

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERE DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique industrielle

Présenté par

Bahiya KACED
Nourddine ARAB

Thème

Synthèse et implémentation de lois de commande sur le TCLab

Mémoire soutenu publiquement le 26/06/ 2024 devant le jury composé de :

M^r Ahmed MAIDI

Professeur, UMMTO, Président

M^r Ahcene TRIKI

MCB, UMMTO, Encadrant

M^{me} Khedoudja KHERRAZ

MCB, UMMTO, Examineur

M^{me} Nacera ARAR

MAA, UMMTO, Examineur

Remerciements

*Avant tout nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné le
Courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et
que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Ce travail n'aurait pu se faire seul! Ce sont les compétences, la disponibilité, le
dynamisme, la bonne humeur et la patience de chacun, qui nous a permis de
poursuivre nos études et d'achever ce mémoire dans les meilleures conditions. C'est
pourquoi nous tenons chaleureusement à remercier ici toutes les personnes qui ont
contribué de loin comme de près pour achever ce modeste travail, proposée par*

***M. TRIKI Ahcene** à qui nous exprimons nos sincères remerciements, pour son aide et sa disponibilité et
surtout ses conseils
précieux lors de l'élaboration de ce mémoire.*

*Nous tenons à remercier tous **les membres de jury**, pour l'honneur qu'ils nous
ont fait en acceptant d'examiner ce travail et de leurs présence en ce jury.*

*Nos remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à
l'aboutissement de ce travail.*

*Enfin, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à l'ensemble des
enseignants et tout le personnel de la faculté de Génie Électrique et d'informatique
(FGEI)*

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui m'ont toujours apporté leurs
amour et leurs soutient pour affronter qui grâce à eux j'ai pu atteindre ce niveau, qui ont été toujours à
mes côtés*

pour me soutenir, et pour me conseiller

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance la plus dévouée.

Je dédie également ce travail à :

Mes frères et sœurs.

Ainsi qu'à tous ceux qui me sont chers

Sans oublier tous les membres de la famille.

Ainsi qu'à tous ceux qui mon aidé d'une manière ou d'une autre dans la vie.

Nourddine

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes parents

A mes sœurs et mes frères

A ma tante et mon oncle coté maternel A mes tantes et mon oncle coté paternel Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour arriver à ce jour là.

Bahiya

Table des figures

1.1	Composants du kit AP Monitor Temperature Control Lab (TCLab)	4
1.2	Composants de la carte de circuit imprimé.	5
1.3	Connexions à la carte Arduino des éléments chauffants et des capteurs de température.	5
1.4	Schéma simulink pour mesurer la réponse indicielle	9
1.5	Réponse indicielle mesurée	9
1.6	Réponses indicielles estimées	11
2.1	Signaux de commande et sortie d'un système de régulation TOR de température	14
2.2	Modèle Matlab Simulink de commande du TCLab par un régulateurTOR.	15
2.3	Configuration du bloc Relay	15
2.4	Signaux de commande et de sortie obtenus après implémentation de la régulation TOR sur le TCLab.	16
2.5	Structure parallèle d'un PID	20
2.6	Structure standard d'un PID	21
2.7	Méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte	22
2.8	Méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée	22
2.9	Schéma de simulation de la commande du TCLAB par PID	25
2.10	Résultat de simulation de la commande du TCLAB par PID C2(s)	25
2.11	Résultat de simulation de la commande du TCLAB par PID C3(s)	26
2.12	Implémentation d'un PID sur le TCLab	26
2.13	: Résultat d'implémentation de la commande du TCLab par C2(s)	27
2.14	Résultat d'implémentation de la commande du TCLab par C3(s)	28
3.1	Structure de commande par modèle interne	30
3.2	Schéma de simulation de la commande du TCLAB par modèle interne	34
3.3	Résultat de simulation de la commande par modèle interne du TCLab avec Perturbation=0	35
3.4	Résultat de simulation de la commande par modèle interne du TCLab avec perturbation=10°C à temps=600 sec	36
3.5	Résultat de simulation de la commande par modèle interne du TCLab avec perturbation	37
3.6	Schéma bloc d'implémentation du correcteur CMI continu sur le système TCLAB	37
3.7	Résultat d'implémentation de la commande par modèle interne du TCLab sans perturbation	38
3.8	Résultat d'implémentation de la commande par modèle interne du TCLab avec perturbation	39

Liste des tableaux

1.1 Exemple de valeurs numériques des paramètres des modèles précédents [5].	8
--	---

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Dédicace	iii
Table des figures	iv
Liste des tableaux	v
Table des matières	vi
Liste de symboles	viii
Introduction générale	1
1 Description, Modélisation et Identification de TCLab	3
1.1 Introduction	3
1.2 Description du TCLAB	3
1.2.1 Kit TCLab	4
1.2.2 Développement et utilisation du TCLAB	6
1.2.3 Problèmes de Commande de température du TCLAB	6
1.3 Modèles mathématiques du TCLAB	7
1.3.1 Modèles de connaissance du TCLAB	7
1.3.2 Modèles de comportement du TCLAB	8
1.4 Conclusion	11
2 Commande du TCLab par régulateurs TOR et PID	12
2.1 Introduction	12
2.2 Régulation Tout Ou Rien	12
2.2.1 Exemple de régulation TOR de température d'une enceinte thermique	13
2.2.2 Avantages et inconvénients de la commande TOR	14
2.2.3 Régulation TOR du TCLAB	15
2.3 Contrôleur PID	16
2.3.1 Principe de fonctionnement du régulateur PID	17
2.3.2 Composantes P, I, et D	17

TABLE DES MATIÈRES

2.3.3	Types de contrôleurs PID	18
2.3.4	Contrôleur P (Proportionnel)	18
2.3.5	Structures des PID	19
2.3.6	Réglage des paramètres PID	21
2.3.7	Réglage des paramètres PID par la fonction Matlab <code>pidtune</code>	23
2.4	Commande du TCLAB par contrôleurs PID	24
2.5	Synthèse de Contrôleurs PID pour la commande du TCLab	24
2.5.1	Simulation des contrôleurs PID synthétisés	25
2.5.2	Implémentation d'un PID sur le TCLab	26
2.6	Conclusion	28
3	Commande par modèle interne du TCLAB	29
3.1	Introduction	29
3.2	Commande par Modèle Interne	29
3.2.1	Structure de l'IMC	30
3.2.2	Avantages et Limitations de l'IMC	32
3.2.3	Applications de l'IMC	32
3.3	Commande par modèle interne du TCLab	33
3.3.1	Synthèse d'un contrôleur par la technique de commande par modèle interne du TCLab	33
3.3.2	Simulation de la commande par modèle interne du TCLab	34
3.3.3	Implémentation du IMC sur le TCLab	37
3.4	Conclusion	39
	Conclusion générale	40
	Bibliographie	42

Liste de symboles

TCLAB	Température Control Laboratoire
TIP31C	Transistors bipolaires
Q_1	Transistors 1
Q_2	Transistors 2
TMP36	Capteur de température
Q	Pourcentage de sortie de chauffage
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
ϵ	Emissivité.
T_0	Température initiale.
A	Surface entre les éléments chauffants 1 et 2.
α	Coefficient de transfert thermique.
C_p	Capacité thermique.
U	Coefficient de transfert de chaleur.
T_a	Température ambiante.
m	Masse
Y	vecteur des mesures de sortie.
u	vecteur des mesures d'entrée.
K_u	Gain critique.
t_{osc}	Période d'oscillation.
PID	Proportional-Integral-Derivative.
TOR	Régulateur Tout ou Rien
K_i	Action intégrale
K_d	Action Dérivée
K_P	Action proportionnel
Y_d	Consigne.
Y_m	Mesure
CMI	Commande par modèle interne
$C_{imc}(s)$	Fonctions de transfert du correcteur
$G_m(s)$	Modèle de système, obtenu par l'identification de système.
$U(s)$	Commande sortie du correcteur
$E(s)$	Erreur
$G(s)$	Fonction de transfert de système
$P(s)$	Perturbation non mesurée
$Y(s)$	Sortie de système.
n	Ordre du filtre
τ_f	Constante du temps du filtre
$F(s)$	Fonction de filtre passe bas .
$G_m^+(s)$	Partie non inversible de $G_m(s)$
$G_m^-(s)$	Partie inversible de $G_m(s)$
$H(s)$	Fonction de transfert en boucle fermée de commande (CMI)

Résumé

Le travail que nous allons présenter dans ce mémoire intitulé Synthèse et implémentation de lois de commande sur le TCLab, l'objectif principal est de démontrer comment des lois de commande variées peuvent être appliquées pour contrôler efficacement ce système, tout en analysant leurs performances respectives.

D'abord, ce travail vise à fournir une présentation détaillée du TCLab, en explorant sa composition, son utilité dans l'enseignement et la recherche, son développement historique, ainsi que les modèles mathématiques qui permettent de le décrire sa dynamique.

Ensuite, nous nous concentrons sur l'implémentation et l'analyse de deux techniques de régulation appliquées au procédé TCLab : le régulateur Tout ou Rien (TOR) et le régulateur Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID) en raison de leur simplicité et de leur efficacité.

Puis, nous aborderons la commande par modèle interne (IMC) appliquée au TCLab. La commande par modèle interne est une technique de contrôle avancée pour améliorer les performances et la robustesse du régulateur.

Mots clés

TCLab, Arduino, Capteurs de Températures, Transistors, Régulation Tout Ou Rien (TOR), Contrôleur PID, Contrôleur PI, Contrôleur PD, Commande par modèle interne (IMC).

Introduction générale

Dans le cadre de la formation en automatique, la compréhension et la mise en œuvre de techniques de commande efficaces constituent des éléments fondamentaux pour de notre formation en Master Automatique Industrielle. Le développement de compétences dans ce domaine passe souvent par l'expérimentation sur des systèmes réels ou simulés, permettant d'illustrer concrètement les concepts théoriques appris. Le procédé Temperature Control Laboratory (TCLab) se distingue comme un outil pédagogique et de recherche particulièrement adapté à cette fin [1]. En offrant une plateforme simple mais complète pour la mise en œuvre et l'analyse de diverses stratégies de commande, le TCLab permet d'acquérir une compréhension approfondie des principes de régulation et de leur application pratique [2][3].

Ce mémoire présent est consacré à la synthèse et à l'implémentation de différentes techniques de commande sur le TCLab. L'objectif principal est de démontrer comment des lois de commande variées peuvent être appliquées pour contrôler efficacement ce système, tout en analysant leurs performances respectives. Le travail s'articule autour de trois chapitres principaux.

Le premier chapitre est dédié à la description détaillée du TCLab et à la présentation des modèles mathématiques qui décrivent sa dynamique thermique. Nous y aborderons la composition du dispositif, son utilité pédagogique et ses applications en recherche, ainsi que son développement historique. La compréhension des modèles mathématiques, obtenus à la fois par modélisation physique et par identification, constitue une base essentielle pour les développements ultérieurs de stratégies de commande.

Le second chapitre explore deux techniques de régulation couramment utilisées dans les systèmes de contrôle industriels : le régulateur Tout ou Rien (TOR) et le régulateur Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID). Nous y présentons les principes de fonctionnement de ces régulateurs, leur implémentation pratique sur le TCLab, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus. Une comparaison des performances de ces deux régulateurs permettra de mettre en lumière leurs avantages et leurs limitations respectives. Enfin, le troisième chapitre se concentre sur

la commande par modèle interne (CMI) appliquée au TCLab. Cette technique de contrôle avancée repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique approché du système pour améliorer les performances et la robustesse du régulateur. Nous y détaillerons les principes de l'IMC, les étapes de sa mise en œuvre, ainsi que les résultats de simulations et d'expérimentations pratiques.

À travers cette étude, nous visons à démontrer non seulement la faisabilité de l'implémentation de différentes techniques de commande sur le TCLab, mais également leur efficacité relative, en fonction des exigences spécifiques du système et des objectifs de contrôle. Ce travail devrait fournir une base solide pour des applications pratiques en ingénierie de contrôle et offrir des perspectives pour des recherches futures dans ce domaine

Chapitre 1

Description, Modélisation et Identification de TCLab

1.1 Introduction

Dans le domaine du contrôle automatique, la mise en œuvre efficace de lois de commande repose largement sur une compréhension approfondie des systèmes sur lesquels elles sont appliquées. Le procédé TCLab (Temperature Control Laboratory) représente un exemple de ces systèmes, jouant un rôle crucial dans la formation et la recherche en ingénierie de contrôle [2][3].

Ce chapitre vise à fournir une présentation détaillée du TCLab, en explorant sa composition, son utilité dans l’enseignement et la recherche, son développement historique, ainsi que les modèles mathématiques qui permettent de le décrire sa dynamique.

1.2 Description du TCLAB

Le TCLab est un dispositif largement utilisé, ces dernières années, dans l’éducation et la recherche pour l’enseignement et l’expérimentation des techniques de contrôle de processus. Il se compose de deux éléments chauffants (H1 et H2) et de deux capteurs de température (T1 et T2), permettant une modélisation et un contrôle précis de la température [4].

Conçu comme une plateforme abordable et accessible au grand public, le TCLab est compatible avec MATLAB, Python et d’autres environnements de développement. Cette compatibilité facilite l’expérimentation et l’analyse dans divers contextes d’étude et de recherche [5].

1.2.1 Kit TCLab

Le TCLAB est un kit, open source, d'un petit système de commande de la température de deux éléments chauffants. Comme illustré en figure 1.1, ce kit est composé d'une carte Arduino Leonardo, d'une carte de circuit imprimé (PCB), d'une alimentation de puissance de $5V - 3A$ (prise, adaptateur et câble blanc) et d'un câble USB [4].

La carte de circuit imprimé est utilisée pour implanter et connecter à la carte Arduino les éléments du procédé à commander (voir figure 1.2), à savoir :

- deux éléments chauffants identiques (Q_1 et Q_2) représentant les actionneurs commandés du TCLAB. Ils sont réalisés par deux transistors $TIP31C$ qui sont des transistors bipolaires à jonction NPN en boîtier $TO - 220$,
- deux capteur de température $TMP36$ permettant de mesurer les températures de chacun des boîtiers des transistors Q_1 et Q_2 ,
- une diode électroluminescente (DEL),

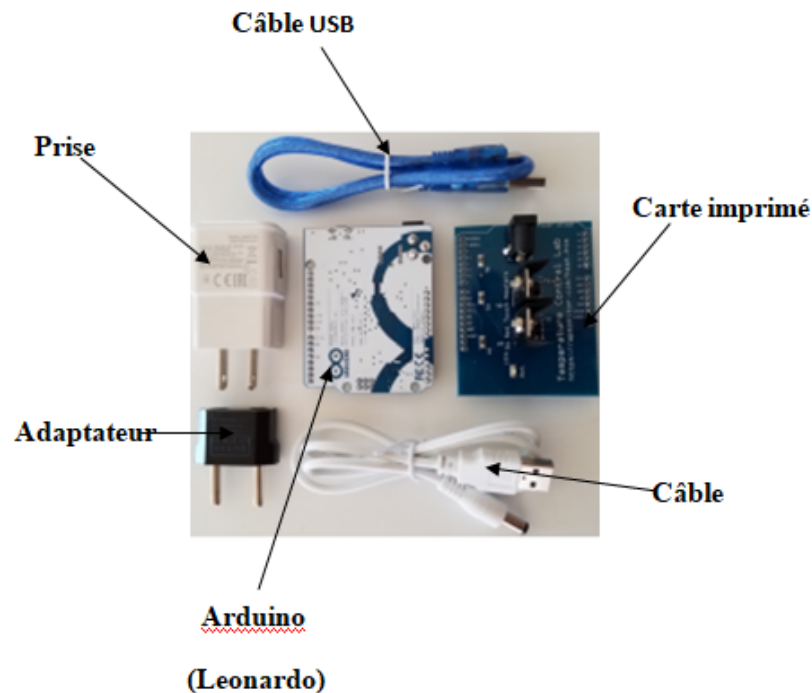


FIGURE 1.1 – Composants du kit AP Monitor Temperature Control Lab (TCLab)

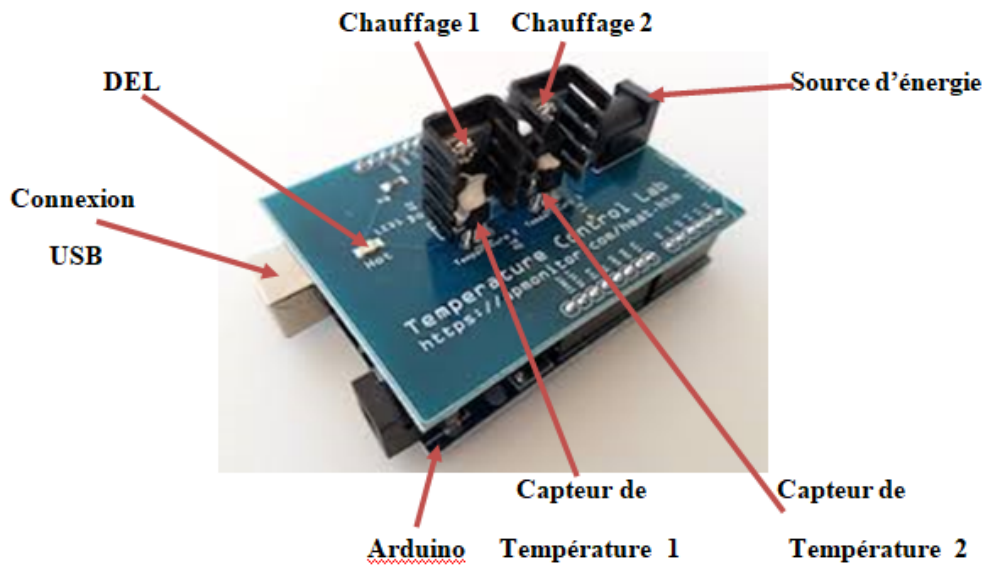


FIGURE 1.2 – Composants de la carte de circuit imprimé.

La carte Arduino est utilisée comme interface d'entrée/Sortie pour un PC sur lequel seront implémentés les algorithmes de commande de température des transistors Q_1 et Q_2 . Ces algorithmes sont écrits sous forme de programmes en Python ou en Matlab/Simulink. La connexion à la carte Arduino des éléments chauffants et des capteurs de température sont représentés en figure 1.3.

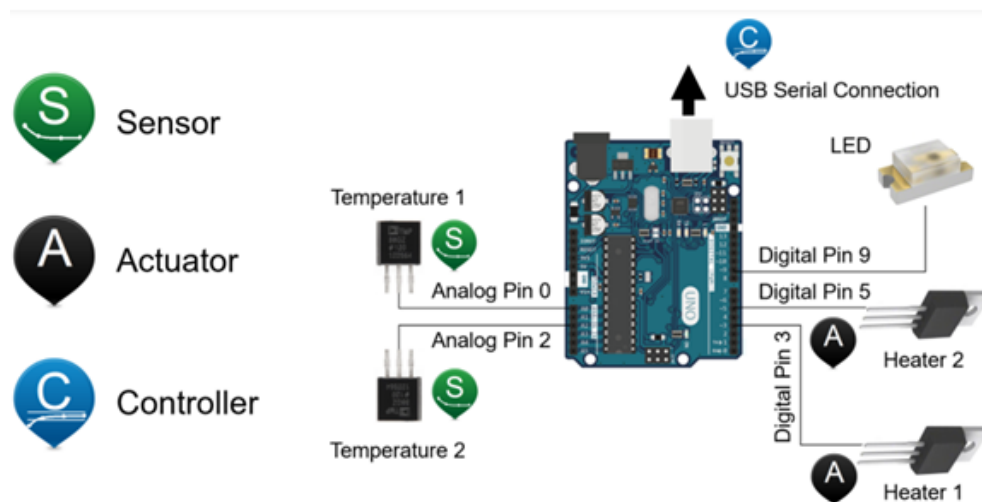


FIGURE 1.3 – Connexions à la carte Arduino des éléments chauffants et des capteurs de température.

1.2.2 Développement et utilisation du TCLAB

Le TCLab a été développé à l'Université Brigham Young, au USA, en réponse à un rapport de la National Science Foundation (NSF) qui soulignait le besoin d'une meilleure compréhension pratique du contrôle des processus et de la dynamique des systèmes chez les diplômés en génie chimique [3].

Après son développement, ce kit, peu coûteux et compact, a été distribué à plusieurs universités où il est couramment utilisé depuis, par les étudiants pour comprendre et appliquer, à travers des expériences pratiques, les principes de diverses techniques de commande de processus (commande ON/OFF, commande PID, commande floue, prédictive, commande multivariable, etc.) [6-8]. Il a été également utilisé par les ingénieurs et chercheurs pour développer, tester et implémenter des techniques de commande et de modélisation des processus.

1.2.3 Problèmes de Commande de température du TCLAB

Le problème de commande de température du TCLab consiste à contrôler avec précision les températures T_1 et T_2 des boîtiers des transistors Q_1 et Q_2 en ajustant les tensions de commande U_1 et U_2 , appliquées aux bases de ces transistors.

L'objectif de commande peut inclure un ou plusieurs éléments suivants :

- 1. Régulation de Température :** Maintenir les températures T_1 et T_2 à des valeurs de consigne fixes.
- 2. Suivi de Trajectoire :** Faire suivre à T_1 et T_2 des trajectoires de température prédéfinies.
- 3. Rejet des Perturbations :** Minimiser l'impact des perturbations externes sur les températures contrôlées.
- 4. Optimisation Énergétique :** Utiliser les tensions de commande U_1 et U_2 de manière optimale pour minimiser la consommation d'énergie.

Lorsqu'une seule entrée de commande (U_1 ou U_2) est utilisée pour réguler une seule température (T_1 ou T_2), on parle d'un problème de commande d'un système monovariable. En revanche, lorsque les deux entrées (U_1 et U_2) sont utilisées simultanément ou bien les deux températures (T_1 et T_2) sont contrôlées simultanément, on parle d'un problème de commande d'un système multivariable.

1.3 Modèles mathématiques du TCLAB

Cette partie présente les modèles mathématiques permettant de décrire la dynamique des températures T_1 et T_2 , mesurées par les capteurs de température en fonction des commandes U_1 et U_2 , appliquées aux éléments chauffants. Ces modèles sont de deux types ; les modèles de connaissances, obtenues par l'application des équation physiques régissant le fonctionnement du TCLab, et le modèle de comportement (appelé aussi modèles identifié), obtenus par opération d'identification donc par l'utilisation de mesures d'entrée/sortie et des algorithmes d'estimation des paramètres de modèles.

1.3.1 Modèles de connaissance du TCLAB

En application le principe de conservation d'énergie (l'équation du bilan énergétique) et certaines hypothèses simplificatrices (ci-dessous), le modèle permettant de définir la dynamique de la température T_1 et T_2 en fonction des commandes U_1 et U_2 peut être donné par les deux équations différentielles non linéaires suivantes [4] :

$$m c_p \frac{dT_1}{dt} = UA(T_a - T_1) + \epsilon \sigma A(T_a^4 - T_1^4) + Q_{C12} + Q_{R12} + \alpha_1 Q_1 \quad (1.1)$$

$$m c_p \frac{dT_2}{dt} = UA(T_a - T_2) + \epsilon \sigma A(T_a^4 - T_1^4) + Q_{C12} + Q_{R12} + \alpha_1 Q_2 \quad (1.2)$$

avec :

$$Q_{C12} = UA_s(T_2 - T_1) \quad (1.3)$$

$$Q_{R12} = \epsilon \sigma A(T_2^4 - T_1^4) \quad (1.4)$$

Dans le cas où il est question d'utiliser qu'une seule entrée de commande U_i ($i = 1$ ou $i = 2$) pour contrôler la température T_i , ce modèle se réduit à l'équation :

$$m c_p \frac{dT_1}{dt} = UA(T_a - T_1) + \epsilon \sigma A(T_a^4 - T_1^4) + Q_{C12} + Q_{R12} + \alpha_1 Q_1 \quad (1.5)$$

avec :

$$Q_{C12} = UA_s(T_a - T_1) \quad (1.6)$$

$$Q_{R12} = \epsilon \sigma A(T_a^4 - T_1^4) \quad (1.7)$$

Avec

m est la masse, c_p capacité thermique, U est le coefficient de transfert de chaleur, T_a est la température ambiante, α_1 est le coefficient de transfert thermique, A surface entre les

éléments chauffants 1 et 2, T_0 est la température initiale, ϵ est l'émissivité, σ est la constante de Stefan-Boltzmann, Q est le pourcentage de sortie de chauffage (en pourcentage (0–100%)), α est un coefficient qui relie la l'énergie dissipée par un transistors en watts. Les valeurs numériques exactes des paramètres des modèles précédents varient d'un modèle de TCLAB à un autre. Le Tableau 1.1 donne un exemple de ces valeurs :

Paramètre	Valeur	Unité
T_0	296,15	K
T_∞	296,15	K
Q	0 à 1	W
α	0,01	W
C_p	500	J/kg-K
A	$1,2 \cdot 10^{-3}$	m^2
m	0,004	kg
U	10	W/m ² -K
ϵ	0,9	-
σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$	W/m ² - K ⁴

TABLE 1.1 – Exemple de valeurs numériques des paramètres des modèles précédents [5].

1.3.2 Modèles de comportement du TCLAB

Les modèles de comportement utilisés dans notre étude décrivent la dynamique de la température $T1$ mesurée par le capteur collé au premier élément chauffant en fonction de la commande $U1$ appliquée à ce dernier. pour obtenir ces modèles, quatre étapes ont été réalisées :

Etape 1 : Acquisition d'une réponse indicielle

En première étape, le schéma Matlab Simulink de la figure 1.4 est implémenté pour obtenir la réponse à un échelon d'amplitude 1 (100% de la commande) du TCLab. la réponse indicielle obtenue est représenté en figure 1.5.

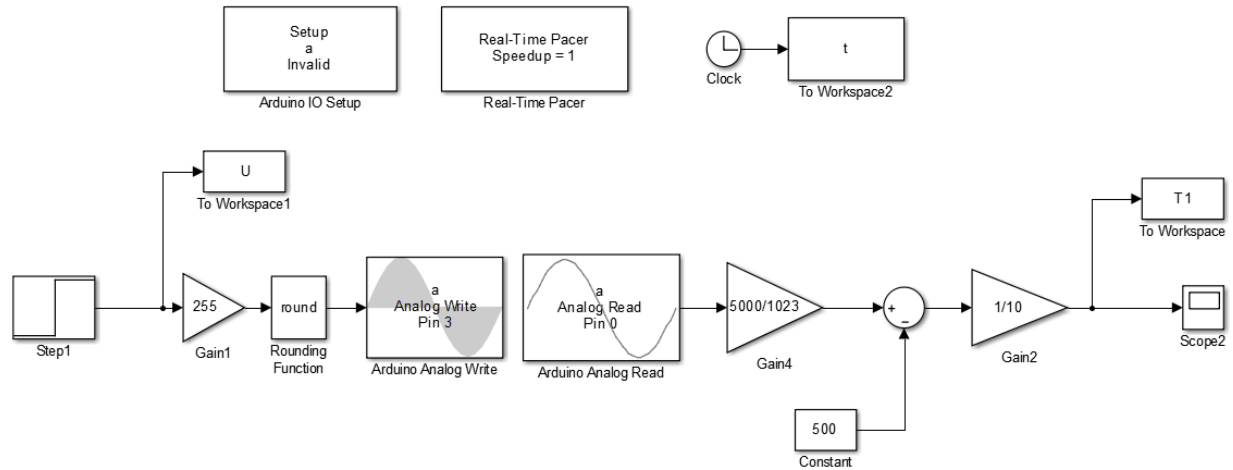


FIGURE 1.4 – Schéma simulink pour mesurer la réponse indicielle

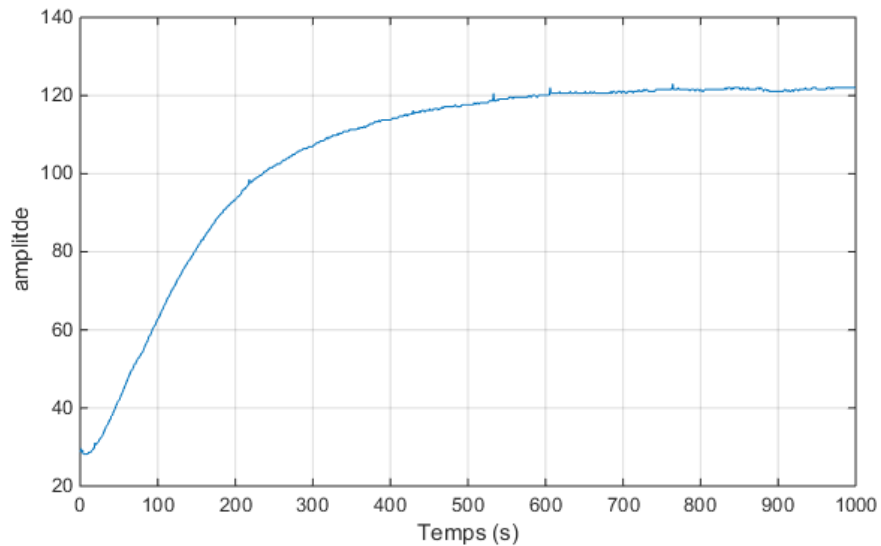


FIGURE 1.5 – Réponse indicielle mesurée

Le schéma de la **figure 1.4** est réalisé par l'utilisation des quatre blocs de la bibliothèque **Arduino IO Library**, qui est primordial pour piloter la carte Arduino sous Matlab/simulink. Ces blocs sont :

- **Arduino IO Setup**, utilisé pour définir le port la carte Arduino.
- **Real-Time Pacer**, utilisé pour fixer le rapport entre le temps de simulation (base de temps de "Matlab") et le temps d'exécution réel.
- **Arduino Analog Write**, représente une sortie PWM de la carte Arduino qui est connectée à la commande du premier élément chauffant (premier transistor).
- **Arduino Analog Read**, représente une entrée analogique de la carte Arduino, qui est

connectée au capteur de température T1.

Etape 2 : Élimination de la valeur initiale

Dans la seconde étapes, afin que la courbe de la température T1 commence par une valeur initiale nulle, les valeurs des mesures de température sont décalées vers le bas de la valeur $28,6^{\circ}C$ correspondant à la valeur initiale mesurée.

Etape 3 : Estimation paramétrique

En troisième étape la fonction `tfest` de Matlab est utilisée pour identifier trois modèles pour le TCLAB.

Le premier modèle est une fonction de transfert du premier ordre :

$$G_1(s) = \frac{0,6302 e^{-30s}}{s + 0,00675}$$

Le deuxième est une fonction de transfert du second ordre avec retard :

$$G_2(s) = \frac{0,0284 e^{-15s}}{s^2 + 0,05032s + 0,0003049}$$

Le troisième est une fonction de transfert du deuxième ordre sans retard :

$$G_3(s) = \frac{0,02656}{s^2 + 0,04747s + 0,0002852}$$

Etape 4 : Validations des modèles identifiés

En dernière étape, afin de valider les modèles identifiés, la fonction Matlab **compare** est utilisée pour comparer les réponse indicielles des modèles estimés à la réponse indicielle mesurée. Les résultats obtenus sont représentés en figure 1.6.

De ces résultats, on constate que les quatre réponses indicielles se superposent presque à 100%. Par conséquent, on conclut que les trois modèles identifiés peuvent être utilisés pour bien représenter la dynamique du premier élément chauffant du TCLab.

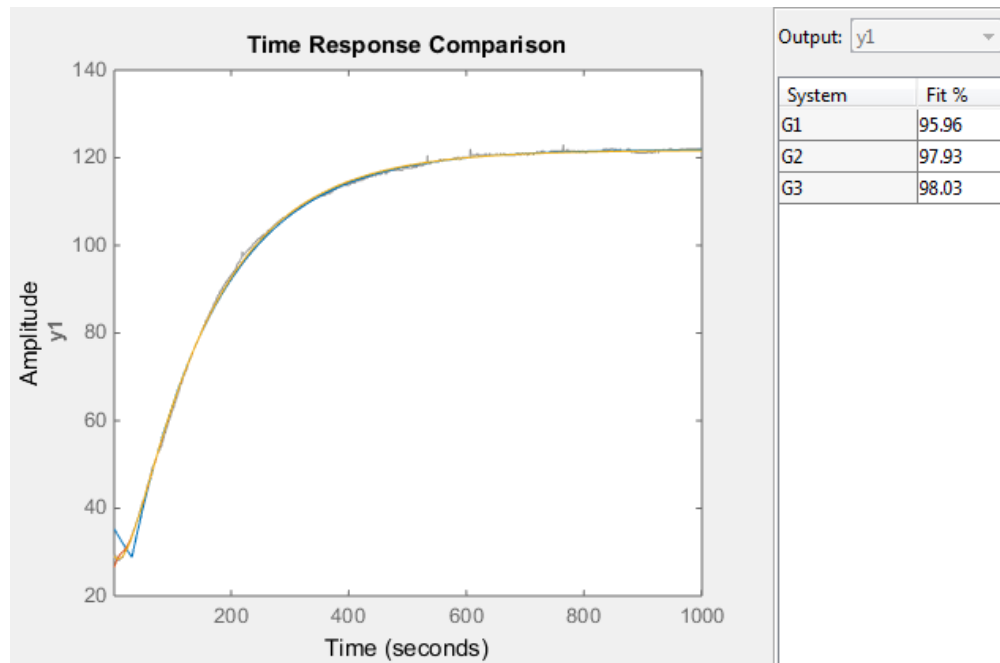


FIGURE 1.6 – Réponses indicielles estimées

1.4 Conclusion

Le TCLab se présente comme un outil essentiel dans le domaine du contrôle automatique, offrant une plateforme précieuse pour l'enseignement et la recherche. Nous avons examiné en détail sa composition physique, ainsi que son évolution historique. De plus, nous avons introduit les modèles mathématiques qui décrivent sa dynamique thermique, posant ainsi les bases nécessaires pour les développements de stratégies de commande efficaces.

Chapitre 2

Commande du TCLab par régulateurs TOR et PID

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur l'implémentation et l'analyse de deux techniques de régulation appliquées au procédé TCLab : le régulateur Tout ou Rien (TOR) et le régulateur Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID). Ces deux méthodes de contrôle sont couramment utilisées dans les systèmes de régulation industrielle en raison de leur simplicité et de leur efficacité. Nous commencerons par une exploration détaillée du régulateur TOR, en décrivant son principe de fonctionnement, sa mise en œuvre pratique sur le TCLab, et les résultats obtenus. Ensuite, nous aborderons le régulateur PID, les méthodes de réglage des paramètres, et sa performance expérimentale sur le TCLab. Enfin, une comparaison entre ces deux régulateurs permettra de mettre en évidence leurs avantages et inconvénients respectifs, et de déterminer les situations dans lesquelles l'un pourrait être préféré à l'autre.

2.2 Régulation Tout Ou Rien

La régulation « Tout Ou Rien » (TOR) appelée aussi régulation ON/OFF, est un type de régulateur qui élabore une action de commande discontinue qui prend deux positions ou deux états, généralement 0 et 100% [9].

Une régulation TOR est caractérisée par :

- Après l'établissement du régime permanent, le signal de sortie oscille autour de la valeur consigne, entre une valeur minimale et une valeur maximale.
- le signal de commande prend alternativement la valeur maximale (100% ou état ON) puis la valeur 0 (état OFF).
- lorsque la sortie est inférieure au seuil d'enclenchement le signal de commande prend la

valeur 1 (état ON),

- lorsque la sortie est supérieure au seuil déclenchement, le signal de commande prend la valeur 0 (état OFF),

La régulation TOR est basée sur une approche simple est efficace pour de nombreuses applications pratiques où une précision fine n'est pas nécessaire. Elle est souvent utilisée dans des systèmes où l'actionneur est également de type tout ou rien, comme les thermostats, les sécurités de surpression ou de niveau, et les fours domestiques.

2.2.1 Exemple de régulation TOR de température d'une enceinte thermique

La figure 2.1 présente les allures du signal de commande et du signal de sortie commandée, obtenues suite à l'application d'une commande TOR sur un système de contrôle de température avec une consigne de 5 degrés Celsius. On remarque que :

- Signal de commande est un signal binaire pour le chauffage (On/Off),
- Le chauffage s'enclenche si la température descend en dessous de la valeur 4.5 degrés Celsius (Seuil d'enclenchement),
- Le chauffage se coupe (se déclenche) si la température dépasse la valeur de 5.5 degrés Celsius (Seuil de déclenchement),
- Réponse du système commandé (la température commandée) fluctue entre 4 et 6 degrés Celsius en fonction de l'état du chauffage.

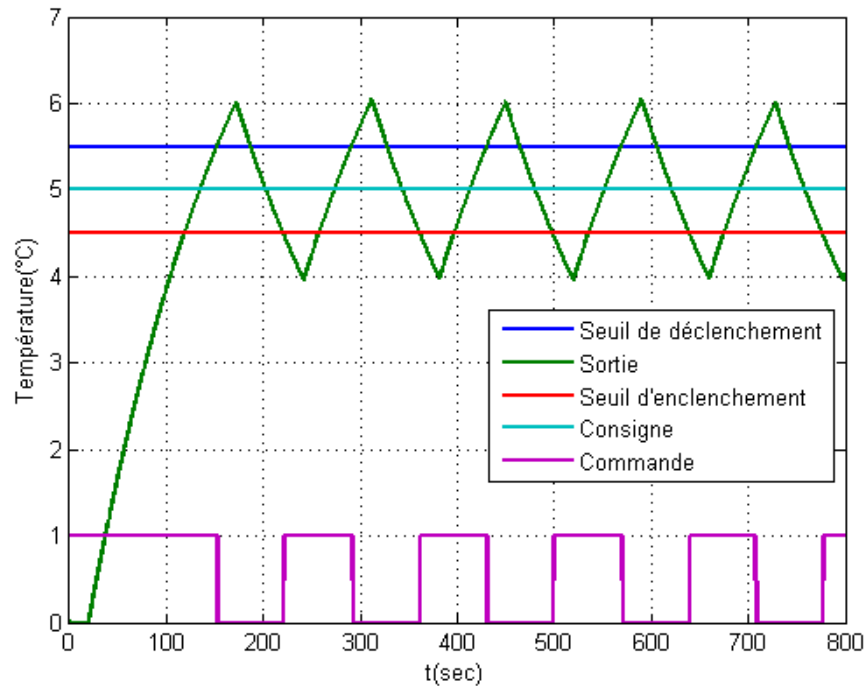


FIGURE 2.1 – Signaux de commande et sortie d'un système de régulation TOR de température

2.2.2 Avantages et inconvénients de la commande TOR

La commande TOR est un outil puissant pour des applications simples, mais pour des systèmes nécessitant un contrôle plus fin et plus stable, d'autres méthodes comme le contrôle proportionnel-intégral-dérivé (PID) peuvent être plus appropriées. Les avantages principaux de la régulation TOR sont :

1. Simplicité : Facile à mettre en œuvre et à comprendre.
2. Coût : Peu coûteuse en termes de composants et de calcul.
3. Robustesse : Fonctionne bien pour de nombreuses applications de base.

Les inconvénients majeurs de la commande TOR sont :

1. Oscillations : Peut provoquer des oscillations autour de la valeur de consigne, surtout si le système réagit rapidement.
2. Usure : Les commutations fréquentes peuvent entraîner une usure prématurée des composants mécaniques ou électriques.
3. Pas de contrôle fin : Ne permet pas de contrôle précis comme les contrôleurs PID par exemple.

2.2.3 Régulation TOR du TCLAB

Pour commander le TCLab par un régulateur nous avons réalisé le modèle Matlab/Simulink de la figure 2.2.

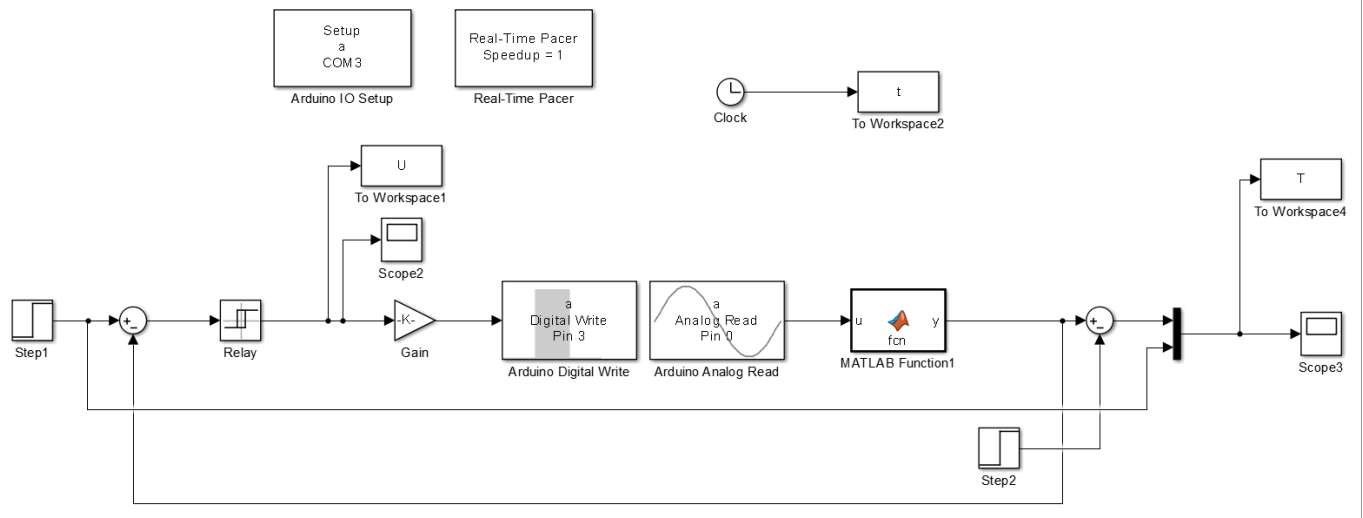


FIGURE 2.2 – Modèle Matlab Simulink de commande du TCLab par un régulateurTOR.

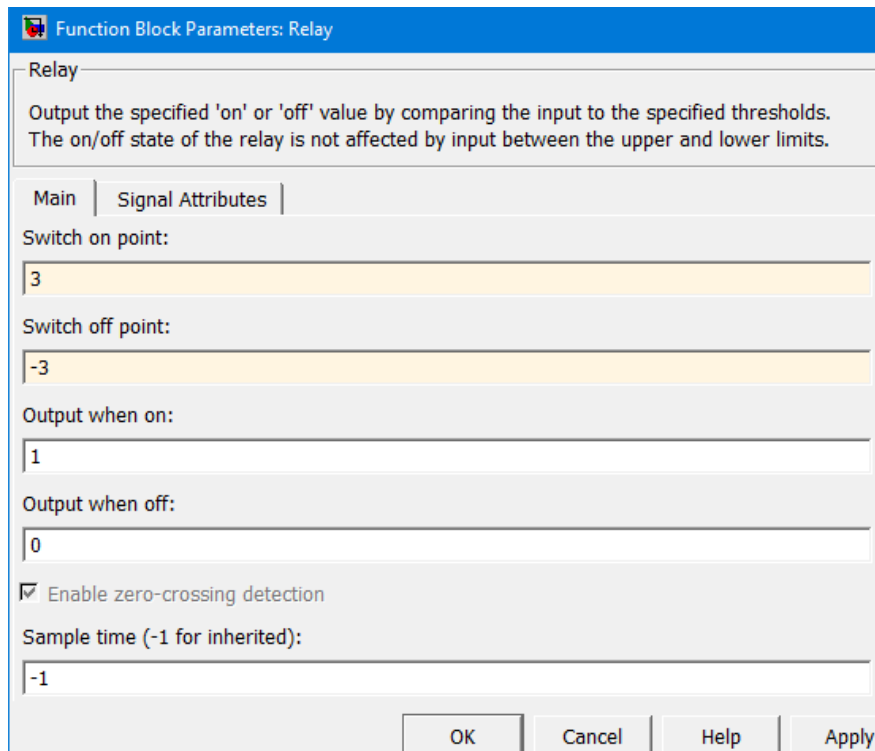


FIGURE 2.3 – Configuration du bloc Relay

Dans ce schéma (figure 2.2), le régulateur TOR est réalisée par le bloc Relay. Comme illustré par la figure 2.3 ,ce bloc est configuré comme suit :

- Le seuil d'enclenchement (Switch on point) est : 3,
- Le seuil de déclenchement (Switch off point) est : -3,
- La valeur du signal de commande lorsque le signal de sortie est supérieur au signal d'enclenchement (Output when on) est :1,
- La valeur du signal de commande lorsque le signal de sortie est supérieur au signal de déclenchement (Output when off) est : 0.

Après implémentation (exécution) de programme de la figure 2.2, les résultats enregistrés sont représentés sur la figure 2.4.

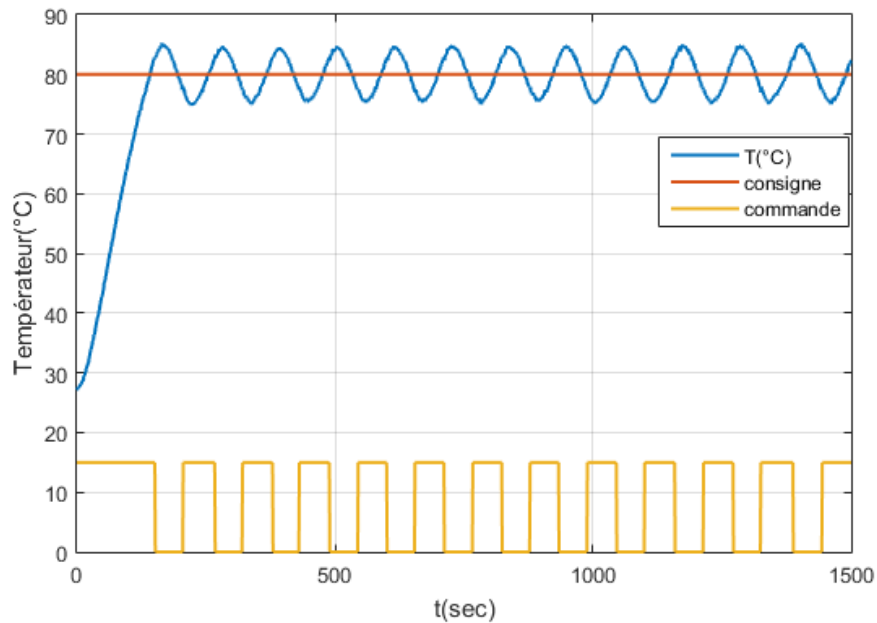


FIGURE 2.4 – Signaux de commande et de sortie obtenus après implémentation de la régulation TOR sur le TCLab.

A partir de ces résultats on constate que des que le régime permanent est établie, la sortie oscille autour de la valeur consigne avec des oscillations d'amplitude de 5^0C et de période de 110 seconde.

2.3 Contrôleur PID

Un contrôleur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) est un dispositif de contrôle utilisé dans les systèmes d'automatisation pour maintenir une variable de processus (comme la température, la pression, le débit, etc.) à une valeur désirée ou consigne en ajustant une

variable de commande. Il combine trois types de contrôles : proportionnel, intégral et dérivé, d'où son nom PID [10].

2.3.1 Principe de fonctionnement du régulateur PID

Le régulateur PID fonctionne en ajustant continuellement la sortie du contrôleur (variable de commande) en fonction de l'erreur entre la valeur mesurée de la variable contrôlée et la consigne, (l'entrée du contrôleur). L'équation générale d'un PID, définissant la relation mathématique entre sa variable de sortie et sa variable d'entrée, est donnée par [11] :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

où :

- $u(t)$ est la sortie du contrôleur.
- $e(t)$ est l'erreur, c'est-à-dire la différence entre la consigne $r(t)$ et la valeur mesurée $y(t)$: $e(t) = r(t) - y(t)$.
- K_p est le gain proportionnel.
- K_i est le gain intégral.
- K_d est le gain dérivé.

2.3.2 Composantes P, I, et D

Un contrôleur PID combine trois actions (contrôle) ; proportionnel, intégrale et dérivée.

Composante Proportionnelle (P)

La composante proportionnelle (P) produit une correction proportionnelle à l'erreur actuelle. La sortie proportionnelle est donnée par :

$$u_p(t) = K_p e(t) \quad (2.2)$$

L'effet de cette composante contribue à réduire l'erreur rapidement. Cependant, si le gain proportionnel K_p est trop élevé, il peut provoquer des oscillations et rendre le système instable.

Composante Intégrale (I)

La composante intégrale (I) produit une correction basée sur l'accumulation de l'erreur passée. La sortie intégrale est donnée par :

$$u_i(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

L'effet de cette composante élimine l'erreur résiduelle à long terme (erreur statique). Toutefois, une trop grande valeur de K_i peut rendre le système lent à réagir et provoquer des oscillations.

Composante Dérivée (D)

La composante dérivée (D) produit une correction basée sur la variation de l'erreur. La sortie dérivée est donnée par :

$$u_d(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

L'effet de cette composante anticipe la tendance de l'erreur, ce qui aide à réduire les oscillations et à stabiliser le système. Cependant, une trop grande valeur de K_d peut amplifier les bruits de mesure et provoquer des oscillations rapides.

2.3.3 Types de contrôleurs PID

Les contrôleurs PID se déclinent en plusieurs types selon les combinaisons de leurs composantes proportionnelle (P), intégrale (I), et dérivée (D). Chaque type a des caractéristiques et des applications spécifiques en fonction de la nature du système à contrôler.

2.3.4 Contrôleur P (Proportionnel)

Le contrôleur proportionnel est le plus simple des contrôleurs PID. Il applique une action proportionnelle à l'erreur mesurée.

Son équation temporelle et sa fonction de transfert sont :

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.5)$$

$$C(s) = K_p \quad (2.6)$$

Contrôleur PI (Proportionnel-Intégral)

Le contrôleur PI combine l'action proportionnelle avec une action intégrale, ce qui permet d'éliminer l'erreur statique.

Son équation temporelle et sa fonction de transfert sont :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (2.7)$$

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.8)$$

Contrôleur PD (Proportionnel-Dérivé)

Le contrôleur PD combine l'action proportionnelle avec une action dérivée, ce qui améliore la réponse dynamique du système en prédisant les changements futurs de l'erreur.

Son équation temporelle et sa fonction de transfert sont :

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.9)$$

$$C(s) = K_p + K_d \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (2.10)$$

Contrôleur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé)

Le contrôleur PID combine les trois actions : proportionnelle, intégrale et dérivée, ce qui permet d'améliorer à la fois la précision statique et la réponse dynamique du système.

Son équation temporelle et sa fonction de transfert sont :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.12)$$

2.3.5 Structures des PID

Un contrôleur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) peut être implémenté avec différentes structures. Ces dernières varient principalement dans la façon dont les termes proportionnel, intégral et dérivé sont combinés. Les deux structures, les plus courantes sont la structure parallèle, et la structure standard.

a- Structure parallèle

La structure parallèle du contrôleur PID est la plus couramment utilisée (figure 2.5). Dans cette structure, les termes proportionnel, intégral et dérivé sont calculés séparément puis additionnés :

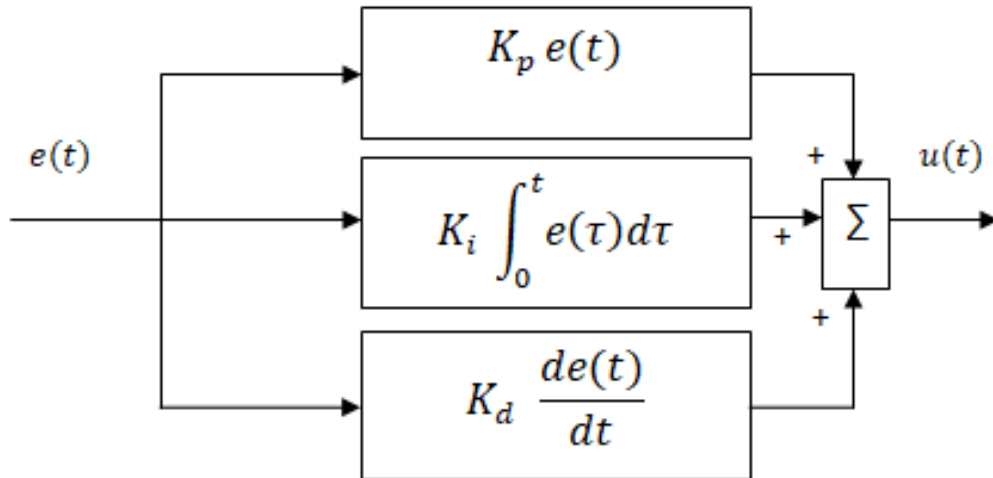


FIGURE 2.5 – Structure parallèle d'un PID

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.13)$$

où :

- $u(t)$ est la sortie du contrôleur.
- $e(t)$ est l'erreur, c'est-à-dire la différence entre la consigne $r(t)$ et la valeur mesurée $y(t)$: $e(t) = r(t) - y(t)$.
- K_p est le gain proportionnel.
- K_i est le gain intégral.
- K_d est le gain dérivé.

b- Structure standard (ou idéal)

La structure standard (figure 2.6), appelée aussi forme idéal ou forme mixte, du contrôleur PID est une variante de la forme parallèle où les termes intégral et dérivé sont multipliés par K_p avant d'être ajoutés :

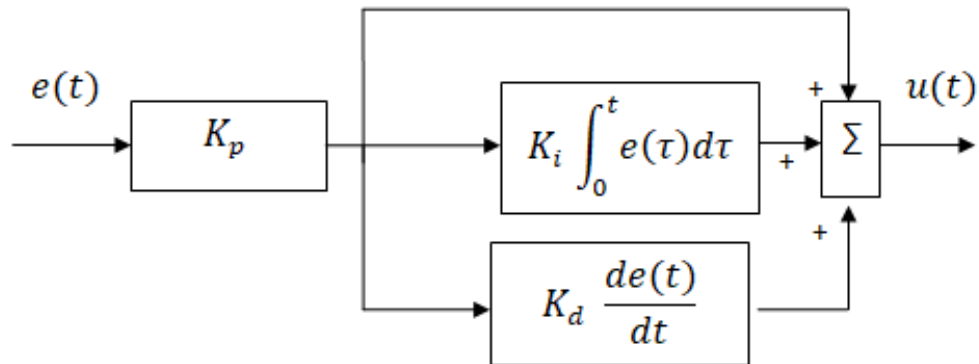


FIGURE 2.6 – Structure standard d'un PID

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.14)$$

2.3.6 Réglage des paramètres PID

Le réglage des paramètres d'un contrôleur PID (K_p , K_i , et K_d) est crucial pour obtenir une performance optimale du système. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour déterminer ces paramètres. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées on a :

a- Méthode de Ziegler-Nichols

La méthode de Ziegler-Nichols se décline en deux approches principales :

Méthode basée sur la réponse en boucle ouverte

Cette méthode consiste à déterminer les paramètres PID par l'utilisation de la réponse transitoire du système en boucle ouverte. la procédure à suivre est :

1. Effectuer un essai en boucle ouverte en appliquant une entrée en échelon au système.
2. Enregistrer la réponse transitoire et déterminer les constantes de la courbe de réaction (temps de retard L et pente R) (figure 2.7).

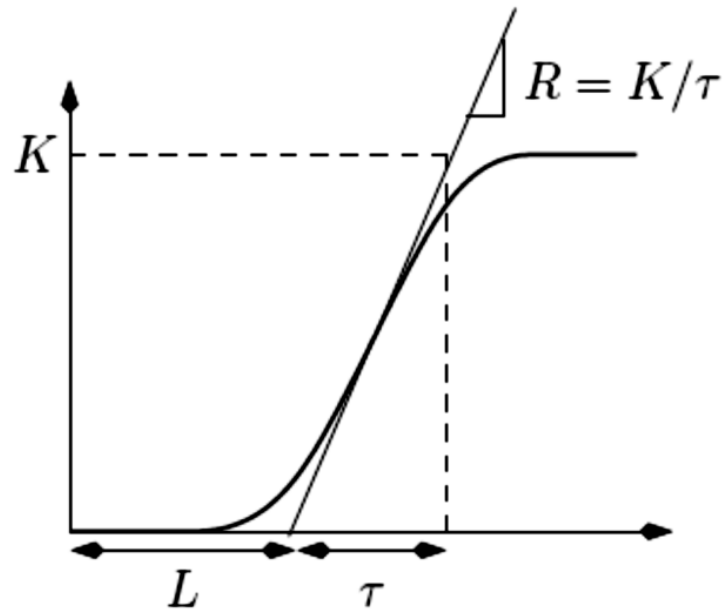


FIGURE 2.7 – Méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte

3. Utiliser les formules de Ziegler-Nichols pour calculer les paramètres PID :

$$K_p = 1,2 \frac{L}{R} \quad (2.15)$$

$$K_i = 2L \quad (2.16)$$

$$K_d = 0,5L \quad (2.17)$$

Méthode basée sur la réponse en boucle fermée

Cette méthode est basée sur la réponse du système en boucle fermée.

1. Régler K_i et K_d à zéro et augmenter K_p jusqu'à ce que le système atteigne une oscillation soutenue (gain critique K_u) (figure 2.8).

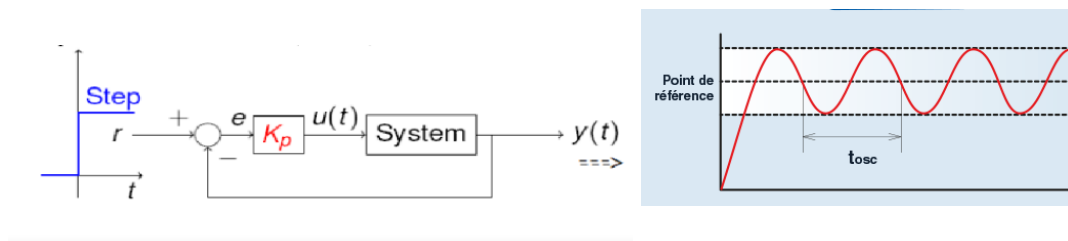


FIGURE 2.8 – Méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée

2. Mesurer la période d'oscillation t_{osc} .

3. Calculer les paramètres PID en utilisant les formules :

$$K_p = 0,6K_u \quad (2.18)$$

$$K_i = \frac{t_{osc}}{2} \quad (2.19)$$

$$K_d = \frac{t_{osc}}{8} \quad (2.20)$$

b- Méthode empirique

La méthode empirique consiste à ajuster manuellement les valeurs de K_p , K_i , et K_d jusqu'à ce que le système réponde de manière satisfaisante. la procédure à suivre est :

1. Régler K_i et K_d à zéro.
2. Augmenter K_p jusqu'à ce que le système réponde rapidement sans trop d'oscillations.
3. Ajouter K_i pour éliminer l'erreur statique, en augmentant progressivement jusqu'à ce que l'offset soit éliminé sans introduire d'oscillations excessives.
4. Ajouter K_d pour stabiliser le système et réduire les oscillations. Ajuster jusqu'à obtenir une réponse rapide et stable.

c- Méthode basée sur Optimisation d'un critère de performance

Les algorithmes d'optimisation, tels que les algorithmes génétiques ou la méthode de Levenberg-Marquardt, peuvent être utilisés pour trouver les paramètres PID optimaux. Ces méthodes automatisées recherchent les meilleurs paramètres en minimisant un critère de performance donné (par exemple, l'erreur quadratique moyenne).

2.3.7 Réglage des paramètres PID par la fonction Matlab `pidtune`

La fonction `pidtune` de MATLAB peut être utilisée pour ajuster les paramètres K_p , K_i , et K_d d'un contrôleur PID réalisant des spécifications de performance définies par l'utilisateur. La syntaxe de cette fonction est :

C = pidtune(sys, 'pid ', desiredspecs);

où :

- **sys** : est le modèle du système à commander (fonction de transfert par exemple),
- **pid** : le type (**p**, **pi** ou **pd**) du PID à régler,
- **desiredspecs** : définit les exigences désirées en boucle fermée par l'utilisation de la fonction `stepDataOptions`.

La fonction `pidtune` utilise des techniques d'optimisation internes pour ajuster les paramètres PID afin de répondre aux spécifications de performance définies par l'utilisateur, telles que le temps de montée, le dépassement, etc.

2.4 Commande du TCLAB par contrôleurs PID

Dans cette partie, nous abordons la commande du TCLab en utilisant des contrôleurs PID. Nous présentons les étapes de synthèse de trois contrôleurs PID différents, suivies de simulations pour évaluer leurs performances. Enfin, nous présenterons l'implémentation des deux contrôleurs les plus performants sur le TCLab.

2.5 Synthèse de Contrôleurs PID pour la commande du TCLab

a- PID par la Méthode de Ziegler-Nichols basée sur la réponse en boucle ouverte

En utilisant la réponse indicielle du TCLAB représenté en **figure 1.5**, les paramètres de la méthode de Ziegler-Nichols basée sur la réponse indicielle en boucle ouverte sont obtenues comme suit :

$$R(\text{pente}) = 225^{\circ}\text{C}$$

$$L(\text{retard}) = 15\text{s}$$

Par l'application des formules (2.15 - 2.17), on obtient le PID :

$$C_1(s) = 18 \left(1 + \frac{30}{s} + 7,5s \right) \quad (2.21)$$

b- PID par la Fonction MATLAB `pidtune` et la fonction de transfert $G_1(s)$

En considérant le modèle identifié du TCLAB $G_1(s)$, l'utilisation de la fonction `pidtune` de MATLAB à permet de synthétiser le PI :

$$C_2(s) = 0,01426 + \frac{0,00014}{s} \quad (2.22)$$

c- PID par la Fonction MATLAB `pidtune` et la fonction de transfert $G_3(s)$

En considérant le modèle identifié du TCLAB $G_3(s)$, l'utilisation de la fonction `pidtune` de MATLAB à permet d'obtenir le PID :

$$C_3(s) = 0,0192 + \frac{0,000176}{s} + 0,01294s \quad (2.23)$$

2.5.1 Simulation des contrôleurs PID synthétisés

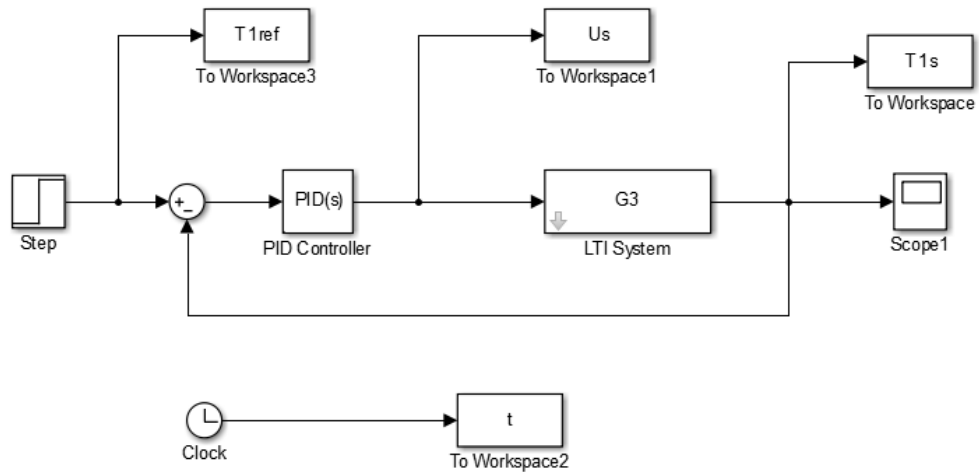


FIGURE 2.9 – Schéma de simulation de la commande du TCLAB par PID

Les résultats obtenus sont donnés par les figures 2.10-2.11.

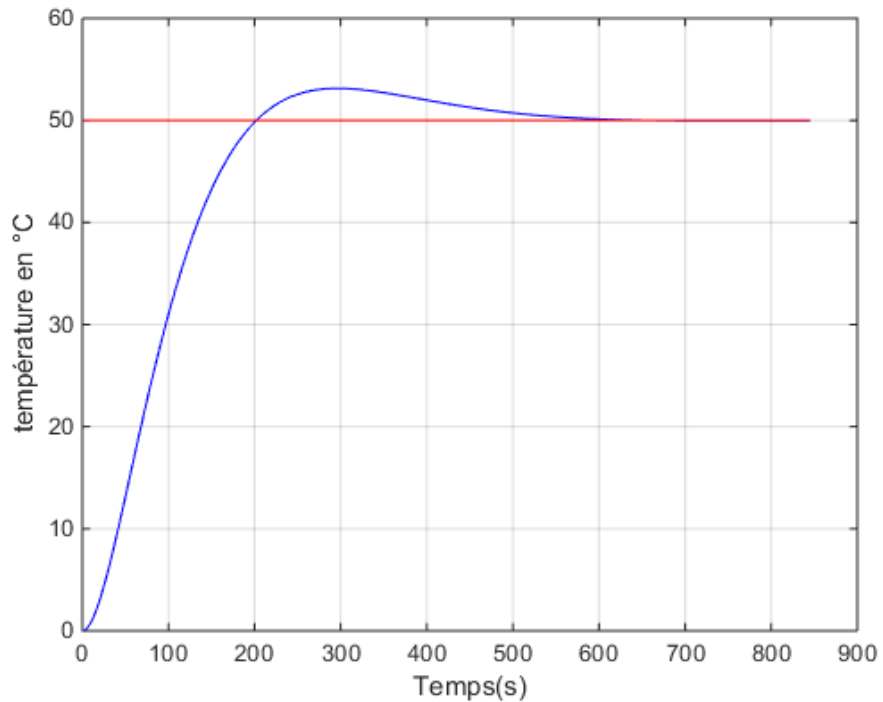


FIGURE 2.10 – Résultat de simulation de la commande du TCLAB par PID C2(s)

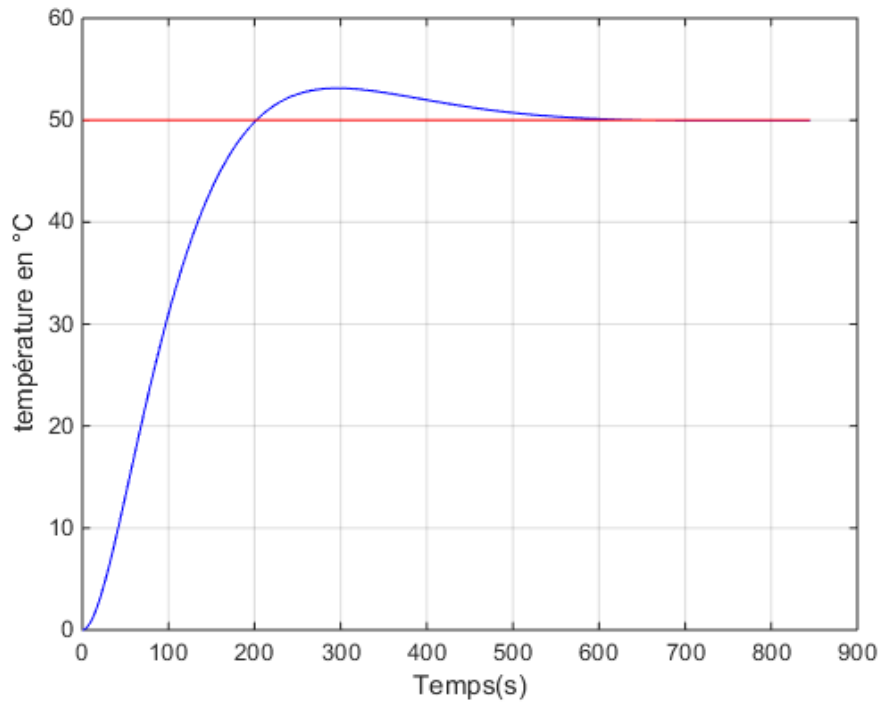


FIGURE 2.11 – Résultat de simulation de la commande du TCLAB par PID C3(s)

2.5.2 Implémentation d'un PID sur le TCLab

Après évaluation des performances PID synthétisés en simulation, les deux contrôleurs les plus performants (C2(s) et C3(s)) ont été implémentés pratiquement sur le TCLab pour évaluer et confirmer leurs performances en pratique. Cette implémentation est réalisée par l'utilisation du modèle Matlab Simulink suivant (figure 2.12)

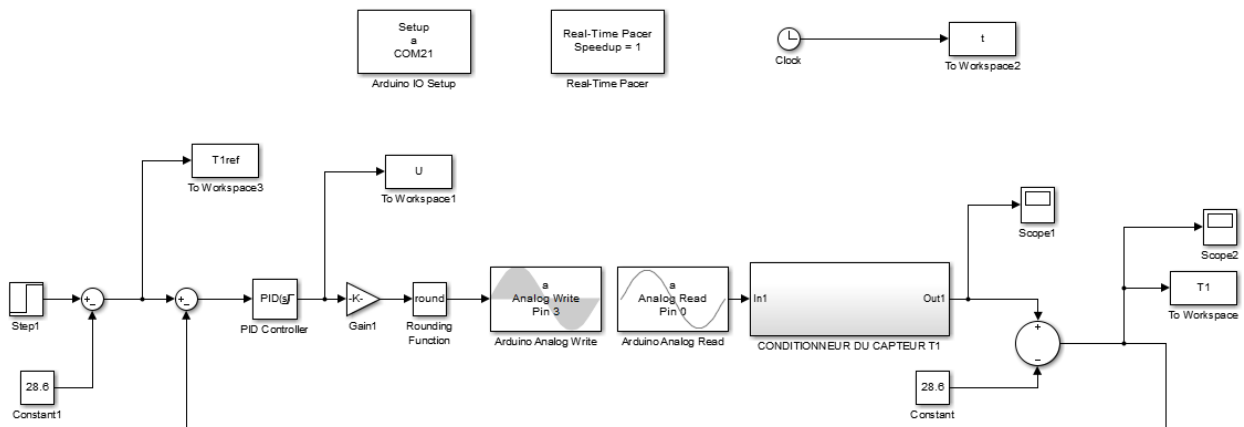


FIGURE 2.12 – Implémentation d'un PID sur le TCLab

Dans ce schéma, la commande du TCLAB est basée sur l'utilisation de l'approche de commande par MLI (modulation de largeur d'impulsion). En effet, le signal de commande, initialement (en sortie du PID) analogique et limité entre 0 et 1 est converti en un signal MLI par les sortie PWM de la carte Arduino, avant d'être appliqué aux transistors à commander. Les figures **2.13** et **2.14** suivantes donnent les courbes de la sortie commandé (Température T1) enregistrées à l'issue de l'implémentation des PID C2(s) et C3(s). De ces résultats, on constate que dans les deux cas, la sortie commandée suit la consigne avec de bonnes performances de précision et de rapidité.

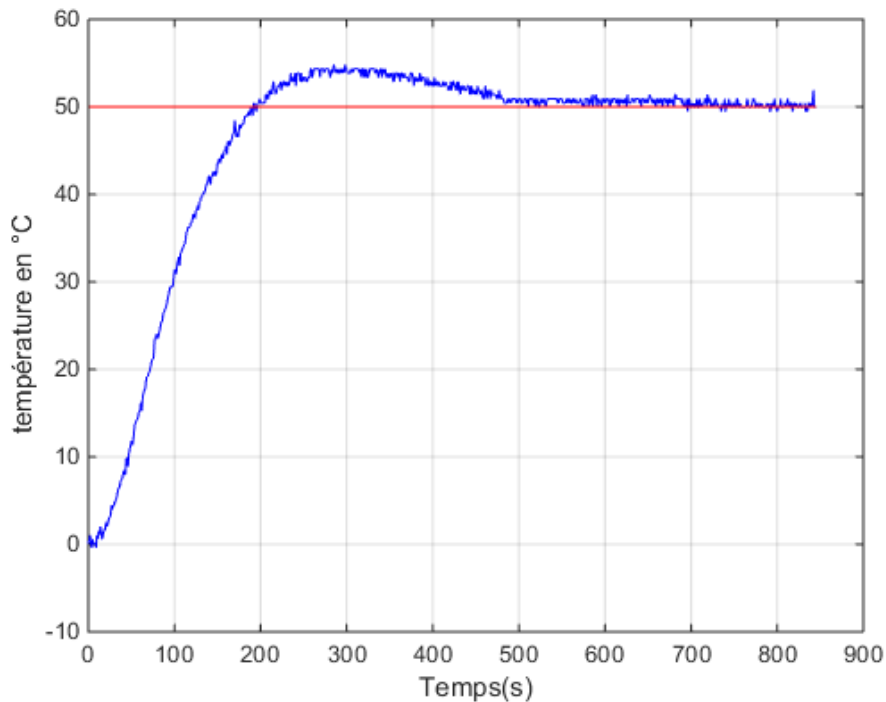


FIGURE 2.13 – : Résultat d'implémentation de la commande du TCLab par C2(s)

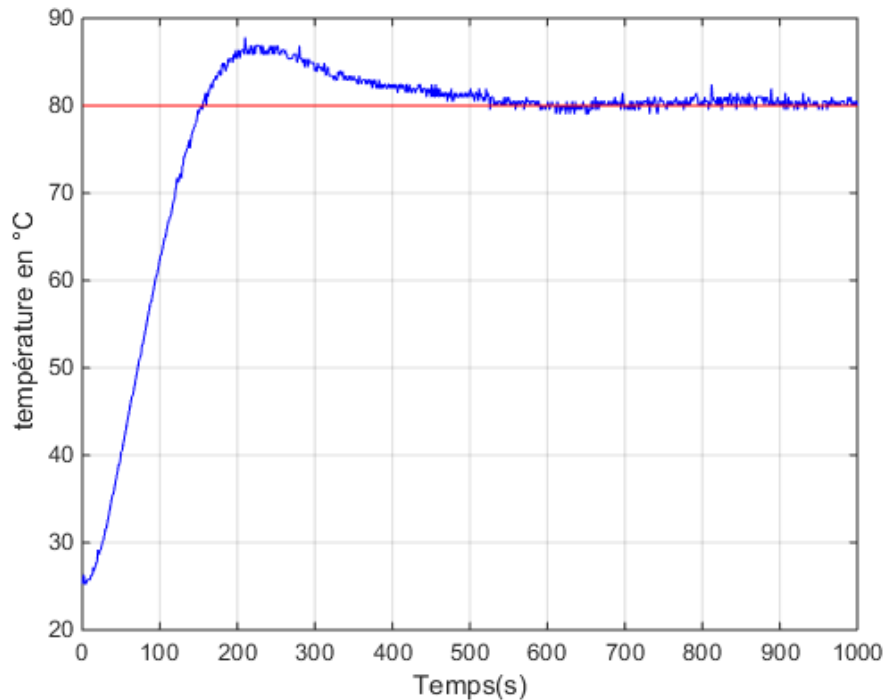


FIGURE 2.14 – Résultat d’implémentation de la commande du TCLab par C3(s)

2.6 Conclusion

Ce chapitre a fourni une présentation des régulateurs Tout ou Rien (TOR) et Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID) appliqués au procédé TCLab. Nous avons montré comment chaque méthode peut être implémentée et avons évalué leurs performances à travers des expérimentations pratiques. Le régulateur TOR, bien que simple et efficace pour des applications basiques, présente des limitations notamment en termes de précision. En revanche, le régulateur PID offre une réponse plus fine et adaptable, permettant un contrôle plus précis du système, bien qu’il nécessite un réglage plus complexe de ses paramètres.

Chapitre 3

Commande par modèle interne du TCLAB

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons la commande par modèle interne (IMC) appliquée au TCLab. La commande par modèle interne est une technique de contrôle avancée qui repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique approché du système à contrôler pour améliorer les performances et la robustesse du régulateur. Cette méthode est particulièrement adaptée aux systèmes où une modélisation précise ne peut pas être obtenue, comme c'est le cas pour le TCLab.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation théorique de la commande par modèle interne. Nous y détaillerons les principes fondamentaux de cette méthode, ses avantages et ses limitations, ainsi que les étapes nécessaires à sa mise en œuvre. La deuxième partie traitera de la simulation de la commande par modèle interne appliquée au TCLab, en utilisant le modèle identifié du système. Enfin, la troisième partie sera dédiée à la synthèse et à l'implémentation pratique de la commande par modèle interne sur le TCLab. Nous décrirons les étapes de l'implémentation et les résultats expérimentaux.

3.2 Commande par Modèle Interne

La commande par modèle interne (CMI ou IMC en anglais pour Internal model Control) est une stratégie de contrôle avancée qui utilise un modèle approché (dit modèle interne) du processus pour concevoir un régulateur robuste. Cette méthode est largement appréciée pour sa simplicité conceptuelle et son efficacité dans le traitement des incertitudes du modèle et des perturbations [12].

3.2.1 Structure de l'IMC

Comme illustré par la figure 3.1, la structure de l'IMC inclut un modèle approché (modèle interne) du processus à commander ($G_m(s)$), un contrôleur C_{IMC} , et un feedback entre la sortie du modèle et celle du processus réel [12].

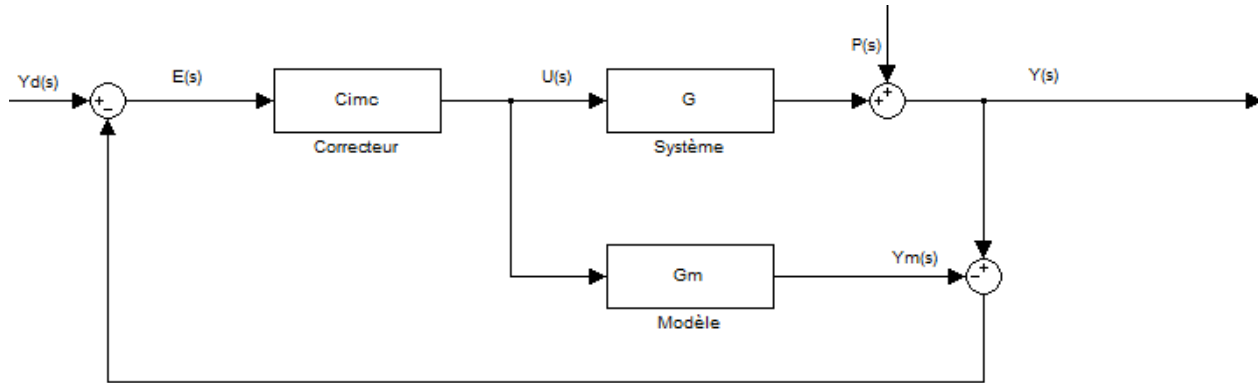


FIGURE 3.1 – Structure de commande par modèle interne

Dans ce schéma bloc :

$G(s)$: modèle exacte du système à commander.

$Y(s)$: la sortie de système à commander.

$G_m(s)$: le modèle approché de système, obtenu par l'identification par exemple.

$C_{IMC}(s)$: le correcteur de commande par modèle interne.

$Y_d(s)$: la consigne.

$P(s)$: perturbation.

$U(s)$: la commande.

Généralement, $G(s)$ et $G_m(s)$ sont différents de plus les perturbations $P(S)$ sont inconnues, donc $Y_m(s)$ est différent de $Y(s)$.

En considérant le schéma de la structure de commande à modèle interne (C_{IMC}) de figure (3.1).

L'expression de la sortie est :

$$Y(S) = P(s) + G(s)C_{IMC}(s)E(s) \quad (3.1)$$

L'écart entre la consigne et la sortie est donnée par :

$$E(s) = Y_d(s) - Y(s) + Y_m(s) \quad (3.2)$$

Avec :

$$Y_m(s) = G_m(s)C_{IMC}(s)E(s) \quad (3.3)$$

En remplaçant les équations (3.1) et (3.3) dans l'équation (3.2), on obtient :

$$E(s) = \frac{1}{1 + G(s)C_{IMC}(s) - G_m(s)C_{IMC}(s)}(Y_d(s) - P(s)) \quad (3.4)$$

Ensuite, en remplaçant l'équation (3.4) dans l'équation (3.1), on aura :

$$Y(s) = \frac{1 - G_m(s)C_{IMC}(s)}{1 + G(s)C_{IMC}(s) - G_m(s)C_{IMC}(s)}P(s) + \frac{G(s)C_{IMC}(s)}{1 + G(s)C_{IMC}(s) - G_m(s)C_{IMC}(s)}Y_d(s) \quad (3.5)$$

Deux performances sont généralement exigées pour le concepteur :

Une poursuite de consigne parfaite ($Y(s) = Y_d(s)$) lorsqu'on ne tient pas compte de perturbations ($P(s) = 0$).

Rejet de perturbation, donc une influence de $P(s)$ minimale, lorsqu'on se trouve en régulation $Y_d(s) = 0$.

Pour que le contrôleur de commande par modèle interne réalise ces deux performances, la procédure à suivre pour le calculer est donnée comme suit :

Étape 1 : On décompose le modèle $G_m(s)$ du procédé sous la forme d'un produit de deux facteurs, le premier $G_m^-(s)$ contenant les retards purs et les zéros positifs ou à partie réelle positive :

$$G_m(s) = G_m^-(s)G_m^+(s) \quad (3.6)$$

Étape 2 : On retient seulement $G_m^+(s)$ (pour écarter les retards purs et les zéros positifs ou à partie réelle positive) et on filtre l'inverse de $G_m^-(s)$ (pour rendre le correcteur réalisable physiquement).

La fonction de transfert du correcteur réel est alors donnée par :

$$C_{IMC}(s) = \frac{F(s)}{G_m^-(s)} \quad (3.7)$$

Où $F(s)$ est la fonction de filtre passe bas qui doit être choisi pour assurer la stabilité et les performances souhaitées.

$$F(s) = \frac{1}{(1 + \tau_f s)^n} \quad (3.8)$$

Où

n : l'ordre du filtre qui est choisi de sorte que le contrôleur soit causal.

τ_f : constante de temps que l'on souhaite imposer à la boucle fermée, elle est déterminée par la performance désirée du système.

Un τ_f plus petit peut fournir une réponse en boucle fermée plus rapide, tandis qu'un τ_f plus

grand augmente la constante de temps en boucle fermée, c'est-à-dire ralentit la rapidité de la réponse.

3.2.2 Avantages et Limitations de l'IMC

Avantages

- **Simplicité de conception** : La structure de l'IMC est simple et intuitive.
- **Robustesse** : Le contrôleur IMC peut être conçu pour gérer les incertitudes du modèle.
- **Performance** : il offre de bonnes performances de poursuite et de régulation pour des systèmes bien modélisés.

Limitations

- **Dépendance au modèle** : La performance de l'IMC dépend fortement de la précision du modèle interne.
- **Filtres additionnels** : Nécessite l'ajout de filtres pour gérer les bruits de mesure et les incertitudes.

3.2.3 Applications de l'IMC

La technique IMC est utilisée dans diverses applications :

Contrôle de Température

L'IMC est largement utilisé dans le contrôle de la température, notamment dans les systèmes HVAC et les processus chimiques, où une régulation précise est cruciale.

Contrôle de Débit

L'IMC trouve également des applications dans le contrôle de débit, par exemple dans les réseaux de distribution de fluides, où des variations de débit doivent être compensées rapidement et efficacement.

3.3 Commande par modèle interne du TCLab

Cette partie présente la commande par modèle interne du TCLab. En premier lieu la synthèse d'un contrôleur par la technique de commande par modèle interne est présentée. Puis, l'évaluation des performances de ce contrôleur est réalisée.

3.3.1 Synthèse d'un contrôleur par la technique de commande par modèle interne du TCLab

En considérant la fonction de transfert $G_1(s)$ comme étant un modèle interne du TCLab et en suivant la procédure précédente :

On a

$$G_1(s) = \frac{0,6302 e^{-30s}}{s + 0,00675}$$

La fonction de transfert $G_1(s)$ admet un retard, donc :

$$G_1(s) = G_1^-(s) \cdot G_1^+(s)$$

Où

$$G_1^-(s) = \frac{0,6302}{s + 0,00675} \text{ est la partie inversible de } G_1(s)$$

$$G_1^+(s) = e^{-30s} \text{ est la partie non-inversible de } G_1(s)$$

Et fonction de transfert du filtre est :

$$F(s) = \frac{1}{(1 + \tau_f s)^n}$$

Où

$$\tau_f = 60 \text{ et } n = 2$$

On obtient comme contrôleur par modèle interne :

$$C_{imc} = \frac{F(s)}{G_1^-(s)}$$

$$C_{imc} = \frac{s + 0,00675}{2269s^2 + 75,62s + 0,6302}$$

3.3.2 Simulation de la commande par modèle interne du TCLab

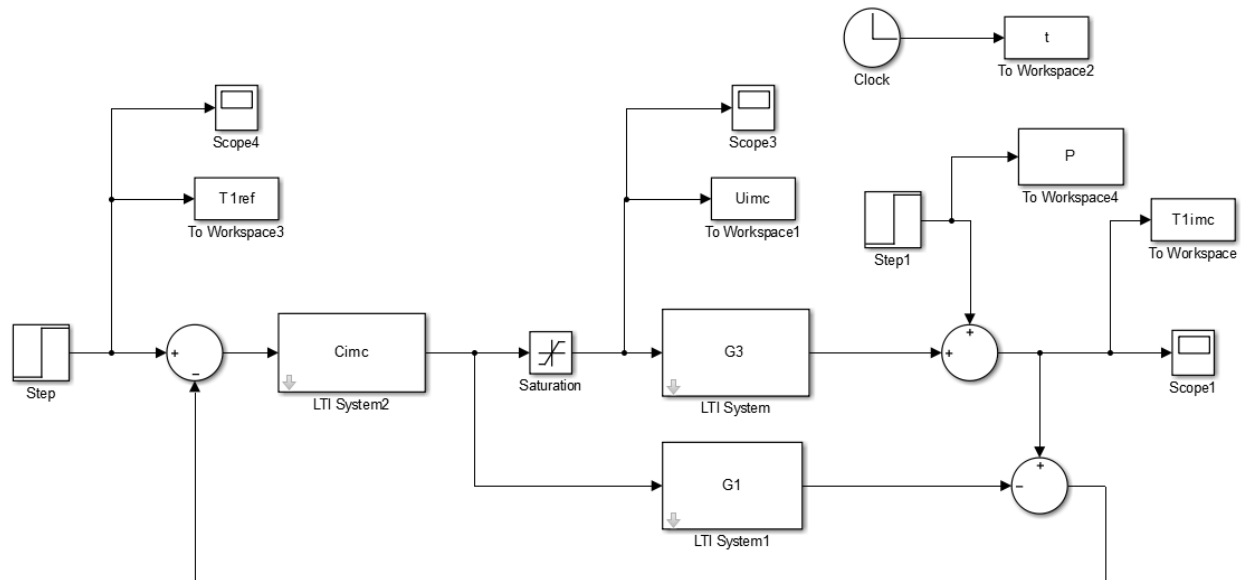


FIGURE 3.2 – Schéma de simulation de la commande du TCLAB par modèle interne

Pour évaluer les performances du contrôleur synthétisé, plusieurs simulations sont réalisées.

Dans ces simulations, le modèle exact du TCLab est considéré comme étant la fonction de transfert $G_3(s)$

Les résultats de simulation obtenues sont présentés en figures (3.3-3.5)

De ces résultats, on constate la consigne est suivie par la sortie commandée avec une bonne précision, rapidité. Ce qui montre que la commande par modèle interne permet d'assurer au TCLab de bonnes performances en termes de poursuite et de rejet de perturbation.

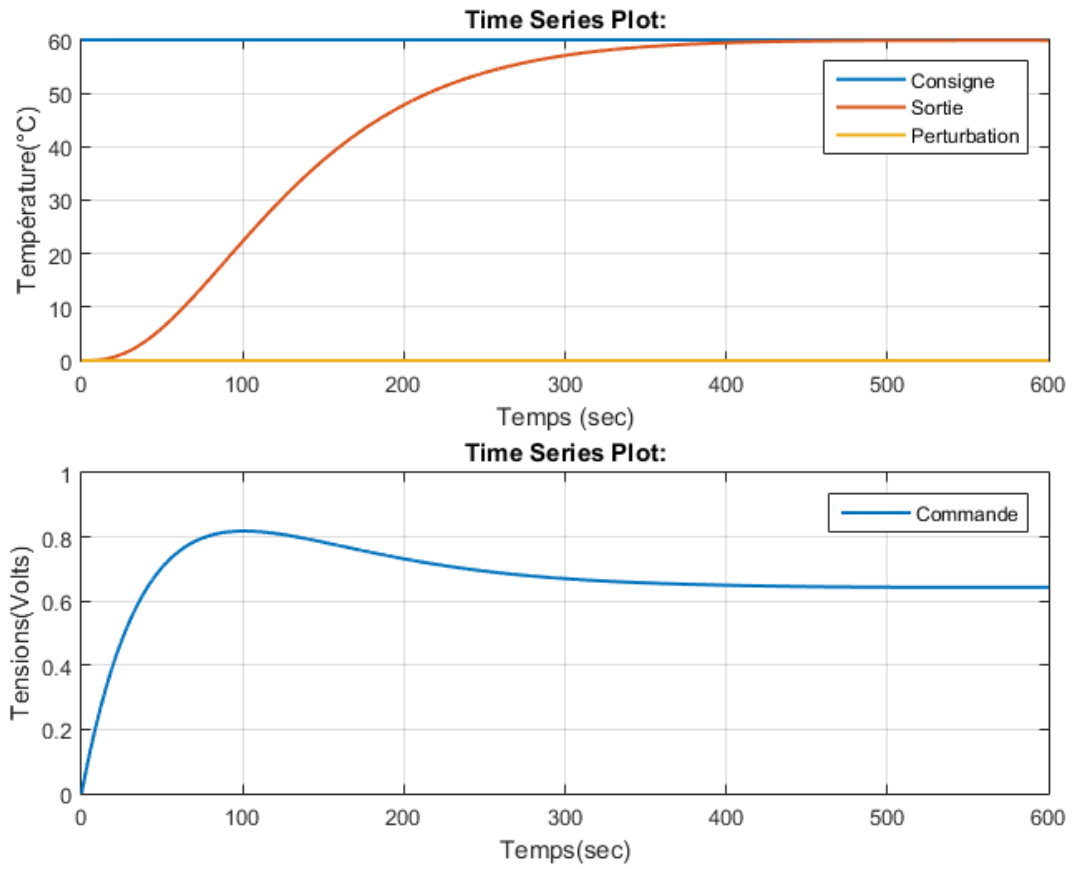


FIGURE 3.3 – Résultat de simulation de la commande par modèle interne du TCLab avec Perturbation=0

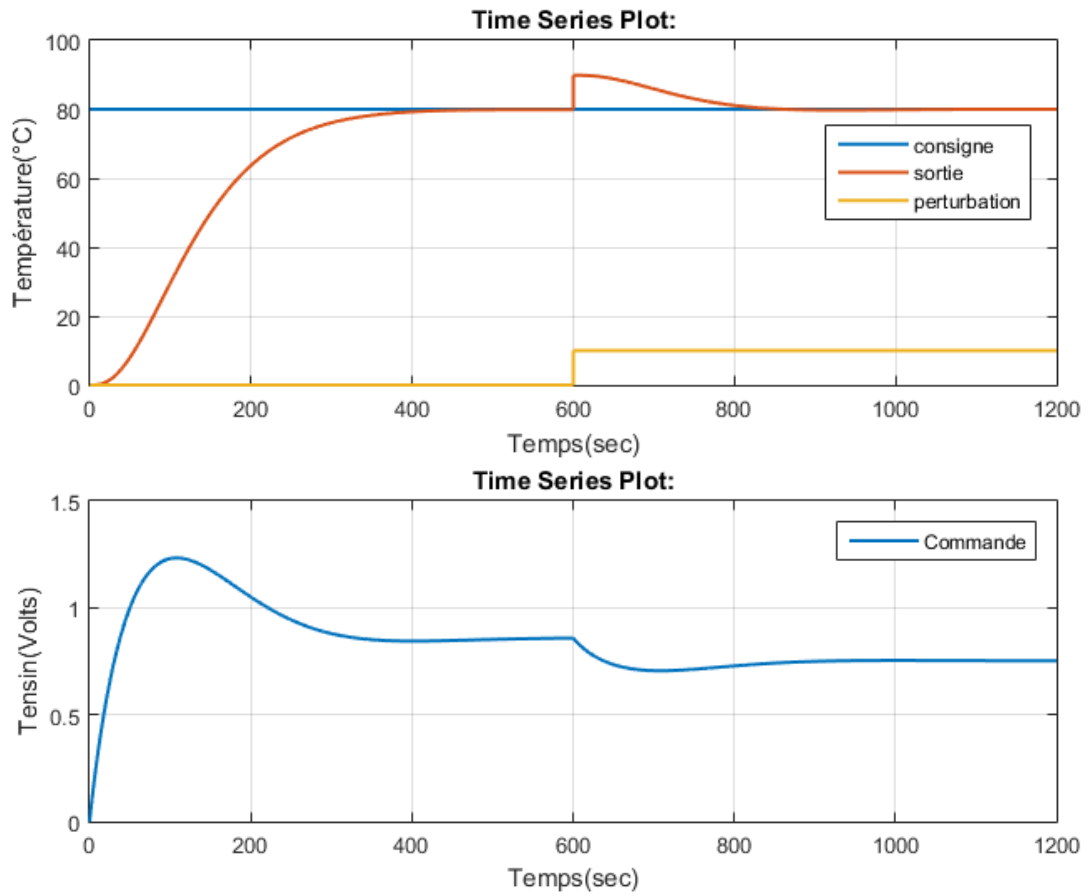


FIGURE 3.4 – Résultat de simulation de la commande par modèle interne du TCLab avec perturbation=10°C à temps=600 sec

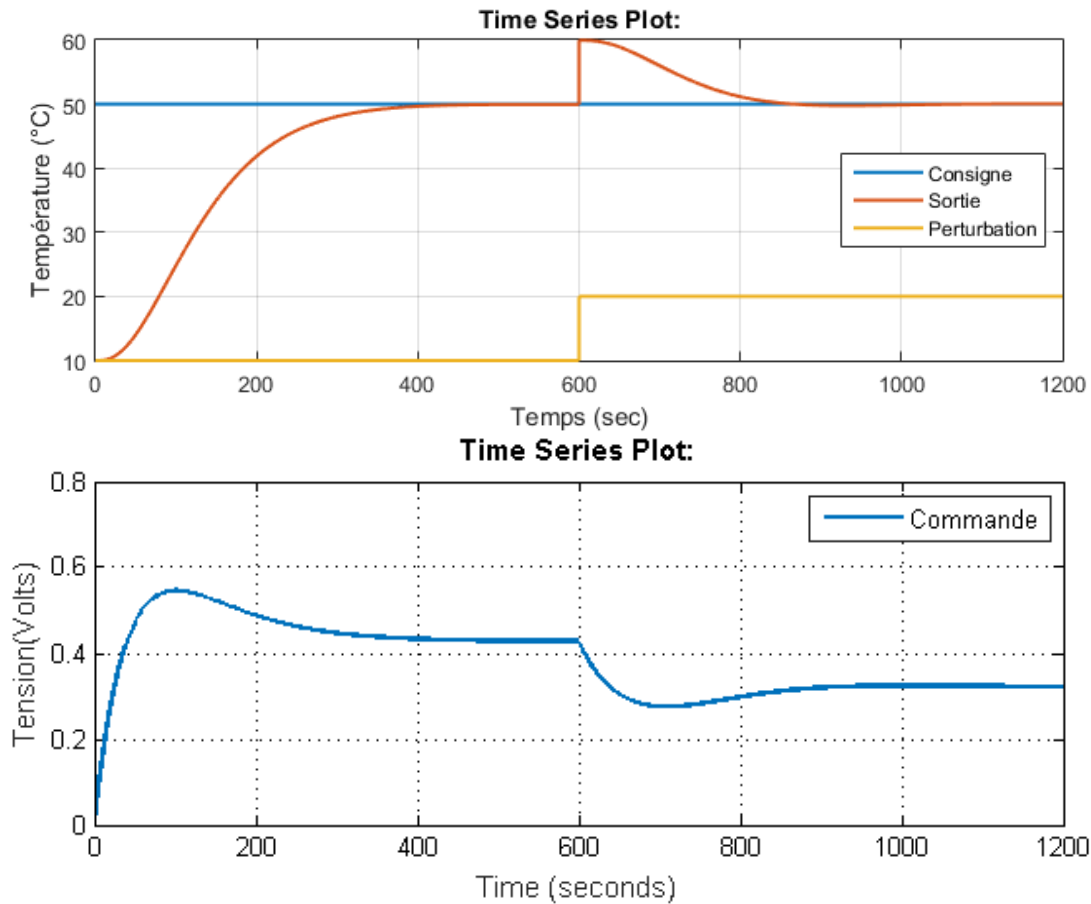


FIGURE 3.5 – Résultat de simulation de la commande par modèle interne du TCLab avec perturbation

3.3.3 Implémentation du IMC sur le TCLab

Implémentation du IMC sur le TCLab est réalisée par l'utilisation du modèle Matlab Simulink suivant (figure 3.6)

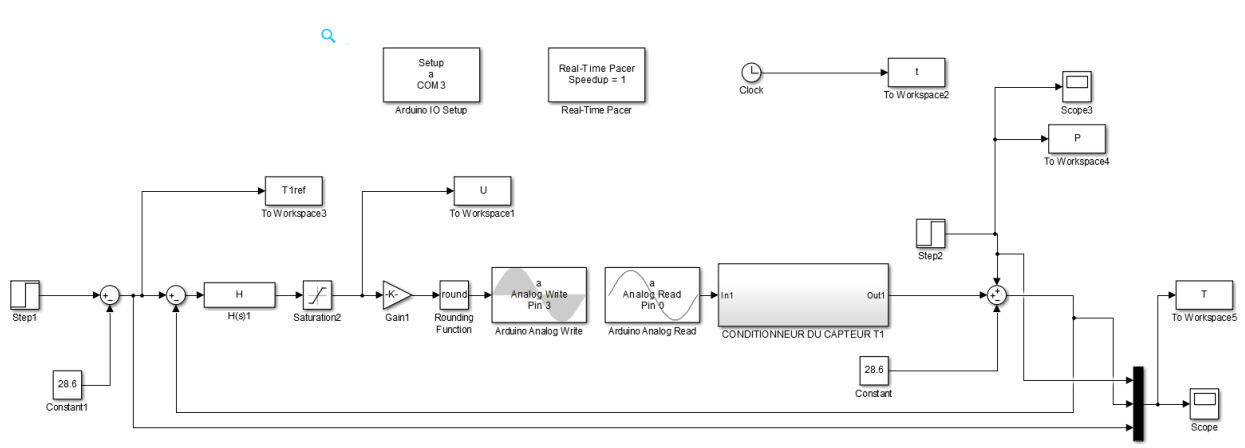


FIGURE 3.6 – Schéma bloc d'implémentation du correcteur CMI continu sur le système TCLAB

Où

$$H(s) = \frac{C_{imc}}{1 - C_{imc}G_1} \quad (3.9)$$

$$H(s) = \frac{2269s^4 + 106,3s^3 + 1,754s^2 + 0,01195s + 2,871 * 10^{-5}}{5,148 * 10^6s^5 + 3,779 * 10^5s^4 + 9465s^3 + 95,91s^2 + 0,3217s} \quad (3.10)$$

Les figures 3.7 et 3.8 donnent les courbes de sortie et de commande après implémentation de la commande par modèle interne du TCLab

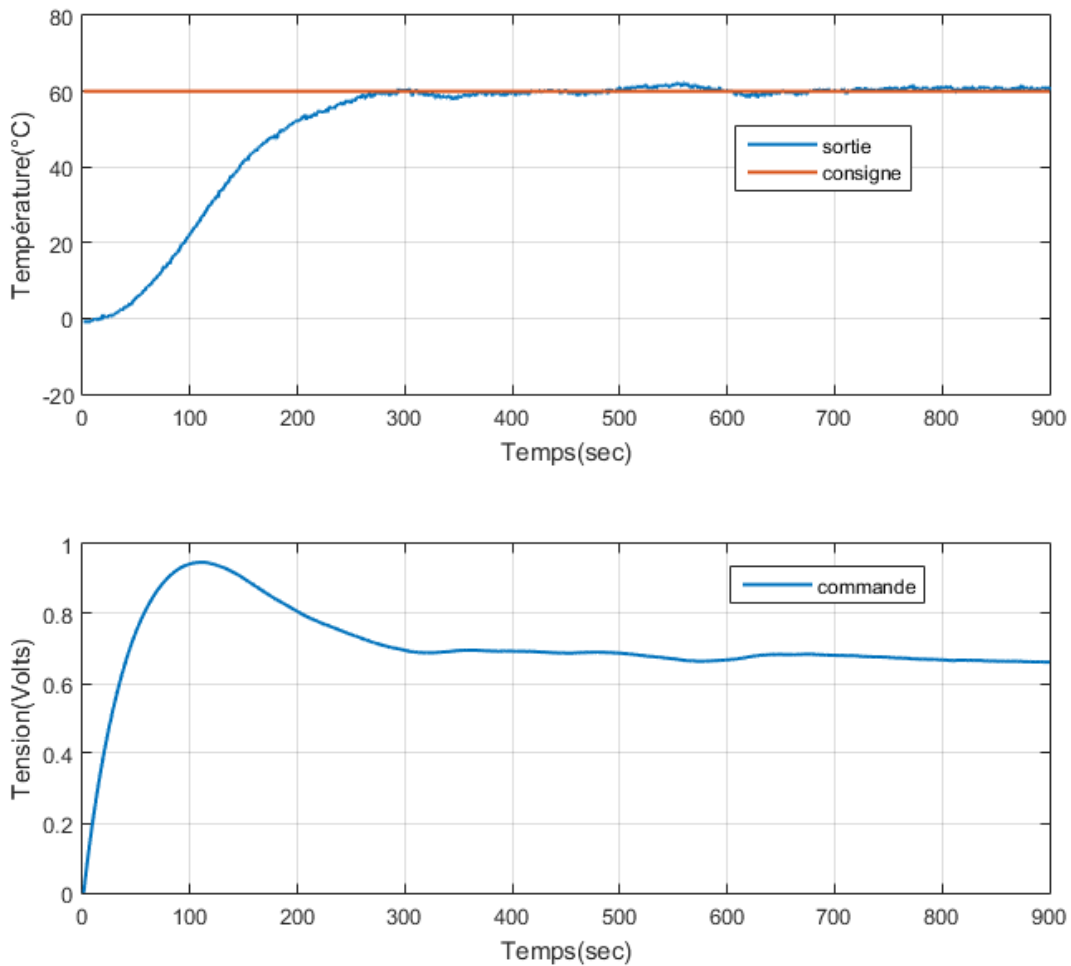


FIGURE 3.7 – Résultat d’implémentation de la commande par modèle interne du TCLab sans perturbation

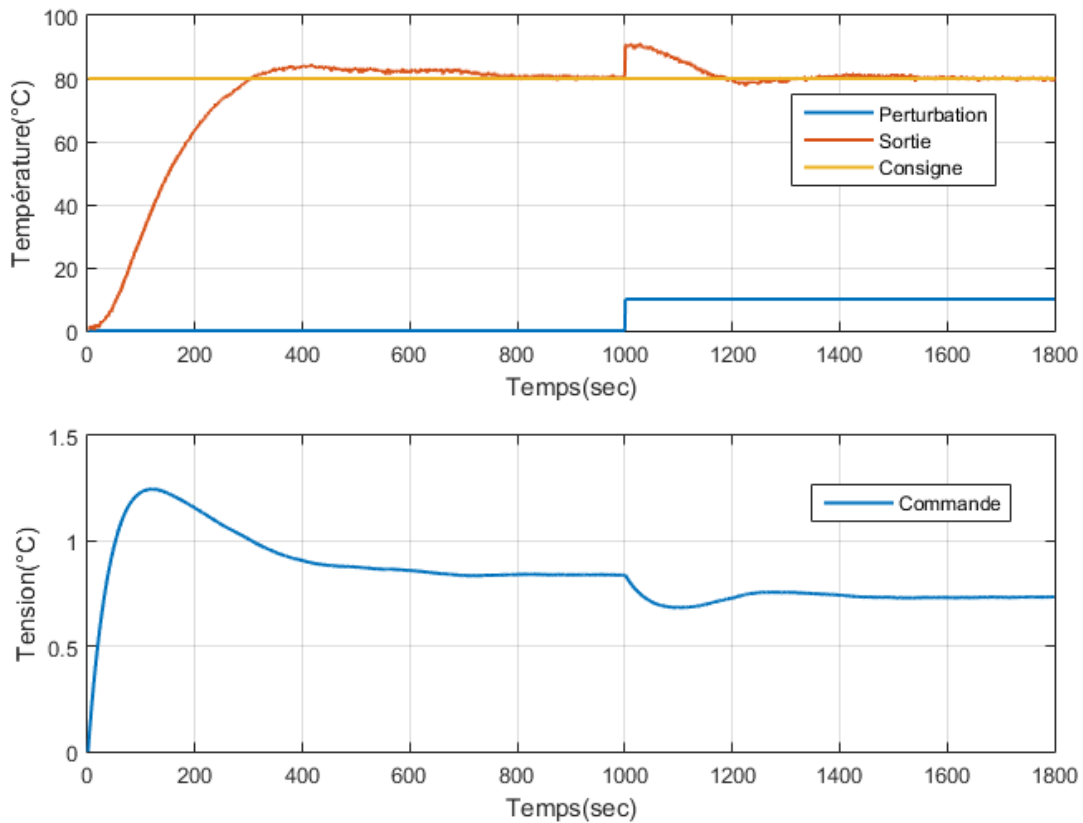


FIGURE 3.8 – Résultat d’implémentation de la commande par modèle interne du TCLab avec perturbation

3.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de démontrer l’efficacité de la commande par modèle interne pour le contrôle du TCLab. La présentation théorique initiale a fourni une compréhension approfondie des principes et des avantages de cette technique de contrôle. Les simulations réalisées en utilisant le modèle identifié du TCLab ont montré que la commande par modèle interne peut améliorer significativement les performances du système en termes de stabilité et de précision.

L’implémentation pratique sur le TCLab a validé les résultats théoriques et simulés, confirmant que cette méthode de commande est non seulement efficace en théorie, mais également applicable en pratique.

Ainsi, la commande par modèle interne s’avère être une méthode robuste et performante pour le contrôle du TCLab, offrant des perspectives intéressantes pour l’application de techniques de contrôle avancées dans des contextes éducatifs et de recherche.

Conclusion générale

Ce mémoire de master a exploré la synthèse et l'implémentation de trois techniques de commande appliquées au procédé Temperature Control Laboratory (TCLab), mettant en lumière leur efficacité et leurs applications potentielles dans le domaine du contrôle automatique. À travers trois chapitres distincts, nous avons progressivement approfondi notre compréhension du TCLab, en abordant successivement la modélisation du système, l'application de régulateurs classiques, et l'implémentation de techniques de contrôle avancées.

Le premier chapitre a posé les fondations nécessaires en offrant une description exhaustive du TCLab. Nous avons examiné sa composition, son utilité dans l'enseignement et la recherche, et son développement historique. En introduisant les modèles mathématiques décrivant la dynamique thermique du TCLab, nous avons établi une base solide pour la mise en œuvre des techniques de commande étudiées dans les chapitres suivants.

Le second chapitre s'est focalisé sur l'application de régulateurs Tout ou Rien (TOR) et Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID) au TCLab. Les expérimentations ont montré que bien que le régulateur TOR soit simple et efficace pour des applications basiques, il présente des limitations en termes de précision et de réponse aux perturbations. En revanche, le régulateur PID, grâce à ses composantes proportionnelle, intégrale et dérivée, offre une meilleure précision et adaptabilité, au prix d'une complexité accrue dans le réglage des paramètres.

Dans le troisième chapitre, nous avons exploré la commande par modèle interne (IMC), une technique de contrôle plus avancée et robuste. La présentation théorique de l'IMC, suivie de simulations et d'implémentations pratiques, a démontré son efficacité pour améliorer la stabilité et la précision du contrôle du TCLab. Les résultats obtenus ont confirmé que l'IMC, bien que nécessitant une modélisation précise du système, offre des performances supérieures dans des conditions variées.

En conclusion, ce mémoire a mis en évidence l'importance d'une compréhension approfondie

des systèmes et des modèles mathématiques associés pour le développement et l'implémentation de techniques de commande efficaces. Les régulateurs TOR et PID, ainsi que la commande par modèle interne, ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients, et leur choix dépend des spécificités du système et des objectifs de contrôle. Les expérimentations sur le TCLab ont fourni de l'efficacité de ces techniques de commande soulignant leur utilité dans des applications pratiques en ingénierie de contrôle.

Ce travail ouvre la voie à des recherches futures, notamment dans l'amélioration des techniques de modélisation et de réglage des paramètres, ainsi que dans l'exploration de nouvelles stratégies de commande adaptées à des systèmes plus complexes.

Bibliographie

- [1] QUINCHUELA, LORENA AND SALAS, SANTIAGO D AND DE LA PAZ, JULIO AND FLORES, CAROLA *Introducing Data Science to Spanish Speaker Students Using the TCLab Arduino Kit, 2024 IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE)*, pp.1–6, 2024

- [2] HEDENGREN, JOHN AND KANTOR, JEFFREY *Computer Programming and Process Control Take-Home Lab*, 2020

- [3] DE MOURA OLIVEIRA, PB AND HEDENGREN, JOHN D AND ROSSITER, JA *Introducing digital controllers to undergraduate students using the tclab arduino kit, IFAC-PapersOnLine*, vol.53, no.2, pp.17524–17529, 2020

- [4] GUZMÁN, JL AND GARCÍA-MAÑAS, F AND HOYO, A AND RAMOS-TEODORO, J AND DONAIRE, JG *Use of TCLab kits for control engineering curricula at the University of Almería, PapersOnLine*, vol.55, no.17, pp.362–367, 2022

- [5] *TCLab*, tiré de site :<https://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/ArduinoTemperatureControl>, en date de 03/07/2024

- [6] OLIVEIRA, PAULO MOURA AND HEDENGREN, JOHN D *An APMonitor temperature lab PID control experiment for undergraduate students, 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFFA)*, pp.790–797, 2019
- [7] DE MOURA OLIVEIRA, PB AND HEDENGREN, JOHN D AND SOLTEIRO PIRES, EJ *Swarm-based design of proportional integral and derivative controllers using a compromise cost function : An arduino temperature laboratory case study* *Algorithms*, vol.13, no.12, pp.315, MDPI, 2020
- [8] SALAZAR, GABRIEL AND ROSSOMANDO, FRANCISCO AND CAMACHO, OSCAR *An Adaptive Neuro-Fuzzy PID Controller Approach for thermal Systems : An Experimental Validation, 2022 IEEE International Conference on Automation/XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*, pp.1–5, 2022
- [9] AMRANI RACHID ET BOUMEGHAR SAÏD, *Etude et Développement d'une Plate Forme de Commande (TOR, PID et Floue) de la Station de Pression Sous Environnement LabVIEW*, Département Automatique, Université de Tizi-Ouzou, 2015
- [10] ÅSTRÖM, KARL J AND HÄGGLUND, TORE *PID control* , *IEEE Control Systems Magazine*, vol.1066, 2006
- [11] SHAMSUZZOHA, MOHAMMAD *PID control for Industrial processes*, BoD–Books on Demand, 2018
- [12] LUC DUGARD, *Régulation Industrielle*, p.260, 2007