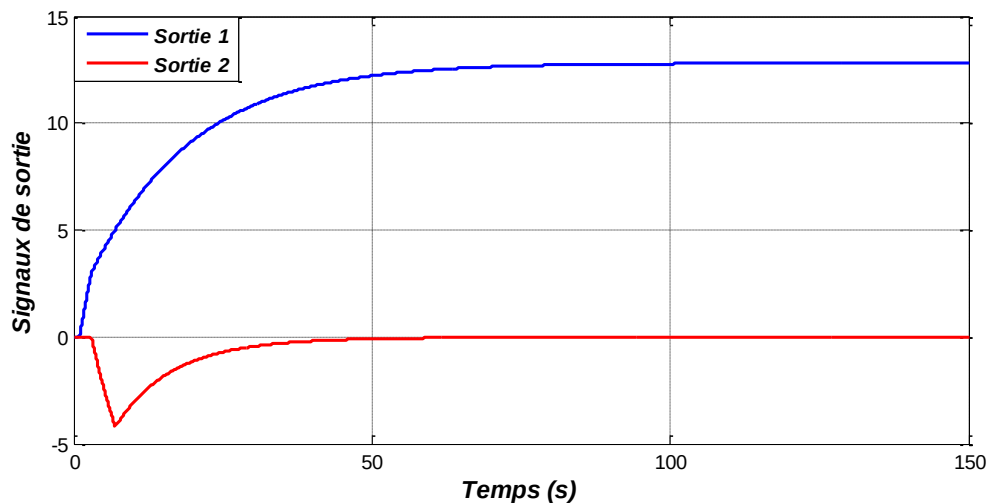


Figure II.27 Représentation de découplage inversé pour $Entrée\ 1 = 1$ et $Entrée\ 2 = 0$

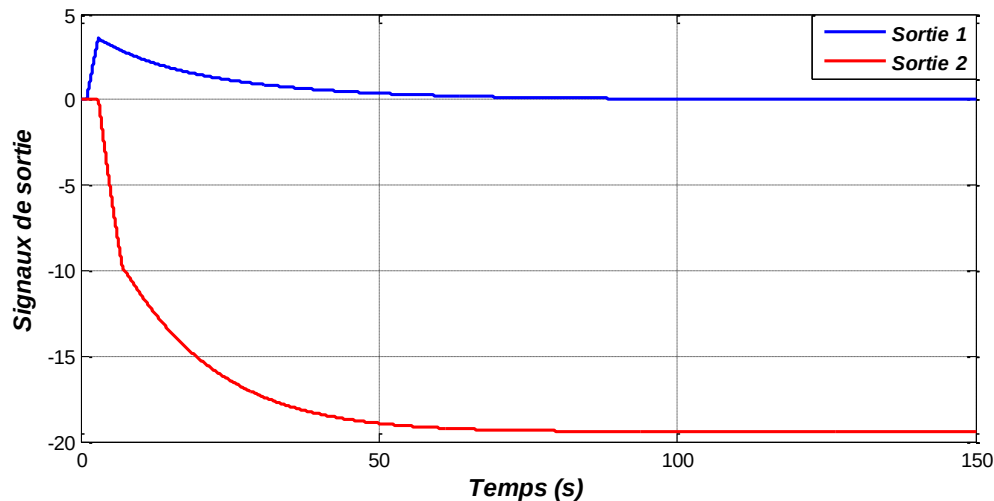


Figure II.28 Représentation de découplage inversé pour *Entrée 1 = 0* et *Entrée 2 = 1*

En comparaisant les résultats obtenus dans les deux techniques de découplage appliquées (dynamique et inversé), on constate que les temps de réponse diffèrent dans les deux méthodes, avec une réponse légèrement plus rapide pour le cas de découplage dynamique. Toutefois, les deux méthodes donnent des résultats similaires en termes d'amplitude. Dans la première méthode, l'amplitude est inférieure à celle du système à son état normal (avant découplage), tandis que dans le découplage inversé, l'amplitude des sorties restent les mêmes de celles en mode normal (couplé).

C. Application du découplage statique

Cette conception de découplage comporte les mêmes composants que le découpleur dynamique. La seule différence réside dans les fonctions $d_{21}(s)$ et $d_{12}(s)$, où les on considère l'état stationnaire, c'est-à-dire qu'on fixe s à 0.

Donc;

$$D(0) = \begin{bmatrix} d_{11}(0) & d_{12}(0) \\ d_{21}(0) & d_{22}(0) \end{bmatrix}$$

Avec;

$$d_{11}(0) = 1;$$

$$d_{12}(0) = -\frac{g_{12}(0)}{g_{11}(0)} = \frac{18.9}{12.8} = 1.47;$$

$$d_{21}(0) = -\frac{g_{21}(0)}{d_{22}(0)} = \frac{6.6}{19.4} = 0.34 ;$$

$$d_{22}(0) = 1.$$

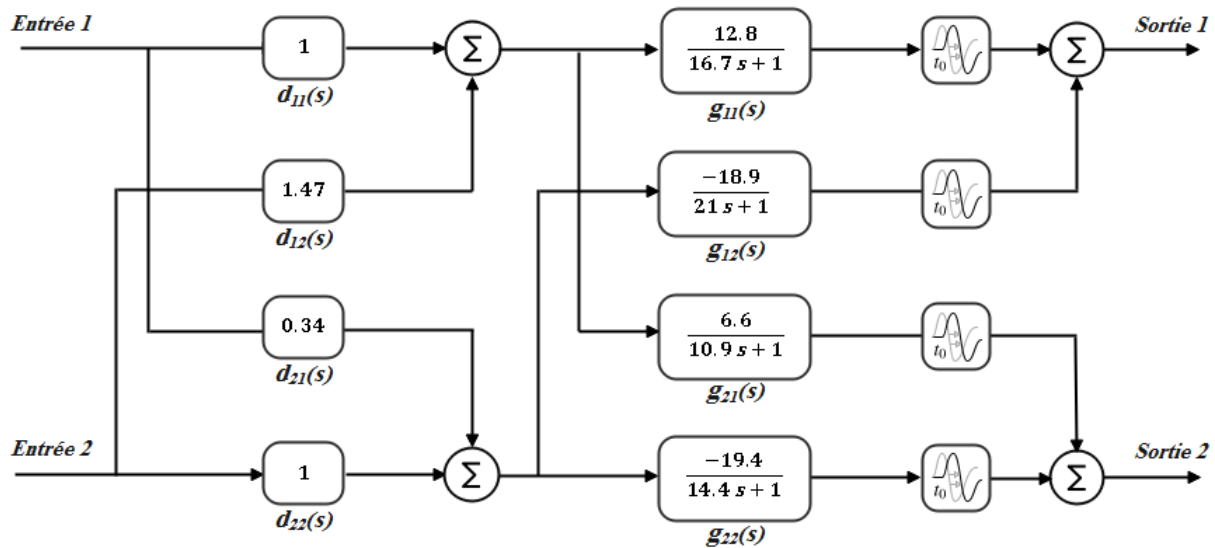
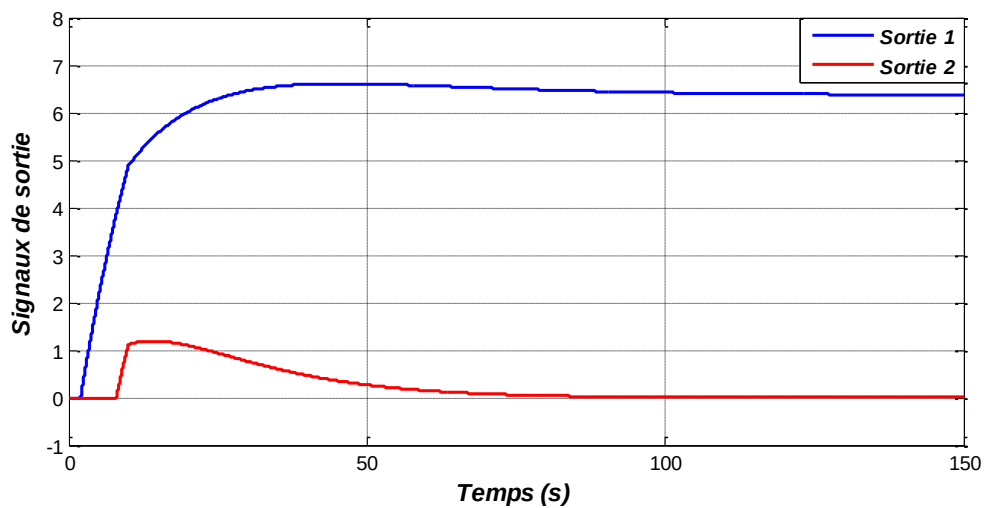
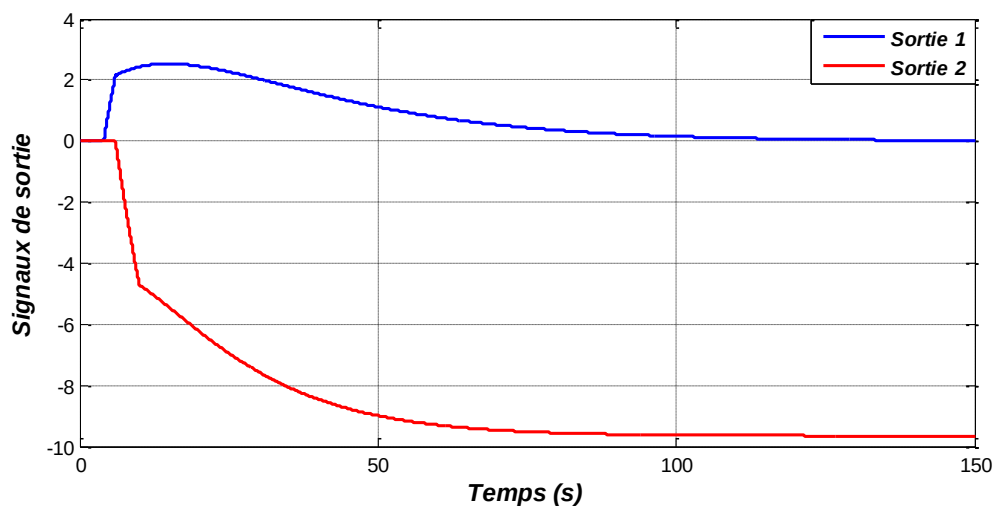


Figure II.29 Structure d'un système du distillation avec découplage statique

Figure II.30 Représentation de découplage statique pour *Entrée 1 = 1* et *Entrée 2 = 0*Figure II.31 Représentation de découplage statique pour *Entrée 1 = 0* et *Entrée 2 = 1*

Après la validation du système découplé, il a été constaté que le découpleur a déterminé son rôle par la séparation des effets de l'entrée sur la sortie opposée dans chaque cas. De plus, nous avons constaté que le type de découpleur statique donne des résultats presque similaires à ceux du découpleur dynamique.

II.6 Test de stabilité par le nombre de conditionnement

Pour bien déterminer le type de découpleur approprié pour chaque système (séchage des céréales et distillation d'eau), il est absolument nécessaire de calculer le nombre de conditionnement pour chaque mode de découplage appliqué dans les études précédentes.

À l'aide du programmation en script du MatLab/Simulink, nous avons obtenu les résultats présentés dans le tableau ci-dessous. Il est important de noter que le codage de ce programme repose sur quatre étapes:

1. La déclaration de votre matrice de transfert.
2. La conversion de la matrice en mode d'espace d'état.
3. L'application de la décomposition en valeurs singulières sur la matrice.
4. Enfin, extraire la diagonale de la matrice contenant les valeurs singulières, afin d'extraire le nombre de conditionnement.

Système	Séchage des céréales	Distillation d'eau
Nombre de conditionnement en mode couplée	6.3423	7.4806
Nombre de conditionnement Découplage dynamique	1.0001	1.5156
Nombre de conditionnement Découplage inversé	1	1.5298
Nombre de conditionnement Découplage statique	1.0003	1.5166

Après avoir obtenu le nombre de conditionnement, nous avons constaté des réactions différentes de chaque système à chaque méthode de découplage. Par exemple, le système de distillation d'eau a montré de bons résultats avec le découplage dynamique par rapport aux découpleurs inversé et statique. D'autre part, nous avons déduit aussi que le système de séchage des céréales donne de meilleurs résultats avec le découpleur inversé par rapport aux autres méthodes de découplage (plus le nombre de conditionnement est proche de 1 plus le système est mieux découplé).

Donc, Chaque système réagit différemment à certaines méthodes de découplage, comme le démontre les résultats illustrées dans le tableau des nombres de conditionnement.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné deux systèmes qui présentent une structure fortement couplée, le séchage des céréales et la distillation d'eau. Nous avons introduit une technique de découplage afin de séparer les différentes entrées et sorties de ces systèmes. Après avoir appliqué les trois méthodes de découplage, à savoir le découplage dynamique, inversé et statique, nous avons remarqué que chaque système répond de manière satisfaisante avec un certain mode de découplage. Ainsi, il n'est pas possible de déterminer quelle méthode est meilleure que l'autre qu'après la détermination du nombre de conditionnement de chaque système pour chaque mode de découplage, ce nombre représente le facteur de découplage ou l'indice de découplage.

Pour notre prochaine étude, nous chercherons à améliorer les performances de ces systèmes en utilisant des régulateurs de type "Proportionnelle - Intégrale - Dérivé" (*PID*).

CHAPITRE III

CONTROLE DES SYSTEMES MULTIVARIABLES DECOUPLES PAR LE REGULATEUR PID

CHAPITRE III

Contrôle des Systèmes Multivariables Découplés par le régulateur PID

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous explorerons le monde des régulateurs *PID*, un algorithme de contrôle largement utilisé dans les systèmes d'ingénierie et d'automatisation. Le terme *PID* fait référence à "*Proportionnel - Intégral - Dérivé*". Il s'agit d'un mécanisme de contrôle en boucle fermée qui permet de maintenir une valeur ciblée ou une consigne souhaitée dans un système. Comprendre les principes et les caractéristiques du contrôle *PID* est essentiel pour les chercheurs impliqués dans la conception et la mise en œuvre des systèmes de contrôle.

III.2 Structuration du système de commande

III.2.1 Système de commande en boucle ouverte

Cette structure de commande est à la fois simple et peu coûteuse. Cependant, dans certaines applications où la précision est d'une grande importance ou lorsque les paramètres du système à contrôler varient, cette structure n'est pas utilisée en raison de son manque de précision. La commande en boucle ouverte peut être définie comme un système où le signal de commande (entrée) est indépendant du signal régulé (sortie) [45].

III.2.2 Système de commande en boucle fermée

La structure de commande en boucle fermée, présentée dans la figure III.1, est définie comme un système dans lequel le signal de commande (entrée) dépend d'une manière ou d'une autre du signal de sortie. Ces systèmes en boucle fermée sont communément appelés des systèmes asservis. La structure de commande en boucle fermée, également connue sous le nom de contre-réaction, est capable de:

- Stabiliser un système instable en boucle ouverte.
- Compenser les perturbations externes.
- Compenser les incertitudes internes propres au processus lui-même.

En résumé, la structure de commande en boucle fermée permet de maintenir un système stable, de minimiser l'impact des perturbations externes et de gérer les incertitudes internes du processus [45].

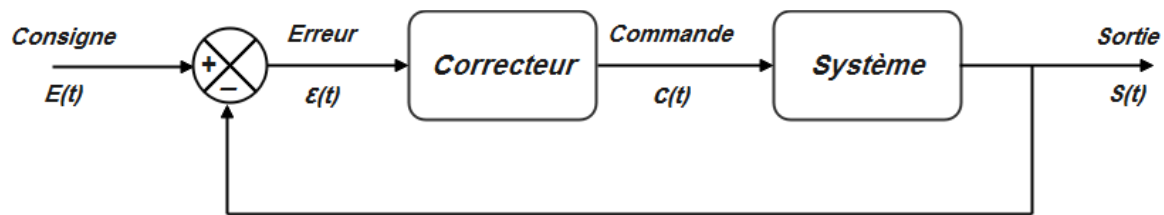


Figure III.1 Structure de commande en boucle fermée

Le rôle du correcteur consiste à éliminer l'écart, indépendamment des perturbations, et à amener le système à réagir le plus rapidement possible, quelle que soit la variation de l'entrée de référence ou des perturbations. Il existe plusieurs types de correcteurs basés sur les actions proportionnelle, intégrale et différentielle.

III.3 Le régulateur PID

III.3.1 Généralités

Le contrôleur *PID* est formé d'une alliance parfaite de gains : proportionnel, intégral et dérivé. Imaginez un système de contrôle en boucle fermée *PID*, dont l'illustration est représentée dans la figure III.2. Dans ce système, les protagonistes principaux sont les fameux K_p , K_i et K_d , qui représentent les gains proportionnel, intégral et dérivé [46].

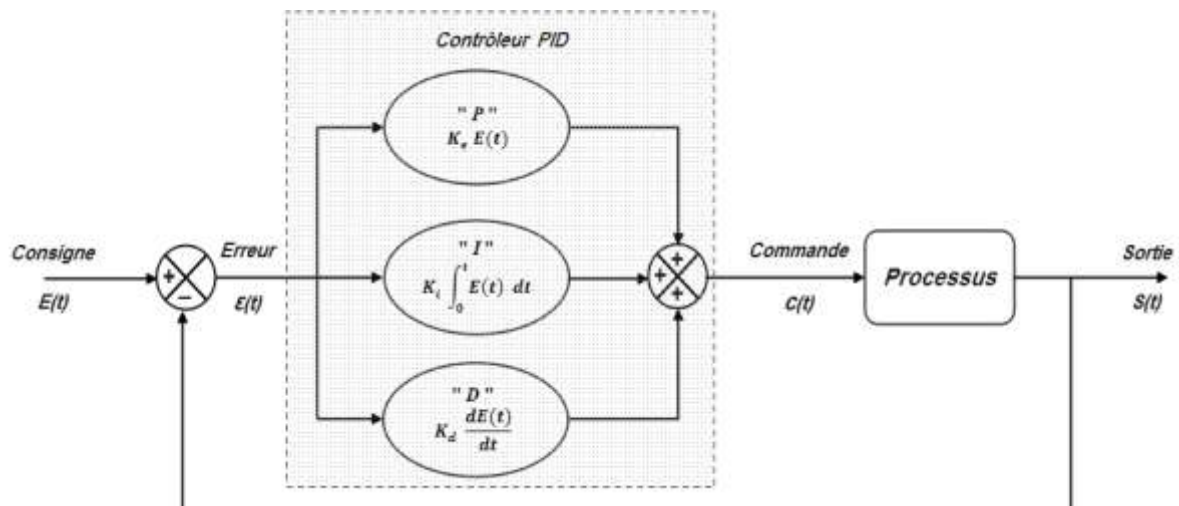


Figure III.2 Système de contrôle PID rétroaction [47]

Dans ce système de contrôle sophistiqué, le gain proportionnel (K_p) ajuste la réponse du système en fonction de l'erreur actuelle. Plus le gain proportionnel est élevé, plus la correction sera rapide et directe. Cela signifie que le système réagira rapidement aux écarts par rapport à la référence, mais il peut également entraîner une instabilité si le gain est trop élevé.

Le gain intégral (K_i) prend en compte l'erreur cumulée au fil du temps. Il sert à corriger les erreurs persistantes qui ne sont pas corrigées par le gain proportionnel seul. Le gain intégral ajuste progressivement la réponse du système et permet d'atteindre précisément la référence à long terme.

Le gain dérivé (K_d) mesure le taux de changement de l'erreur. Il permet d'anticiper les variations de l'erreur et d'ajuster la réponse en conséquence. Le gain dérivé est particulièrement utile pour réduire le temps de réponse du système et atténuer les oscillations.

En combinant ces trois gains, le contrôleur *PID* parvient à maintenir la variable contrôlée (S) aussi proche que possible de la référence (E) en minimisant l'erreur (ε). Il est couramment utilisé dans une grande variété d'applications de contrôle, allant des systèmes de régulation de température aux véhicules autonomes [48].

Le contrôleur *PID* offre une approche équilibrée pour le contrôle des systèmes dynamiques, offrant à la fois une correction rapide des erreurs, une précision à long terme et une stabilité. Grâce à sa flexibilité et à sa large gamme d'applications, le contrôleur *PID* reste un outil précieux pour les ingénieurs en automatisation et les professionnels du contrôle des processus.

III.3.2 Fonction de transfert d'un régulateur PID

La fonction de transfert d'un régulateur *PID* est largement utilisée dans les systèmes multivariables pour contrôler plusieurs entrées et sorties. Dans les systèmes de contrôle multivariables, la fonction de transfert *PID* est utilisée pour concevoir des régulateurs qui régulent plusieurs variables simultanément.

La fonction de transfert d'un régulateur *PID* est généralement représentée comme suit [49]:

$$G(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (\text{III.1})$$

Où;

- $G(s)$ est la fonction de transfert du régulateur PID ;
- K_p est le gain proportionnel;
- K_i est le gain intégral;
- K_d est le gain dérivé.
- s est la variable complexe représentant la transformée de Laplace.

La fonction de transfert PID est un outil fondamental dans la conception de systèmes de contrôle pour les processus multivariables. Elle permet aux ingénieurs d'analyser les interactions, de concevoir des stratégies de contrôle décentralisées et d'optimiser les performances de systèmes complexes avec plusieurs entrées et sorties.

III.4 Méthodes de calcul des paramètres optimaux du régulateur PID

Les ISE (Integral of Squared Error), IAE (Integral of Absolute Error), $ITSE$ (Integral of Time multiplied by Squared Error), et $ITAE$ (Integral of Time multiplied by Absolute Error) sont des critères de performance utilisés dans l'optimisation des systèmes multivariables. Ils sont similaires aux critères de performance utilisés dans le système de contrôle PID à une seule variable, mais sont étendus aux systèmes multivariables [50]. Voici un aperçu de chaque critère et de son équation:

III.4.1 ISE (Integral of Squared Error)

L' ISE est calculé en faisant la somme des erreurs au carré entre la référence (consigne) et la variable de processus correspondante pour chaque canal d'entrée/sortie au fil du temps. L'équation pour l' ISE est:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) \quad (III.2)$$

III.4.2 IAE (Integral of Absolute Error)

L' IAE est calculé en faisant la somme des valeurs absolues des erreurs entre la référence et la variable de processus correspondante pour chaque canal d'entrée/sortie au fil du temps. L'équation pour l' IAE est [51]:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (III.3)$$

III.4.3 ITSE (Integral of Time multiplied by Squared Error)

L'ITSE est obtenu en multipliant l'erreur au carré par le temps correspondant à chaque point, en le sommant au fil du temps et en traversant tous les canaux d'entrée/sortie. L'équation pour l'ITSE est:

$$ISE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (III.4)$$

II.4.3.1. ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute Error)

L'ITAE est obtenu en multipliant l'erreur absolue par le temps correspondant à chaque point, en le sommant au fil du temps et en traversant tous les canaux d'entrée/sortie. L'équation pour l'ITAE est [52]:

$$IAE = \int_0^{\infty} t * |e^2(t)| dt \quad (III.5)$$

Dans l'optimisation des systèmes multivariables, ces critères de performance peuvent être utilisés comme fonctions objectif pour ajuster les paramètres du régulateur. L'objectif est de minimiser le critère de performance choisi en ajustant les paramètres de contrôle (par exemple, les gains, les constantes de temps) afin d'obtenir des performances de contrôle optimales sur tous les canaux d'entrée/sortie [53].

III.5 Optimisation par la méthode "Nelder-Mead"

La méthode de Nelder-Mead, également connue sous le nom de "Polytope mouvant", est basée sur l'algorithme de Spendley, Hext et Himsworth [54,55]. Elle utilise un arrangement de $(n + 1)$ points x_i où la fonction coût est évaluée, où n représente la dimension de l'espace de recherche. Cet arrangement peut être considéré comme les sommets d'un simplexe. Un simplexe régulier de taille initiale a est initialisé en x_0 , par exemple en utilisant la règle suivante [56].

$$x_1 = x_0 + p e_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n q e_k \quad \text{où } i = 1, n. \quad (III.6)$$

Où

$$p = \frac{a}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1} + n - 1)$$

$$q = \frac{a}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1} - 1)$$

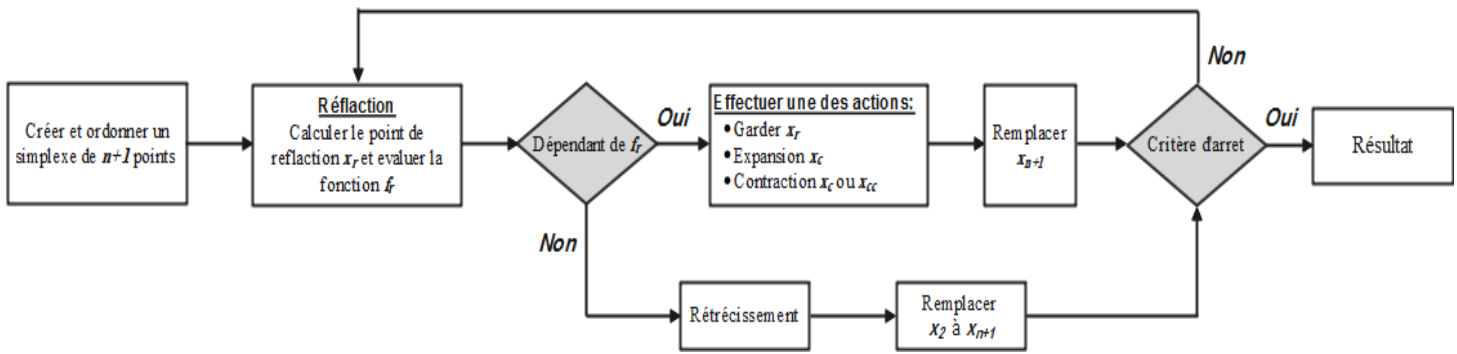


Figure III.3 Structuration de la méthode de Nelder-Mead [57]

III.5.1 Etapes de l'algorithme de Nelder-Mead [57]

- **Triangle Initial BGW**

La méthode de Nelder-Mead sera utilisée pour trouver les trois points d'un triangle, en minimisant la fonction $f(K)$ qui est utilisée à cet effet.

$$B = f(k_1), G = f(k_2) \text{ et } W = f(k_3)$$

Où B est le point optimal (valeur inférieure à G et W), G est un point de qualité (proche du meilleur), et W est le point le plus mauvais.

- **Point Milieu M**

Le processus de construction utilise le point situé au milieu de la ligne reliant B et G .

$$M = \frac{B+G}{2} \quad (\text{III.7})$$

- **Point d'Expansion E**

Le point d'expansion est calculé en utilisant le point milieu M et le point le plus mauvais W .

$$E = 3M - 2W \quad (\text{III.8})$$

- **Point de Contraction C**

Le premier point est obtenu en combinant le point le plus mauvais avec le point médian. Le deuxième point est calculé en utilisant le point de réflexion ainsi que le point médian.

$$C_1 = \frac{W+R}{2} \quad (\text{III.9})$$

$$C_2 = \frac{R+M}{2} \quad (\text{III.10})$$

- **Point de Réduction R**

Le point de contraction est construit en utilisant le point optimal et le point le plus mauvais.

$$R = \frac{B+W}{2} \quad (\text{III.11})$$

Les points utilisés pour la méthode de "Nelder-Mead" sont indiqués dans la Figure ci-dessous.

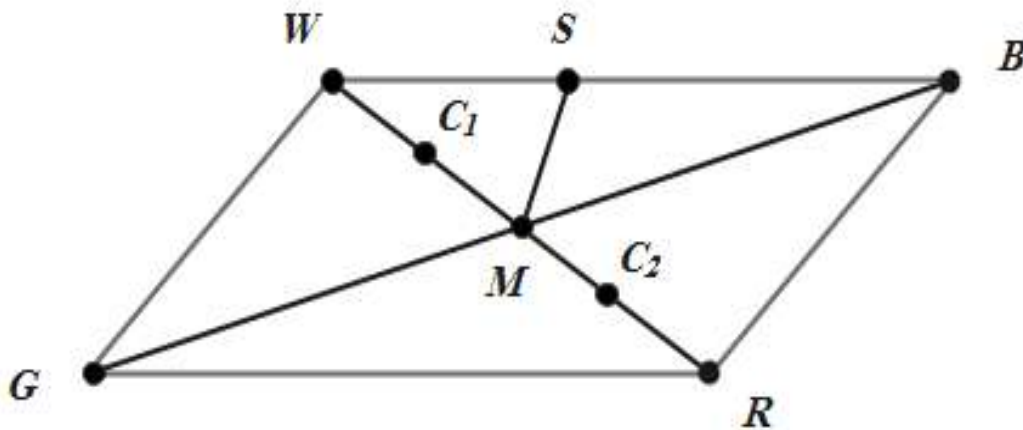


Figure III.4 Indication des points utilisés dans la méthode de Nelder-Mead

III.6 Détermination des paramètres du régulateurs PID par la méthode Ziegler-Nichols

La précision de la formule de réglage Ziegler-Nichols est vérifiée dans le cadre de l'autoréglage *PID* et *PI*. Pour l'autoréglage *PID*, il sera démontré qu'en cas de dépassement excessif de la réponse du point de consigne, la pondération du point de consigne peut réduire le dépassement à une valeur spécifiée et la formule de réglage originale de Ziegler-Nichols peut être conservée. Il sera également démontré que la pondération du point de consigne surpasse les solutions conventionnelles pour réduire les dépassements importants par décalage de gain ou filtrage du point de consigne. Cependant, si le dépassement de la consigne est insuffisant, la formule de réglage doit être modifiée. Pour l'autoréglage *PI*, la formule de réglage de Ziegler-Nichols s'avérera insuffisante et devra être complètement revue. L'application de la pondération de la consigne et la modification de la formule de réglage peuvent se baser simplement sur la connaissance du gain normalisé ou du temps mort normalisé du procédé. Les améliorations apportées à ces heuristiques, lorsqu'elles sont combinées, amélioreront considérablement les performances du syntoniseur automatique [58].

III.6.1 Méthode 1 de réglage de Ziegler-Nichols pour courbe de réponse à un échelon en forme de "S"

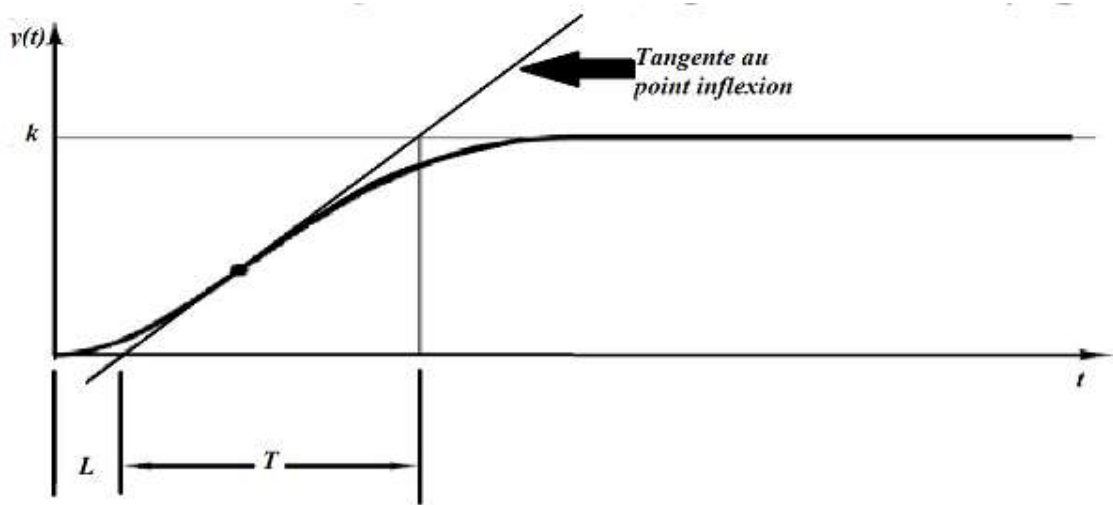


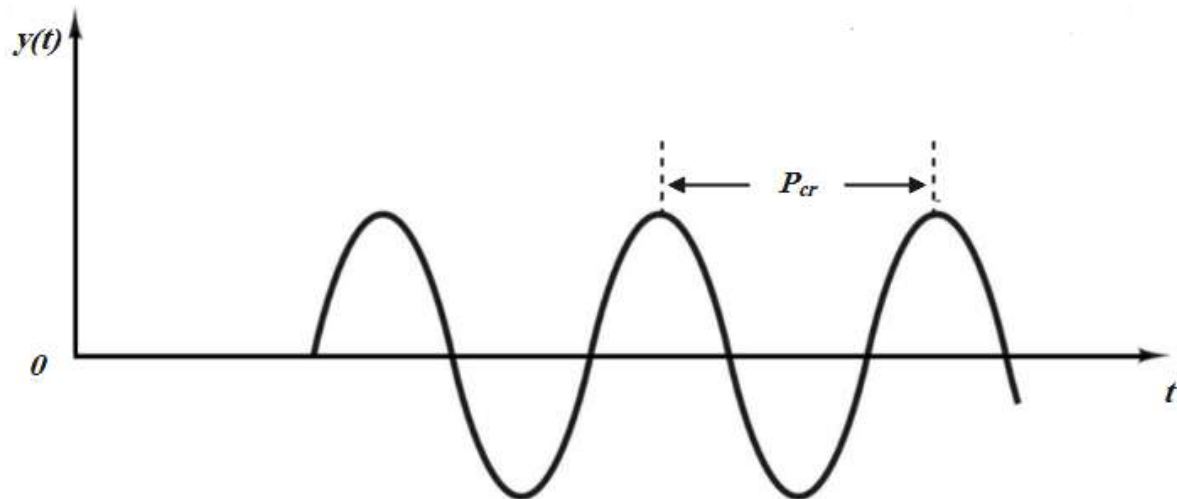
Figure III.5 Courbe de réponse en forme de "S"

Type de contrôleur	k_P	k_I	k_D
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2 L$	$0.5 L$

Tableau III.1 Règles de réglage de Ziegler-Nichols basée sur la réponse à une échelon

III.6.2 Méthode 2 de Réglage de Ziegler-Nichols

Dans la deuxième méthode, nous entamons en fixant et en utilisant exclusivement l'action de contrôle proportionnelle afin d'augmenter progressivement K_p depuis 0 jusqu'à atteindre la valeur critique K_{cr} . Cette valeur critique est celle à laquelle la sortie présente pour la première fois des oscillations soutenues. Si la sortie ne présente pas d'oscillations soutenues, quelle que soit la valeur de K_p , alors cette méthode n'est pas applicable. Par conséquent, le gain critique K_{cr} et la période correspondante P_{cr} sont déterminés de manière expérimentale [59].

Figure III.6 Oscillation soutenue avec une période P_{cr}

Type de contrôleur	k_P	k_I	k_D
P	$0.5 k_{cr}$	0	0
PI	$0.45 k_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6 k_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

Tableau III.2 Règles de réglage de la deuxième méthode de Ziegler-Nichols

III.6.3 Application sur le système de séchage des céréales

Le logiciel de simulation MatLab/Simulink est largement utilisée dans le réglage des régulateurs *PID*. Avec Simulink, vous pouvez modéliser le système à contrôler, concevoir un régulateur *PID* et effectuer des simulations pour évaluer les performances du système en temps réel. Simulink fournit diverses méthodes de réglage automatique du gain *PID*, telles que Ziegler-Nichols ou Cohen-Coon, pour faciliter la détermination des paramètres optimaux du contrôleur. De plus, le Simulink offre la possibilité d'intégrer des méthodes de réglage manuel via une interface conviviale, ce qui facilite la modification des gains en temps réel et l'observation de l'effet sur la réponse du système. Cela permet aux ingénieurs de mettre en œuvre une approche itérative en ajustant les gains *PID* jusqu'à ce que les performances souhaitées soient atteintes. En ajustant le contrôleur *PID* à l'aide de MatLab/Simulink, nous pouvons obtenir une solution efficace et précise pour nos besoins spécifiques [60].

II.6.3.1 Réglage PID en mode de découplage dynamique

Dans la figure ci-dessous, nous représentons la structure de réglage *PID* d'un système de séchage des céréales contrôlé par le mode de découplage dynamique.

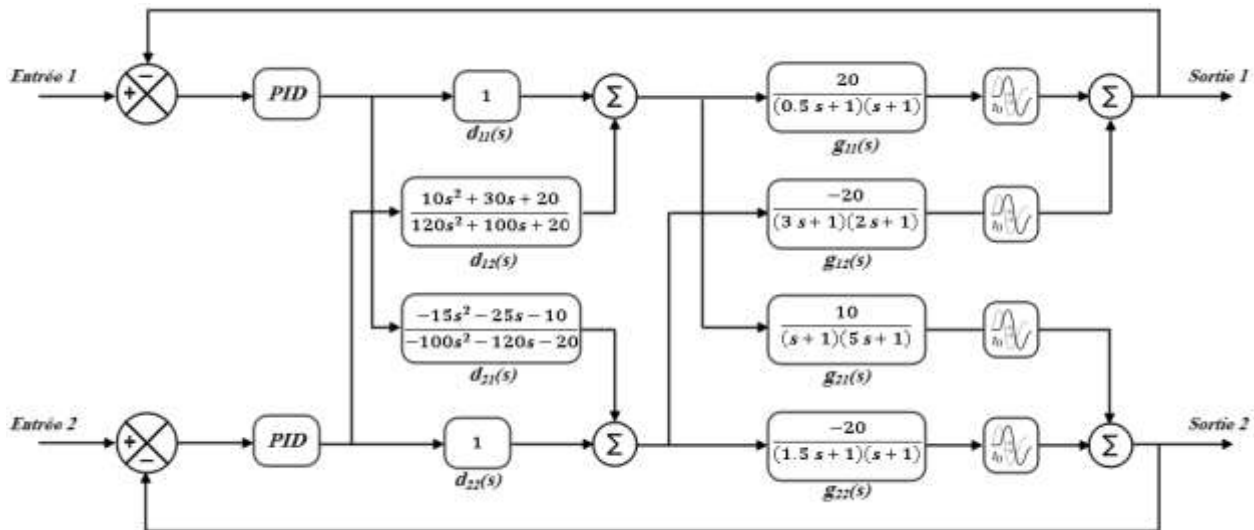


Figure III.7 Réglage par PID du système de séchage des céréales en mode de découplage dynamique

L'exécution de la structure mentionnée à l'aide du logiciel Matlab/simulink nous a donné les résultats suivants en boucle fermée et ouverte.

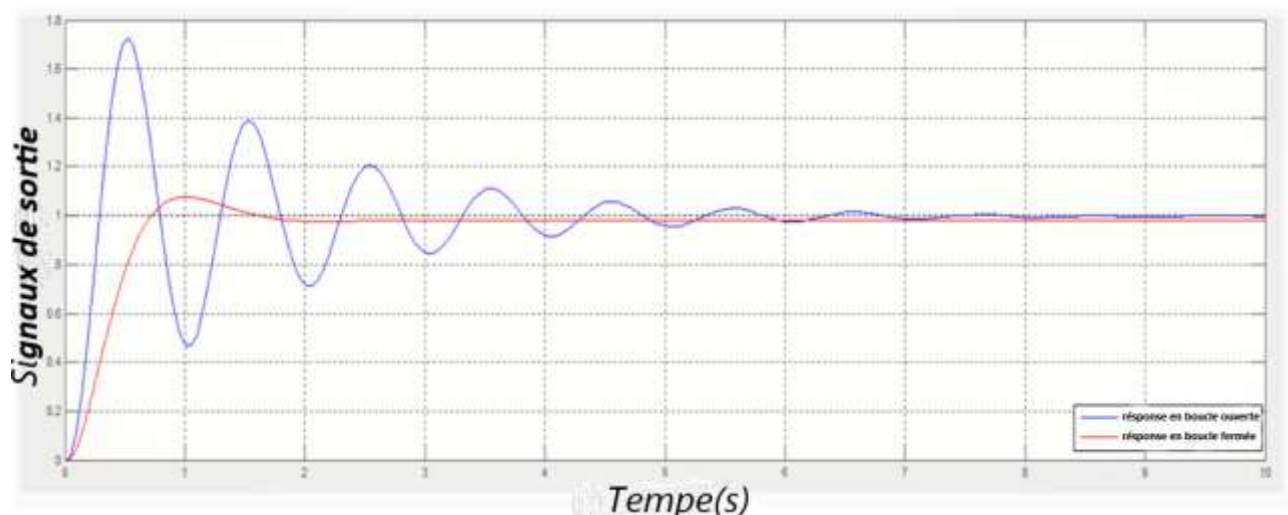


Figure III.8 Réponses en boucle ouverte et fermée du système en mode de découplage dynamique

Paramètres du régulateur	Réponse en boucle fermée	Réponse en boucle ouverte
K_p	0.22093	1
K_i	0.16343	1
K_d	0.03675	0
N	7.5308	300

Tableau III.3 Paramètres du contrôleur *PID* pour le découplage dynamique

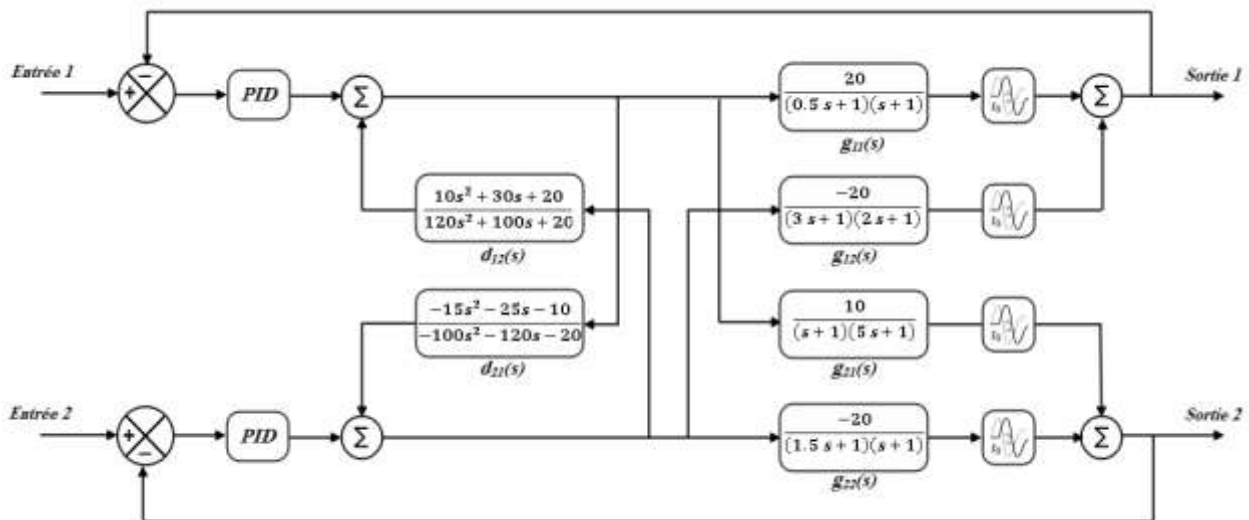
Performances	Réponse en boucle fermée	Réponse en boucle ouverte
<i>Temps de montée (seconds)</i>	0.468	0.177
<i>Temps d'établissement (seconds)</i>	2.67	6.19
<i>Dépassement %</i>	7.63	72.8
<i>Pic</i>	1.08	1.73

Tableau III.4 Performances du système régulé par *PID* en mode de découplage dynamique

Plusieurs facteurs entrent en jeu lors de la comparaison des performances du système en boucle fermée (réglé) et en boucle ouverte (non réglé). Par à la réponse du système en boucle ouverte, la réponse en boucle fermée présente des avantages exceptionnels en termes de stabilité et de dépassement. elle parvient à se stabiliser plus rapidement à la valeur souhaitée et à la maintenir avec un minimum d'oscillations. De plus, la caractéristique en boucle fermée présente un pic réduit, indiquant la réduction du dépassement par rapport à celle en boucle ouverte.

III.6.3.2 Réglage *PID* en mode de découplage inversé

La structure présentée en dessous, présente le réglage *PID* d'un système de séchage des céréales contrôlé par le mode de découplage inversé.

Figure III.9 Réglage par *PID* du système de séchage des céréales en mode de découplage inverse

L'implémentation du réglage *PID* du système de séchage des céréale sous le logiciel MatLab/Simulink nous a fourni les résultats illustrée sur la figure III.9 ci-dessous.

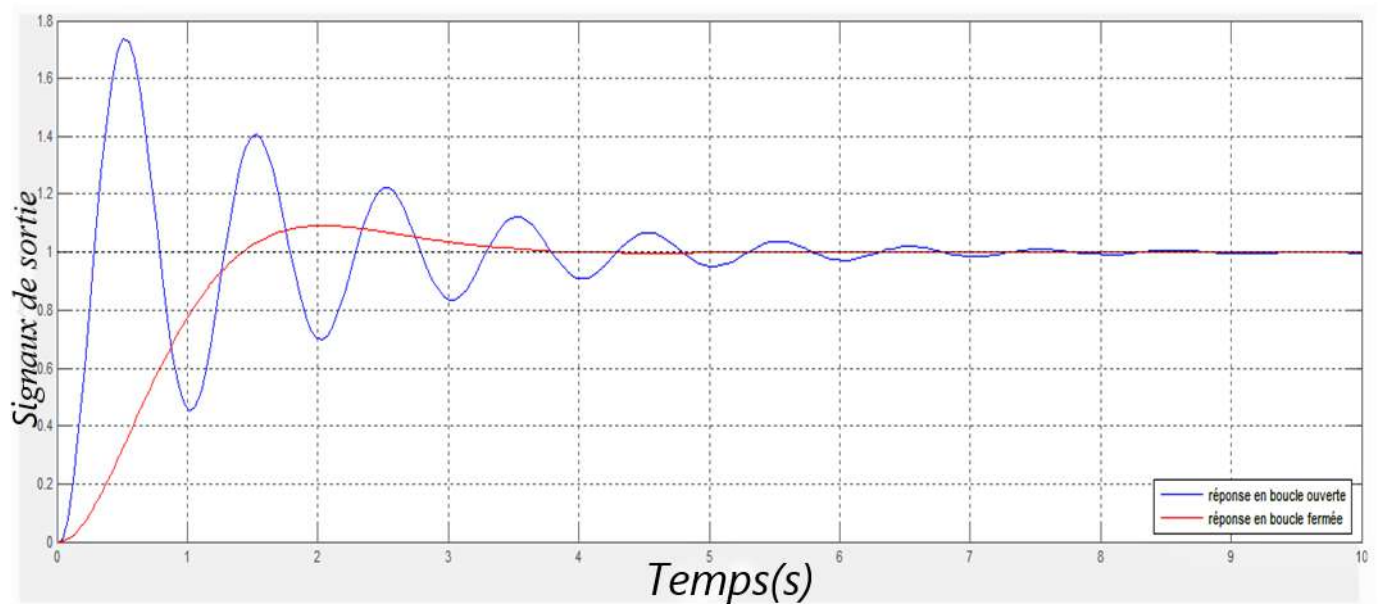


Figure III.10 Réponses en boucle ouverte et fermée du système en mode de découplage inverse

Paramètres du régulateur	Reponse en boucle fermée	Reponse en boucle ouverte
K_p	0.08496	1
K_i	0.08483	1
K_d	0.00898	0
N	2.9266	300

Tableau III.5 Paramètres du contrôleur *PID* pour le découplage inversé

Performances	Réponse en boucle fermée	Réponse en boucle ouverte
<i>Temps de montée (seconds)</i>	0.938	0.176
<i>Temps d'établissement (seconds)</i>	3.29	6.56
<i>Dépassement %</i>	9.13	73.9
<i>Pic</i>	1.09	1.74

Tableau III.6 Performances du système régulé par *PID* en mode de découplage inversé

Des différences significatives apparaissent lors de la comparaison des performances du système sous le réglage *PID* en mode de découplage inverse dont les paramètres du régulateur sont mentionnés dans le tableau III.5.

En termes de stabilité et de dépassement, la réponse du système en boucle fermée de réglage *PID* présente un net avantage. Comme le montre les allures de la figure III.9, la réponse en boucle fermée parvient à maintenir la valeur souhaitée avec moins d'oscillations, démontrant ainsi une meilleure stabilité que celle en boucle ouverte. De plus, la réponse en boucle fermée présente un dépassement inférieur, ce qui indique une meilleure précision de contrôle. Et selon les tableaux des performances, lorsque l'on compare les performances du système en boucle fermée de régulation *PID* en modes de découplage inversé et dynamique, il est clair que la configuration de réglage en mode découplage dynamique est nettement mieux à tous égards, avec un dépassement minimal, temps de montée et établissement réduit et aussi un pic bien contrôlé.

III.6.3.3 Réglage PID en mode de découplage statique

La figure III.10 représente la structure de réglage du système de séchage des céréales en utilisant le régulateur *PID* pour un mode de découplage statique.

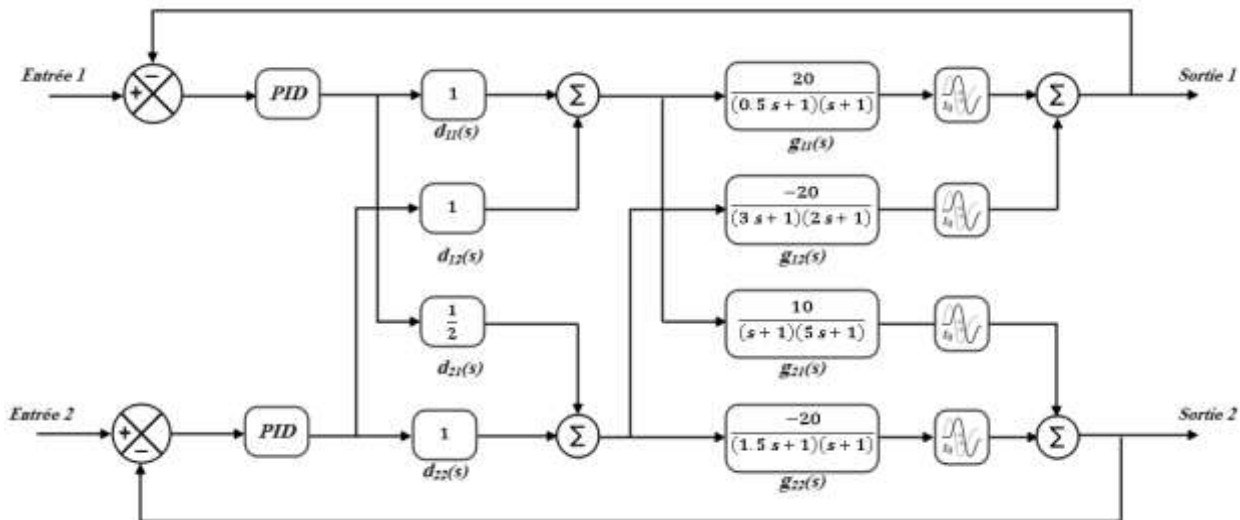


Figure III.11 Réglage par *PID* du système de séchage des céréales en mode de découplage statique

La figure III.11 ci-dessous illustre les caractéristiques du système obtenu par l'implémentation de la configuration de réglage montrée en dessus.

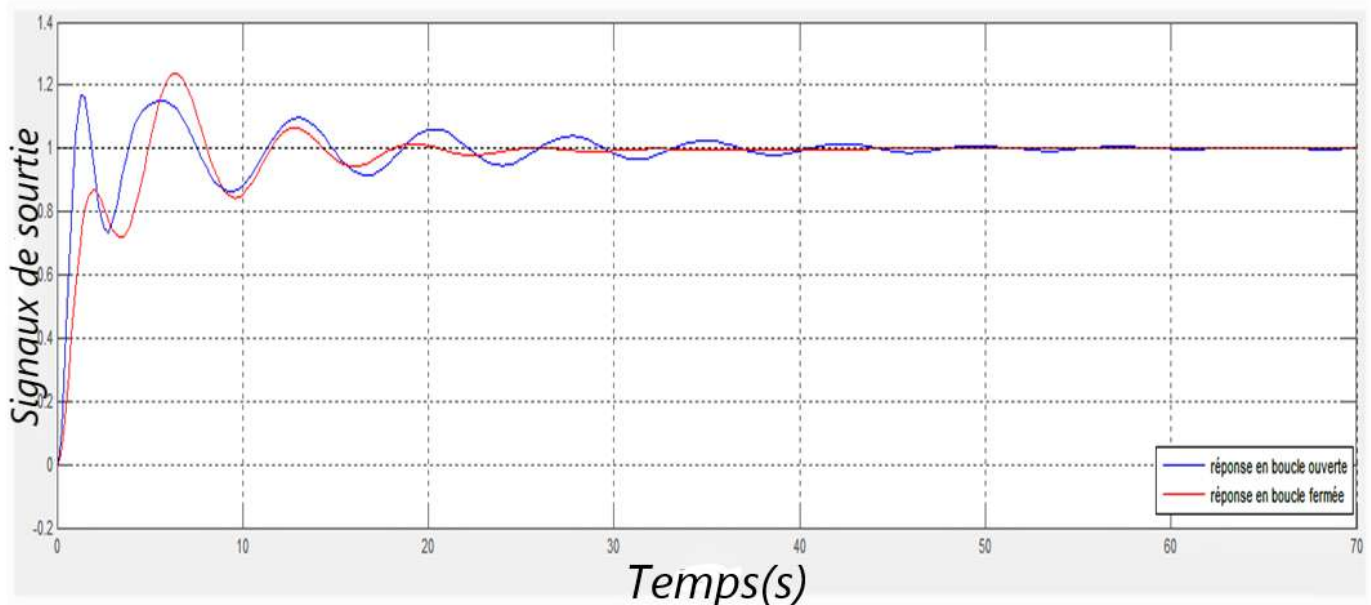


Figure III.12 Réponses en boucle ouverte et fermée du système en mode de découplage statique

Paramètres du régulateur	Réponse en boucle fermée	Réponse en boucle ouverte
K_p	-0.06758	1
K_i	-0.06401	1
K_d	0	0
N	100	300

Tableau III.7 Paramètres du contrôleur *PID* pour le découplage statique

Performances	Réponse en boucle fermée	Réponse en boucle ouverte
<i>Temps de montée (seconds)</i>	4.22	0.635
<i>Temps d'établissement (seconds)</i>	22.8	39
<i>Dépassement %</i>	23.7	72.816.8
<i>Pic</i>	1.24	1.17

Tableau III.8 Performances du système régulé par *PID* en mode de découplage statique

Après la simulation du système, et en comparant les caractéristiques obtenus et basant sur le tableau des performances du système en boucle fermée et en boucle ouverte, nous constatons que le système à découplage statique en boucle fermée de régulation *PID* présente des meilleurs performances, il a une excellente stabilité, un dépassement réduit et un pic bien contrôlé et cela démontre une plus grande précision et une plus grande capacité à maintenir les valeurs souhaitées sans oscillations excessives. Cependant, il est important de noter que la réponse en boucle ouverte présente l'avantage de temps de montée réduit, atteignant la valeur ciblée plus rapidement que la réponse du système en boucle fermée et cela peut être attribué à une réponse plus rapide, bien que cela s'accompagne d'un dépassement plus important et d'une stabilité plus faible. Donc, à l'exception du temps de montée, le système en boucle fermée et plus performant compte tenu de tous les aspects illustrés sur le tableau III.8.

Cependant, si nous comparons les résultats obtenus avec les résultats des configurations de réglage *PID* pour les deux modes de découplage précédentes (dynamique et inversé), il convient de souligner que cette configuration de réglage est la moins performante.

III.7 Conclusion

Après avoir effectué une étude approfondie de l'application de l'optimisation *PID* sur les trois modes différents de découplage d'un système de séchage des céréales (à savoir, le découplage dynamique, le découplage inversé et le découplage statique) en utilisant le logiciel MatLab/Simulink, il est clair que le système à régulation *PID* ne fonctionnent pas de la même manière dans les trois méthodes de découplage. La raison en est principalement liée aux différences structurelles entre ces méthodes et à d'autres facteurs inhérents à chaque système.

Premièrement, il faut reconnaître que le choix de la méthode de découplage a un impact significatif sur la réponse globale du système. Les méthodes de découplage dynamique, statique et inversé proposent différentes manières d'aborder les interactions entre les différentes variables du système de séchage des céréales. Ces méthodes peuvent produire différentes caractéristiques de réponse et affecter la façon dont le contrôleur *PID* est appliqué.

Deuxièmement, comprendre les différences entre les méthodes de découplage et leur impact sur les applications de réglage *PID* est essentiel pour obtenir des performances optimales dans les systèmes secs. Une approche individualisée basée sur la connaissance du système et une évaluation rigoureuse des résultats expérimentaux est nécessaire pour trouver les paramètres optimaux du contrôleur *PID* et atteindre les objectifs de contrôle du système de séchage des céréales.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce mémoire sur les systèmes multivariables était d'étudier les défis et les complexités associés à ces systèmes dans le domaine du génie de contrôle. L'objectif était de comprendre les interactions complexes entre plusieurs variables et de développer des stratégies efficaces pour contrôler ces systèmes. En explorant les méthodes de découplage et les techniques d'optimisation basées sur les régulateurs *PID*, le mémoire visait à améliorer la stabilité, les performances et la fiabilité des systèmes multivariables. L'objectif ultime était de fournir des connaissances et des solutions précieuses pouvant être appliquées dans divers secteurs industriels et applications technologiques afin d'améliorer le contrôle des systèmes complexes et interconnectés.

Dans le cadre de notre travail, nous avons appliqué différentes méthodes de découplage à un système de séchage des céréales et à une colonne de distillation. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité des méthodes de découplage utilisées à la réduction des interactions indésirables entre les variables d'entrée et de sorties des systèmes étudiés.

Dans le système de séchage des céréales, nous avons observé que la méthode de découplage inversé a permis une réduction significative des interactions entre les variables, améliorant ainsi la stabilité et la précision du processus de séchage. Cette méthode a montré des résultats prometteurs en termes de réduction des temps de réponse et de minimisation des dépassements.

En revanche, dans la colonne de distillation, nous avons constaté que la méthode de découplage dynamique était plus efficace pour réduire les interactions entre les variables. Cette méthode a permis de mieux contrôler la séparation des composés dans la colonne de distillation, améliorant ainsi l'efficacité globale du processus.

De plus, l'application de la méthode de découplage statique a montré des résultats satisfaisants dans les deux systèmes étudiés. Cette méthode a réussi à atténuer les effets des interactions croisées, permettant une meilleure régulation des variables et une amélioration des performances des systèmes.

En ce qui concerne l'optimisation par des contrôleurs *PID*, nous avons focalisé nos efforts sur le système de séchage des céréales. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité du contrôleur *PID* dans la stabilisation du processus de séchage, avec une réduction significative du dépassement et une amélioration du temps de réponse. Ces résultats confirment l'importance de la régulation par *PID* pour atteindre des performances optimales dans le système de séchage des céréales.

En conclusion, notre mémoire a démontré que chaque système répond différemment aux différentes méthodes de découplage (dynamique, statique et inverse). La sélection de la méthode appropriée dépend des caractéristiques spécifiques du système et des objectifs de contrôle visés. De plus, l'optimisation par *PID* a joué un rôle crucial dans l'amélioration des performances du système de séchage des céréales, confirmant son utilité dans les systèmes multivariables. Ces résultats contribuent à l'avancement des connaissances dans le domaine du contrôle des systèmes multivariables et offrent des perspectives prometteuses pour l'amélioration des processus industriels.

Référence bibliographie

Bibliographie

- [1] Yin, Shen, et al. "Data-based techniques focused on modern industry: An overview." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* ,2014
- [2] Kravaris, Costas, and Masoud Soroush. "Synthesis of multivariable nonlinear controllers by input/output linearization." *AIChE Journal* ,1990
- [3] Xia, Huafeng, et al. "Maximum likelihood-based gradient estimation for multivariable nonlinear systems using the multiinnovation identification theory." *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2020
- [4] Nassirharand, Amir, and S. A. Hosseini. "Tracking and decoupling of multivariable non-linear systems." *International Journal of Modelling, Identification and Control*,2009
- [5] Samira. LARBI, " Réduction de systèmes via l’algorithme de Division de facteur et Analyse Spectrale Propre ", *Mémoire de Magister en Electronique* ,Université Ziane Achour de Djelfa, 2012, Algérie.
- [6] Demirel, Y. K. "Systems thinking: An overview of the literature. " *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019.
- [7] Nise, Norman S. "CONTROL SYSTEMS ENGINEERING,(With CD), volume 6th. Edition." 2010.
- [8] Feliachi, Ali. "Control systems curriculum national survey." *1991 American Control Conference*. IEEE, 1991.
- [9] Ogata, Katsuhiko. "Control systems analysis in state space. Modern Control Engineering". *Pearson Education*. 2010.
- [10] Franklin, Gene F., et al. " Feedback control of dynamic systems. Vol. 4. " *Upper Saddle River: Prentice hall*, 2002.
- [11] Vamshi Krishna Samudrala "Integrating lattice space-time codes of highest rank and multiplexing over rayleigh fading channels", *Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College*, 2010.

- [12] Kaiser, Mark J. "Control systems engineering: by Norman S. NISE; Benjamin/Cummings". *Redwood City, CA, 1995, USA*
- [13] Naidu, D. Subbaram. *Optimal control systems*. CRC press, 2002.
- [14] Li, Y., Li, S., Li, L., & Li, S. "Revue de la technologie MIMO et de ses perspectives d'application dans le domaine des communications sans fil. " *Wireless Networks*. 2018.
- [15] M. Basseville, "Multivariate input single output (MISO) systems," in *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, Wiley, 2017.
- [16] M. Darouach, "Commande des systèmes multivariables à entrées/sorties simples", in *Commande des systèmes multivariables*, Hermès Science, 2018
- [17] S. Tarbouriech, M. Benosman et G. Garcia, "Contrôle et synchronisation d'un bras robotique flexible à deux maillons via une approche basée sur un observateur MISO", *Control Engineering Practice*, vol. 60 .2015.
- [18] T. Chatterjee, A. Sengupta et R. Saha, "Étude comparative des filtres adaptatifs MISO pour l'annulation d'écho acoustique", in *Signal Processing and Communication (ICSC), Conférence internationale sur le traitement du signal et la communication*, 2016
- [19] Lee, J., Lee, M., Lee, S., & Park, H. " Conception de systèmes de contrôle MIMO avec des contrôleurs décentralisés basés sur QFT. " *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, . 2017
- [20] T. Chatterjee, A. Sengupta et R. Saha, "Étude comparative des filtres adaptatifs MISO pour l'annulation d'écho acoustique", in *Signal Processing and Communication (ICSC), Conférence internationale sur le traitement du signal et la communication*, 2016
- [21] A. Mellit, A. Hadj Arab, H. "Power control of a variable speed wind turbine using a MISO fuzzy controller Renewable Energy", 2003 .
- [22] B. Tassadit, H. Karima, " Analyse des interactions dans les systèmes multivariables ", *Mémoire de Master*, Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou 2010, Algérie.
- [23] Albertos, Pedro, and Sala Antonio. " Multivariable control systems: an engineering approach. " *Springer Science & Business Media*, 2006.

- [24] Tzafestas, Spyros G., ed. *Multivariable control: new concepts and tools*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [25] Joseph, Lardiès. "Estimation de l'ordre et des paramètres d'un processus stochastique multivariable." 1997.
- [26] Chen, G, & Jia, R. "Properties of singular values of the discrete Fourier transform". *Journal of Fourier analysis and Applications*, 2012
- [27] Jolliffe, I. T. "Singular value decomposition and principal component analysis". In *Principal Component Analysis (pp. 71-91)*. Springer, Cham, 2017.
- [28] Zhou, Kemin, and John Comstock Doyle. "Essentials of robust control. Vol. 104." *Upper Saddle River, NJ: Prentice hall*, 1998.
- [29] Valenti, Arnaud. "Régulation H-infinity: application aux suspensions actives." 1996.
- [30] Jian-Xin Xu, H-infinity Control for Linear SISO Systems: An Overview" in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 60-70, Feb. 2003
- [31] P. APKARIAN, "Elément de la théorie de la commande robuste "
- [32] Skogestad, Sigurd, and Ian Postlethwaite. " Multivariable feedback control: analysis and design. " *john Wiley & sons*, 2005.
- [33] Elsayah, Sondoss, et al. "Eight grand challenges in socio-environmental systems modeling." *Socio-Environmental Systems Modelling* 2 .2020.
- [34] système couple:Zanetti, R., et al. "Completeness and timeliness: cancer registries could/should improve their performance." *European journal of cancer* 51.9 .2015.
- [35] Shimizu, Kiyotaka. "P· SPR· D+ I control of linear MIMO systems with time-delay by application of high gain feedback." *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, 2014.
- [36] Li, Shuanghong, Chengjun Zhan, and Yupu Yang. "Control system based on anode offgas recycle for solid oxide fuel cell system." *Mathematical Problems in Engineering* 2018.
- [37] George Ellis, "Control System Design Guide: Using Your Computer to Understand and Diagnose Feedback Controllers" *Academic Press*, 2004.
- [38] Pierre R. Belanger and Louis A "Control Engineering: A Modern Approach". *Wehenkel CRC Press*, 2001.

- [39] D. Bouafia, N. Bouarour, "Commande multiboucle d'un système multivariable: Optimisation du facteur de déréglage de la BLT. Diss. " *Mémoire de Master*, Université Mouloud Mammeri, 2018, Algérie.
- [40] Tassadit benabdallah, " les technique de couplages explicite et implicite des systèmes multivariables .application sur un modèle d'une colonne de distillation binaire. " ", *Mémoire de Master*, Université de boumerdès, 2011, Algérie.
- [41] Olivier BACHELIER, " Systèmes Multivariables - Partie II", 2019.
- [42] P. G. Ciarlet. " Introduction `à l'analyse numérique matricielle et `à l'optimisation. " *Editions Masson, France*, 1982.
- [43] Xi-Wen Liu and Tie-Feng Dai " Design for Fuzzy Decoupling Control System of Temperature and Humidity", *School of Mechanical Engineering, Xiangtan University*
- [44] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Distillation>.
- [45] Johnson, Michael A., and Mohammad H. Moradi. "PID control". *London, UK: Springer-Verlag London Limited*, 2005.
- [46] Dr. Roland Büchi. "PID Controller Parameter Tables for Time-Delayed Systems Optimized Using Hill-Climbing". *School of Engineering, Zurich University of Applied Sciences, 8400 Winterthur, Switzerland*. 2022
- [47] wang, Qing-Guo, et al. "PID control for multivariable processes". *Springer*, 2008
- [48] Yogendra Kumar Soni¹ and Rajesh Bhatt "BF-PSO optimized PID Controller design using ISE, IAE, IATE and MSE error criteria", *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 2, Issue 7, July 2013*.
- [49] Controller design using ISE, IAE, IATE and MSE error criteria. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 2013
- [50] MOUSAKAZEMI, Seyed Mohammad Hossein. "Comparison of the error-integral performance indexes in a GA-tuned PID controlling system of a PWR-type nuclear reactor point-kinetics model". *Progress in Nuclear Energy*, 2021
- [51] Mirzal, A., Yoshii, S., & Furukawa, M. " PID parameters optimization by using genetic algorithm". 2012.
- [52] SOLIHIN, Mahmud Iwan; TACK, Lee Fook; KEAN, Moey Leap. " Tuning of PID controller using particle swarm optimization (PSO) ". *In: Proceeding of the international conference on advanced science, engineering and information technology*. 2011.

- [53] Nelder, J.A., Mead, R. "A simplex for function minimization". *Computer Journal*, 7, 308–313 (1965)
- [54] Spendley, W., G.R. Himsworth, F.R. "Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation". *Technometrics*, 4, 441–461, 1962.
- [55] rediac, M. " A Procedure for Designing Laminated Plates with Required Stiffness Properties. Application to Thin Quasi-Isotropic Quasi-Homogeneous Uncoupled Laminates". *Journal of Composite Materials*, 33(20), 1939–1956 , 1999.
- [56] Blondin, Maude Josée. " Algorithme contraint d'optimisation pour la syntonisation de correcteurs avec saturation". *Diss. Université du Québec à Trois-Rivières*, 2014.
- [57] Sinlapakun, Vunlop, and Wudhichai Assawinchaichote. "PID Controller Based Nelder Mead Algorithm for Electric Furnace System with Disturbance." *ECTI Transactions on Computer and Information Technology (ECTI-CIT)*.2016.
- [58] Hang, Chang C., Karl Johan Åström, and Weng Khuen Ho. "Refinements of the Ziegler–Nichols tuning formula." *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)*. Vol. 138. No. 2. IET Digital Library, 1991.
- [59] https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2018_12_11:07_59_15_PM.
- [60] WANG, Liuping. *PID control system design and automatic tuning using MATLAB/Simulink*. John Wiley & Sons, 2020.