

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

Université ABOU BEKR BELKAID TLEMCEM
Faculté de Technologie
Département DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉLECTRONIQUE

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du Diplôme de
Master en Automatique

Option : Automatique et Informatique Industrielle

Thème

Commande Sans Modèle d'un banc de Régulation de Température

Présenté par : Bentoumi Ahlam

Tekfi Sarah

Encadrant : **BENYAHIA Boumediene**

Co-Encadrant : **YACOUBI Boumediene**

Soutenu le : 30/09/2020 devant le jury composé de :

Président :	<i>Mme. CHOUKCHOU BRAHAM</i> Amal	Pr
Examinateur :	<i>M^r. BENSALAH</i> Choukri	M.C.B
Invités :	<i>M^r. CHERKI</i> Brahim	Pr
	<i>M^r. MELIANI</i> Sidi Mohammed	M.C.A

Mots clés

Modélisation mathématique : décrire le comportement du système en notation mathématique.

PID 'intelligents' : correcteur proportionnel intégral dérivé intelligent.

Dérivateur numérique : filtre.

CSM : la commande sans modèle.

La température : grandeur physique.

Système de chaleur : un système dont la grandeur à réguler est la chaleur.

Mathematical modeling : describing the behavior of the system in mathematical notation.

Intelligent' PID : Intelligent Proportional Integral Derivative Corrector.

Digital derivator : filter.

MC : the modelless control.

Temperature : physical parameter.

Heat system : a system whose parameter to be regulated is heat.

Résumé

Tout processus industriel a un comportement précis selon sa propre dynamique apparent et compris par le praticien, par une représentation concrète par des équations différentielles, fonction de transfert . . . , ce que l'on appelle modélisation mathématique d'un système automatique. Parfois ce modèle est très difficile, voir impossible à trouver. Donc on ne peut pas lui appliquer une loi de commande qui assure un cahier de charge spécifique (stabilité, rapidité, précision . . .).

Pour résoudre ce problème, Michel Fliess a proposé une nouvelle méthode pour les systèmes complexes qui est une contributions des correcteurs PID 'intelligents' dont le réglage devient facile, l'outil essentiel est un dérivateur numérique. Cet approche a besoin de la connaissance des entrées et sorties du système seulement, nommée la CSM.

L'objet de ce mémoire est d'utiliser cette technique pour commander la température d'un bloc thermique (four). Ce travail comporte trois grandes parties, la première consiste à étudier le comportement du système de chaleur, la deuxième consiste à étudier la CSM et la troisième consiste à appliquer cette commande sur le système et discuter les résultats obtenus.

Abstract

Any industrial process has a precise behavior according to its own dynamics apparent and understood by the practitioner, by a concrete representation with differential equations, transfer function ..., what is called mathematical modeling of an automatic system. Sometimes this model is very difficult, if not impossible to find. Therefore we cannot apply to it a control law which ensures a specific specifications (stability, speed, precision ...).

To solve this problem, Michel Fliess proposed a new method for complex systems which is a contribution of 'intelligent' PID correctors whose adjustment becomes easy, the essential tool is a numerical derivator. This approach needs the knowledge of the inputs and outputs of the system only, named the MC.

The purpose of this paper is to use this technique to control and maintain the temperature of a block. This work has three main parts, the first is to study the behavior of the heat system, the second is to study the MC and the third is to apply this control on the system and discuss the results obtained..

Remerciements

Tout d'abord nous adressons nos sincères sentiments de gratitude et reconnaissance à Allah tout puissant d'avoir guidé nos pas, et de nous avoir donné la santé, la volonté et la patience pour mener à terme nos recherches et réaliser ce projet de fin d'étude. Nous remercions aussi nos chers parents qui ont été toujours à nos côtés ainsi que tous les membres de nos familles et nos amis. Nous tenons aussi à exprimer nos profonds remerciements à nos encadreurs : " Mr.Benyahia Boumediene et Mr.Yaacoubi Boumediene " qui nous ont fourni le sujet de ce mémoire et nous ont guidé de leurs précieux conseils et suggestions tout au long de ce travail. Et à Mr.Meliani qui était présent généreusement et passionnément et la confiance qu'il nous a témoigné durant cette étude. Nous adressons nos sincères remerciements aussi à Mr.cherki qui nous a enrichi le travail avec ses programmes qui nous ont facilité les tâches et Mme.choukchou amal qui nous a bien formé en systèmes asservis qui est la base de notre travail. Enfin, nous tenons à remercier les membres du jury qui nous ont honoré par leur présence pour examiner et évaluer ce travail.

Dédicace

A nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de nos études.

A nos chers frères et sœurs . . . pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A nos amis . . . pour leur appui et leur encouragement.

A tous les membres de nos familles pour leur soutien tout au long de notre parcours universitaire, que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

Merci d'être toujours là pour nous.

Introduction Générale

La température est la première grandeur physique mesurée et régulée en industrie, vu son importance pour l'échauffement des produits nécessitant un traitement thermique, ou son influence sur les autres grandeurs et les éléments du système. Beaucoup de domaines nécessitent la régulation de température : industrie métallurgique, industrie chimique et pharmaceutique, industrie agro-alimentaire, ...

La régulation de température des fours industrielles, des chambres de stockage (chambre froides par exemple), des habitations, ... est une tâche primordiale des ingénieurs, qui doivent maintenir la température régulée égale ou proche à la consigne fixées par le processus de fonctionnement et les normes et ceci, malgré les perturbations subies par le système : température extérieure, déperdition de chaleur à travers les proies, ouverture des portes ou fenêtres, ...

Que ce soit en chauffage ou en climatisation, la régulation de température est essentielle au confort des individus ou au bon fonctionnement des processus industriels.

Les dispositifs de régulation de température sont nombreux, ils intègrent plusieurs éléments : les capteurs tels que sondes de température, les actionneurs tels que résistances chauffantes, le régulateur qui représente le "cerveau" du système de régulation. Nous trouverons également des équipements intégrés et combinés, tel qu'un thermostat intérieur programmable.

Le régulateur de température le plus utilisé en industrie est le PID, qui consiste à combiner trois actions de correction : proportionnelle, intégrale, dérivée. Un autre contrôle qui vient de gagner sa place ce dernier temps en industrie est le prédictif, qui consiste à réguler le système par fenêtre de temps où la commande est renouvellement prédite.

Le contrôle efficace de température nécessite un modèle du système, qui peut être une fonction de transfert ou une représentation d'état. Le modèle est obtenu après avoir fait plusieurs simplifications (retard approximé, négligence de certaines dynamiques, paramètres incertains, ...). Le correcteur calculé sur la base d'un tel modèle devrait continuer à fonctionner sur le système réel dans des conditions différentes de celles où le modèle a été identifié. Nous parlons dans ce cas de la commande robuste, qui n'est pas toujours facile à calculer.

Dans ce mémoire, nous proposons l'utilisation d'une commande sans modèle, appliquée à un système de régulation de température. Cette commande est basée uniquement sur les mesures de sortie/entrée et sera continuellement renouvelée sur chaque intervalle de commande qu'on doit choisir en fonction du système commandé. Nous aurons l'occasion de tester l'efficacité d'une loi de commande calculée sans tenir compte du modèle du système, en d'autre terme, tester sa robustesse. Nous avons bien souhaité d'implémenter la commande en expérimental sur un banc de régulation de température CE103 situé au niveau du laboratoire pédagogique d'automatique de la faculté de Technologie, mais à cause de la situation liée au Covid-19, cette expérience n'a pas pu être réalisée.

Le mémoire est organisé comme suit : dans le premier chapitre, nous présentons le système thermique que nous allons commander et nous détaillons le développement de son modèle Simulink, en utilisant le package "simscape". Nous introduisons dans le deuxième chapitre la théorie du contrôle sans modèle proposé par Michel Fliess et nous montrons le calcul des dérivées numériques dont nous aurons besoin pour la commande. Le troisième chapitre est consacré à l'application de la loi de commande sans modèle au système thermique, les résultats obtenus sont discutés et analysés. Le mémoire est terminé par une conclusion générale et des perspectives du travail.

Table des matières

Mots clés	i
Résumé	iii
Remerciements	v
Dédicace	vii
Introduction Générale	ix
1 Présentation et simulation du système thermique	1
1.1 Partie théorique :	1
1.1.1 Introduction :	1
1.1.2 Fonctionnement de l'appareil :	2
1.1.3 Le bloc de processus :	4
1.1.4 Le contrôleur CE120 :	5
1.1.5 Modélisation du système thermique :	6
1.1.6 Equation différentielle :	7
1.1.7 Fonction de transfert du système :	8
1.1.8 Les deux capteurs de température :	9
1.1.9 Équations d'état :	11
1.2 Partie simulation :	12
1.2.1 Introduction :	12
1.2.2 Schématisation du système par SIMSCAPE :	13
1.2.3 Résultat de simulation :	31

2	Commande sans modèle	32
2.1	Introduction	32
2.2	Principes généraux	33
2.2.1	Automatique :	33
2.2.2	Système automatisé ou système automatique :	33
2.2.3	Régulation et asservissement :	35
2.2.4	Classification des structures de commande des systèmes :	35
2.3	Pourquoi utiliser une commande sans modèle ?	36
2.4	Modèle globale v.s modèle local :	37
2.5	Principe de calcul de la commande sans modèle :	38
2.5.1	Choix du correcteur :	40
2.6	Estimations des dérivées temporelles	41
2.6.1	Introduction :	41
2.6.2	Estimations des dérivées temporelles selon M.Fliess et al :	42
2.7	Conclusion :	47
3	Application au système en simulation	48
3.1	Introduction :	48
3.2	Régulation avec un correcteur PI (proportionnel intégral) :	50
3.3	Régulation avec la commande sans modèle :	51
3.3.1	L'implémentation de la commande sur Matlab/Simulink :	52
3.3.2	Tester la robustesse de la commande sans modèle vis-à-vis un chan- gement de consigne :	61
3.4	Comparaison entre les deux commandes :	62
3.4.1	PI classique :	62
3.4.2	CSM :	62
3.5	Conclusion :	63
	Conclusion générale	65
	Annexe	67

Liste des tableaux

Table des figures

1.1	Photo du banc de régulation thermique CE103, disponible au niveau du laboratoire d'automatique pédagogique	1
1.2	Diagramme schématique du banc de régulation thermique CE103	3
1.3	Diagramme schématique du bloc de processus thermique	4
1.4	Diagramme schématique de la section d'amplificateur de relais	5
1.5	Photo du régulateur CE120, disponible au niveau du laboratoire d'automatique pédagogique.	5
1.6	Le diagramme schématique qui représente un système de chauffage industriel	6
1.7	Le schéma bloc qui représente un système de chauffage industriel	7
1.8	Schéma bloc de l'ensemble du système de chauffage industriel	9
1.9	Schématisation du système par SIMSCAPE en boucle ouverte	13
1.10	Bloc de la consigne d'entrée	13
1.11	Capteur de Température à base de Thermistor	14
1.12	Montage du Capteur de Température basé sur la Thermistance	15
1.13	Conversion de la température en tension	15
1.14	Sous-système du bloc convertisseur d'entrée avec le contenu de chaque fonction	15
1.15	Actionneur	16
1.16	processus	18
1.17	Convective Heat Transfer	19
1.18	Conductive Heat Transfer	20
1.19	Sous-système de bloc de déperdition de chaleur à travers les 3 parois	20

1.20	Bloc des paramètres de convection air intérieur/tôle et air extérieur/tôle	21
1.21	Bloc des paramètres de conduction 1/2 tôle et 1/2 laine de verre	21
1.22	Bloc des paramètres de masse thermique de laine de verre et tôle extérieure	21
1.23	Sous-système de bloc de déperdition de chaleur à travers la fenêtre	22
1.24	Bloc des paramètres de conduction et convection du vitre	22
1.25	Bloc des paramètres de masse thermique du verre	22
1.26	Sous-système de bloc de déperdition de chaleur à travers la partie supérieure	23
1.27	Bloc des paramètres de conduction 1/2 laine de verre et convection air intérieure/tôle	23
1.28	Bloc des paramètres de masse thermique de laine de verre et tôle extérieure	23
1.29	Sous-système de bloc de déperdition de chaleur à travers la base	24
1.30	Bloc des paramètres de conduction 1/2 tôle et convection air intérieur/tôle	24
1.31	Bloc des paramètres de masse thermique de laine de verre et tôle extérieure	24
1.32	Capteur de Température	28
1.33	Temperature Exterieur (°C)	28
1.34	Gain de proportionnalité	28
1.35	Simulink-PS Converter	29
1.36	PS-Simulink Converter	29
1.37	Scope	29
1.38	Display	30
1.39	Sum	30
1.40	Réponse du système en BO	31
2.1	Représentation fonctionnelle d'un système mono-variable et d'un système multi-variables.	34
2.2	Schéma fonctionnel d'un système avec des perturbations	34
2.3	Commande en boucle ouverte	35
2.4	Commande en boucle fermée	36
2.5	Modèle globale v.s modèle local	37

2.6	Schéma représentatif du principe de la commande sans modèle.	38
3.1	Régulation avec un correcteur PI classique en BF	50
3.2	Réponse indicielle du système corrigé avec un correcteur PI	51
3.3	Régulation avec une commande sans modèle	52
3.4	bloc de la commande sans modèle	52
3.5	bloc des paramètres	53
3.6	bloc de commande	53
3.7	Sous-système du bloc de commande sans modèle	54
3.8	bloc de calcul des intégrales	54
3.9	Sous-système du bloc de calcul des intégrales	55
3.10	Fonction Matlab : M4-intégrateFcts	55
3.11	Fonction Matlab : M2-integrate	55
3.12	Fonction Matlab : M1-Mainprog	56
3.13	Réponse indicielle du système corrigé avec la CSM en cas de $\delta t = 0.001sec$	59
3.14	Réponse indicielle du système corrigé avec la CSM en cas de $\delta t = 0.01sec$	60
3.15	Tester la robustesse de la CSM vis-à-vis un changement de consigne	61
3.16	69

Chapitre 1

Présentation et simulation du système thermique

1.1 Partie théorique :

1.1.1 Introduction :

Le CE103 est un appareil de contrôle des processus thermiques montré par la Figure 1.1. Ce banc semi-industriel (pédagogique) est dédié aux études théoriques et expérimentales de la régulation de température.



FIGURE 1.1 – Photo du banc de régulation thermique CE103, disponible au niveau du laboratoire d'automatique pédagogique

Le CE103 se rapporte spécifiquement sur les problèmes de contrôle de la chaleur et de transfert de chaleur tels qu'ils se posent habituellement dans les industries de contrôle des procédés. Il peut également être utilisé comme une introduction pratique à la conception, au fonctionnement et à l'application des systèmes de contrôle en général.

Etant comme système de contrôle typique, le banc peut être largement utilisé pour l'analyse des performances des processus thermiques / systèmes de transfert de chaleur. [3]

1.1.2 Fonctionnement de l'appareil :

Cet appareil modélise la situation industrielle que l'on trouve couramment dans des équipements tels que les installations de conditionnement d'air, où le contrôle de la température est assuré par une combinaison de :

- a- La variation de l'apport d'énergie thermique au système.
- b- Faire varier la vitesse d'un ventilateur de circulation.
- c- Utilisation d'une aube variable pour limiter l'écoulement.
- d- N'importe quelle combinaison de a, b et c.

Le procédé contenu dans le CE103 comprend un conduit d'air dans lequel l'air peut circuler grâce à un ventilateur électrique à vitesse variable. Un bloc de traitement chauffé électriquement est monté dans le trajet de l'air de manière à atteindre une température d'équilibre en équilibrant la chaleur gagnée grâce à l'énergie qui lui est fournie par le serpentin chauffant et la chaleur perdue par convection / conduction.

Deux thermomètres à résistance de platine contrôlent la température réelle du bloc, l'un en contact thermique direct avec le bloc et l'autre monté avec une entretoise isolante pour introduire une inertie thermique et des effets de constante de temps variable dans la boucle de contrôle. [3]

On montre sur la Figure 1.2, un schéma représentatif du dispositif CE103 .

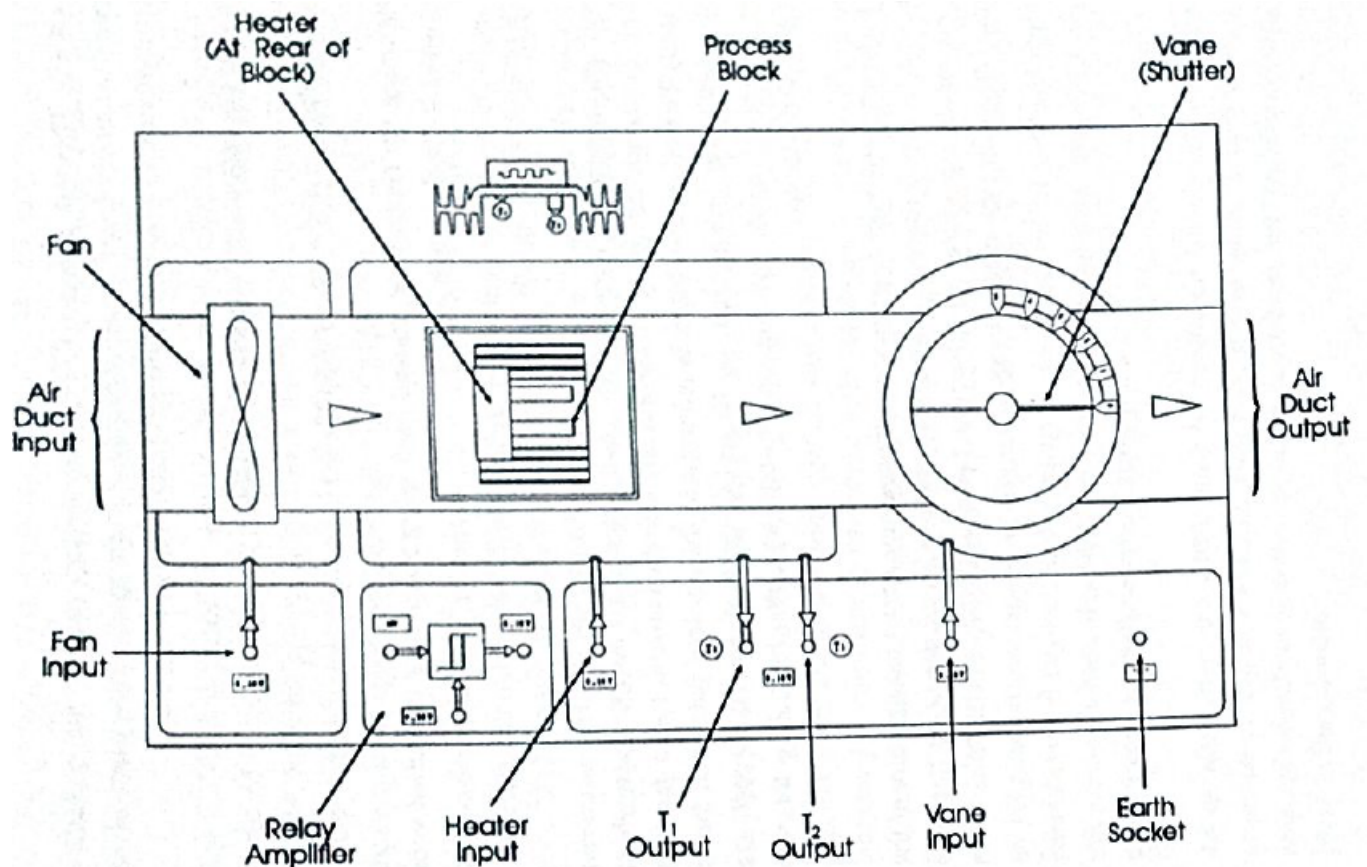


FIGURE 1.2 – Diagramme schématique du banc de régulation thermique CE103

Le problème de contrôle est de maintenir la température du processus dans des limites acceptables alors qu'il fonctionne dans différentes conditions. Une combinaison de régulation de l'énergie électrique à l'élément chauffant, en faisant varier le débit d'écoulement de l'air et la rotation de la pale donne le contrôle de la chaleur.

L'amplificateur de relais avec hystérésis variable permet des expériences plus avancées. La conception flexible de l'équipement permet à l'utilisateur de développer de nombreux autres exercices d'analyse et de contrôle pour répondre à leurs besoins. Il est bon pour les expériences de contrôle étendues ou avancées et est idéal pour le travail de projet étudiant.

1.1.3 Le bloc de processus :

Le bloc de traitement est monté dans le conduit et peut être vu à travers la fenêtre transparente du panneau avant.

Le chauffage est monté à l'arrière du bloc et les deux thermomètres à résistance de platine sont clairement visibles sur la face avant.

Cette figure montre le positionnement relatif de l'appareil de chauffage et des thermomètres.

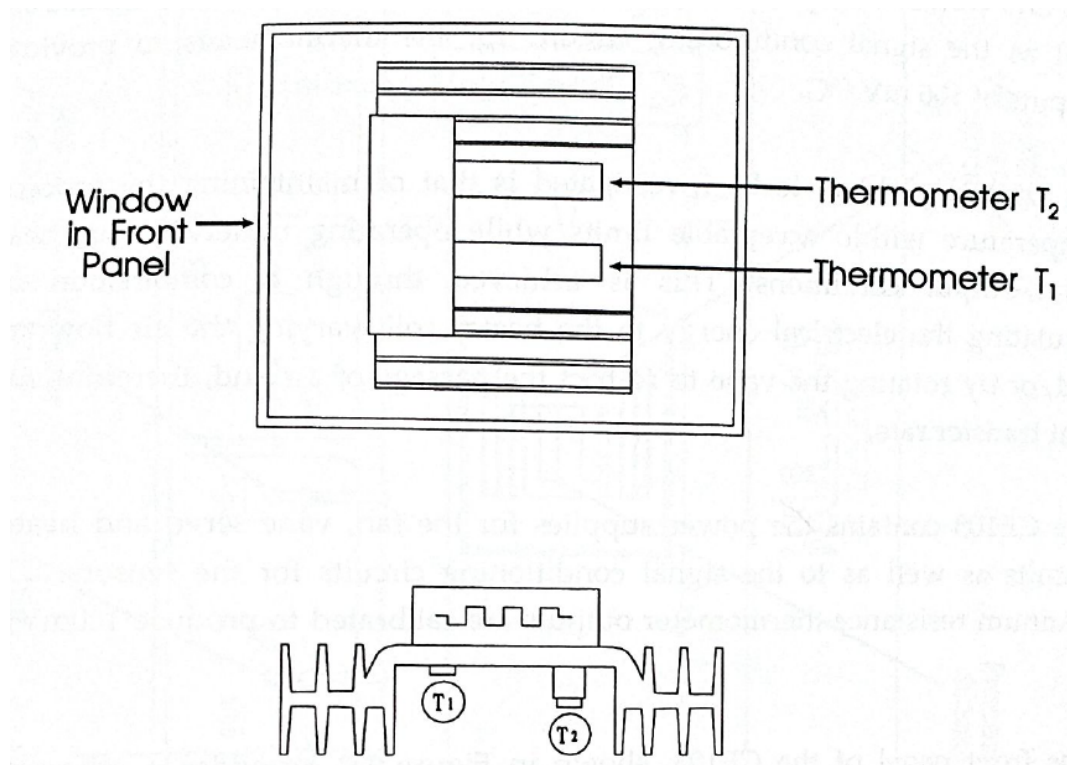


FIGURE 1.3 – Diagramme schématique du bloc de processus thermique

La prise d'entrée du chauffage, lorsqu'elle est alimentée par un signal dans la plage de 0 à 10 V, contrôle la puissance du chauffage en régulant le rapport cyclique d'un amplificateur de chauffage à modulation de largeur d'impulsion. La période est d'environ 1 seconde. La LED adjacente indique que le chauffage est en marche. Si la température du bloc de traitement dépasse 100 °C, le circuit du chauffage est désactivé jusqu'à ce que la température tombe en dessous de 100 °C. Les tensions négatives sont ignorées.

Les deux capteurs délivrent une tension de 0 à 10 V, pour une mesure de température variant de 0 à 100 °C.

De même, le dispositif chauffant, le ventilateur et le moteur de la palette, sont alimentés par des tensions variants de 0 à 10 V.

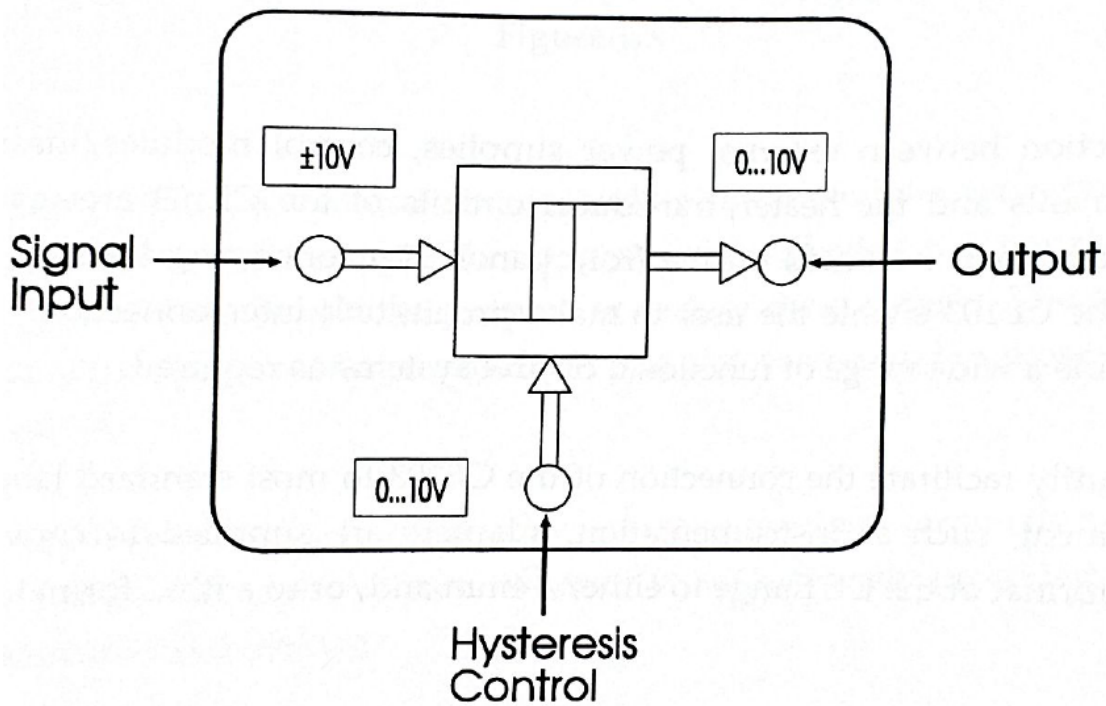


FIGURE 1.4 – Diagramme schématisé de la section d'amplificateur de relais

1.1.4 Le contrôleur CE120 :



FIGURE 1.5 – Photo du régulateur CE120, disponible au niveau du laboratoire d'automatique pédagogique.

Le contrôleur CE120, illustré sur la figure 1.5 est une unité modulaire conçue pour étudier de manière pratique les principes de base et avancés de la technique de contrôle. Il est principalement destiné à être utilisé comme élément de contrôle combiné analogique/numérique avec le banc thermique CE103. [3]

1.1.5 Modélisation du système thermique :

La première étape de contrôle d'un processus industriel consiste à comprendre complètement le comportement de la dynamique du système, ce que l'on appelle la modélisation du système. [3]

Dans un premier temps, considérons le processus de transfert de chaleur comme un simple bloc (que nous prendrons pour représenter un processus industriel dont la température doit être contrôlée), comme le montre les deux figures 1.6 et 1.7.

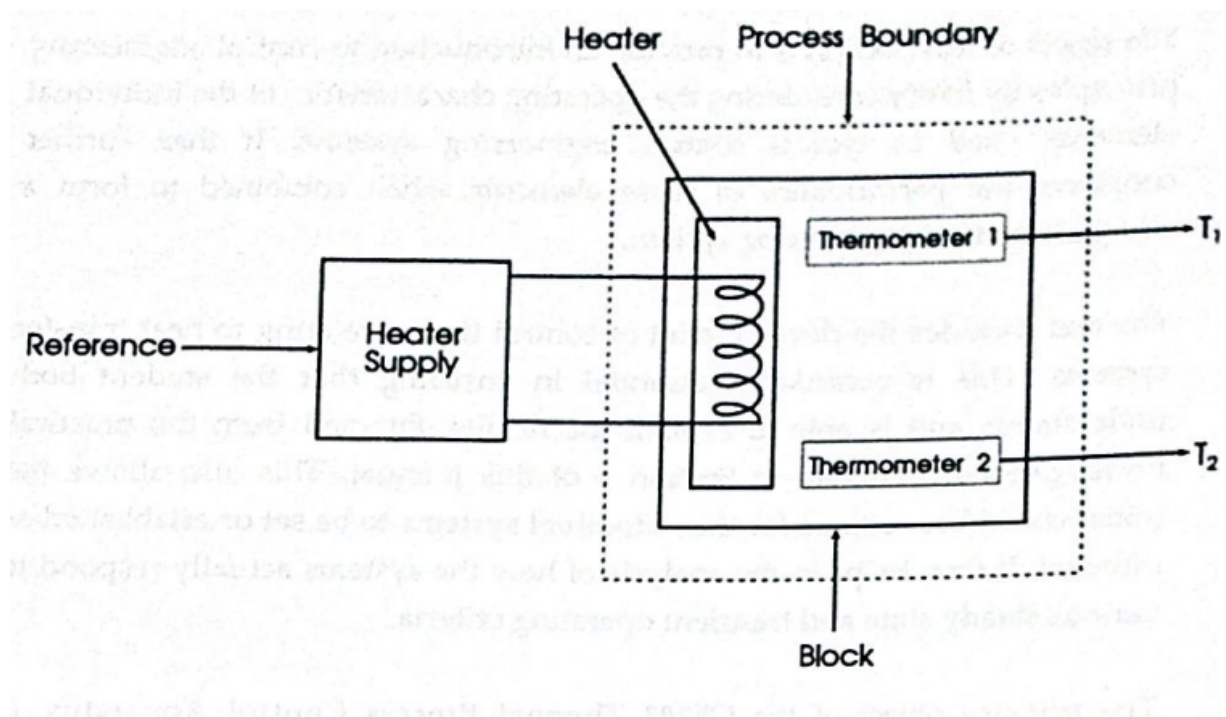


FIGURE 1.6 – Le diagramme schématique qui représente un système de chauffage industriel

1.1.6 Equation différentielle :

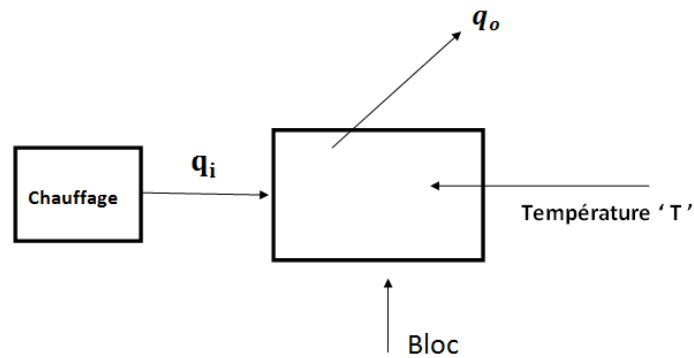


FIGURE 1.7 – Le schéma bloc qui représente un système de chauffage industriel

Le chauffage fournit de l'énergie thermique à un flux de chaleur q_i et le bloc se refroidit par rayonnement et convection à un flux de chaleur q_o . Le modèle du système est déterminé en reliant les flux de chaleur q_i et q_o . [3]

$q_i - q_o =$ taux de variation de la chaleur dans le bloc.

$$q_i - q_o = m.c_e \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1.1)$$

→ c'est l'équation de changement de température du bloc .

Avec :

m : La masse du bloc .

T : La température du bloc .

c_e : La chaleur spécifique du bloc .

On va utiliser :

$$C = m.c_e \quad (1.2)$$

→ qui est la capacité thermique du bloc .

Si l'on suppose que le bloc perd de la chaleur par rayonnement et convection, alors la production de chaleur q_o est une fonction complexe et non linéaire de la température (T) du bloc, de la température ambiante T_{AM} , de la surface du bloc et d'autres paramètres.

Mais pour les faibles différences de température rencontrées dans l'appareil de régulation thermique **CE103**, on peut assumer cette relation :

$$q_o = h.A.(T - T_{AM}) \quad (1.3)$$

→ c'est la relation linéaire.

Avec :

h : Coefficient de transfert de chaleur .

A : La surface exposée du bloc pour le transfert de chaleur .

Si l'on considère les petites variations de température ΔT par rapport à la température ambiante T_{AM} , le modèle du système peut être écrit comme suit :

$$C \cdot \frac{d\Delta T}{dt} + h.A.\Delta T = q_i \quad (1.4)$$

→ c'est l'équation différentielle linéaire du premier ordre .

1.1.7 Fonction de transfert du système :

La transformé de Laplace de l'équation (1.4) donne :

$$TL \rightarrow C.s.\Delta T(s) + h.A.\Delta T(s) = q_i(s)$$

$$\text{on divise sur } hA \Rightarrow \frac{C}{h.A}.s.\Delta T(s) + \Delta T(s) = \frac{1}{h.A}.q_i(s)$$

$$\text{Mettons : } \tau = \frac{C}{h.A} \text{ et } k = \frac{1}{h.A}$$

$$\Rightarrow \tau.s.\Delta T(s) + \Delta T(s) = k.q_i(s)$$

$$\Rightarrow (\tau.s + 1).\Delta T(s) = k.q_i(s)$$

Avec :

τ : La constante de temps du système .

k : c'est un gain .

La fonction de transfert du système chauffant est donné par :

$$\Delta T(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \cdot q_i(s) \quad (1.5)$$

Le modèle ci-dessus suppose qu'un taux de refroidissement constant est appliqué, mais en pratique, le taux de refroidissement varie en fonction de la vitesse du ventilateur de refroidissement. Cela peut être intégré dans le modèle sous la forme d'une modification de h le coefficient de transfert de chaleur (du bloc). Si la vitesse du ventilateur est contrôlée par une tension d'entrée v_f .

$$h = h_o + k_f \cdot v_f \quad (1.6)$$

→ c'est la relation approximative de l'influence de la vitesse du ventilateur.

Avec :

τ : La constante de temps du système .

k : c'est un gain.

1.1.8 Les deux capteurs de température :

La position des deux capteurs par rapport au bloc chauffant est montrée par la Figure 1.8, où le capteur 2 est sur un isolateur, tandis que le premier est relié directement au bloc. [3]

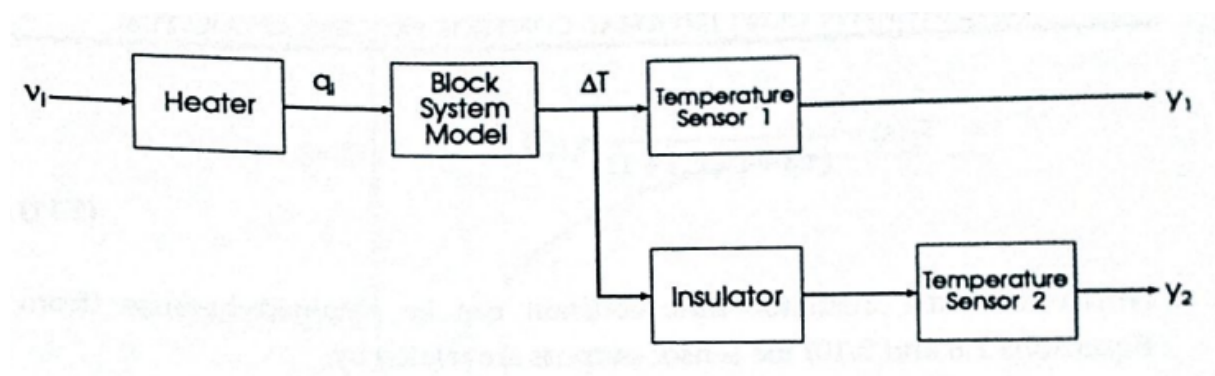


FIGURE 1.8 – Schéma bloc de l'ensemble du système de chauffage industriel

La tension d'entrée du chauffage v_i et le débit de chaleur q_i ont été mis en relation linéaire.

$$q_i = k_i.v_i \quad (1.7)$$

Avec :

k_i : Le gain de chauffage et, k_{S1} : Le gain du capteur 1.

Le signal T_1 délivré par le premier capteur est linéaire à la température ΔT :

$$T_1 = k_{s1}.\Delta T \quad (1.8)$$

En combinant les équations (1.5),(1.7) et (1.8) on trouve :

$$\Rightarrow T_1(s) = k_{S1}.\frac{k}{\tau+1}.q_i(s)$$

$$\Rightarrow T_1(s) = k_{S1}.\frac{k}{\tau+1}.k_i.v_i(s)$$

On pose : $G = k_{S1}.k.v_i(s)$, on trouve la fonction de transfert du premier capteur :

$$T_1(s) = \frac{G}{\tau.s + 1}.v_i(s) \quad (1.9)$$

Le deuxième capteur subit un décalage thermique à travers l'isolant de sorte qu'une constante de temps supplémentaire du capteur (τ') est introduite. La température ΔT et la sortie du capteur 2 sont liées par la fonction de transfert suivante :

$$\frac{T_2(s)}{\Delta T} = \frac{k'_{s2}}{\tau'.s + 1} \quad (1.10)$$

Par conséquent, lorsque le capteur 2 détecte la température du bloc, les fonctions de transfert standard du système de deuxième ordre se produisent.

En remplaçant (1.5) dans (1.10), nous obtenons :

$$\frac{T_2(s)}{v_i(s)} = \frac{G'}{(\tau'.s + 1).(\tau.s + 1)} \quad (1.11)$$

Avec : $G' = k'_{S2}.k.k_i$, et k_{S2} Le gain du capteur 2.

On divise (1.10) sur (1.8) nous obtenons la fonction de transfert du second capteur en fonction du premier capteur, qui peut être écrite de cette manière :

$$T_2(s) = \frac{g}{(\tau'.s + 1)}T_1(s) \quad (1.12)$$

Avec : $g = \frac{G'}{G}$ représente la différence de gain entre les deux capteurs de température et peut être utilisé comme mesure de la perte de chaleur dans le bloc isolant associé au capteur 2.

1.1.9 Équations d'état :

Nous avons G , G' , τ et τ' des constantes .

$$\begin{cases} T_1(s) = \frac{G}{\tau.s+1}.v_i(s) \dots (1.13) \\ T_2(s) = \frac{g}{\tau'.s+1}.T_1(s) \dots (1.14) \end{cases}$$

Avec : $v_i(s)$: l'entrée du système .

→ **d'après l'équation (1.13) :**

$$T_1(s)(\tau s + 1) = G.v_i(s)$$

$$\Rightarrow \tau s T_1(s) + T_1(s) = G.v_i(s)$$

$$TL^{-1} \rightarrow \tau \dot{T}_1 + T_1 = G v_i \dots \dots \dots (1.15)$$

→ **d'après l'équation (1.14) :**

$$T_2(s)(\tau' s + 1) = g.T_1(s)$$

$$\Rightarrow \tau' s T_2(s) + T_2(s) = g.T_1(s)$$

$$TL^{-1} \rightarrow \tau' \dot{T}_2 + T_2 = g T_1 \dots \dots \dots (1.16)$$

On utilise des équations (1.15) et (1.16) pour présenter les sorties temporelles de notre système.

$$\begin{cases} \dot{T}_1 = -\frac{1}{\tau}.T_1 + \frac{G}{\tau}.v_i \dots (1.15) \\ \dot{T}_2 = -\frac{1}{\tau'}.T_2 + \frac{g}{\tau'}.T_1 \dots (1.16) \end{cases}$$

On choisit les variables d'état :

$$\begin{cases} X1 = T1 \\ X2 = T2 \end{cases}$$

⇒

$$\begin{cases} \dot{X}1 = -\frac{1}{\tau}X_1 + \frac{G}{\tau}v_i \\ \dot{X}2 = -\frac{1}{\tau'}X_2 + \frac{g}{\tau'}X_1 \end{cases}$$

→ c'est les équations d'état de notre système.

1.2 Partie simulation :

1.2.1 Introduction :

Dans cette partie du travail, nous allons développer étape par étape le modèle Simulink du four, en utilisant l'outil SIMSCAPE.

SIMSCAPE : Simscape nous permet de créer rapidement des modèles de systèmes physiques dans l'environnement Simulink. Grâce à Simscape, nous pouvons créer des modèles au moyen de connexions physiques qui s'intègrent directement dans des schéma-blocs ou dans d'autres paradigmes de modélisation. Nous pouvons ainsi modéliser des systèmes tels que des moteurs électriques, des convertisseurs électriques, des actionneurs hydrauliques et des systèmes de réfrigération en assemblant des composants dans un schéma. Les bibliothèques additionnelles Simscape offrent des fonctions d'analyse et des composants plus complexes. Simscape permet de développer des systèmes de contrôle et de tester les performances au niveau système. Nous pouvons créer des composants personnalisés à l'aide du langage Simscape reposant sur MATLAB et ainsi créer au format textuel des composants, des domaines ou encore des bibliothèques de modélisation physique. Nous pouvons paramétrer nos modèles à l'aide de variables et d'expressions MATLAB, et concevoir les systèmes de contrôle pour notre système physique dans Simulink. Afin de déployer nos modèles vers d'autres environnements de simulation, Simscape prend en charge la génération de code C. [5]

1.2.2 Schématisation du système par SIMSCAPE :

A) **Schéma global** : Ci-dessus est le schéma SIMULINK de notre système en boucle ouverte.

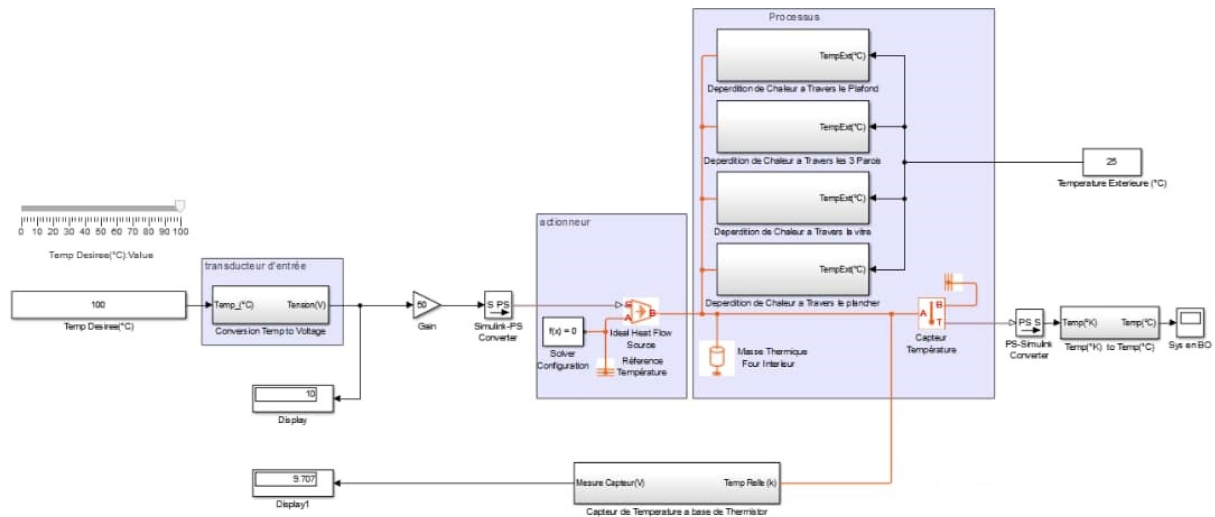


FIGURE 1.9 – Schématisation du système par SIMSCAPE en boucle ouverte

B) Description des blocs du schéma :

1. **Le signal d'entrée** : la consigne qui est une source d'énergie variante entre 0°C et 100°C

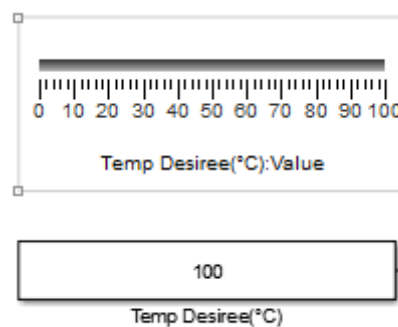


FIGURE 1.10 – Bloc de la consigne d'entrée

2. Le bloc de boucle de retour :

— Nous avons bouclé ce système par un capteur de température à base de thermistance de type NTC (negative temperature coefficient) qui est un capteur à résistance variable (plus la température augmente, la résistance diminue).

C'est un capteur non-linéaire et a pour caractéristique de voir sa résistance varie non linéairement en fonction de la température à laquelle il est exposé. Il est régi par la relation suivante :

$$R = R_0 \cdot e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (1.13)$$

Avec :

β : constante de température en kelvin.

R_0 : résistance de référence en Ohm.

T_0 : la température à laquelle s'applique la résistance de référence en kelvin.

T : Température de l'entrée en k.



FIGURE 1.11 – Capteur de Température à base de Thermistor

- Le capteur résistif de la température est utilisé dans un pont de Wheatstone, nous avons choisi le pont de Wheatstone (figure 1.12) parce qu'il arrive à mesurer avec précision les faibles variations de résistance.

La tension de sortie du pont de Wheastone en fonction de résistance du capteur est donnée par :

$$V_{out} = V_G \cdot \left(\frac{R_p}{R + R_p} - \frac{R_p}{2R_p} \right) \quad (1.14)$$

Avec :

V_{out} : Tension de sortie du pont de wheastone

V_G : Tension d'alimentation

R_p : Résistance du pont de wheatstone

R : La résistance de la thermistance qui varie selon la température de sortie.

- Nous avons combiné l'utilisation de ce pont avec un montage différentiateur à base d'amplificateur opérationnel, comme illustré par la figure 1.12

Avec : $R_a = 100$ Ohm

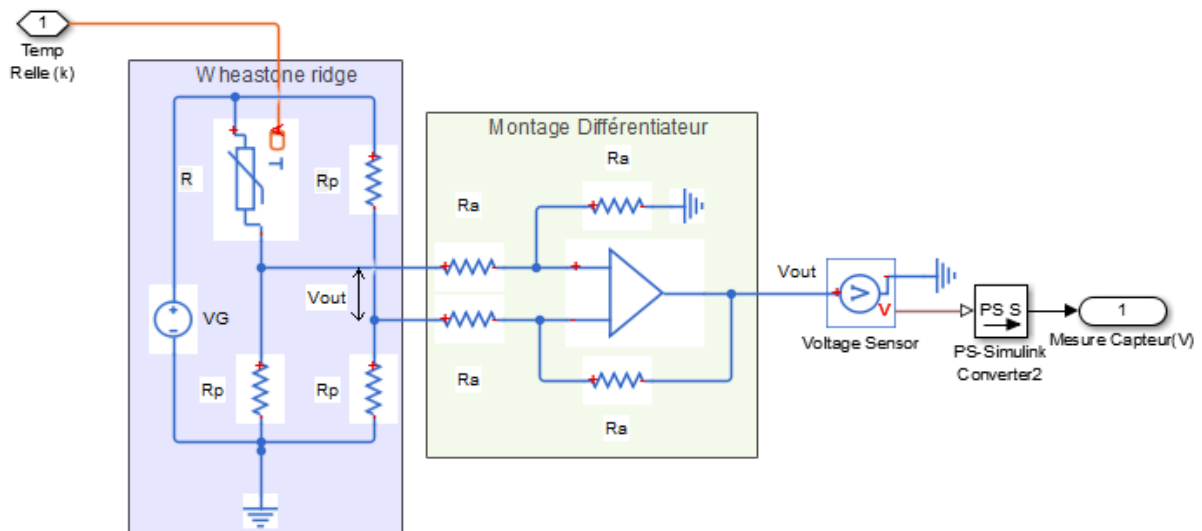


FIGURE 1.12 – Montage du Capteur de Température basé sur la Thermistance

3. Convertisseur d'entrée : dans ce bloc nous avons convertis une température d'entrée en une autre grandeur physique qui est la tension :

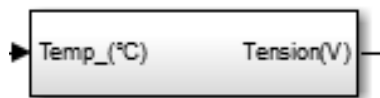


FIGURE 1.13 – Conversion de la température en tension

Cette conversion s'est effectuée passant par deux étapes qui sont : conversion température / résistance puis conversion résistance/tension, comme le montre cette figure :

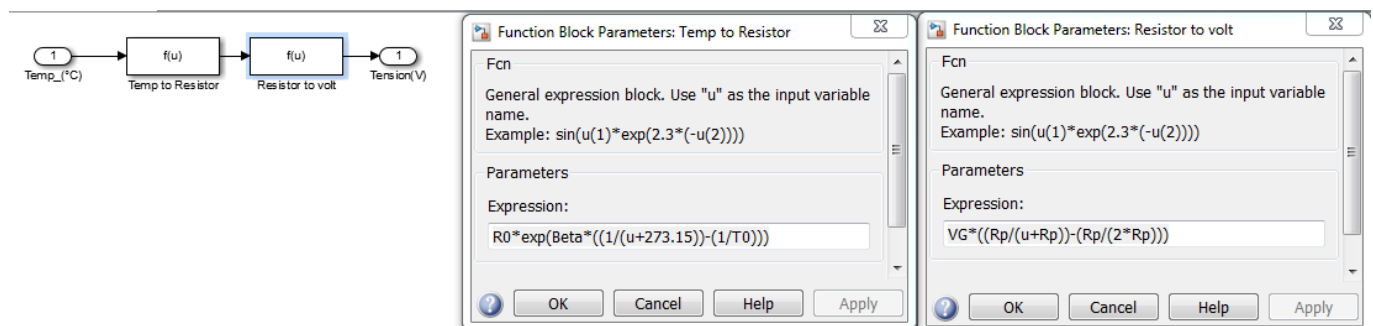


FIGURE 1.14 – Sous-système du bloc convertisseur d'entrée avec le contenu de chaque fonction

- Température en résistance : Utilisant l'équation de la thermistance ou capteur de température (voir ci-dessous) :

$$R = R_0 \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T+273.15} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1.15)$$

R_0	1000 Ohm
β	3500 K
T_0	298.15 K

- Résistance en tension : Utilisant l'équation suivante :

$$V_{out} = V_G \cdot \left(\frac{R_p}{R + R_p} - \frac{R_p}{2R_p} \right) \quad (1.16)$$

V_G	21.3335 V
R_p	2928.3 Ohm

4.Actionneur : Ça représente le bloc qui reçoit la commande désirée à l'entrée, et c'est la partie opérative de tout système automatisé. Son rôle est de transformer l'énergie qu'on lui a fournie en un phénomène physique qui fournit un travail (chauffage, refroidissement), modifiant le comportement ou l'état d'un système.

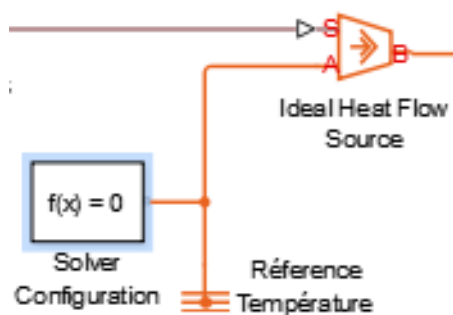


FIGURE 1.15 – Actionneur

L'actionneur de notre système est ' Ideal Heat Flow Source ' de SIMSCAPE qui est le bloc Source de flux thermique idéal représente une source idéale d'énergie thermique qui est suffisamment puissante pour maintenir un flux thermique spécifié à sa sortie, quelle que soit la différence de température entre les deux sources.

Les connexions A et B sont des orifices de conservation thermique correspondant respectivement à l'entrée et à la sortie de la source. Le port S est un port de signal physique, par lequel est appliqué le signal de commande qui pilote la source. Nous pouvons utiliser toute la gamme des sources de signaux Simulink pour générer le profil de variation du flux thermique souhaité. Le flux de chaleur à travers la source est directement proportionnel au signal au niveau du port de contrôle S. [8]

- **PORT A :** est toujours relié avec une référence thermique et un solveur (un environnement SIMSCAPE ne peut pas fonctionner sans solveur).

Le bloc de référence thermique représente un point de référence thermique, c'est-à-dire un point avec une température nulle absolue, par rapport auquel toutes les températures du système sont déterminées.

Chaque réseau physique représenté par un bloc-diagramme Simscape connecté nécessite des informations sur les paramètres du solveur pour la simulation. Le bloc Solver Configuration spécifie les paramètres du solveur dont votre modèle a besoin avant de pouvoir commencer la simulation. Chaque bloc diagramme Simscape typologiquement distinct nécessite exactement un bloc de configuration du solveur pour y être connecté.

- **PORT B :** la sortie, c'est le point le plus chaud, relié avec la masse thermique. Le sens positif du bloc est de l'orifice A vers l'orifice B. Cela signifie que le signal positif à l'orifice S génère un flux de chaleur dans le sens de A vers B.

5. Le bloc de processus : qui est le système de température à commander, Comme illustré par la figure 1.16.

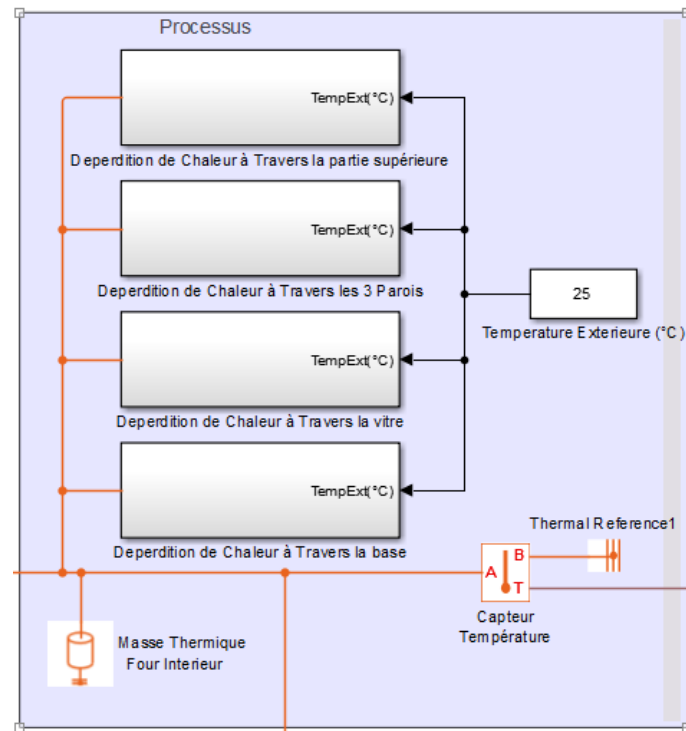


FIGURE 1.16 – processus

Ce bloc se compose essentiellement d'une masse thermique de l'intérieur du milieu qu'on veut commander sa température et de 4 blocs décrivant ce milieu et à travers ces derniers la chaleur a une déperdition (on peut les compter comme étant des perturbations), en plus d'un capteur de température pour visualiser les changements thermiques.

— La Masse Thermique : masse thermique à l'intérieur du Four :

Le bloc thermique *Mass* représente une masse thermique, qui reflète la capacité d'un matériau ou d'une combinaison de matériaux à stocker l'énergie interne. La propriété est caractérisée par la masse du matériau et sa chaleur spécifique [8].

La masse thermique est décrite par l'équation suivante :

$$Q = V \cdot \rho \quad (1.17)$$

Avec :

$$V = \text{Longueur} \cdot \text{Largeur} \cdot \text{Hauteur} \quad (1.18)$$

$$\rho = \frac{P.M}{R.T} \quad (1.19)$$

Q	Kg
ρ : Densité de l'air	$\frac{Kg}{m^3}$
V : volume	m^3
P : Pression de l'air	Pa
M : Masse molaire de l'air	$\frac{Kg}{mol}$
R : la constante universelle des gaz parfaits	$\frac{J}{K.mol}$
T : température	K

— Les blocs de déperdition de chaleur (perturbations) : la chaleur est transmise de deux manières soit en convection soit en conductivité, pour cela nous avons utilisé les deux blocs suivants :

1- Le bloc Convective Heat Transfer : représente un transfert de chaleur par convection entre deux corps au moyen d'un mouvement de fluide.

Le transfert est régi par la loi de Newton sur le refroidissement et est directement proportionnel au coefficient de chaleur par convection, à la surface et à la différence de température. [8]



FIGURE 1.17 – Convective Heat Transfer

Il est décrit par l'équation suivante :

$$Q = K.A.(T_A - T_B) \quad (1.20)$$

Avec :

Q	flux de chaleur [w]
A	surface [m^2]
K	coefficient de transfert de chaleur par convection [$\frac{w}{m^2.k}$]
$T_A.T_B$	la température des corps [K]

2- Le bloc Conductive Heat Transfer : représente un transfert de chaleur par conduction entre deux couches d'un même matériau. Le transfert est régi par la loi de Fourier. [8]



FIGURE 1.18 – Conductive Heat Transfer

Il est décrit par l'équation suivante :

$$Q = K \cdot \frac{A}{D} \cdot (T_A - T_B) \quad (1.21)$$

Avec :

Q	flux de chaleur
A	zone normale à la direction du flux de chaleur
K	la conductivité thermique du matériau
D	la distance entre les couches
T_A, T_B	la température des couches

Déperdition de chaleur à travers les 3 parois :

Contenu du sous-système :

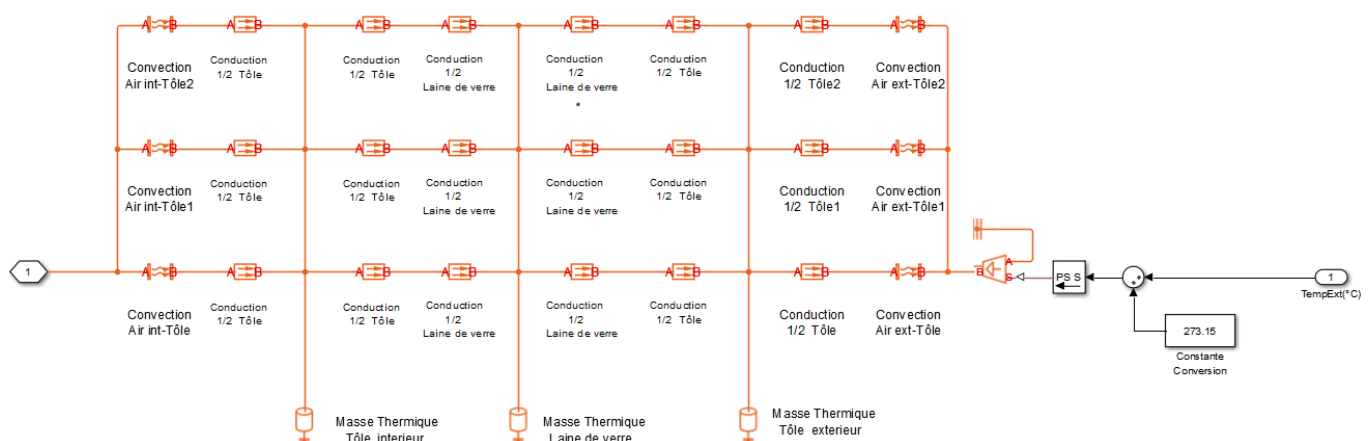


FIGURE 1.19 – Sous-système de bloc de déperdition de chaleur à travers les 3 parois

L'échange de chaleur entre l'air proche du mur et le mur est mis en œuvre à l'aide d'un bloc de transfert de chaleur par convection. Nous avons trois murs constitués chacun de deux aciers comprenant la laine de verre entre elles, ces figures montrent les paramètres de transfert thermique des 3 parois :

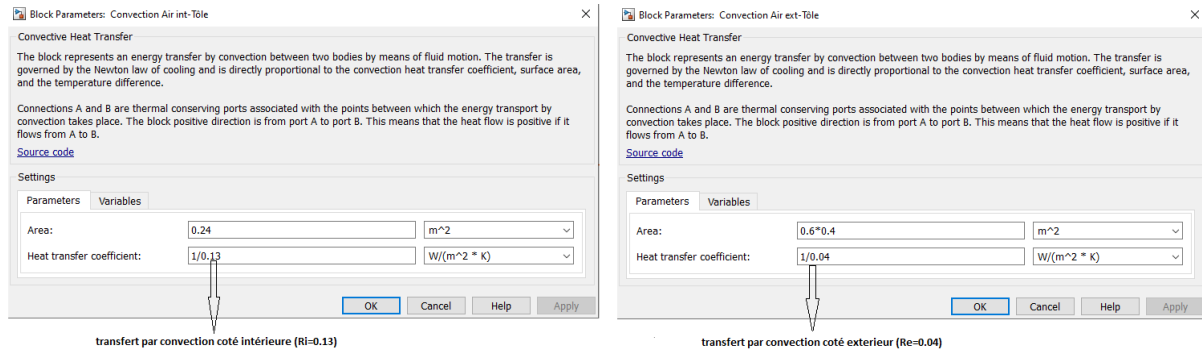


FIGURE 1.20 – Bloc des paramètres de convection air intérieur/tôle et air extérieur/tôle

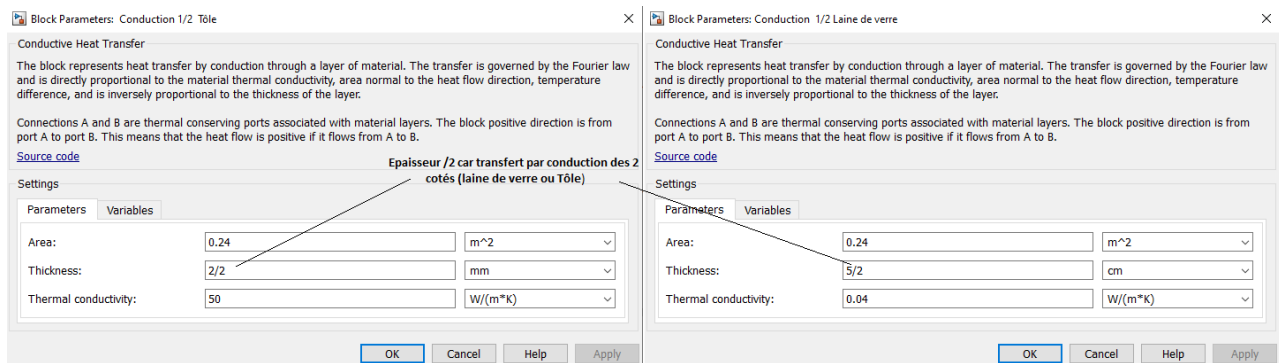


FIGURE 1.21 – Bloc des paramètres de conduction 1/2 tôle et 1/2 laine de verre

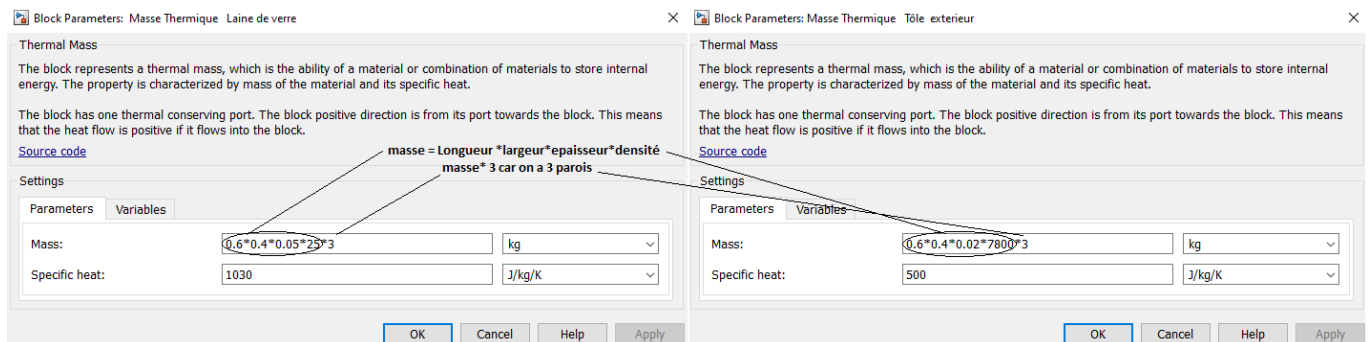


FIGURE 1.22 – Bloc des paramètres de masse thermique de laine de verre et tôle extérieure

Déperdition de chaleur à travers la fenêtre :

Contenu du sous-système :

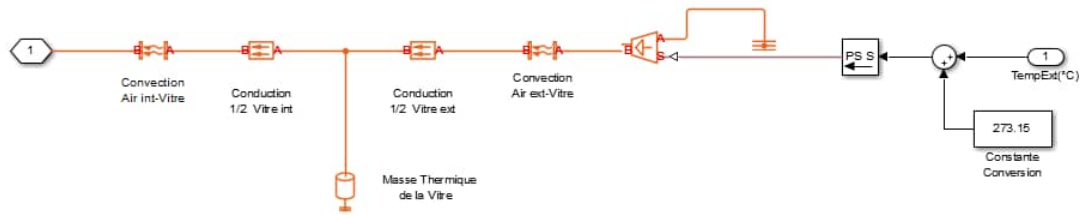


FIGURE 1.23 – Sous-système de bloc de déperdition de chaleur à travers la fenêtre

L'échange de chaleur entre l'air proche de la fenêtre (Dans notre cas nous avons un vitrage simple (c'est-à-dire sans espace d'air ou de gaz), la transmission de chaleur se fait par conduction.) et la fenêtre est mis en œuvre à l'aide d'un bloc de transfert de chaleur par convection.

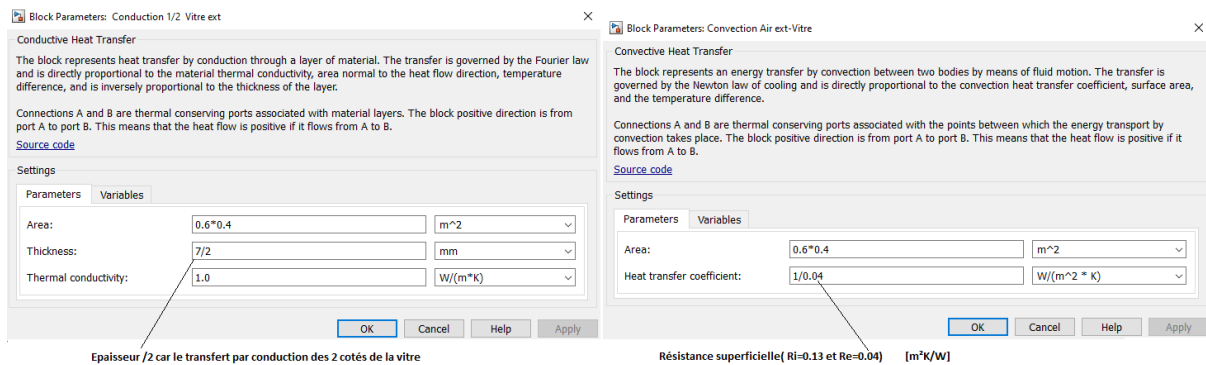


FIGURE 1.24 – Bloc des paramètres de conduction et convection du vitre

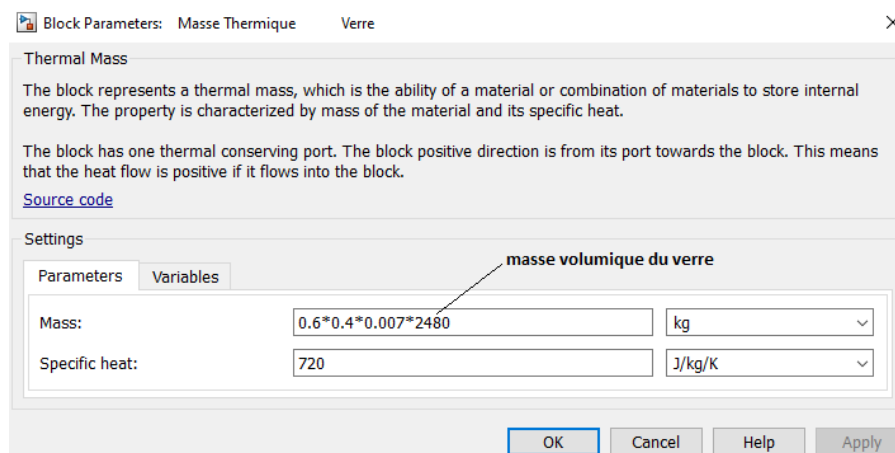


FIGURE 1.25 – Bloc des paramètres de masse thermique du verre

Déperdition de chaleur à travers la partie supérieure :

Contenu du sous-système :

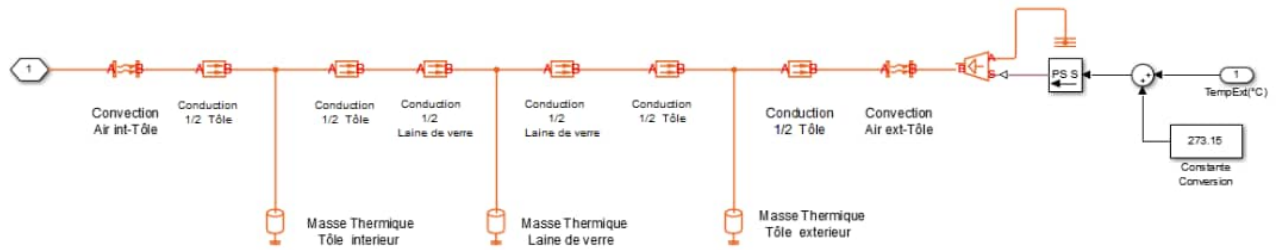


FIGURE 1.26 – Sous-système de bloc de déperdition de chaleur à travers la partie supérieure

L'échange de chaleur entre l'air proche de la partie supérieure et la partie supérieure du four est mis en œuvre à l'aide d'un bloc de transfert de chaleur par convection.

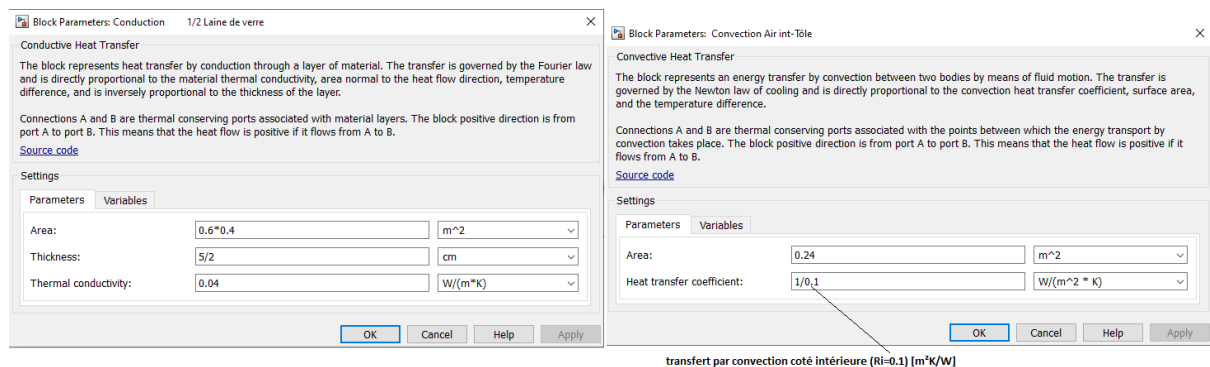


FIGURE 1.27 – Bloc des paramètres de conduction 1/2 laine de verre et convection air intérieure/tôle

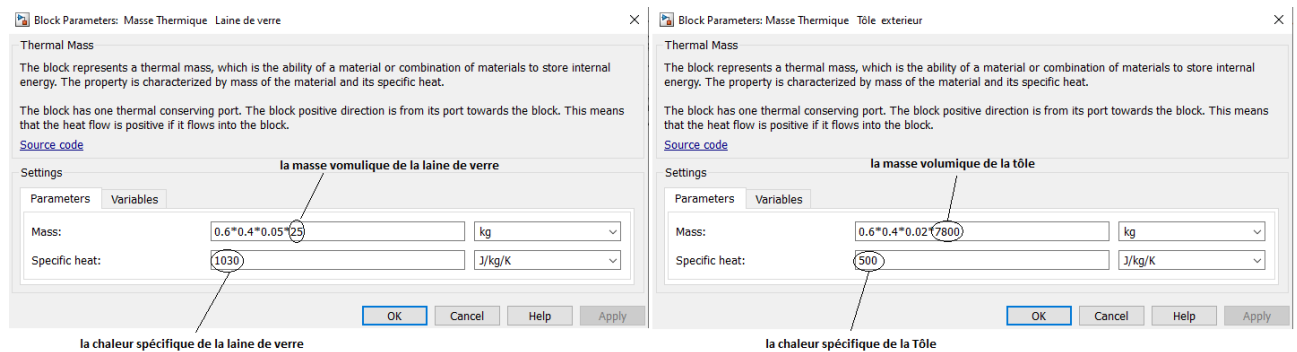


FIGURE 1.28 – Bloc des paramètres de masse thermique de laine de verre et tôle extérieure

Déperdition de chaleur à travers la base :

Contenu du sous-système :

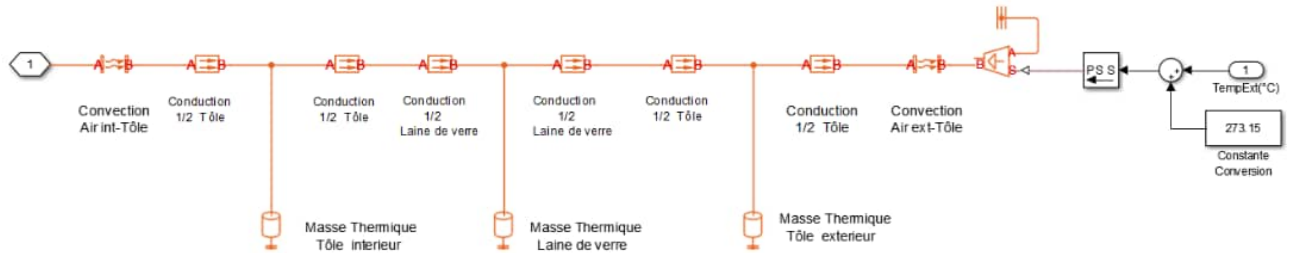


FIGURE 1.29 – Sous-système de bloc de déperdition de chaleur à travers la base

L'échange de chaleur entre l'air proche de la base et la base est mis en œuvre à l'aide d'un bloc de transfert de chaleur par convection.

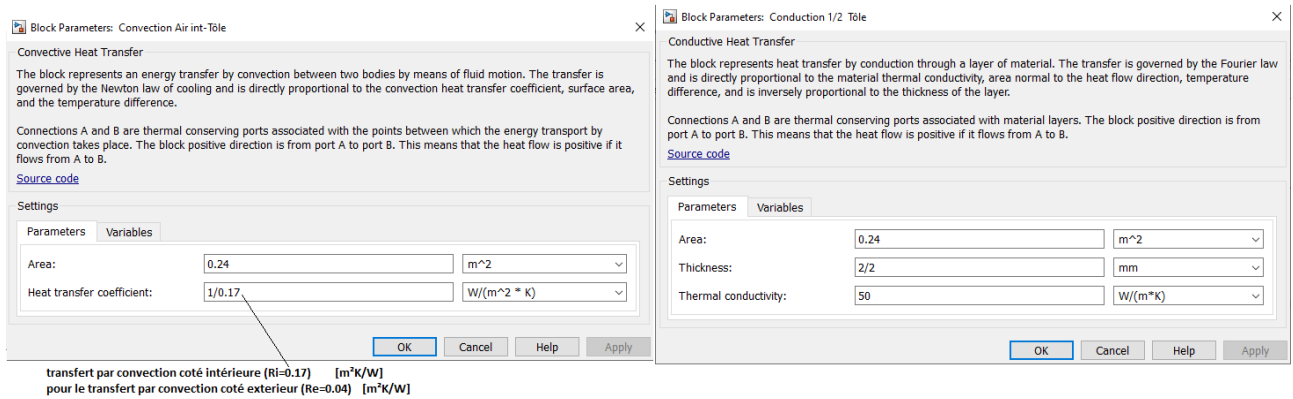


FIGURE 1.30 – Bloc des paramètres de conduction 1/2 tôle et convection air intérieur/tôle

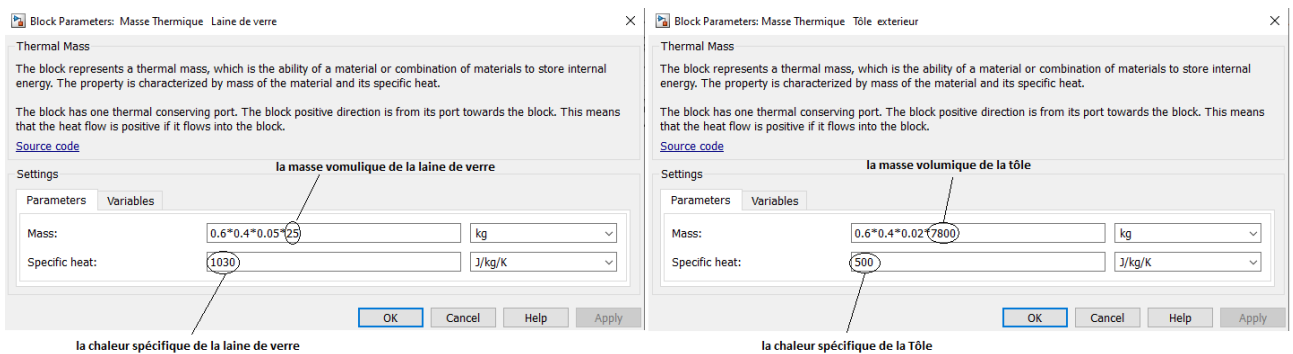


FIGURE 1.31 – Bloc des paramètres de masse thermique de laine de verre et tôle extérieure

Définitions des blocs thermiques et les valeurs de leurs paramètres :

1. La tôle : [4],[2]

Longueur	60 cm
Largeur	40 cm
Épaisseur	2 mm
Densité (masse volumique)	$7800 \frac{Kg}{m^3}$
Chaleur spécifique massique	$500 \frac{J}{Kg.K}$
Conductivité thermique	$50 \frac{w}{m.K}$

2. La laine de verre : [7]

Longueur	60 cm
Largeur	40 cm
Épaisseur	5 cm
Densité (masse volumique)	$25 \frac{Kg}{m^3}$
Chaleur spécifique massique	$1030 \frac{J}{Kg.K}$
Conductivité thermique	$0.04 \frac{w}{m.K}$

3. La fenêtre en verre (simple vitrage) : [6]

Longueur	60 cm
Largeur	40 cm
Épaisseur	7 mm
Densité (masse volumique)	$2480 \frac{Kg}{m^3}$
Chaleur spécifique massique	$720 \frac{J}{Kg.K}$
Conductivité thermique	$1 \frac{w}{m.K}$

La masse volumique : est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume appelé aussi densité volumique de masse.

La masse volumique est généralement notée par ρ et calculée par fraction de la masse sur le volume. [1]

La chaleur spécifique : qu'il convient d'appeler capacité thermique massique. elle est définie par la quantité de chaleur à apporter à 1kg du matériau pour élever sa température de 1°C. [1]

La conductivité thermique : est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction notée λ . C'est la quantité de chaleur traversant en 1 seconde un matériau de 1m d'épaisseur et d'une surface de 1 m^2 lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1°C. Plus la conductivité est petite plus le matériau est isolant. Ce coefficient vous est fourni par le fabricant de l'isolant. [1]

Le coefficient de transfert thermique : est un flux thermique par convection au travers d'une surface d'échange appelé aussi coefficient de transmission surfacique U . Il permet d'indiquer la facilité avec laquelle l'énergie thermique passe au travers de la surface d'échange. [1]

	Coefficient de transfert thermique $\frac{w}{m^2.k}$
Parois (Tôle), Verre coté extérieur	$\frac{1}{0.04}$
Parois (Tôle), Verre coté intérieure	$\frac{1}{0.13}$
partie supérieure (Tôle) coté extérieur	$\frac{1}{0.04}$
partie supérieure (Tôle) coté intérieur	$\frac{1}{0.1}$
La base (Tôle) coté extérieur	$\frac{1}{0.04}$
La base (Tôle) coté intérieur	$\frac{1}{0.17}$

$$U = \frac{1}{R_i + R + R_e} \quad (1.22)$$

R : La résistance thermique : représente la résistance du matériau au passage de la chaleur. C'est donc l'inverse de la conductivité thermique. Plus le matériau est épais, mieux il résistera au transfert de chaleur. La résistance thermique d'une paroi constituée d'un seul matériau, se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (1.23)$$

Où :

e : L'épaisseur de la paroi en m

λ = la conductivité thermique du matériau en $\frac{W}{m.K}$

Résistance superficielle R_i et R_e en $\frac{W}{m^2.K}$: quand une paroi est en contact avec l'air, elle échange de la chaleur par conduction, par convection avec cet air et par rayonnement avec son environnement.

Ces transferts thermiques sont caractérisés par les coefficients d'échange thermique superficiel nommés h_e et h_i .

- h_e : est le coefficient d'échange thermique superficiel entre une paroi et une ambiance extérieure.

$$h_e = \frac{1}{R_e} \quad (1.24)$$

R_e : représente la résistance thermique d'échange d'une surface extérieure.

- h_i : est le coefficient d'échange thermique superficiel entre une paroi et une ambiance intérieure.

$$h_i = \frac{1}{R_i} \quad (1.25)$$

R_i : représente la résistance thermique d'échange d'une surface intérieure.

Valeur par défaut $\frac{m^2.k}{W}$	R_i	R_e
Paroi vertical et le sens du flux horizontal	0.13	0.04
Paroi horizontal et le sens du flux vers le haut	0.10	0.04
Paroi horizontal et le sens du flux vers le bas	0.17	0.04

- Le capteur de température : représente un capteur de température idéal qui est représenté par la figure 1.32, c'est-à-dire un dispositif qui détermine la différence de température mesurée entre deux points sans prélever de chaleur.

Les connexions A et B sont des ports de conservation thermique qui se connectent aux deux points où la température est surveillée. Le port T est un port de signal physique qui fournit la valeur du différentiel de température. Le sens positif du bloc va du port A au port B. [8]

La température mesurée est déterminée comme suit :

$$T = TA - TB. \quad (1.26)$$



FIGURE 1.32 – Capteur de Température

Le bloc comporte les ports suivants :

Port A : relié avec la source de chaleur (la sonde positive du capteur).

Port B : relié avec la référence thermique (la sonde négative du capteur).

T : Port de sortie du signal physique pour la température.

6. Température extérieure : c'est la température en dehors du système, mais qui joue un rôle essentiel dans le changement de la température intérieure par les phénomènes de conduction et convection qu'on a déjà cité.

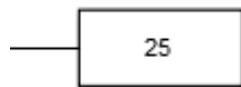


FIGURE 1.33 – Temperature Exterieur (°C)

7. Un gain : Le bloc gain multiplie l'entrée par une valeur constante (gain). L'entrée et le gain peuvent être chacun un scalaire, un vecteur ou une matrice. Vous spécifiez la valeur du gain dans le paramètre Gain. Le paramètre Multiplication vous permet de spécifier la multiplication par élément ou par matrice.[8]

pour chauffer notre four, nous avons besoin d'une énergie de 500 watt. Nous avons donc multiplié l'entrée de la source de chaleur, qui est égale à 10, par ce gain, qui est égal à 50, pour obtenir une énergie qui peut chauffer ce four.



FIGURE 1.34 – Gain de proportionnalité

D'autres blocs utilisés dans le schéma :

- **Le bloc Simulink-PS Converter** : utilisez ce bloc pour connecter des sources Simulink ou d'autres blocs Simulink aux entrées d'un diagramme de réseau physique.

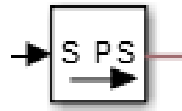


FIGURE 1.35 – Simulink-PS Converter

- **Le bloc PS-Simulink Converter** : convertit un signal physique en un signal de sortie Simulink. Utilisez ce bloc pour connecter les sorties d'un diagramme de réseau physique aux oscilloscopes Simulink ou à d'autres blocs Simulink.



FIGURE 1.36 – PS-Simulink Converter

- **Scope** : c'est l'oscilloscope Simulink qui offre plusieurs méthodes pour afficher les données de simulation et les saisir pour une analyse ultérieure.

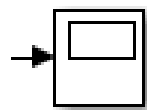


FIGURE 1.37 – Scope

- **DISPLAY (affichage)** : Le bloc Affichage indique la valeur des données d'entrée. Vous pouvez spécifier la fréquence de l'affichage. Pour les données numériques, vous pouvez également spécifier le format d'affichage. Si le bloc d'entrée est un tableau, vous pouvez redimensionner le bloc verticalement ou horizontalement pour afficher plus que le premier élément.

Si le bloc est un vecteur, le bloc ajoute séquentiellement des champs d'affichage de gauche à droite et de haut en bas. Le bloc affiche autant de valeurs que possible. Un triangle noir indique que le bloc n'affiche pas tous les éléments du tableau de saisie. Le bloc Affichage affiche les 200 premiers éléments d'un signal vectoriel et les 20 premières lignes et 10 colonnes d'un signal matriciel.

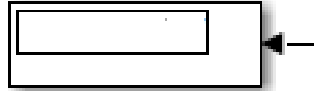


FIGURE 1.38 – Display

- **Le bloc Somme** : effectue des additions ou des soustractions sur ses entrées. Les blocs Add, Subtract, Sum of Elements et Sum sont des blocs identiques. Ce bloc peut ajouter ou soustraire des entrées scalaires, vectorielles ou matricielles. Il peut également réduire les éléments d'un signal et effectuer une sommation.

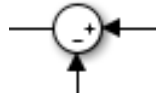


FIGURE 1.39 – Sum

1.2.3 Résultat de simulation :

La simulation en boucle ouverte de ce système, et le résultat du scope donnent le changement de température en fonction de temps présenté par la figure suivante :

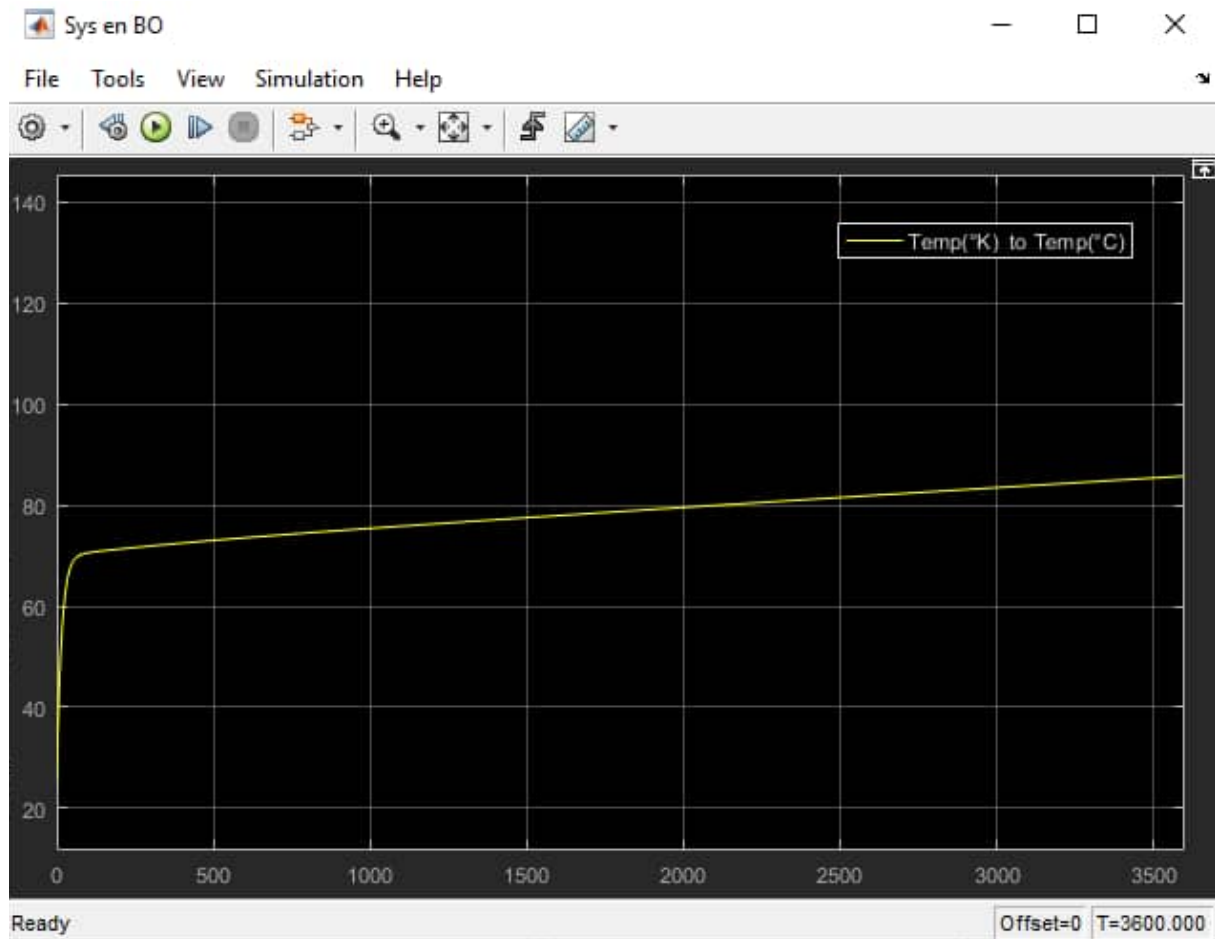


FIGURE 1.40 – Réponse du système en BO

Interprétation des résultats de simulation :

Nous pouvons remarquer sur cette figure que notre système thermique est instable.

Chapitre 2

Commande sans modèle

2.1 Introduction

Un contrôle automatique efficace nécessite des modèles fiables, représentant assez fidèlement les systèmes physiques. Or les modèles sont souvent obtenus après plusieurs simplifications et leurs paramètres sont généralement incertains. Les lois de commande calculées sur la base de ces modèles ne sont parfois efficaces que pour le modèle nominal. Pour les praticiens, il est nécessaire que la loi de commande continue à fonctionner sur le système réel, dont le comportement pourrait être différent de celui du modèle initial. On a recours à des régulateurs dits robustes pour remédier à ce problème.

Une autre solution aussi efficace est d'utiliser de la commande sans modèle, autrement dit une commande non calculée sur la base du modèle du système, mais utilisant seulement des mesures des sorties et d'entrées du système. Dans ce chapitre, nous présentons la théorie de la commande sans modèle et la méthode d'estimation numérique des dérivées de la sortie du système.

2.2 Principes généraux

2.2.1 Automatique :

Elle regroupe l'ensemble de théories et de techniques pour la prise de décision et la commande des systèmes. L'automatique est ainsi la discipline scientifique permettant de caractériser les systèmes automatisés et de choisir/concevoir/réaliser leur commande.[10]

Il existe deux domaines d'intervention de l'automatique :

- Dans les systèmes à événements discrets ou automatismes où on a une séquence d'actions dans le temps, comme les distributeurs automatiques, les portes automatisées, les ascenseurs, les passages à niveau, ...
- Dans les systèmes de régulation et d'asservissement, comme la régulation de température, de pression, asservissement de position et de vitesse, robotique, ...

2.2.2 Système automatisé ou système automatique :

D'abord un système est défini comme un assemblage de composants ou d'éléments de manière à produire une fonction ou tâche donnée. Il possède un ou plusieurs signaux d'entrée exogène et un ou plusieurs signaux de sortie. Deux classes de système peuvent être distinguées selon le nombre d'entrées/sorties : les systèmes mono-variables et les systèmes multi-variables, comme illustré par la Figure 2.1.

Un système automatisé est un système réalisant des opérations où l'homme n'intervient que dans la programmation du système de contrôle et dans son réglage. Le but d'un système automatisé est de réaliser des tâches complexes ou dangereuses pour l'homme, effectuer des tâches pénibles ou répétitives ou encore gagner en efficacité et en précision.[14]

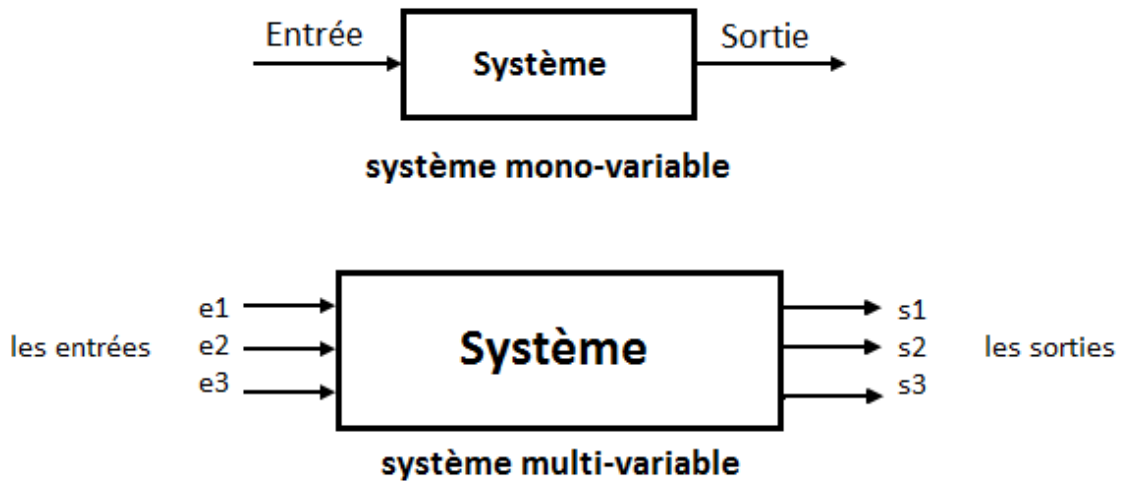


FIGURE 2.1 – Représentation fonctionnelle d’un système mono-variable et d’un système multi-variables.

En plus des entrées notées u et des sorties notées y , un système peut subir des perturbations notées p qui sont des entrées indésirables, comme représenté par la figure 2.2.

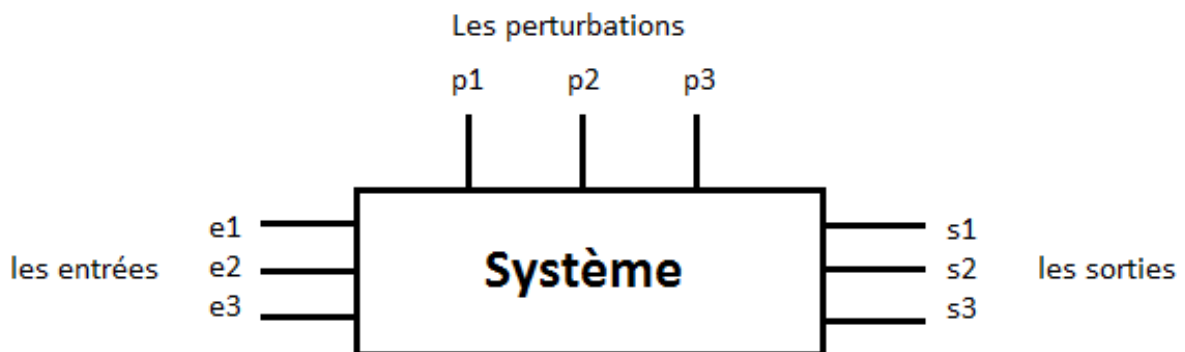


FIGURE 2.2 – Schéma fonctionnel d’un système avec des perturbations

Le comportement d’un système physique est régi par une équation différentielle de la forme générale suivante :

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{du}{dt} + b_0 u(t) \quad (2.1)$$

Pour des raisons de causalité, on a $m \leq n$ (la cause $u(t)$ précède l’effet $y(t)$).

2.2.3 Régulation et asservissement :

Le but d'un système automatique est de satisfaire un cahier de charges en termes de Stabilité, Rapidité, Précision et Robustesse. Le régulateur veille à assurer ces performances en se basant sur les mesures de la sortie du système effectuées par capteurs ou estimées par observateurs et, en agissant sur les actionneurs du système.[14]

Selon la nature de la consigne, on peut réaliser :

- La Régulation où la consigne est choisie constante et, le régulateur doit garder la sortie égale ou proche à cette entrée référence.
- L'asservissement où la consigne est un signal variable, qui doit être suivi par la sortie asservie avec une erreur nulle ou faible.

2.2.4 Classification des structures de commande des systèmes :

1. Commande en boucle ouverte (B.O) :

Est défini comme un système où le signal de commande est indépendant du signal de sortie (pas de capteur) [10], comme représenté par la Figure 2.3.

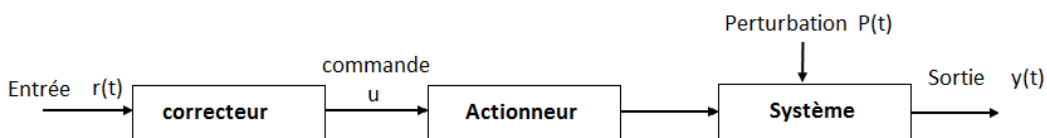


FIGURE 2.3 – Commande en boucle ouverte

En boucle ouverte, l'organe de commande pilote le système à réguler mais ne peut pas assurer la régulation. Cette structure est simple et peu coûteuse, mais souvent inutilisable à cause de son imprécision et son incapacité à contrer les effets aléatoires dus aux perturbations.

2. Commande en boucle fermée (B.F) :

C'est un système où le signal de commande dépend d'une façon ou d'une autre du signal de sortie. Autrement dit, il y a un feedback où le signal de sortie est continument comparé au signal d'entrée et donc, le système est continument corrigé jusqu'à ce que les deux signaux soient égaux ou proches [10]. Le principe de cette structure est montré par la Figure 2.4.

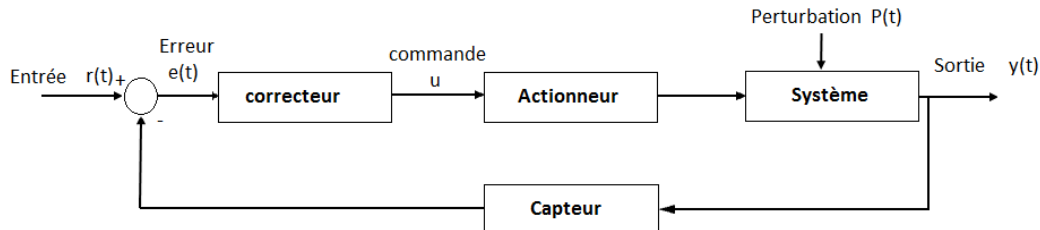


FIGURE 2.4 – Commande en boucle fermée

Cette structure plus chères et plus robuste du fait de la présence d'un capteur dans la chaîne de retour et d'un régulateur performant dans la chaîne directe.

2.3 Pourquoi utiliser une commande sans modèle ?

Décrire des systèmes physiques par des modèles simples et fiables est loin d'être gagné. Les modèles utilisés sont obtenus après plusieurs simplifications, leurs paramètres ne sont connus qu'avec incertitude et le fonctionnement réel du système peut s'éloigner du modèle identifié initialement dit modèle nominal.

Il est nécessaire de calculer des lois de commandes robustes face à ces problèmes d'incertitude. Une alternative pour contrôler les systèmes physiques est la commande sans modèle abordée dans ce chapitre. Ce type de commande n'est pas basé sur le modèle global du système, mais uniquement sur des mesures des entrées et des sorties du système. La commande est continument renouvelée en utilisant un modèle local valable sur un court laps de temps.

La commande sans modèle est une nouvelle approche proposée par M.Fliess et al. Elle se distingue des identifications de type "boîte noire", telles qu'on les trouve dans la littérature, où l'on recherche un modèle valide sur une plage de fonctionnement aussi large que possible.[15]

2.4 Modèle globale v.s modèle local :

Un modèle global est un modèle aussi valable que possible dans le temps. Il décrit la relation de la sortie du système en fonction de son entrée en fonction des lois physiques. D'un point de vue mathématique, un modèle global peut s'écrire généralement comment montré par l'équation (2.2).

$$y^{(n)} = f(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, u, \dot{u}, \dots, u^{(m)}) \quad (2.2)$$

La commande sans modèle n'a besoin que d'un modèle ultra-local valable sur une courte fenêtre de temps, comme représenté par la Figure 2.5.

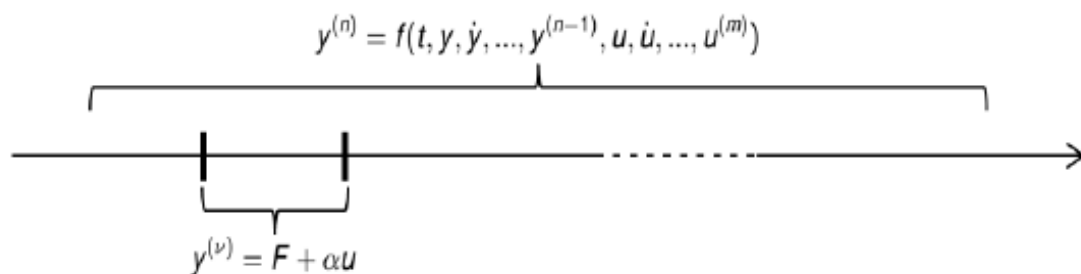


FIGURE 2.5 – Modèle globale v.s modèle local

Dans l'ignorance d'un modèle mathématique global, le modèle ultra-local dit aussi "phénoménologique", est donné par l'équation (2.3) : [9]

$$y^{(\nu)} = F + \alpha u \quad (2.3)$$

où :

- Les variables u et y désignent respectivement la commande et la sortie.
- L'ordre ν est celui de dérivation, choisi souvent égal à 1 ou 2.
- Le paramètre constant $\alpha \in R$ sans unité, est fixé par l'opérateur afin que les valeurs numériques de αu et $y^{(\nu)}$ aient le même ordre de grandeur.
- La fonction constante F supposée contenir toute la partie inconnue et perturbée du système (sans différence) est estimée à partir des mesures des sorties y et des entrées u sur chaque fenêtre de temps considérée.

$$F_{est} = y_{est}^{(\nu)} - \alpha u$$

2.5 Principe de calcul de la commande sans modèle :

Nous expliquons le principe de contrôle par la Figure 2.6. Deux intervalles de temps sont considérés : [9],[12]

- Intervalle de commande T , sur lequel le modèle local (2.4) est considéré et, qui est évidemment actualisé à chaque intervalle. La commande est appliquée au système à chaque T .
- Intervalle des mesures δt , auquel on prend des mesures de la sortie du système et donc on estime $y^{(\nu)}$.

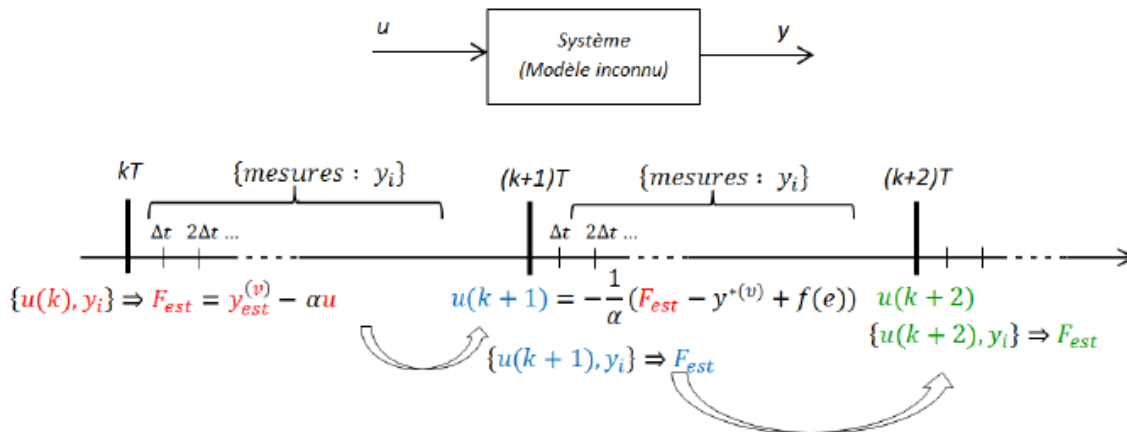


FIGURE 2.6 – Schéma représentatif du principe de la commande sans modèle.

Pour calculer une commande sans modèle, on procède comme suit :

- Définir le modèle ultra local :

$$y^{(\nu)} = F + \alpha u \quad (2.4)$$

- Estimer la dérivée $y_{est}^{(\nu)}$ pour estimer par la suite la fonction F :

Comme on l'a mentionné ci-dessus, F subsume non seulement la structure inconnue du système mais aussi la partie perturbée. Elle est continuellement mise à jour par :

$$F_{est} = y_{est}^{(\nu)} - \alpha u \quad (2.5)$$

- Calculer la commande u :

A chaque période de commande T , le contrôle est donné par :

$$u = -\frac{1}{\alpha}(F_{est} - y^{*(\nu)} + f(e)) \quad (2.6)$$

y^* est la trajectoire de référence dont la sortie y doit suivre.

$f(e)$ est une fonction dépendante du passé et du présent de l'erreur $e = y - y^*$

Combinons maintenant les deux équations :

$$\begin{aligned} y^{(\nu)} &= F + \alpha u \\ u &= -\frac{1}{\alpha}(F - y^{*(\nu)} + f(e)) \end{aligned}$$

Nous obtenons :

$$e^{(\nu)} + f(e) = 0 \quad (2.7)$$

Nous devons choisir $f(e)$ tel qu'un bon suivi de la trajectoire y^* soit assuré, c'est à dire :

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} e(t) = 0$$

Le plus souvent, on utilise un contrôleur Proportionnel-Intégral-Dérivé intelligent (iPID) ajustable. Donc on choisit :

$$f(e) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \dot{e}(t)$$

Les valeurs des gains k_p , k_i et k_d sont ajustables par essai-erreur.

2.5.1 Choix du correcteur :

Pour simplifier, prenons le cas d'un système mono variable, rappelons que le modèle local dit aussi phénoménologique est donné par : [11],[12]

$$y^{(\nu)} = F + \alpha u$$

Le plus souvent on choisit $\nu = 1$ ou 2 , de telle sorte considérer un modèle local simplifié d'ordre 1 ou 2.

- Si $\nu = 2$, on ferme la boucle avec un régulateur intelligent Proportionnel-Intégral-Dérivé (*i*-PID) :

$$u = -\frac{F - \dot{y}^* + k_p e + k_i \int e + k_d \dot{e}}{\alpha} \quad (2.8)$$

- Si $\nu = 1$, on ferme la boucle avec un régulateur intelligent Proportionnel-Intégral (*i*-PI) dont la commande est donnée par :

$$u = -\frac{F - \dot{y}^* + k_p e + k_i \int e}{\alpha} \quad (2.9)$$

Idem, une bonne estimation de F aide le régulateur à satisfaire de bonnes performances.

Étapes de la commande sans modèle :

Mise à part l'estimation de la sortie et de ses dérivées qui doit être fiable, la commande sans modèle est simple. Le praticien doit suivre les étapes suivantes :[13]

1. Fixer la valeur de $\nu = 1$ ou 2 de l'équation (2.4).
2. Ajuster α de façon à avoir le même ordre de grandeur entre $y^{(\nu)}$ et αu .
3. Choisir la référence y^* (consigne).
4. Calculer la valeur numérique de $F = y^{(\nu)} - \alpha u$, après avoir estimé $y^{(\nu)}$.
5. Appliquer un correcteur i -PI ou i -PID au système selon le cahier de charges, en ajustant les paramètres k_p , k_i et k_d .

Remarque :

Il est très important de bien choisir les deux périodes de temps : T la période de commande qui dépendra de la constante de temps du système commandé, et δt la période de mesure.

2.6 Estimations des dérivées temporelles

2.6.1 Introduction :

La commande sans modèle est essentiellement basée sur une bonne estimation des dérivées des sorties du système, si l'estimation est mauvaise, alors les résultats qui suivent seront erronés ; d'où l'importance cruciale de choisir la bonne méthode de dérivation numérique.

Il existe plusieurs méthodes, malheureusement elles sont soit, très sensibles aux bruits, soit difficiles à implémenter.

Afin de régler ce problème, M. Fliess et al. Ont mis au point de nouvelles méthodes [16], qui estiment les dérivées en calculant des intégrales, qui comme nous le savons, sont des filtres passe bas, et donc bons pour filtrer les bruits de mesure.

2.6.2 Estimations des dérivées temporelles selon M.Fliess et al :

Soit $y(t)$ une observation bruitée d'un signal $x(t)$ à valeurs réelles, sur un ensemble d'intervalles finis dans le temps, nous voulons estimer ses dérivées. Nous supposons que $x(t)$ est un signal polynômial de degré N , qui peut s'écrire par son développement limité de Taylor au tour du point zéro, de la manière suivante :[15]

$$x_N(t) = \sum_{\nu=0}^N x^{(\nu)}(0) \frac{t^\nu}{\nu!} \quad (2.10)$$

La transformée de Laplace de $x_N(t)$ est :

$$X_n(s) = \sum_{\nu=0}^N \frac{x^{(\nu)}(0)}{s^{\nu+1}} \quad (2.11)$$

Le but est d'estimer le $x^{(\nu)}(0)$, à partir de là on trouve facilement les estimations des dérivées temporelles de la sortie $x(t)$ du système qui est supposé être bruité, pour cela on va faire une estimation indépendante.[13],[16]

Multiplions les deux membres de l'équation (2.11) par s^{N+1} , ce qui donne :

$$s^{N+1}X_N(s) = s^N x(0) + s^{N-1}\dot{x}(0) + \dots + x^{(N)}(0) \quad (2.12)$$

Soit $N = 3$ par exemple :

$$s^4 X_N(s) = s^3 x(0) + s^2 \dot{x}(0) + s \ddot{x}(0) + x^{(3)}(0) \quad (2.13)$$

L'objectif donc est de retrouver $x(0), \dot{x}(0), \ddot{x}(0), x^{(3)}(0)$.

1. Estimation de $x(0)$: Pour obtenir $x(0)$, nous dérivons l'équation (2.13) trois fois par rapport à s , nous obtenons :

- 1^{ère} dérivée :

$$4s^3 X_N(s) + s^4 \frac{dX_N(s)}{ds} = 3s^2 x(0) + 2s\dot{x}(0) + \ddot{x}(0) \quad (2.14)$$

- 2^{ème} dérivée :

$$12s^2 X_N(s) + 8s^3 \frac{dX_N(s)}{ds} + s^4 \frac{d^2 X_N(s)}{ds^2} = 6sx(0) + 2\dot{x}(0) \quad (2.15)$$

- 3^{ème} dérivée :

$$24s X_N(s) + 36s^2 \frac{dX_N(s)}{ds} + 12s^3 \frac{d^2 X_N(s)}{ds^2} + s^4 \frac{d^3 X_N(s)}{ds^3} = 6x(0) \quad (2.16)$$

Nous divisons l'équation (2.16) par $s^{\bar{N}}$, en choisissant par exemple $\bar{N} = 5$:

$$\frac{24}{s^4} X_N(s) + \frac{36}{s^3} \frac{dX_N(s)}{ds} + \frac{12}{s^2} \frac{d^2 X_N(s)}{ds^2} + \frac{1}{s} \frac{d^3 X_N(s)}{ds^3} = \frac{6}{s^5} x(0) \quad (2.17)$$

Maintenant on applique à l'équation(2.17) la transformée de Laplace inverse pour revenir au domaine temporel, nous obtenons :

$$\begin{aligned} 6x(0) \frac{T^4}{4!} = & \\ & \int_0^T -\sigma^3 x(\sigma) d\sigma + 12 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \sigma^2 x(\sigma) d\sigma d\sigma_1 + 36 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \int_0^{\sigma_2} -\sigma x(\sigma) d\sigma d\sigma_1 d\sigma_2 \\ & + 24 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \int_0^{\sigma_2} \int_0^{\sigma_3} x(\sigma) d\sigma d\sigma_1 d\sigma_2 d\sigma_3 \end{aligned}$$

En utilisant les outils mathématiques, on peut encore simplifier les intégrales doubles, triples et quadruples en intégrales simples :

$$\begin{aligned} 6x(0) \frac{T^4}{4!} = & \int_0^T -\sigma^3 x(\sigma) d\sigma + 12 \int_0^T (T - \sigma) \sigma^2 x(\sigma) d\sigma + 36 \int_0^T -\frac{(T-\sigma)^2}{2!} \sigma x(\sigma) d\sigma \\ & + 24 \int_0^T \frac{(T-\sigma)^3}{3!} x(\sigma) d\sigma \end{aligned}$$

D'où l'estimation de $x(0)$.

2. Estimation de $\dot{x}(0)$: Pour obtenir $\dot{x}(0)$, nous dérivons l'équation (2.13) deux fois par rapport à s , nous obtenons :

- 1^{ère} dérivée :

$$4s^3 X_N(s) + s^4 \frac{dX_N(s)}{ds} = 3s^2 x(0) + 2s\dot{x}(0) + \ddot{x}(0) \quad (2.18)$$

- 2^{ème} dérivée :

$$12s^2 X_N(s) + 8s^3 \frac{dX_N(s)}{ds} + s^4 \frac{d^2 X_N(s)}{ds^2} = 6sx(0) + 2\dot{x}(0) \quad (2.19)$$

Remarque :

Nous voulons estimer $\dot{x}(0)$: alors il faut éliminer le terme $x(0)$. Pour cela :

— On va diviser l'équation (2.19) par s , comme suit :

$$12s X_N(s) + 8s^2 \frac{dX_N(s)}{ds} + s^3 \frac{d^2 X_N(s)}{ds^2} = 6x(0) + \frac{2}{s} \dot{x}(0) \quad (2.20)$$

— Et encore une fois, nous dérivons l'équation (2.20) que nous avons obtenue une seule fois par rapport à s , comme suit :

$$-\frac{2}{s^2} \dot{x}(0) = s^3 \frac{d^3 X_N(s)}{ds^3} + 11s^2 \frac{d^2 X_N(s)}{ds^2} + 28s \frac{dX_N(s)}{ds} + 12X_N(s) \quad (2.21)$$

Ensuite, divisons (2.21) par s^4 :

$$-\frac{2}{s^6} \dot{x}(0) = \frac{1}{s} \frac{d^3 X_N(s)}{ds^3} + \frac{11}{s^2} \frac{d^2 X_N(s)}{ds^2} + \frac{28}{s^3} \frac{dX_N(s)}{ds} + \frac{12}{s^4} X_N(s) \quad (2.22)$$

Maintenant on applique à l'équation(2.22) la transformée de Laplace inverse pour revenir au domaine temporel, nous obtenons :

$$\begin{aligned} -2\dot{x}(0) \frac{T^5}{5!} = & \\ \int_0^T -\sigma^3 x(\sigma) d\sigma + 11 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \sigma^2 x(\sigma) d\sigma d\sigma_1 + 28 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \int_0^{\sigma_2} -\sigma x(\sigma) d\sigma d\sigma_1 d\sigma_2 & \\ + 12 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \int_0^{\sigma_2} \int_0^{\sigma_3} x(\sigma) d\sigma d\sigma_1 d\sigma_2 d\sigma_3 & \end{aligned}$$

En utilisant les outils mathématiques, on peut encore simplifier les intégrales doubles, triples et quadruples en intégrales simples :

$$-2\dot{x}(0)\frac{T^5}{5!} = \int_0^T -\sigma^3 x(\sigma) d\sigma + 11 \int_0^T (T-\sigma)\sigma^2 x(\sigma) d\sigma + 28 \int_0^T -\frac{(T-\sigma)^2}{2!} \sigma x(\sigma) d\sigma \\ + 12 \int_0^T \frac{(T-\sigma)^3}{3!} x(\sigma) d\sigma$$

D'où l'estimation de $\dot{x}(0)$.

3. Estimation de $\ddot{x}(0)$:

Pour obtenir $\ddot{x}(0)$, nous dérivons l'équation (2.13) une seule fois par rapport à s , nous obtenons :

$$4s^3 X_N(s) + s^4 \frac{dX_N(s)}{ds} = 3s^2 x(0) + 2s\dot{x}(0) + \ddot{x}(0) \quad (2.23)$$

Remarque :

Nous voulons estimer $\ddot{x}(0)$: alors il faut éliminer le terme $x(0)$ et $\dot{x}(0)$. Pour cela :

— On va diviser l'équation (2.23) par s , comme suit :

$$4s^2 X_N(s) + s^3 \frac{dX_N(s)}{ds} = 3sx(0) + 2\dot{x}(0) + \frac{1}{s}\ddot{x}(0) \quad (2.24)$$

— Et encore une fois, nous dérivons l'équation (2.24) que nous avons obtenue deux fois par rapport à s , comme suit :

$$\frac{2}{s^3}\ddot{x}(0) = s^3 \frac{d^3 X_N(s)}{ds^3} + 10s^2 \frac{d^2 X_N(s)}{ds^2} + 22s \frac{dX_N(s)}{ds} + 8X_N(s) \quad (2.25)$$

Ensuite, divisons (2.25) par s^4 :

$$\frac{2}{s^7}\ddot{x}(0) = \frac{1}{s} \frac{d^3 X_N(s)}{ds^3} + \frac{10}{s^2} \frac{d^2 X_N(s)}{ds^2} + \frac{22}{s^3} \frac{dX_N(s)}{ds} + \frac{8}{s^4} X_N(s) \quad (2.26)$$

Maintenant on applique à l'équation(2.26) la transformée de Laplace inverse pour revenir au domaine temporel, nous obtenons :

$$2\ddot{x}(0)\frac{T^6}{6!} = \int_0^T -\sigma^3 x(\sigma) d\sigma + 10 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \sigma^2 x(\sigma) d\sigma d\sigma_1 + 22 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \int_0^{\sigma_2} -\sigma x(\sigma) d\sigma d\sigma_1 d\sigma_2 \\ + 8 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \int_0^{\sigma_2} \int_0^{\sigma_3} x(\sigma) d\sigma d\sigma_1 d\sigma_2 d\sigma_3$$

En utilisant les outils mathématiques, on peut encore simplifier les intégrales doubles, triples et quadruples en intégrales simples :

$$2\ddot{x}(0)\frac{T^6}{6!} = \int_0^T -\sigma^3 x(\sigma) d\sigma + 10 \int_0^T (T-\sigma)\sigma^2 x(\sigma) d\sigma + 22 \int_0^T -\frac{(T-\sigma)^2}{2!} \sigma x(\sigma) d\sigma + 8 \int_0^T \frac{(T-\sigma)^3}{3!} x(\sigma) d\sigma$$

D'où l'estimation de $\ddot{x}(0)$.

4. Estimation de $x^3(0)$:

Dérivons l'équation (2.13) par s :

$$s^3 X_N(s) = s^2 x(0) + s\dot{x}(0) + \ddot{x}(0) + \frac{1}{s} x^3(0) \quad (2.27)$$

Dérivons maintenant l'équation (2.27) trois fois par rapport à s :

$$-\frac{6}{s^4} X^3(0) = s^3 \frac{d^3 X_N(s)}{ds^3} + 9s^2 \frac{d^2 X_N(s)}{ds^2} + 18s \frac{dX_N(s)}{ds} + 6X_N(s) \quad (2.28)$$

Ensuite, divisons l'équation (2.28) par s^4 :

$$-\frac{6}{s^8} X^{(3)}(0) = \frac{1}{s} \frac{d^3 X_N(s)}{ds^3} + \frac{9}{s^2} \frac{d^2 X_N(s)}{ds^2} + \frac{18}{s^3} \frac{dX_N(s)}{ds} + \frac{6}{s^4} X_N(s) \quad (2.29)$$

Maintenant on applique à l'équation(2.29) la transformée de Laplace inverse pour revenir au domaine temporel, nous obtenons :

$$-6X^{(3)}(0)\frac{T^7}{7!} = \int_0^T -\sigma^3 x(\sigma) d\sigma + 9 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \sigma^2 x(\sigma) d\sigma d\sigma_1 + 18 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \int_0^{\sigma_2} -\sigma x(\sigma) d\sigma d\sigma_1 d\sigma_2 + 6 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \int_0^{\sigma_2} \int_0^{\sigma_3} x(\sigma) d\sigma d\sigma_1 d\sigma_2 d\sigma_3$$

En utilisant les outils mathématiques, on peut encore simplifier les intégrales doubles, triples et quadruples en intégrales simples :

$$-6X^{(3)}(0)\frac{T^7}{7!} = \int_0^T -\sigma^3 x(\sigma) d\sigma + 9 \int_0^T (T-\sigma)\sigma^2 x(\sigma) d\sigma + 18 \int_0^T -\frac{(T-\sigma)^2}{2!} \sigma x(\sigma) d\sigma + 6 \int_0^T \frac{(T-\sigma)^3}{3!} x(\sigma) d\sigma$$

D'où l'estimation de $x^{(3)}(0)$.

Cet exemple nous a montré la philosophie de cette méthode.

L'estimation des dérivées temporelles est une méthode rapide :

- Avantages :
 - "Intégrer pour dériver" : l'estimé s'exprime à l'aide d'intégrales itérées (filtres passe-bas).
 - Élimination du bruit.
 - Pas de retard comme pour les filtres classiques : temps de réponse, bande passante, pente du filtre.
- Classes d'utilisation :
 - Estimation d'état, estimation de paramètres, diagnostic, commande et adaptation de défauts,...
- Méthode mathématique : le calcul opérationnel utilisé c'est (Transformée de Laplace).

2.7 Conclusion :

On a présenté dans ce chapitre une commande sans modèle à appliquer aux systèmes complexes de dimension finie. Cette commande peut être vue comme une contribution à des correcteurs type "PID intelligent (*i*-PID), ou PI intelligent (*i*-PI)", dont le réglage devient facile, même avec des non-linéarités du système. L'outil essentiel utilisé est :

- 1 Le modèle local considéré sur un court laps de temps et continument mis à jour
- 2 L'estimation numérique des dérivées de la sortie.

La commande sans modèle est vue comme suit :

- Une technique particulière de calcul en temps réel des paramètres du régulateur.
 - sans connaissance à priori du modèle mathématique du système.
 - par l'utilisation de méthodes de dérivation numérique.
- Elle permet de se libérer de l'identification des paramètres du système.

Chapitre 3

Application au système en simulation

3.1 Introduction :

Régulation : On appelle régulation un système asservi qui doit maintenir constante la sortie conformément à la consigne (constante) indépendamment des perturbations.

Ex : Régulation de température

Asservissement : un système asservi dont la sortie doit suivre le plus fidèlement possible la consigne (consigne variable). Les systèmes asservis pouvaient présenter des défauts, une précision insuffisante, une stabilité trop relative, un temps de réaction trop lent, un dépassement trop important. Il est donc souvent nécessaire d'intégrer dans le système asservis un réseau correcteur en boucle fermée dont l'objectif est d'améliorer un ou plusieurs de ces différents paramètres.

- Le principe de la commande consiste à utiliser des correcteurs pour agir sur les systèmes à réguler afin d'obtenir un comportement ou une réponse désirée.
- Il s'agit de générer des actions appropriées en fonction du résultat des performances actuelles afin de satisfaire des performances désirées.
- Les meilleures performances sont obtenues avec une structure de commande en boucle fermée.

- Les performances sont exprimées en termes de stabilité¹, rapidité² et précision³ dans un cahier de charge.
- Le choix du correcteur dépend des performances désirées.

La régulation est la technique utilisée pour contrôler une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système telles que la vitesse, la position, la température, etc., en vue d'en imposer le comportement et de maintenir ces grandeurs à des niveaux prédéfinies. Dans notre étude, nous sommes intéressés à faire une comparaison entre deux correcteurs : un PI classique et i-PI intelligent.

La température souhaitée représente la consigne (fixée par l'utilisateur) est comparée à la valeur mesurée par la thermistance NTC. Le correcteur délivre alors un signal de commande en fonction de la valeur et du signe de l'écart entre la valeur souhaitée et la température de la pièce, soit de chauffer si la température de la pièce est inférieure à la température de consigne, soit de refroidir si la température de la pièce est supérieur à la température de consigne. Dans la vie quotidienne nous sommes pratiquement toujours en boucle fermées. Pour chaque geste nous disposons d'un capteur, d'un correcteur (notre cerveau), d'un actionneur pour tenter de rapprocher la situation réelle de celle qui est désirée.

1. un système est stable si pour une entrée constante, la sortie reste constante quelles que soient les perturbations. On analyse la stabilité par les critères de Routh et de Nyquist

2. La rapidité caractérise le temps mis par le système pour que la sortie atteigne sa nouvelle valeur.

3. La précision qualifie l'aptitude du système à atteindre la valeur visée. Elle est caractérisée par l'écart entre la consigne et la sortie. L'écart éventuel s'exprime dans la même unité que la grandeur de sortie.

3.2 Régulation avec un correcteur PI (proportionnel intégral) :

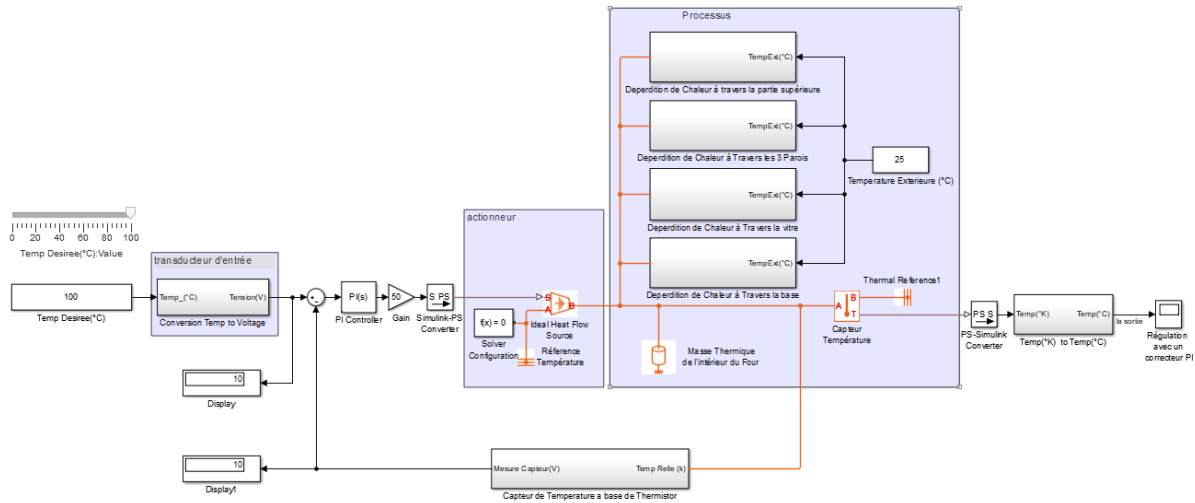


FIGURE 3.1 – Régulation avec un correcteur PI classique en BF

On ferme la boucle avec un régulateur proportionnel-intégral (PI) comme représenté par la Figure 3.1. Ce régulateur élabore alors une commande donnée par la relation suivante :

$$u(t) = k_p(\varepsilon(t)) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) d\tau$$

La fonction de transfert du correcteur est alors donnée par :

$$C(s) = k_p \frac{1 + T_i s}{T_i s}$$

Rappelons les effets du PI :

- Effet statique (régime permanent) : annule l'erreur statique de position, de vitesse ou d'accélération, selon le nombre d'intégrateurs mis en chaîne directe.
- Effet dynamique (régime transitoire) : augmente le temps de réponse (système moins rapide), et peut causer l'instabilité (PI introduit un déphasage supplémentaire pouvant aller jusqu'à -90°).
- Effet filtre passe bas : annule les bruits hautes fréquences.

En appliquant le régulateur PI classique sur notre modèle Simulink pour une consigne de 100°C . La réponse indicielle du système corrigé est représentée sur la figure 3.2

Les gains du régulateur ont été choisis par essai erreur et sont fixés à : $k_p = 30$ et $K_i = 0.99$.

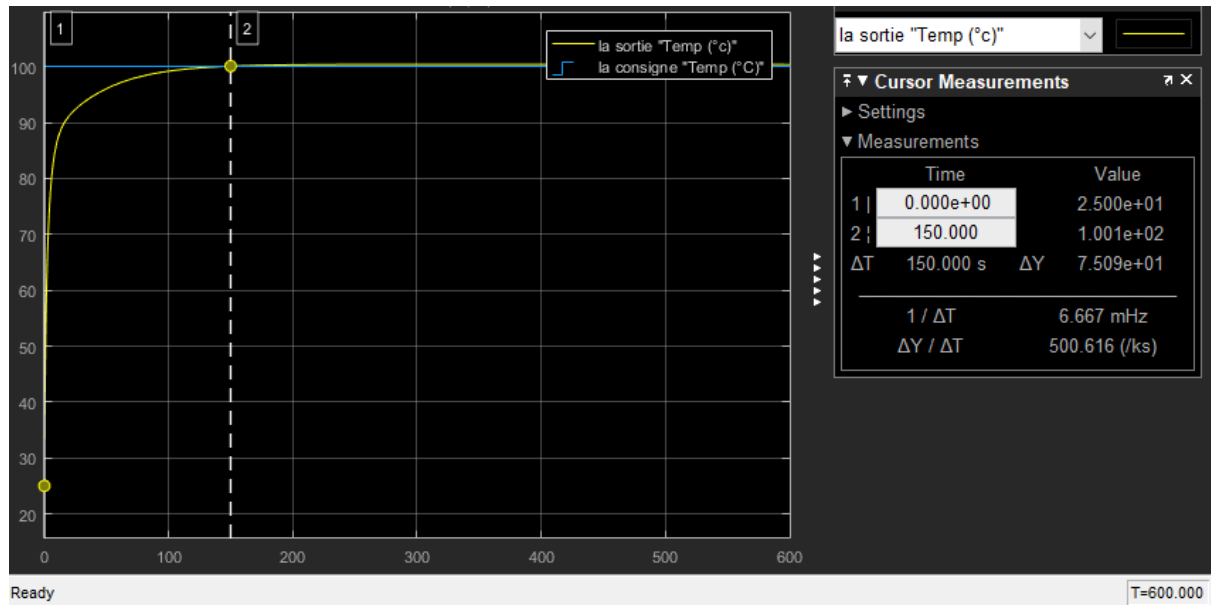


FIGURE 3.2 – Réponse indicielle du système corrigé avec un correcteur PI

Interprétation des résultats de simulation :

Nous pouvons remarquer sur cette figure que notre système atteint sa température désirée 100°C . La température suit convenablement sa consigne et il finit par se stabiliser avec une très bonne précision, une erreur statique nulle, et un temps de réponse $t_r = 150\text{s}$.

3.3 Régulation avec la commande sans modèle :

Dans cette partie du mémoire nous allons appliquer la commande décrite dans le deuxième chapitre qui est la commande sans modèle en boucle fermée sur le système de température. Nous allons aussi voir les résultats de cette simulation et les comparer avec ceux d'un PI simple. Nous allons donc tester la crédibilité de ce qu'on avait cité avant sur ce contrôle en l'appliquant sur un système qu'on connaît son comportement présent et sachant le comportement qu'on veut assurer (son cahier de charge).

L'implémentation de cette commande se fait sur MATLAB/SIMULINK et elle est représentée par la Figure 3.3 .

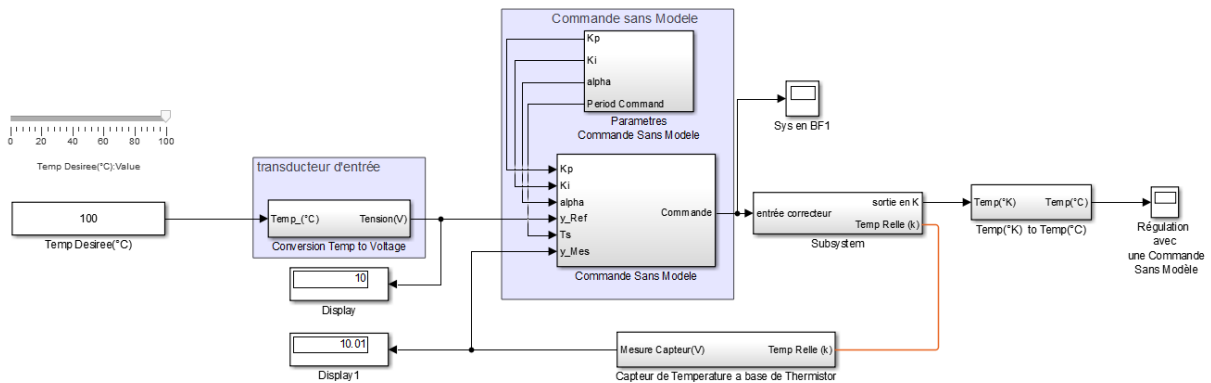


FIGURE 3.3 – Régulation avec une commande sans modèle

3.3.1 L'implémentation de la commande sur Matlab/Simulink :

Nous avons ajouté le bloc où la commande sans modèle est implémentée :

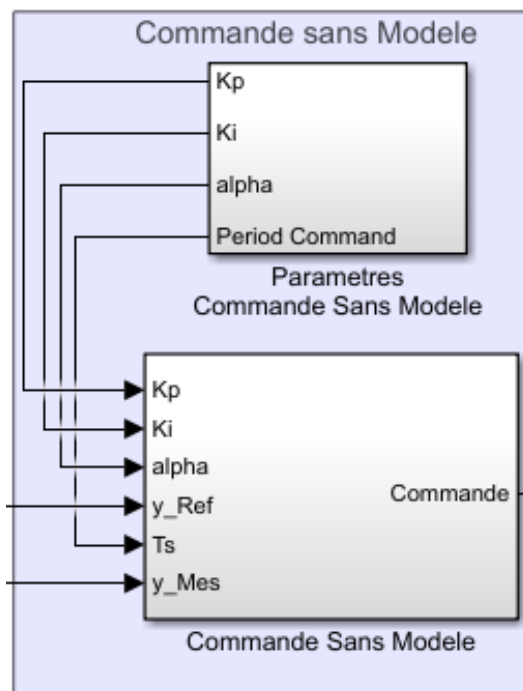


FIGURE 3.4 – bloc de la commande sans modèle

Ce bloc contient à sa place deux blocs :

3.1 Un bloc des paramètres :

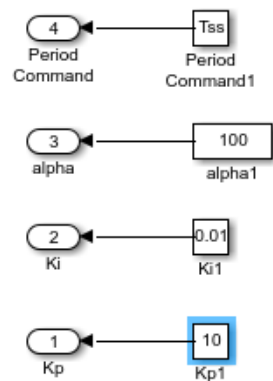


FIGURE 3.5 – bloc des paramètres

3.2 Un bloc de commande :

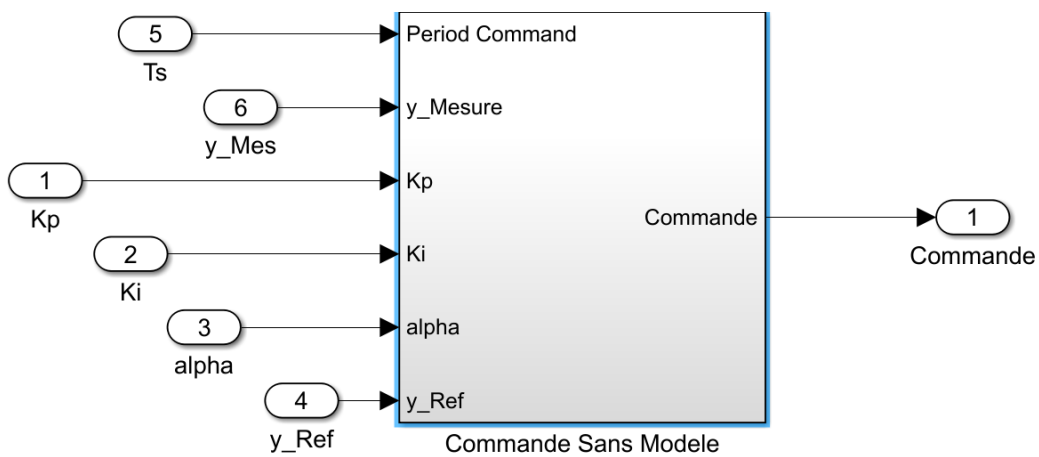


FIGURE 3.6 – bloc de commande

C'est le bloc qui fournit à sa sortie la commande et reçoit à son entrée le signal de référence et le signal de mesure nécessaire pour ce contrôle, comme le montre la figure 3.7

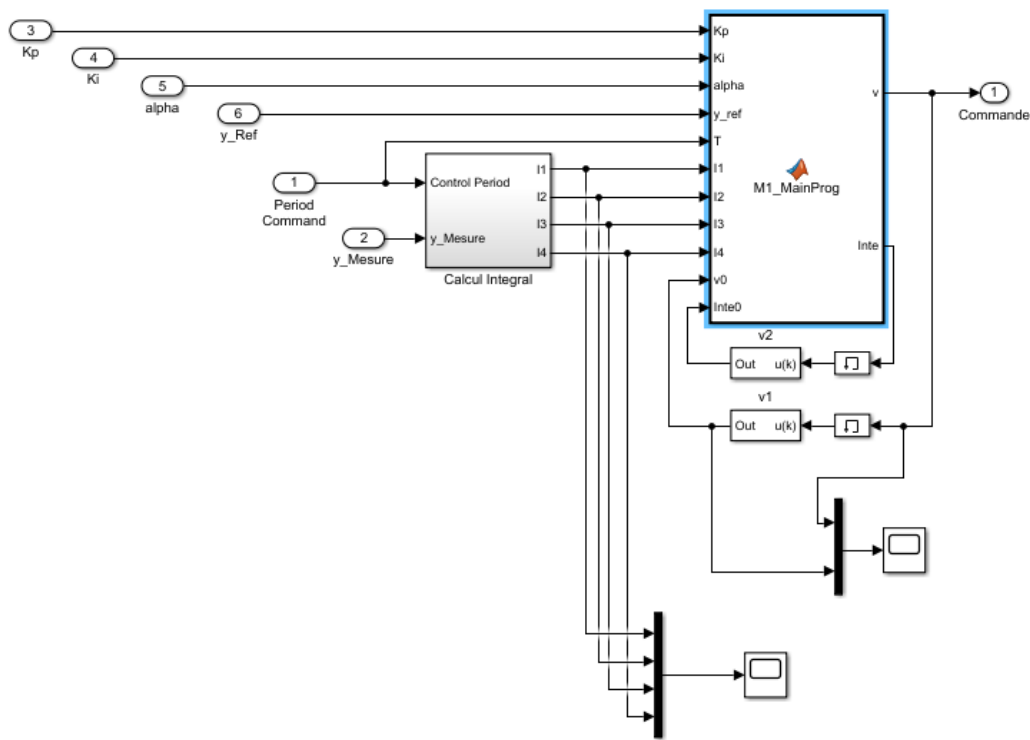


FIGURE 3.7 – Sous-système du bloc de commande sans modèle

Cette commande comme nous avons déjà annoncé se base essentiellement sur une bonne estimation des dérivées des sorties car une mauvaise estimation mène à des résultats erronés. Pour bien estimer les dérivées, le calcul des intégrales doit être précis.

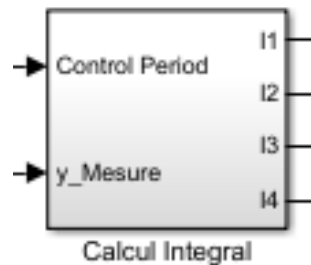


FIGURE 3.8 – bloc de calcul des intégrales

Ce bloc demande la mesure des intégrales I1, I2, I3 et I4 par la méthode des trapèzes en appelant la fonction Matlab illustrée par la Figure 3.11. Le sous-système du bloc de calcul des intégrales est détaillé sur la Figure 3.9.

Nous avons comme paramètres d'entrée du bloc : la période de commande T_{ss} et la période de mesure δt .

La valeur de δt permet de déterminer le nombre d'itérations de calcul d'intégrales dans l'intervalle T_{ss} et sa valeur dépend du pas de simulation en Simulink (δt et le pas Simulink doivent être égaux).

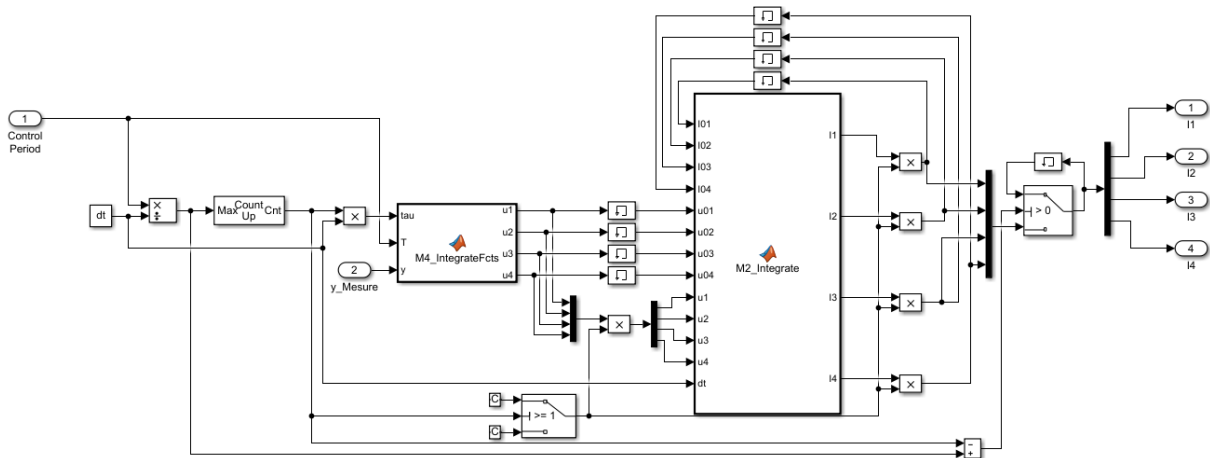


FIGURE 3.9 – Sous-système du bloc de calcul des intégrales

On fait appel à deux fonctions Matlab : l'une qui s'appelle M4-intégrateFcts (où se trouvent les quatre fonctions à intégrer) représenté par la figure 3.10, et l'autre qui s'appelle M2-integrate (fonction de calcul des intégrales par la méthode de trapèze) représenté par la figure 3.11.

```

Commande Sans Modele/Commande Sans Modele/Calcul Integral/M4_IntegrateFcts x
function [u1,u2,u3,u4]=M4_IntegrateFcts(tau,T,y)
    u1=-tau^3*y;
    u2=tau^2*(T-tau)*y;
    u3=(-tau*(T-tau)^2/2)*y;
    u4=((T-tau)^3/6)*y;

```

FIGURE 3.10 – Fonction Matlab : M4-intégrateFcts

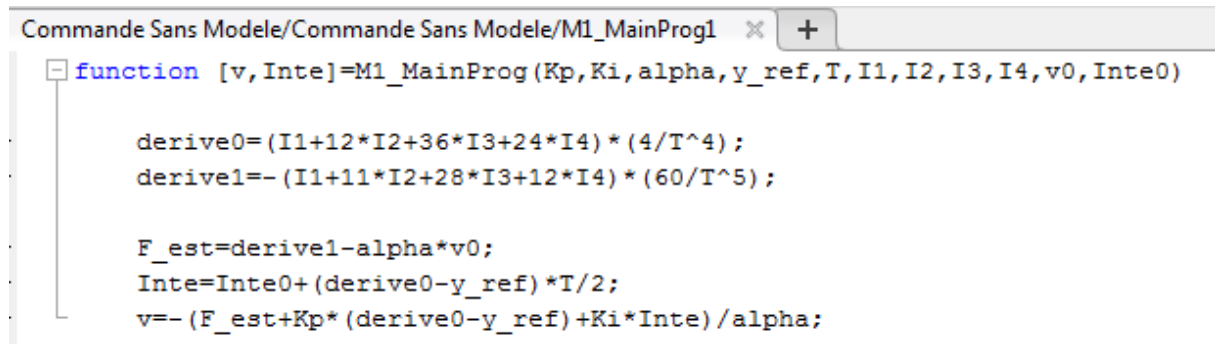
```

Commande Sans Modele/Commande Sans Modele/Calcul Integral/M2_Integrate x +
function [I1,I2,I3,I4]=M2_Integrate(I01,I02,I03,I04,u01,u02,u03,u04,u1,u2,u3,u4,dt)
    I1=I01+(u01+u1)/2*dt;
    I2=I02+(u02+u2)/2*dt;
    I3=I03+(u03+u3)/2*dt;
    I4=I04+(u04+u4)/2*dt;

```

FIGURE 3.11 – Fonction Matlab : M2-integrate

Après avoir calculé ces intégrales, les valeurs seront transférées à la fonction Matlab de commande en premier lieu pour estimer les dérivées, puis calculer la commande qui sera injectée au processus, comme le montre la figure 3.12



```
function [v, Inte]=M1_MainProg(Kp, Ki, alpha, y_ref, T, I1, I2, I3, I4, v0, Inte0)

    derive0=(I1+12*I2+36*I3+24*I4) * (4/T^4);
    derive1=- (I1+11*I2+28*I3+12*I4) * (60/T^5);

    F_est=derive1-alpha*v0;
    Inte=Inte0+(derive0-y_ref) *T/2;
    v=- (F_est+Kp*(derive0-y_ref) +Ki*Inte)/alpha;
```

FIGURE 3.12 – Fonction Matlab : M1-Mainprog

Les étapes de l’algorithme de commande :

Nous avons utilisé un contrôle iPI, donc nous avons choisi $\nu = 1$ dans le modèle local. Le correcteur iPI est donné par :

$$u = - \frac{F - \dot{y}^* + k_p e + k_i \int e}{\alpha}$$

L’implémentation de la loi de commande s’effectue suivant les étapes ci-après :

1. Conditions initiales : initialisation des paramètres (rôle du switch 1 : limiter le nombre d’itération pour le calcul d’intégral.)
 - Initialiser y_0 à 0 qui est le premier échantillon de mesure pour le calcul de la première valeur d’intégrale.
 - Initialiser le variable de temps t à 0.
 - Choisir la période T_{ss} de commande.
 - Choisir δt le temps de mesure et aussi le pas de calcul de Simulink.
 - Calcul du nombre d’itérations $n_t = \frac{T_{ss}}{\delta t}$.
 - Initialiser τ à 0.

Et le choix de ces paramètres se fait Pour la première itération (Compteur = 0, donc sortie du “Switch 1” est nulle (fausse)), ce si nous donne les valeurs de $U_1, U_2, U_3 = 0$, et $U_4 \neq 0$, et $I_1, I_2, I_3, I_4 = 0$ par le biais des blocs mul-

tiplicateurs ; ces valeurs seront mémorisées comme demandé par la méthode. Le compteur s'incrémente, le calcul des intégrales s'effectue jusqu'à atteindre le nombre d'itérations. Puis on transfère les intégrales calculées à la fonction M1-Main par le biais du "Switch 2" avant d'initialiser $U_1, U_2, U_3, U_4 = 0$; I1, I2 I3, I4 pour le nouvel intervalle de commande T_{ss} .

Cette procédure s'exécute pour un temps de simulation choisi.

2. Calcul des intégrales :

- Appel de la fonction M4-integrateFct (figure 3.10) pour l'estimation des dérivées ($U_i, i=1,2, \dots, 4$).
- Appel de la fonction M2-integrate (figure 3.11) pour le calcul des intégrales ($I_i, i=1,2, \dots, 4$).

3. Application de la commande :

Lorsqu'on reçoit les valeurs de I1, I2, I3 et I4, on calcule les estimés de la référence y^* et ses dérivées, à partir de ces valeurs on calcule la nouvelle commande qui sera injectée au système.

- Transfert des données après le calcul des intégrales (Rôle du Switch 2 : récupérer la valeur de l'intégrale et la transférer au bloc de calcul de la commande).
- Appel de la fonction M1-Mainprog (figure 3.12) pour l'obtention de la commande.

Le problème rencontré était comment éliminer les boucles pour le calcul des intégrales. La boucle qui dépend de δt est la période de calcul d'intégrale et il y a une deuxième boucle qui dépend du temps de commande.

Donc là nous avons utilisé des compteurs pour créer le calcul des itérations est des switches pour passer d'une fonction à une autre car on ne peut pas passer à la commande sans avoir calculé les intégrales.

Synthèse de la commande sans modèle :

- La période de commande T_{ss} doit être au moins 10 fois plus faible que le temps de réponse du système. Nous avons choisi $T_{ss} = 0.4sec$.
- δt (Le temps de calcul des intégrales) $\ll T_{ss}$ (La période de commande).
Nous avons fixé $\delta t = 0.01sec$, ce qui fait $T_{ss}/\delta t = 40$ itérations de calcul d'intégrales.
- Bien choisir le paramètre α qui est un paramètre de proportionnalité important pour une commande adéquate aux exigences du système.
Après essai-erreur, nous avons choisi $\alpha = 100$.
- Le choix des paramètres K_p et K_i pour que la commande appliquée entraîne une réponse convergente à la consigne désirée.

Remarque :

Il ne faut pas confondre entre les pas de la commande glissante (là où le Modèle phénoménologique est valable) T_{ss} et le pas d'intégration δt qui est le pas de la méthode des Trapèzes pour le calcul d'une intégrale.

Essai 1 :

Pour un pas d'intégration $dt = 0.001s$, et un intervalle de commande $T_{ss} = 0.4s$, $\alpha = 100$

Les gains du régulateur ont été choisis par essai erreur et sont fixés à : $k_p = 17$, $K_i = 0.0001$.

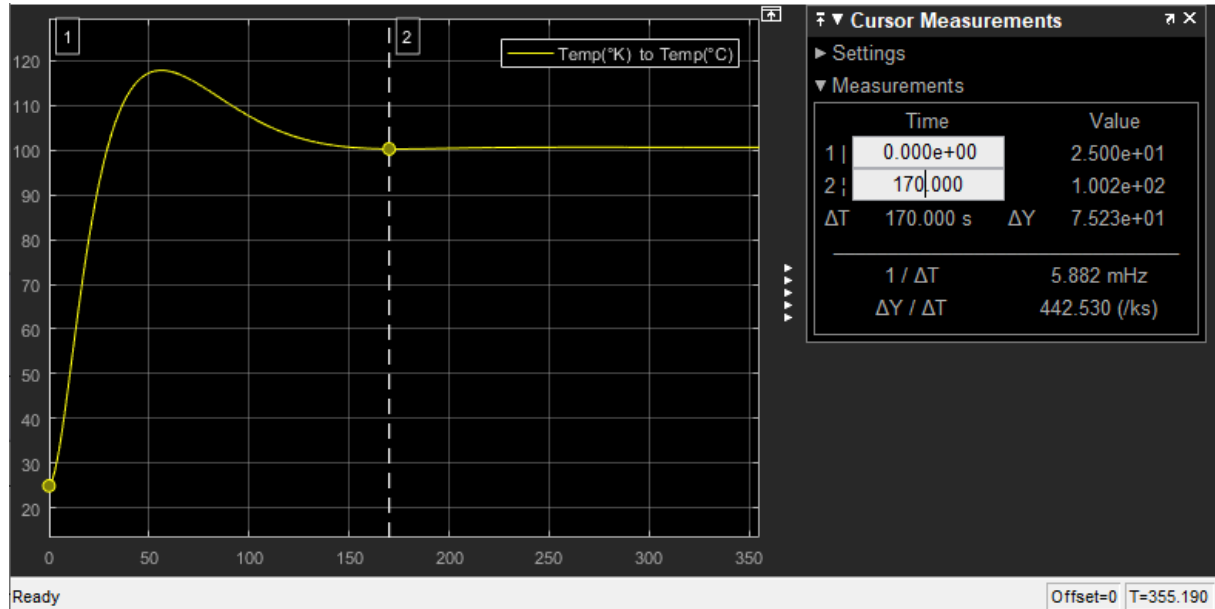


FIGURE 3.13 – Réponse indicielle du système corrigé avec la CSM en cas de $\delta t = 0.001sec$

Interprétation des résultats de simulation :

Nous pouvons remarquer sur la figure 3.13 que le système présente un dépassement d'environ 20 % en régime transitoire mais finit par se stabiliser avec une très bonne précision, une erreur statique nulle. La sortie atteint sa température désirée $100^\circ c$ avec un temps de réponse $t_r = 170s$.

Essai 2 :

Pour un pas d'intégration $\delta t = 0.01s$, et un intervalle de commande $T_{ss} = 0.4s$, $\alpha = 100$

Pour le choix des gains du correcteur, nous les avons déterminés après quelques essais :

$$k_p = 17, K_i = 0.0001.$$

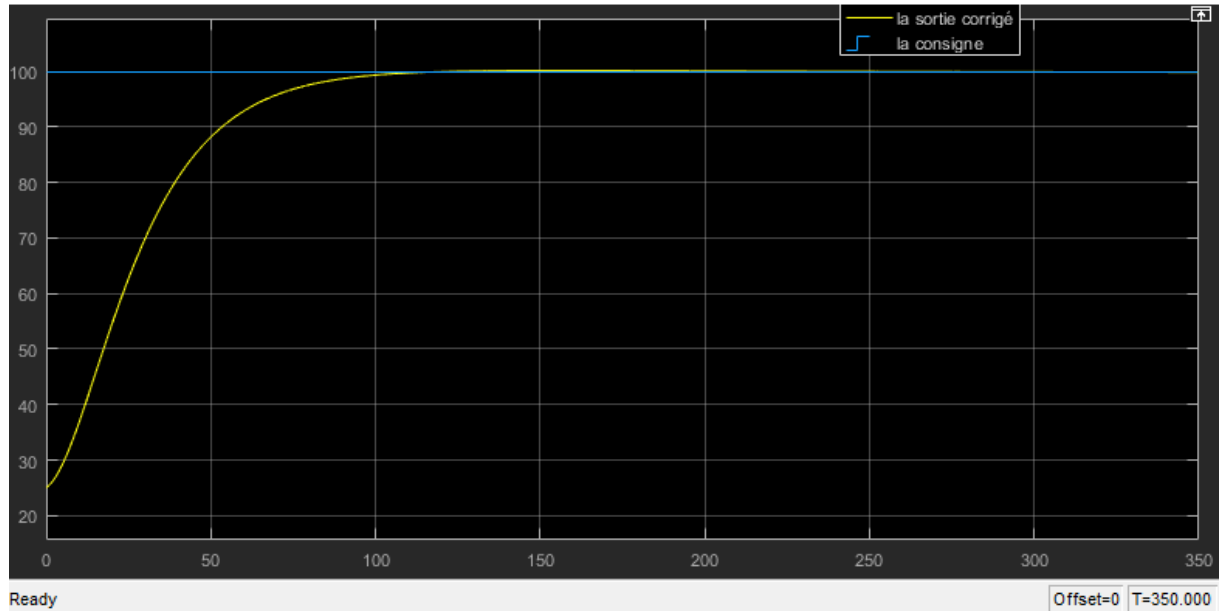


FIGURE 3.14 – Réponse indicielle du système corrigé avec la CSM en cas de $\delta t = 0.01sec$

Interprétation des résultats de simulation :

Cette réponse est de loin la meilleure. Nous pouvons remarquer sur la figure 3.14 que notre système atteint sa température désirée, sans marquer un dépassement et en un temps de réponse à 1 % $t_r = 100sec$.

On remarque que cette réponse indicielle est beaucoup plus satisfaisante que la réponse obtenue par correcteur PI classiques, le système corrigé est rapide, le temps de réponse est égale à 100s, par contre 170s pour le PI classique.

3.3.2 Tester la robustesse de la commande sans modèle vis-à-vis un changement de consigne :

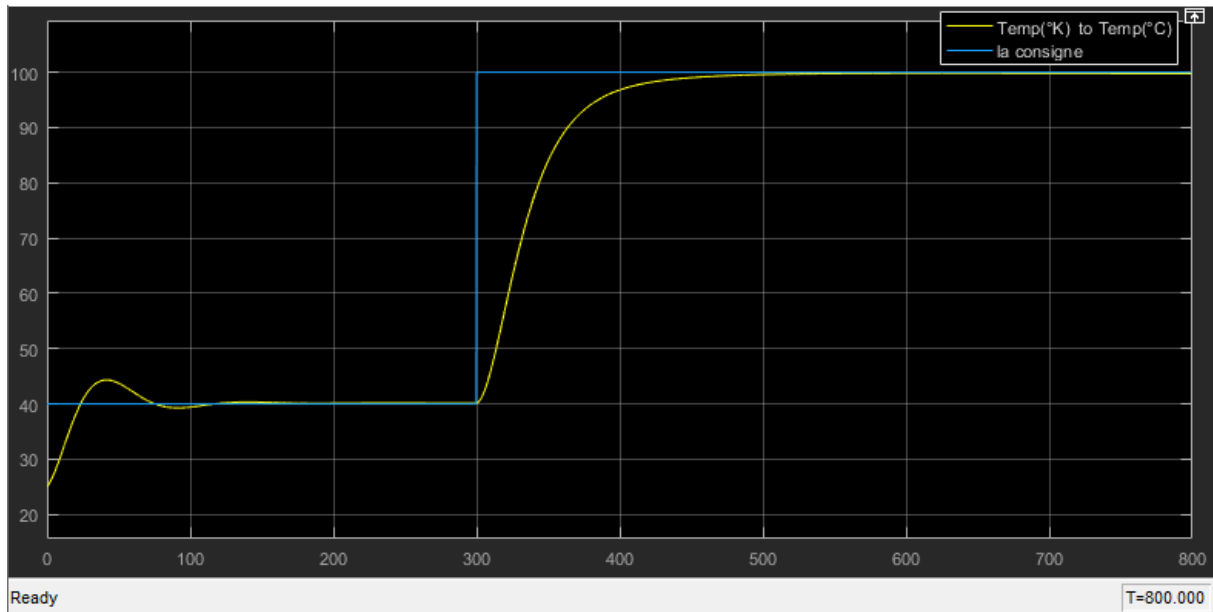


FIGURE 3.15 – Tester la robustesse de la CSM vis-à-vis un changement de consigne

Interprétation des résultats de simulation :

Sur la figure 3.15. Nous pouvons voir que notre four se comporte correctement. Nous pouvons remarquer que notre système atteint sa température désirée ($40^{\circ}c$, et après 300 secondes nous avons augmentés la température à $100^{\circ}c$), donc la température suit convenablement sa consigne, ce qui démontre que cette commande est robuste vis-à-vis les changements brusque de la consigne.

3.4 Comparaison entre les deux commandes :

3.4.1 PI classique :

- Avantage :
 - Erreur statique nulle.
 - Rejet asymptotique de perturbations constantes.
 - Réglage (progressif) des coefficients.
- Inconvénients :
 - Nécessite un modèle mathématique qui est parfois peu précis, ou tout simplement difficile à déterminer.
 - Extension difficile aux systèmes "multi-entrées", "multi-sorties".
 - Effet dynamique (régime transitoire) : augmente le temps de réponse (système moins rapide), et peut augmenter l'instabilité (introduit un déphasage supplémentaire pouvant aller jusqu'à -90°).

3.4.2 CSM :

- Avantage :
 - Aucun modèle de système nécessaire.
 - Découplage entre la régulation et la poursuite.
 - Extension facile aux systèmes "multi-entrées", "multi-sorties" linéaire ou non.
 - Basée essentiellement sur une bonne estimation des dérivées des sorties du système qui nécessite le calcul d'intégrales et donc, filtre les bruits de mesure.
 - Robustesse :
 - Robuste, car il ne prend pas en compte le modèle du système.
- Inconvénients :
 - En pratique c'est impossible de prendre un intervalle d'intégration δt très petit, car le temps de calcul est très grand et les micro-contrôleurs ou les cartes DSP ne seraient pas assez puissants pour faire ces calculs.
 - Le réglage de α et δt n'est pas toujours facile.

3.5 Conclusion :

Nous avons vu à travers cette application, que la commande sans modèle est une approche très intéressante, elle nous a permis de réguler notre système thermique qui est instable et trop long (les systèmes thermiques ont toujours eu des perturbations à cause des pertes de chaleurs). Malgré ça, nous avons obtenu à sa sortie une réponse stable avec une très bonne précision, et un temps de réponse rapide.

Cette commande est non seulement robuste vis-à-vis des perturbations, mais elle est aussi robuste vis-à-vis des erreurs de modèle puisqu'elle n'utilise pas un modèle mathématique et repose essentiellement sur la bonne estimation des dérivées qui est fiable devant le filtrage des bruits. Ce qui n'était pas le cas pour les autres méthodes de commande.

On conclut que le contrôle sans modèle nous a garanti les exigences du cahier de charge .

Conclusion générale

La majorité des processus industriels nécessitent le contrôle d'un certain nombre de grandeurs telles que la température d'un four industriel par exemple. Plusieurs techniques sont utilisées pour contrôler ces grandeurs physiques, de telle sorte que celles-ci gardent constamment une valeur ou reste proche de la valeur désirée ; quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir.

La régulation d'un système physique est basée sur trois exigences d'un cahier de charge spécifique qui sont : la stabilité, la rapidité et la précision. Pour arriver à ces demandes nous devons garantir le bon choix du régulateur.

Dans ce mémoire, nous avons implémenté sous Simulink un four virtuel, en choisissant ses paramètres le plus proche possible à ceux d'un four réel. Dans notre cas le système en boucle ouverte était instable, lent et subissait des perturbations sous forme de déperditions de chaleur à travers ses parois. Nous avons appliqué à ce système deux types de commandes qui sont un simple PI et un PI intelligent de la commande sans modèle. La comparaison des résultats des deux correcteurs a mis en évidence que le réglage du deuxième n'est pas assez facile, mais il a donné des résultats très satisfaisants devant le PI classique, en terme de stabilité et rapidité.

On peut conclure que la commande sans modèle répond aux besoins industriels et ce type de contrôleurs se révèlent suffisant pour résoudre un grand nombre de problèmes de contrôle. Nous avons aussi testé la robustesse de la commande sans modèle vis-à-vis le changement de consigne et les erreurs de modélisation puisque cette commande n'utilise pas un modèle global.

Annexe

1. Quelques informations sur l'appareil CE103 :

— Caractéristiques principales du banc de température CE103 :

- (a) Autonome et unité de banc de montage compact.
- (b) Chauffé électriquement et un procédé de modèle refroidi par air qui imite un véritable processus industriel.
- (c) Comprend hystérésis variable pour des expériences de contrôle de processus avancé.
- (d) Panneau avant comprend le schéma synoptique du processus afin que les élèves puissent voir ce qu'ils contrôlent.
- (e) Toutes les entrées et les sorties mises en mémoire tampon pour la connexion à TecQuipment avec contrôleurs optionnels ou d'autres régulateurs appropriés.

— Les sujets expérimentaux qui peuvent être étudiés à l'aide du CE103 :

- (a) Transfert de chaleur
- (b) Contrôle ON / OFF - expérience comprend investigation de dépassement et sous-dépassement, ON et le rapport de temps d'arrêt, les taux de chauffage et de refroidissement, offset et hystérésis .
- (c) Contrôle proportionnel (P), proportionnel + intégral (PI) et proportionnel + intégral + dérivé (PID) .les expérimentations prennent en considération la stabilité, la fréquence, la réponse etc ...
- (d) Réponse en fréquence du processus de modèle.
- (e) Inertie thermique et constantes à temps variable.
- (f) Multi-contrôle variable (jusqu'à trois variables peuvent être surveillés et contrôlés).

- ### 2. Définition de la thermique : c'est la science qui traite de la production d'énergie, de l'utilisation de l'énergie pour la production de chaleur ou de froid, et des transferts de chaleur suivant différents phénomènes physiques, en particulier la conduction et la convection et le rayonnement.

3. Compléments mathématiques :

(a) **Théorème de Taylor** : en mathématiques, plus précisément en analyse, le théorème de Taylor (ou formule de Taylor), du nom du mathématicien anglais Brook Taylor qui l'établit en 1715, montre qu'une fonction plusieurs fois dérivable au voisinage d'un point peut être approchée par une fonction polynomiale dont les coefficients dépendent uniquement des dérivées de la fonction en ce point. Cette fonction polynomiale est parfois appelée polynôme de Taylor.

De manière plus précise, soit :

- I : un intervalle réel.
- $alpha$: un élément de I .
- E : un espace vectoriel normé de dimension finie.
- f : une fonction de I dans E dérivable en a jusqu'à un certain ordre n supérieur ou égal à 1.

Alors pour tout nombre réel x appartenant à I , on a la formule de Taylor-Young :

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f^{(2)}(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n + R_n(x) \quad (3.1)$$

Ou son équivalent :

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(a)}{k!}(x-a)^k + R_n(x) \quad (3.2)$$

(b) Calcul d'intégrale par la méthode des trapèzes :

En analyse numérique, la méthode des trapèzes est une méthode pour le calcul numérique d'une intégrale, s'appuyant sur l'interpolation linéaire par intervalles.

$$\int_a^b f(x)dx$$

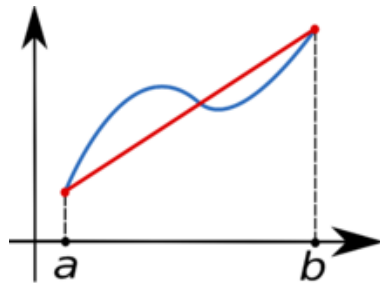


FIGURE 3.16 –

Le principe est d'assimiler la région sous la courbe représentative d'une fonction f définie sur un segment $[a, b]$ à un trapèze et d'en calculer l'aire T :

$$T = (b - a) \frac{f(a) + f(b)}{2}$$

Bibliographie

- [1] Bilan thermique chartres. accessible sur :
http://www.bilan-thermique-28.fr/theorie_generale.html?fbclid=IwAR3CaYYvCTVH1uMBNMGjMHGPTZFNI8bmSGH_x2057cX1Y8uirx2NJSZ1reI.
- [2] BiomÉtal martinique. accessible sur :
<https://www.biometal-martinique.com/produits/solutions/metal-iso/42-metal-iso.html>.
- [3] *CE103*. TQ education and training ltd, Bonsall Street Long Eaton Nottingham NG10 2AN England.
- [4] Ecommerce marketplace by demeter fbTM. accessible sur :
http://www.envirofluides.com/contents/fr/d1232_chaleur_massique_solides.html. 2019.
- [5] The mathworks, inc., suisse. accessible sur :
<https://ch.mathworks.com/fr/products/simscape.html>. 1994-2020.
- [6] Passiv act. accessible sur :
[https://passivact.fr/Concepts/files/Vitrages-BilansThermiques.html#:~:text=La%20transmission%20de%20chaleur%20par,%C3%A0%20celle%20des%20meilleurs%20isolants](https://passivact.fr/Concepts/files/Vitrages-BilansThermiques.html#:~:text=La%20transmission%20de%20chaleur%20par,%C3%A0%20celle%20des%20meilleurs%20isolants.). 11/04/2017.
- [7] tout sur l'isolation. accessible sur :
<https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact27&art=415#:~:text=Capacit%C3%A9%20thermique%20des%20isolants%20et%20risque%20de%20surchauffe%202010%2F03.06&text=>

- La%20capacit%C3%A9%20thermique%20volumique%20d,' exprime%20en%20J%2Fm%C2%B3. 9/07/2019.
- [8] *Help Matlab*. The MathWorks, Inc., États-Unis, 1994-2016.
- [9] *Contrôle sans modèle : Application au système AM2 de digestion anaérobique*. Université de Tlemcen Faculté de Technologie, TREASURE, Hammamet, 03 - 05 décembre 2019.
- [10] CHOUKCHOU-BRAHAM, A. *Système asservis linéaires continus*.
- [11] CÉDRIC JOIN, M. F. *Model-free control*. e-STA, 20 nov 2013.
- [12] CÉDRIC JOIN, M. FLIESS, S. R. *Rien de plus utile qu'une bonne théorie : la commande sans modèle*. 4èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, JD-JN-MACS, Jun 2011, Marseille, France, hal-00581109v2, 30 Mar 2011.
- [13] DIB, Z. *Commande sans modèle d'un Bioréacteur*. Université de Tlemcen (Algerie), p 19-24, 2011.
- [14] LAKHDAR, A. Systèmes asservis. accessible sur :
<https://ft.univ-setif.dz/externe/divers/Module-sysasservi.pdf>.
- [15] M. FLIESS, C. J. *Commande sans modèle et commande à modèle restreint*. e-STA, 28 January 2008.
- [16] MAMADOU MBOUP, CÉDRIC JOIN, M. F. *A revised look at numerical differentiation with an application to nonlinear feedback control*. The 15th Mediterrean Conference on Control and Automation - MED'2007, Jun 2007, Athènes, Greece., inria-00142588.