

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'Ingénieur

Département : Electronique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : automatique

Spécialité : automatique et système

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Conception et application d'un régulateur PID basé sur les systèmes immunitaires artificiels

Présenté par : *Belhouchet Miloud Nazim*

Encadrant : *Dr.Gherbi Sofiane*

Jury de Soutenance :

BENMOUSSA Samir	MCA	UBM Annaba	Président
GHERBI Sofiane	MCA	UBM Annaba	Encadrant
CHAKER Karima	MAA	UBM Annaba	Examinatrice

Année Universitaire : 2019/2020

Résumé

Dans ce mémoire, on a présenté une nouvelle structure du régulateur PID, celle-ci est directement inspirée du schéma de réaction du système immunitaire biologique face à une invasion d'antigènes. Cette dernière présente une analogie évidente avec la boucle de commande classique d'un système, ainsi qu'une similitude de son modèle mathématique avec la loi de commande avec d'un régulateur PID. L'application de cette structure pour la commande d'un système de contrôle de la température dans une salle, nous a permis de constater son efficacité en comparaison avec la structure classique.

Mots clés : PID, systèmes bio-inspirés, optimisation.

Abstract

In this thesis, we presented a new structure of the PID regulator, which is directly inspired by the reaction scheme of the biological immune system to an invasion of antigens. The latter has a clear analogy with the classic control loop of a system, as well as a similarity of its mathematical model to the law of control with a PID regulator. The application of this structure for a room temperature control system, has allowed us to see its efficiency in comparison with the conventional structure.

Keywords: PID, bio-inspired systems, optimization.

ملخص

في هذه الأطروحة، قدمنا هيكلًا جديدًا لمنظم PID، وهو مستوحى مباشرة من مخطط تفاعل نظام المناعة البيولوجي لغزو المستضدات. هذا الأخير له تشابه واضح مع حلقة التحكم الكلاسيكية للنظام، بالإضافة إلى تشابه نموده الرياضي مع قانون التحكم مع منظم PID. إن تطبيق هذا الهيكل للتحكم في نظام التحكم في درجة الحرارة في الغرفة، سمح لنا برؤية كفاءته بالمقارنة مع الهيكل التقليدي.

الكلمات الرئيسية: PID، أنظمة مستوحاة من الحيوية، تحسين.

Remerciements

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

- ❖ Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers M. GHERBI SOFIANE, Maître de conférence classe A, qui a permis que ce travail s'accomplisse sous sa direction. Son encadrement, sa disponibilité et ses conseils m'ont été d'un grand apport. Qu'il en soit remercié.

- ❖ Je tiens à remercier très vivement monsieur le président du jury, d'avoir bien voulu présidé ma séance de soutenance. Qu'il soit assuré de mon profond hommage.

- ❖ Je tiens aussi à exprimer toute ma reconnaissance à tous les membres du jury pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

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

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

- ❖ Je n'oublierai pas le soutien lointain de tous les membres de ma famille lointaine, qui se trouve à l'intérieur et à l'extérieur du pays, je les remercie de tout cœur.

Liste des tableaux

Tableau	titre	Page
I.1	Effets des actions P, I, D d'un régulateur PID	4
I.2	Paramètres PID (Ziegler-Nichols en B.O)	5
I.3	Paramètres PID (Ziegler-Nichols en B.F)	6
I.4	Paramètres du régulateur PID (Åström et Hägglund « réponse indicielle »).	8
I.5	Paramètres du régulateur PID (Åström et Hägglund « point critique »).	9
II.1	Analogie entre le système immunitaire et la boucle de commande	13
II.2	Règles floues du modèle de f(.)	18

Liste des figures

Figure	Titre	page
I.1	Réponse indicielle en Boucle Ouverte	5
I.2	Réponse indicielle en Boucle Fermée	6
II.1	Principe de réaction du système immunitaire	12
II.2	Système commandé en boucle fermée	13
II.3	Evolution de $f(.)$ en fonction du paramètre a	17
II.4	Schéma du modèle floue de $f(.)$	18
II.5	Fonctions d'appartenance (entrées)	19
II.6	Fonctions d'appartenance (sorties)	19
II.7	Schéma bloc du régulateur et la boucle de rétroaction immunitaire	19
II.8	Schéma SIMULINK du régulateur PID_{imf}	20
III.1	Boucle de commande de la température d'une salle	21
III.2	Réponse indicielle du système en boucle fermée (Ziegler-Nichols BO)	23

III.3	Réponse indicielle du système en boucle fermée (Ziegler-Nichols BF)	24
III.4	Réponse indicielle du système en boucle fermée (Astrom-Hägglund)	25
III.5	Modèle SIMULINK (PID optimal)	25
III.6	Réponse indicielle du système en boucle fermée (Méthode optimale)	26
III.7	Modèle SIMULINK (PID immunitaire)	27
III.8	Réponse indicielle du système en boucle fermée (Régulateur immunitaire)	27

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale.....1

Chapitre 1 : le régulateur P.I.D et différentes techniques de réglages de ses paramètres

I.1 Introduction.....2

I.2 Les régulateur PID classique(standard).....2

I .2 .1 L'action proportionnelle.....2

I .2 .2 L'action Integrale2

I .2.3 Action Dérivé.....3

I.3 Différentes méthodes de réglages des paramètres du régulateur PID.....4

I.3.1 Méthode de Ziegler-Nichols.....4

a) Méthode de Ziegler Nichols en boucle ouverte (B O).....4

b) Méthode de Ziegler Nichols en boucle fermée (B F).....6

I.3.2 Méthode de Åström et Hägglund.....7

a) Méthode de la réponse indicielle7

b) Méthode du point critique (plan fréquentiel)8

I.4 Méthode de réglage optimale.....9

I.4.1 Le critère ISE (Integral Squared Error).....9

I.4.2Le critère ITSE (Integral Time Squared Error).....10

I.4.3Le critère IAE (Intégral AbsoluteError).....10

I.4.4Le critère ITAE (Intégral TimeAbsoluteError).....11

I.4.5Expression du problème d'optimisation.....11

I.5 Conclusion.....11

Chapitre 2 : le régulateur P.I.D inspiré du système immunitaire

II.1 Introduction.....	12
II.2 Analogie entre le système immunitaire et la boucle de commande d'un système.....	12
II.3 Loi de commande inspirée par le système immunitaire.....	14
II.4 Le régulateur PID inspiré par le système immunitaire.....	15
II.4.1 Avantages du régulateurs PID inspiré du système immunitaire.....	16
a) Modélisation mathématique de la fonction non linéaire $f(.)$	16
b) Modélisation par logique floue de la fonction non linéaire $f(.)$	17
II.5 Schéma de commande du régulateur PID_{imf}	19
II.5.1 Réalisation du modèle du régulateur PID immunitaire sous environnement MATLAB/SIMULINK.....	20
II.6 Conclusion	20

Chapitre 3 : application sur un modèle d'un système de commande de la température d'une salle

III.1 Introduction.....	21
III.2 Présentation et modélisation du système a commandé	21
III.2.1 Application numérique	22
III.3 Application de la méthode de Ziegler Nichols.....	22
III.3.1 Méthodede Ziegler-Nichols en boucle ouverte.....	23
III.3.2 Méthodede Ziegler-Nichols en boucle fermée.....	23
III.4 Méthode de Astrom-Hägglund.....	24
III.5 La méthode optimale	25
III.6 Application de la structure du PID inspirée de la réaction du système immunitaire.....	26
III.7 Conclusion.....	28
Conclusion général.	29

Bibliographie

Introduction générale

Le régulateur PID reste parmi les plus utilisés dans le monde industriel aujourd'hui, et chaque jour de nouvelles méthodes sont conçues pour le réglage de ses paramètres. Parmi les nouvelles approches, on assiste à l'émergence des méthodes bio-inspirées. Dans ce mémoire, on présente une nouvelle structure du régulateur PID directement inspirée de la réaction du système immunitaire. Ce type de régulateurs possède l'avantage d'avoir cinq paramètres (dont un non linéaire) à régler, ceci le rend plus flexible pour la commande de divers types de systèmes.

Ce mémoire est organisé comme suit : dans le premier chapitre, on présente le régulateur PID ainsi que les différentes méthodes de réglage de ses paramètres (classiques et optimales). Dans le second chapitre, on présente la structure du régulateur PID inspirée de la réaction du système immunitaire, sa loi de commande ainsi que son modèle SIMULINK. Dans le troisième chapitre, on appliquera les structures de PID classique et inspirée par la réaction du système immunitaire pour la commande d'un système de contrôle de la température dans une salle. Les méthodes classiques et optimale seront utilisées pour le réglage des paramètres des régulateurs, et les résultats seront commentés et comparés.

Chapitre I

Le régulateur PID et différentes techniques de réglages de ses paramètres

Le régulateur PID et différentes techniques de réglages de ses paramètres

I.1 Introduction :

Le régulateur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée « PID » est certainement le plus utilisé dans l'industrie, grâce à la simplicité de sa mise en œuvre, les effets complémentaires de ses trois actions le rend adaptable à la plupart des processus industriels.

I.2 Les régulateur PID classique(standard) :

Sa fonction de transfert est donnée par [1] [2] :

$$K_{PID_classique}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (I.1)$$

Avec : K_p coefficient de l'action proportionnelle

c coefficient de l'action intégrale

d coefficient de l'action proportionnelle dérivé)

I.2.1 L'action proportionnelle :

Elle consiste à appliquer une correction proportionnelle à l'écart entre la mesure et la consigne, son rôle est justement de réduire rapidement cet écart $e(t)$, son principal effet est donc la diminution rapide du temps de montée et du temps de réponse. Cela impactera négativement la précision ce qui constitue son principal défaut.

Sa loi de commande est donnée par :

$$u(t) = K_p e(t) \quad (I.2)$$

I.2.2 L'action Integrale :

Elle agit proportionnellement à l'intégrale (surface) de l'écart entre la consigne et la mesure, elle permet d'obtenir une erreur statique nulle en régime permanent, cependant une valeur trop grande de cette action peut mener à l'instabilité du système, en effet, cette action introduit un déphasage supplémentaire de -90° diminuant ainsi la marge de phase.

Sa loi de la commande est donnée par :

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (I.3)$$

Le régulateur PID et différentes techniques de réglages de ses paramètres

Cette action est souvent associée à l'action proportionnelle pour former le régulateur proportionnel intégral **PI**, sa loi de commande est donnée par :

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot dt \right) \quad (I.4)$$

I.2.3 Action Dérivée:

L'effet principal de l'action dérivée est l'accélération de la réponse du système et l'amélioration de la stabilité de la boucle fermée, elle permet un amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une perturbation ou à une variation subite de la consigne.

Sa loi de commande est donnée par :

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (I.5)$$

Le principal inconvénient du régulateur PD est sa sensibilité au bruit, en effet un gain élevé de ce dernier peut même mener le système à l'instabilité. Ce type de régulateur est rarement utilisé seul, il est souvent associé à une action proportionnelle pour constituer un régulateur **PD** dont la loi de commande est donnée par :

$$u(t) = K_p \left(1 + T_D \frac{d}{dt} \right) e(t) \quad (I.6)$$

Remarque :

Afin d'éviter l'amplification de signaux parasites en basses fréquences, l'action dérivée est toujours filtrée, la fonction de transfert du régulateur PD devient donc :

$$c(s) = K_p \left(1 + \frac{T_d \cdot s}{1 + \frac{T_d}{N} \cdot s} \right) \quad (I.7)$$

Avec **N** coefficient de filtrage (=100 dans la plupart des cas).

D'où la fonction de transfert du régulateur PID filtré (que nous allons utiliser dans le troisième chapitre :

Le régulateur PID et différentes techniques de réglages de ses paramètres

$$K_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d \cdot s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \right) \quad (I.8)$$

Le tableau suivant résume les effets des actions **P**, **I**, **D** d'un régulateur PID :

Coefficient	Temps de monté	Temps de stabilisation	Dépassement	Erreur Statique
K_p	Diminue	Augmente	Augmente	Diminue
K_i	Diminue	Augmente	Augmente	Annule
K_d	—	Diminue	Diminue	—

Tableau.I.1 Effets des actions P, I, D d'un régulateur PID

I.3 Différentes méthodes de réglages des paramètres du régulateur PID :

La combinaison des effets des trois actions du contrôleur PID est primordiale pour satisfaire les exigences du cahier de charge du système à régler, en termes de performances temporelles et de robustesse face aux perturbations. Pour cela, il existe plusieurs méthodes de réglage des paramètres du contrôleur PID parmi lesquelles :

I.3.1 Méthode de Ziegler-Nichols

Il s'agit d'une approche empirique basée sur des expériences, il y a deux versions : en boucle ouverte et en boucle fermée [1], [3].

a) Méthode de Ziegler Nichols en boucle ouverte (B O) :

Pour appliquer cette méthode, il faut enregistrer la réponse indicielle du processus en boucle ouverte, puis de tracer la tangente au point d'inflexion de la courbe (voir la figure I.1). Cette démarche nous permet d'identifier le modèle de notre système sous la forme d'un système du premier ordre plus retard :

$$G(s) = \frac{K e^{-Tus}}{1 + T as} \quad (I.9)$$

Le régulateur PID et différentes techniques de réglages de ses paramètres

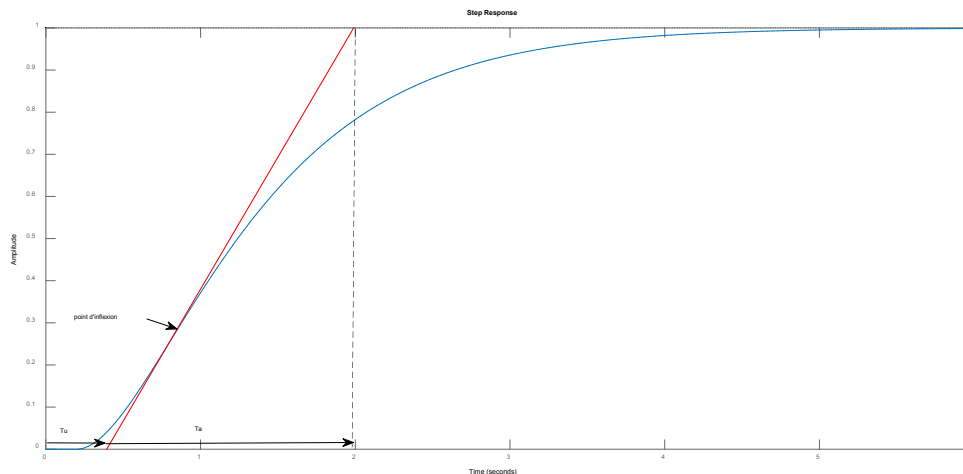


Figure I.1 : Réponse indicielle en Boucle Ouverte

Où : T_u correspond au temps au point d'intersection entre l'axe des abscisses et la tangente

T_a est le temps de montée de la tangente.

Ensuite, les paramètres T_u et T_a vont être utilisés pour régler les paramètres du régulateur **PID** mais aussi des régulateurs **P** et **PI** selon le tableau suivant :

Type de régulateur	K_p	T_i	T_d
P	$T_a/T_u * K$		
PI	$T_a * 0.9/T_u * K$	$3.33 T_u$	
PID	$T_a * 1.2/T_u * K$	$2.0 T_u$	$0.5 T_u$

Tableau I.2 : Paramètres PID (Ziegler-Nichols en B.O)

Le critère utilisé pour savoir si une réponse est satisfaisante est le rapport entre les deux premiers dépassements (positifs), il doit être de 0,25.

Le régulateur PID et différentes techniques de réglages de ses paramètres

b) Méthode de Ziegler Nichols en boucle fermée (B F) :

Cette méthode est utilisée lorsqu'il est impossible d'obtenir la réponse indicielle du système en boucle ouverte. Le principe de est le suivant : on boucle expérimentalement le processus sur un simple régulateur proportionnel dont on augmente le gain jusqu'à amener le système en régime oscillatoire de manière permanente(phénomène de pompage), on se trouve ainsi à la limite de stabilité. On relève alors le gain critique (K_{cr}) conduisant au pompage de la boucle ainsi que la période des oscillations T_{cr} correspondante comme le montre la figure suivante :

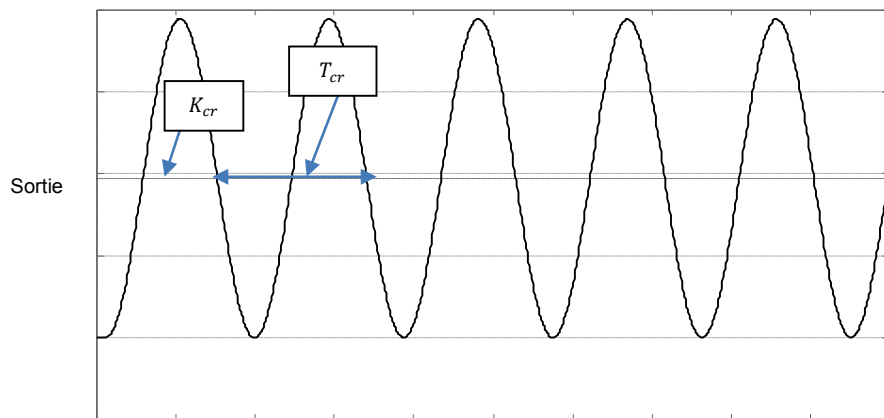


Figure I.2 : Réponse indicielle en Boucle Fermée

Ces deux paramètres seont alors utilisé pour déterminer les valeurs des paramètres du reguillateur PID mais aussi des régulateurs P et PI selon le tableau suivant :

Type du régulateur	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$		
PI	$0.4K_{cr}$	$0.8T_{cr}$	
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5T_{cr}$	$0.125T_{cr}$

Tableau I.3 : Paramètres PID (Ziegler-Nichols en B.F)

Le régulateur PID et différentes techniques de réglages de ses paramètres

I.3.2 Méthode de Åström et Hägglund

La méthode de Åström et Hägglund est inspirée de la méthode de Ziegler & Nichols, elle consiste à régler les paramètres des régulateurs : **P**, **PI** et **PID** avec deux versions : La première basée sur la réponse indicielle et la deuxième dite méthode du point critique.

La fonction de transfert du régulateur **PID** utilisée dans la méthode de Astrom & Hägglund est la suivante :

$$K_{pid}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \left(\frac{1 + T_d \cdot s}{1 + T_f \cdot s} \right) \quad (I.10)$$

Avec : $T_f = 0.05 * T_d$ est le coefficient de filtrage de l'action dérivée.

Le réglage des paramètres de ce régulateur PID s'effectue selon les deux méthodes suivantes :

a) Méthode de la réponse indicielle :

Dans cette méthode, on utilise la constante de temps apparente « T_a », celle-ci correspond au temps nécessaire pour que la réponse indicielle atteigne 63% de sa valeur asymptotique moins le temps mort apparent T_u (voir figure II.4). Comme pour la méthode de Ziegler-Nichols, on définit deux paramètres qui serviront au réglage du PID [1] :

✓ le gain normalisé : $K_n = \frac{K T_u}{T_a}$ (I.11)

✓ le temps mort relatif : $\tau = \frac{T_u}{T_u + T_a}$ (I.12)

Contrairement à Ziegler et Nichols qui proposaient simplement trois coefficients pour déterminer les termes du régulateur **PID**, Åström et Hägglund l'ont amené à relier les paramètres du régulateur au temps mort relatif à travers des fonctions ayant la forme :

$$f(\tau) = a_0 \exp(a_1 \tau + a_2 \tau^2) \quad (I.13)$$

Le régulateur PID et différentes techniques de réglages de ses paramètres

Les paramètres a_0, a_1, a_2 servant au calcul des termes K_p, T_i, T_d par ajustage des courbes au sens des moindres.

Un autre paramètre est utilisé dans cette méthode à savoir la sensibilité maximale M_s , il s'agit d'un critère d'ajustage des paramètres du régulateur défini par Åström : plus M_s est petit, plus le système asservi est moins sensible aux perturbations, il est donné par la formule suivante :

$$M_s = \max_{0 < \omega < \infty} \left| \frac{1}{1 + K(j\omega)G(j\omega)} \right| \quad (I.14)$$

Les valeurs typiques de M_s sont comprises entre 1.2 et 2.

Différents tableaux sont proposés par Åström et Hägglund pour différentes valeurs de M_s , voici celui correspondant à $M_s = 2$:

K_n	$K_0 T_u / T_a$
τ	$T_u / (T_u + T_a)$
K_p	$a_0 \cdot \exp(a_1 \tau + a_2 \tau^2) / K_n$
T_i	$a_0 \cdot \exp(a_1 \tau + a_2 \tau^2) \cdot T_a$
T_d	$a_0 \cdot \exp(a_1 \tau + a_2 \tau^2) \cdot T_a$

Tableau I. 4 Paramètres du régulateur PID (Åström et Hägglund « réponse indicielle »).

b) Méthode du point critique (plan fréquentiel) :

Cette méthode est développée dans le plan fréquentiel, elle requiert le gain statique K_0 du processus pour le calcul des paramètres suivants :

➤ Le gain relatif : $k = \frac{1}{K_{cr} \cdot K_0}$ (I.15)

Le régulateur PID et différentes techniques de réglages de ses paramètres

➤ La période d'oscillation critique : $T_{cr} = \frac{2\pi}{P_u}$ (I.16)

K_{cr} Et P_u représentent le gain critique et la période critique respectivement.

Comme pour la méthode temporelle, Åström et Hägglund ont reliés les paramètres du régulateur au gain relatif k définis par la fonction suivante :

$$f(k) = a_0 \exp(a_1 k + a_2 k^2) \quad (I.17)$$

Les paramètres a_0, a_1, a_2 servant au calcul des termes K_p, T_i, T_d par ajustage des courbes au sens des moindres carrés.

Le tableau suivant est utilisé pour le réglage des paramètres des régulateurs P, PI ou PID selon cette méthode :

K_n	$K_0 T_u / T_a$
k	$1 / (K_{cr} + K_0)$
K_p	$a_0 \cdot \exp(a_1 k + a_2 k^2) \cdot K_{cr}$
T_i	$a_0 \cdot \exp(a_1 k + a_2 k^2) \cdot T_{cr}$
T_d	$a_0 \cdot \exp(a_1 k + a_2 k^2) \cdot T_{cr}$

Tableau I.5 Paramètres du régulateur PID (Åström et Hägglund « point critique »).

I.4 Méthode de réglage optimale :

Récemment, de nouvelles méthodes de réglage des paramètres du régulateur PID sont apparues, elles sont basées sur la minimisation d'un critère dans le domaine temporel impliquant l'expression de l'erreur et/ou du temps [4]. Il existe plusieurs critères, parmi lesquelles [5] :

I.4.1 Le critère ISE (Integral Squared Error) :

Son expression mathématique est donnée par :

Le régulateur PID et différentes techniques de réglages de ses paramètres

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si: } E_{\infty} = 0, J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \\ \text{Ou encore:} \\ \text{Si: } E_{\infty} \neq 0, J = \int_0^{2T_r} e^2(t) dt \end{array} \right. \quad (\text{I.18})$$

Ce critère est utilisé pour minimiser l'énergie de la commande.

I.4.2 Le critère ITSE (Integral Time Squared Error) :

Ce critère minimise le carrée de l'erreur en un temps minimal, il donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si: } E_{\infty} = 0, J = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \\ \text{Ou:} \\ \text{Si: } E_{\infty} \neq 0, J = \int_0^{2T_r} e^2(t) dt \end{array} \right. \quad (\text{I.19})$$

I.4.3 Le critère IAE (Intégral Absolute Error) :

Il contient l'expression de la valeur absolue de l'erreur, il est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si: } E_{\infty} = 0, J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \\ \text{Ou:} \\ \text{Si: } E_{\infty} \neq 0, J = \int_0^{2T_r} |e(t)| dt \end{array} \right. \quad (\text{I.20})$$

I.4.4 Le critère ITAE (Intégral TimeAbsolute Error) :

Le régulateur PID et différentes techniques de réglages de ses paramètres

Il implique aussi bien l'expression de la valeur absolue de l'erreur que le temps, il est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si: } E_{\infty} = 0, J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \\ \text{Ou:} \\ \text{Si: } E_{\infty} \neq 0, J = \int_0^{2T_r} t |e(t)| dt \end{array} \right. \quad (I.21)$$

Ce critère est utilisé pour minimiser les dépassements.

I.4.5 Expression du problème d'optimisation :

Le problème du réglage optimal des paramètres d'un régulateur PID consiste à trouver les paramètres K_p , T_i , et T_d optimaux qui minimisent le critère temporel choisi, il s'agit d'un problème de minimisation qui peut être exprimé mathématiquement par :

$$\min_{\{K_p, T_i, T_d\}} \left\{ \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \right. \quad (I.22)$$

Ce problème peut être résolu numériquement par de nombreux outils logiciels dont la toolbox Optimisation de Matlab [6].

I.5 Conclusion

Le régulateur PID reste parmi les plus utilisés dans le monde industriel aujourd'hui, dans ce chapitre nous avons présenté quelques définitions concernant ce type de régulateur, ainsi que différentes méthodes de réglages de ses paramètres.

Chapitre II

le régulateur P.I.D inspiré du
système immunitaire

II.1 Introduction

Ces derniers temps, les scientifiques se sont beaucoup inspirés de divers phénomènes biologiques dans divers domaines technologiques. Dans ce cadre, sont apparus les systèmes immunitaires artificiels, qui sont une discipline récente utilisant les principes de fonctionnement du système immunitaire biologique, pour le traitement de l'information de façons intelligente. Dans ce chapitre, nous allons présenter une version du régulateur PID inspiré du système humanitaire.

II.2 Analogie entre le système immunitaire et la boucle de commande d'un système

Le système immunitaire biologique est le mécanisme naturel qui intercepte et neutralise tout micro-organisme extérieure exogène (antigènes), il est composé essentiellement de deux types de cellule : les lymphocytes et les anticorps, il existe deux types de lymphocytes [7]: les cellules T eux même divisés en cellules T stimulantes T_h et cellules T tueuses T_s , l'autre type sont les cellules B. La figure suivante montre la façon avec laquelle le mécanisme immunitaire agit face à une invasion extérieure [8] :

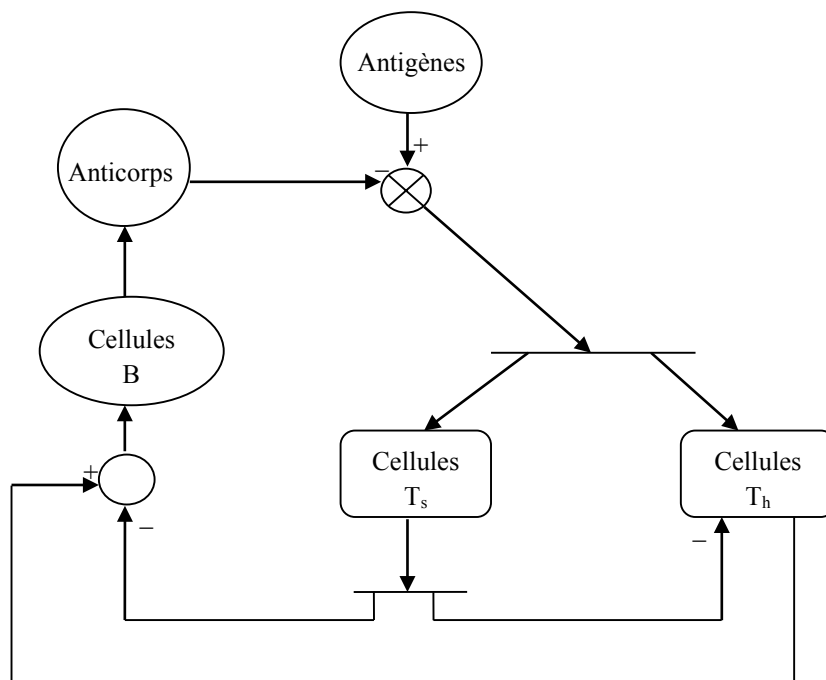


Figure II.1 Principe de réaction du système immunitaire

Dès l'invasion de l'organisme par les antigènes, l'information est perçue par les cellules T stimulantes T_h qui elles-mêmes stimulent les cellules B en leur fournissant

Le Régulateur PID inspiré du système immunitaire

toutes les informations concernant les antigènes, les cellules B produisent alors des anticorps spécifiques pour éliminer les antigènes, le processus continu (et le nombre de cellules T_h à croître) tant que la quantité d'antigènes est importantes, dès que celle-ci commence à diminuer, les cellules tueuses T_s entrent en jeux et commencent à éliminer les cellules T_h et B jusqu'au retour à la situation normale, c'est-à-dire : élimination totale des antigènes et stabilisation du systèmes immunitaire [8].

D'après la figure II.1, on remarque qu'il y a une similitude entre le fonctionnement du système immunitaire et la boucle fermée de commande d'un système (figure II.2), si on assimile l'erreur e entre la référence R et la sortie réelle du système y aux anticorps dans le système immunitaire.

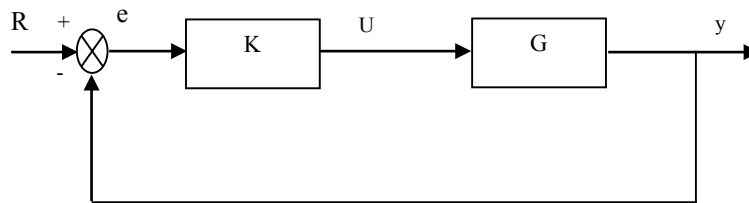


Figure II.2 Système commandé en boucle fermée

En effet, l'objectif dans les deux systèmes est l'élimination de l'erreur (antigènes), ceci est possible grâce à la loi de commande U (analogue aux cellules B du système immunitaire) générée par le contrôleur K et qui agit sur le système G .

L'analogie entre les deux systèmes peut être résumée par le tableau suivant [8] :

Commande en boucle fermée	Système immunitaire
e : erreur entre la référence et la sortie réelle	Quantité d'antigènes
U : Loi de commande	Quantité de cellules B

Tableau II.1 Analogie entre le système immunitaire et la boucle de commande

II.3 Loi de commande inspirée par le système immunitaire

Le Régulateur PID inspiré du système immunitaire

Les cellules tueuses T_s jouent un rôle important dans la stabilisation et l'équilibre du système immunitaire, Leurs tâche consiste essentiellement à réguler la quantité de cellules stimulantes T_h et des cellules B, ceci en délivrant la quantité nécessaire de ces cellules afin d'éliminer la quantité d'antigènes introduites [7], [8].

A la $k^{i\text{eme}}$ génération d'antigènes, la quantité de cellule B (production d'anticorps) est donnée par [7]:

$$B(k) = T_h(k) - T_s(k) \quad (\text{II.1})$$

Où

$$T_h(k) = K_1 \xi(k) \quad (\text{II.2})$$

Avec $\xi(k)$ est la quantité d'antigènes a la the $k^{i\text{eme}}$ générationet K_1 est le facteur de stimulation des cellules T_h .

La quantité de cellules tueuses T_s est alors donnée par :

$$T_s(k) = K_2 \{f[B(k), \Delta B(k-d)]\} \xi(k) \quad (\text{II.3})$$

Avec K_2 est le facteur d'inhibition, $\Delta B(k-d)$ est la variation de la quantité de cellules B de la $k^{i\text{eme}}$ génération, elle est donnée par :

$$\Delta B(k-d) = B(k-d) - \Delta B(k-d-1) \quad (\text{II.4})$$

Avec d est le temps de réaction du système immunitaire (retard), $f(\cdot)$ est fonction non linéaire qui exprime l'interaction entre les anticorps produites les cellules B et les antigènes à la $(k-d)^{i\text{eme}}$ génération [1,3].

Si on remplace les équations (II.2) et (II.3) dans l'équation (II.1), on trouve :

$$B(k) = K_1 \xi(k) - K_2 \{f[B(k), \Delta B(k-d)]\} \xi(k) \quad (\text{II.5})$$

Le Régulateur PID inspiré du système immunitaire

Où

$$B(k) = K_1 \{1 - \mu f[B(k), \Delta B(k-d)]\} \xi(k) \quad (II.6)$$

Avec $\mu = \frac{K_2}{K_1}$ le coefficient proportionnel qui exprime l'interaction entre les cellules $T_h(k)$ and $T_s(k)$.

D'après la formule (II.6), on remarque que l'augmentation de K_1 accélère la réaction du système immunitaire (temps de réponse), tandis que l'augmentation de μ équilibre la quantité de cellules B nécessaire pour arriver à la stabilisation du système immunitaire.

L'équation (II.6) présente une similitude évidente avec la loi de commande proportionnelle classique donnée par

$$U(k) = K_p e(k) \quad (II.7)$$

Avec K_p est le coefficient du gain proportionnel.

Cependant, dans la formule (II.7), le gain proportionnel est non linéaire, on peut alors établir la loi de commande proportionnelle inspirée du système immunitaire comme suit [7] :

$$\left. \begin{aligned} U(k) &= K_p \{1 - \mu f[U(k), \Delta U(k-d)]\} \xi(k) \\ Ou : U(k) &= K_{pimm} \xi(k) \end{aligned} \right\} \quad (II.8)$$

Avec $K_{pimm} = K_p \{1 - \mu f[U(k), \Delta U(k-d)]\}$

II.4 Le régulateur PID inspiré par le système immunitaire

Tout d'abord, on rappelle que la loi de commande d'un régulateur PID classique est donnée par :

$$u(t) = K_p \left(1 + \frac{T_i}{s} + T_d s \right) e(t) \quad (II.9)$$

Avec : K_p coefficient de l'action proportionnelle, T_i coefficient de l'action intégrale, T_d coefficient de l'action dérivée.

Le Régulateur PID inspiré du système immunitaire

Si on remplace la loi de commande proportionnelle inspiré du système immunitaire (II.8) dans la loi de commande du régulateur PID (II.9), on obtient la loi de commande d'un régulateur PID inspirée par le système immunitaire [7] :

$$U(t) = K_p \{1 - \mu f[U(k), \Delta U(k-d)]\} \left(1 + \frac{T_i}{s} + T_d s \right) e(t) \quad (\text{II.10})$$

II.4.1. Avantages du régulateurs PID inspiré du système immunitaire

Le régulateur PID inspiré du système immunitaire (PID_{imm}) dont la loi de commande est donnée par (II.10), présente plusieurs avantages parmi lesquelles [7] :

- ✓ Un paramètre supplémentaire à ajuster μ en plus des trois paramètres classiques du PID, cela nous offre plus de possibilités (solutions).
- ✓ Un paramètre non linéaire $f(\cdot)$, cela rend l'utilisation du PID immunitaire possible pour de processus présentant des comportements dynamiques non linéaire.

a) Modélisation mathématique de la fonction non linéaire $f(\cdot)$

La fonction non linéaire donne une information sur l'évolution de la quantité d'antigènes présentes dans le corps : si elle est en train d'augmenter (c-à-d $\Delta U(k-d)$ augmente), alors $f(\Delta U(k-d))$ doit croître afin de la réduire cette quantité, et le contraire est vraie. Ils existent plusieurs modèles mathématiques de $f(\cdot)$, parmi lesquelles [7, 8] :

$$\triangleright f(x) = 1 - e^{\left(\frac{-x^2}{a}\right)} \quad (\text{II.11})$$

$$\triangleright f(x) = 1 - \frac{2}{1+e^{(-ax)}} \quad (\text{II.12})$$

$$\triangleright f(x) = 1 - \frac{2}{e^{(ax)}+e^{(-ax)}} \quad (\text{II.13})$$

Où a est un paramètre non nul, pour toutes les valeurs de $x, f(x) \in [0,1]$.

Le Régulateur PID inspiré du système immunitaire

La figure suivante représente $f(x) = 1 - e^{\left(\frac{-x^2}{a}\right)}$ en fonction de trois valeurs du paramètre a , respectivement $a = 1, 2, 3$.

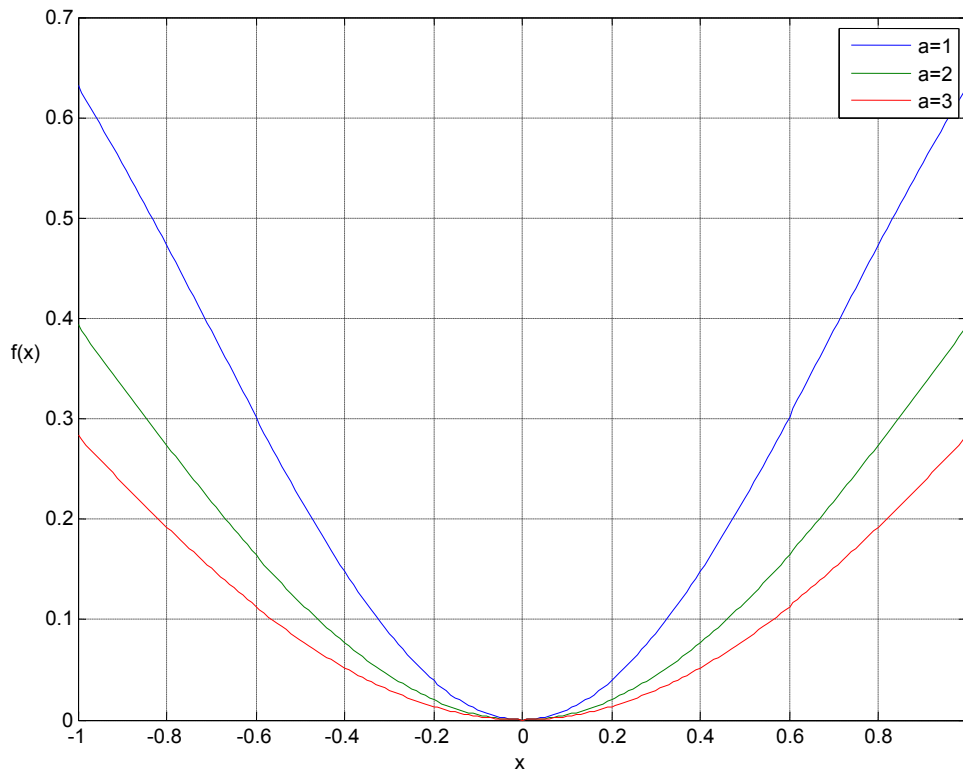


Figure II.3 Evolution de $f(.)$ en fonction du paramètre a

On constate que plus la valeur de a diminue, plus la fonction $f(.)$ augmente, cela se traduit par le fait que chaque système immunitaire possède sa vitesse de réaction, ce qui correspond au de réponse d'un système dynamique corrigé.

b) Modélisation par logique floue de la fonction non linéaire $f(.)$

La logique floue est une extension de la logique booléenne où il est possible de représenter d'autres états que vrai ou faux. Comme cette technique est largement connue de nos jours, nous allons donc directement l'utiliser pour modéliser notre fonction non linéaire selon le schéma de la figure suivante [8] :

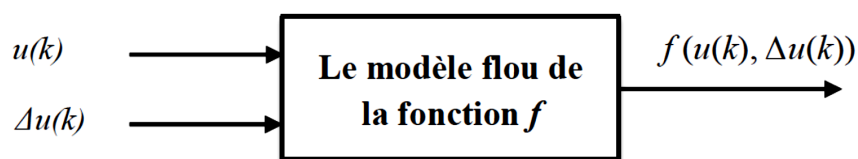


Figure II.4 Schéma du modèle floue de $f(.)$

Le Régulateur PID inspiré du système immunitaire

Il existe plusieurs modèles flous dont celui de Mamdani que nous avons choisi. Ce modèle possède les caractéristiques suivantes [9], [10] :

- ✓ Les deux variables d'entrée sont la sortie du contrôleur IMF $u(k)$ et sa variation $\Delta u(k)$, tandis que la variable de sortie est la quantité de suppression des cellules $T f(u(k), \Delta u(k))$.
- ✓ Les opérateurs linguistiques d'entrée contiennent cinq ensembles flous : NB (Negative Big), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small) et PB (Positive Big).
- ✓ Les opérateurs linguistiques de sortie contiennent sept ensembles flous : NB, NM (Negative medium), NS, ZE, PS, PM (Positive Medium) et PB.
- ✓ Les fonctions d'appartenance choisies sont toutes définies dans l'intervalle $(-6, +6)$.

Les règles floues établis selon le principe de la réaction immunitaire sont représentées par le tableau II.2.

u(k)	$\Delta u(k)$				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>
NS	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>
ZE	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>
PS	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>	<i>NB</i>
PB	<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>

Tableau II.2 Règles floues du modèle de f(.)

Les fonctions d'appartenance d'entrée et de sortie sont illustrées dans les figures II.5 et II.6 respectivement.

Le Régulateur PID inspiré du système immunitaire

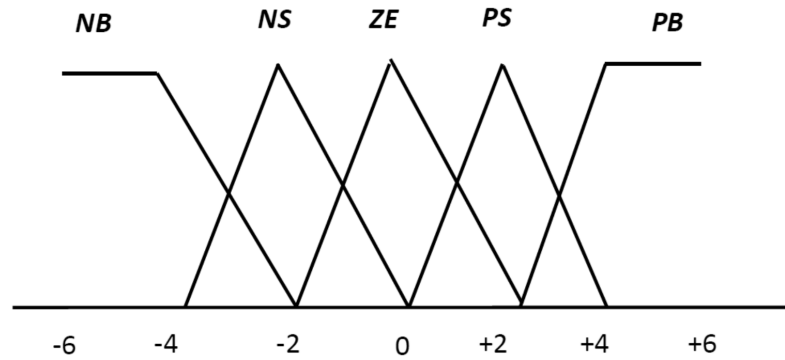


Figure II.5 Fonctions d'appartenance (entrées)

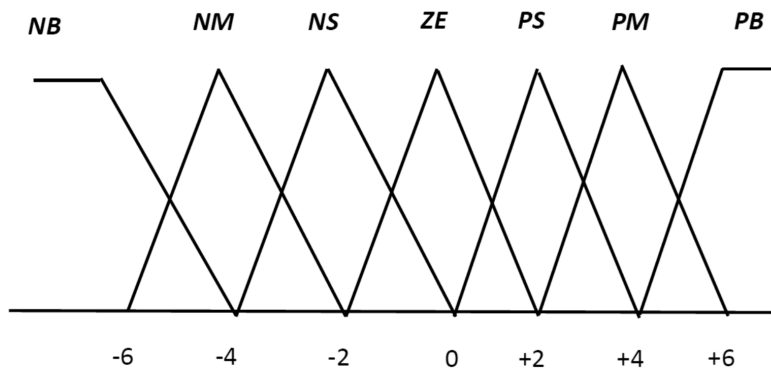


Figure II.6 Fonctions d'appartenance (sorties)

II.5 Schéma de commande du régulateur PID_{imf}

La figure ci-après présente le schéma bloc d'un régulateur PID inspiré de la réaction du système immunitaire biologique [8].

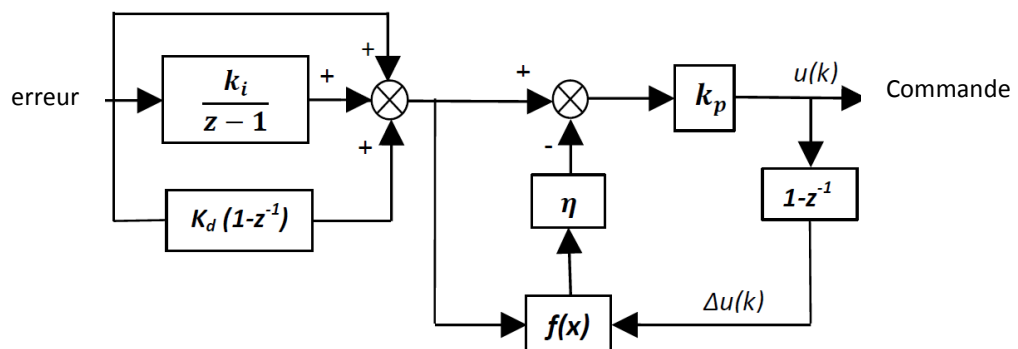


Figure II.7 Schéma bloc du régulateur et la boucle de rétroaction immunitaire

Le Régulateur PID inspiré du système immunitaire

On remarque une similitude évidente avec la boucle de commande du PID classique.

II.5.1 Réalisation du modèle du régulateur PID immunitaire sous environnement MATLAB/SIMULINK

Afin de constater l'efficacité d'un tel régulateur, il sera appliqué en simulation pour la commande d'un système dans le troisième chapitre, mais avant cela, nous avons réalisé son schéma bloc sous l'environnement SIMULINK de MATLAB comme suit :

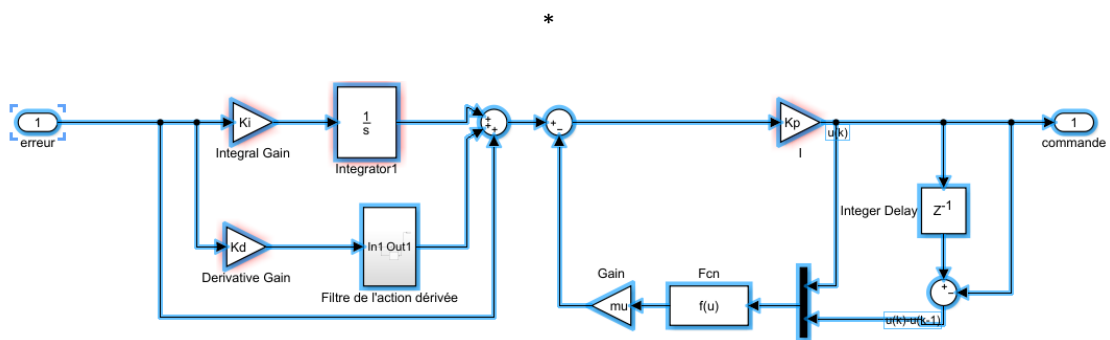


Figure II.8 Schéma SIMULINK du régulateur PID_{imf}

II.6 Conclusion

La réaction du système immunitaire biologique présente plusieurs similitudes avec la boucle de commande d'un système. Dans ce chapitre, nous avons présenté un régulateur PID inspiré du système immunitaire, sa structure présente plusieurs avantages par rapport à la structure classique. Nous avons aussi réalisé un schéma bloc sous environnement MATLAB/SIMULINK représentant la structure du régulateur PID immunitaire afin de l'utiliser pour la commande de systèmes dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Application sur un modèle d'un
système de commande de la
température d'une salle

Application sur un modèle d'un système de commande de la température d'une salle

III.1 Introduction

Dans les précédents chapitres, nous avons présenté le régulateur PID ainsi que différentes méthodes de réglage de ses paramètres que sont : la méthode de Ziegler-Nichols, la méthode de Astrom-Hägglund ainsi que la méthode de réglage optimale. Nous avons aussi présenté une nouvelle structure du régulateur PID directement inspirée du fonctionnement du système immunitaire biologique.

Dans ce qui suit, nous appliquer les méthodes citées plus haut sur un modèle d'un système de commande de la température d'une salle présenté dans [9].

III.2 Présentation et modélisation du système a commandé

La boucle de commande d'un système de contrôle de la température d'une salle est décrite par le schéma bloc suivant [9] :

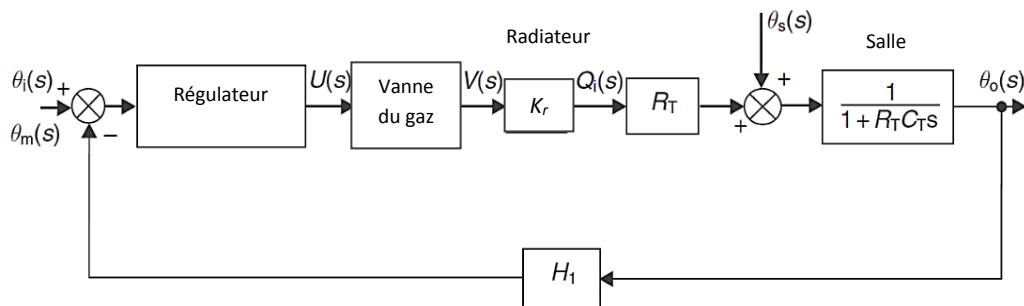


Figure III.1 Boucle de commande de la température d'une salle

Avec :

$\theta_d(t)$ = Température désirée ($^{\circ}\text{C}$)

$\theta_m(t)$ = Température mesurée (V)

$\theta_o(t)$ = Température actuelle ($^{\circ}\text{C}$)

$\theta_s(t)$ = Température Ambiante ($^{\circ}\text{C}$)

$u(t)$ = Signal de commande (V)

$v(t)$ = Débit de gaz (m^3/s)

$Q_i(t)$ = Flux de chaleur dans la pièce ($\text{J/s} = \text{W}$)

$Q_o(t)$ = Flux de chaleur à travers les murs (W)

K_r = Coefficient du bruleur du radiateur (Ws/m^3)

Application sur un modèle d'un système de commande de la température d'une salle

R_T = Résistance thermique des murs

C_T = Capacité thermique de l'air dans la pièce

H_I = Coefficient de mesure du thermomètre

La vanne du gaz peut être modélisée par la fonction de transfert du premier ordre suivante :

$$\frac{V(s)}{U(s)} = \frac{K}{1+\tau s} \quad (\text{III.1})$$

D'après la figure III.1, la fonction de transfert de la chaîne directe (sans régulateur) est donnée par :

$$\frac{\theta_o(s)}{U(s)} = \frac{KK_T R_T}{(1+\tau s)(1+R_T C_T s)} \quad (\text{III.2})$$

III.2.1 Application numérique

Comme application numérique, prenons les valeurs des constantes suivantes [9] :

$KK_1 = 5 \text{ W/V}$; $R_T = 0.1 \text{ Ks/J}$; $C_T = 80 \text{ J/K}$; $H_I = 1.0 \text{ V/K}$; $\tau = 4 \text{ s}$.

D'où la fonction de transfert du système :

$$\frac{\theta_o(s)}{U(s)} = \frac{0.5}{(1+4s)(1+8s)} \quad (\text{III.3})$$

Maintenant, il s'agit alors de concevoir un régulateur de type PID dont les paramètres seront déterminés par les méthodes présentées dans le premier chapitre, à savoir : Ziegler-Nichols, Astrom-Hägglund, ainsi que la méthode optimale. Nous appliquerons aussi l'autre structure du PID inspirée du système immunitaire biologique (voir chapitre II). Toutes ces méthodes seront appliquées pour la commande du modèle de système de contrôle de la température d'une salle, et les résultats obtenus seront commentés et comparés.

III.3 Application de la méthode de Ziegler Nichols

Nous avons utilisé l'interface graphique «Automatic PID Tuning» [11], cette interface peut servir à calculer les paramètres du régulateur PID selon plusieurs méthodes parmi lesquelles Ziegler-Nichols et Astrom-Hägglund.

Application sur un modèle d'un système de commande de la température d'une salle

III.3.1 Méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte

La fonction de transfert du régulateur PID filtré dont les paramètres sont calculés par la méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte est la suivante :

$$K_{PIDZNO}(s) = \frac{41.04 s^2 + 53.12 s + 17.19}{3.09e^{-5}s^2 + 3.09 s}$$

La réponse indicielle du système en boucle fermée corrigé par $K_{PIDZNO}(s)$ est représentée sur la figure suivante :

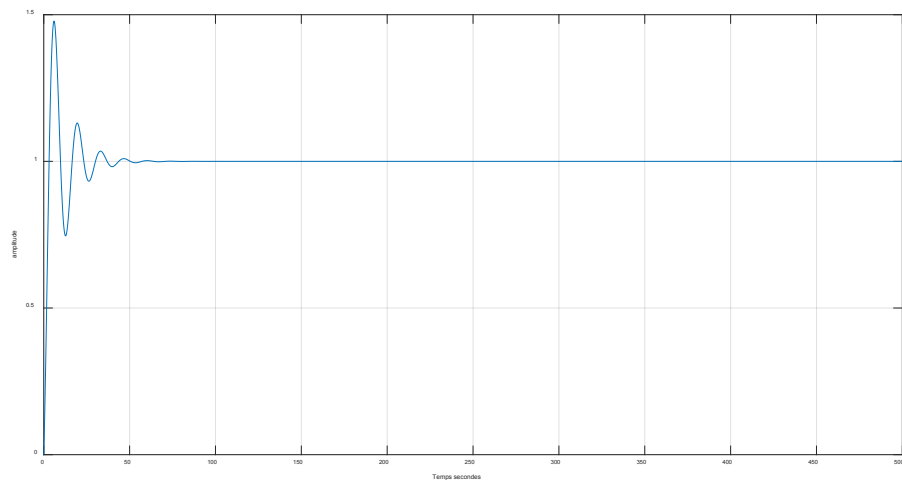


Figure III.2 Réponse indicielle du système en boucle fermée (Ziegler-Nichols BO)

On constate de faibles performances temporelles, avec un régime transitoire oscillatoire, un dépassement de presque 50%, et un temps de réponse de plus de 40 secondes.

III.3.2 Méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée

La fonction de transfert du régulateur PID filtré dont les paramètres sont calculés par la méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée est la suivante :

Application sur un modèle d'un système de commande de la température d'une salle

$$K_{PID_{ZN_{CL}}}(s) = \frac{35.53 s^2 + 7.997 s + 0.45}{0.0001777 s^2 + 17.77 s}$$

La réponse indicielle du système en boucle fermée corrigé par $K_{PID_{ZN_{CL}}}(s)$ est représentée sur la figure suivante :

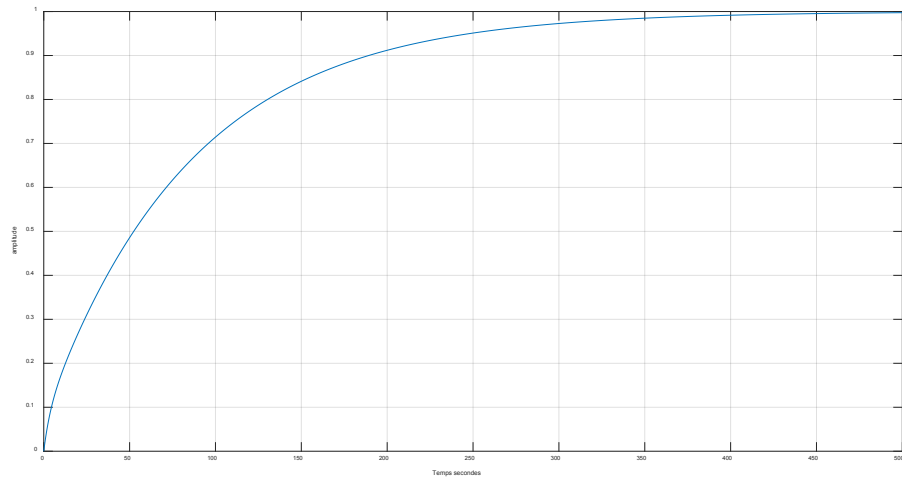


Figure III.3 Réponse indicielle du système en boucle fermée (Ziegler-Nichols BF)

On constate une nette amélioration en termes de stabilité, mais le temps de réponse (250 secondes) est plus long en comparaison avec celui obtenu par la méthode Ziegler-Nichols en boucle ouverte. A noter aussi que le dépassement est nul.

III.4 Méthode de Astrom-Hägglund

La fonction de transfert du régulateur PID filtré dont les paramètres sont calculés par la méthode de Astrom-Hägglund est la suivante :

$$K_{PID_{AH}}(s) = \frac{60.11 s^2 + 13.34 s + 0.7403}{0.0001802 s^2 + 18.02 s}$$

La réponse indicielle du système en boucle fermée corrigé par $K_{PID_{AH}}(s)$ est représentée sur la figure suivante :

Application sur un modèle d'un système de commande de la température d'une salle

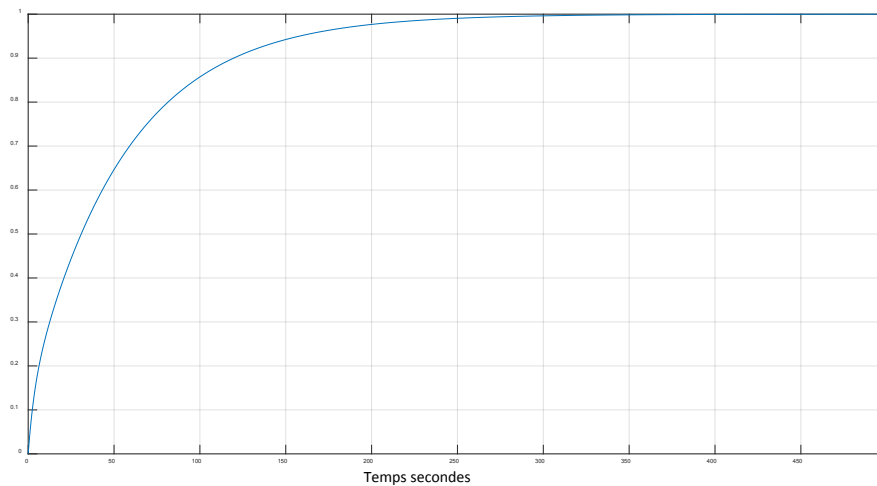


Figure III.4 Réponse indicielle du système en boucle fermée (Astrom-Hägglund)

Ici le temps de réponse (150 secondes) est plus petit que celui obtenu par la méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée, mais reste plus grand que celui obtenu par la méthode Ziegler-Nichols en boucle ouverte, tandis que la stabilité est améliorée par rapport à cette dernière, avec aussi un dépassement nul.

III.5 La méthode optimale

Comme nous l'avons évoqué dans le premier chapitre, la méthode optimale consiste à trouver les paramètres du régulateur PID, qui solution du problème d'optimisation suivant : $\min_{\{K_p, T_i, T_d\}} \left\{ \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \right\}$. Afin de résoudre ce problème

numériquement, nous avons utilisé le modèle SIMULINK (Figure III.5) afin de récupérer les signaux dont nous avons besoin, ensuite nous avons utilisé l'instruction « fminsearch » de la toolbox optimisation de MATLAB. La fonction de transfert

filtrée du régulateur PID obtenu est la suivante : $K_{PID_{opt}}(s) = \frac{61.59s^2 + 23.59s + 1.958}{0.001s^2 + s}$.

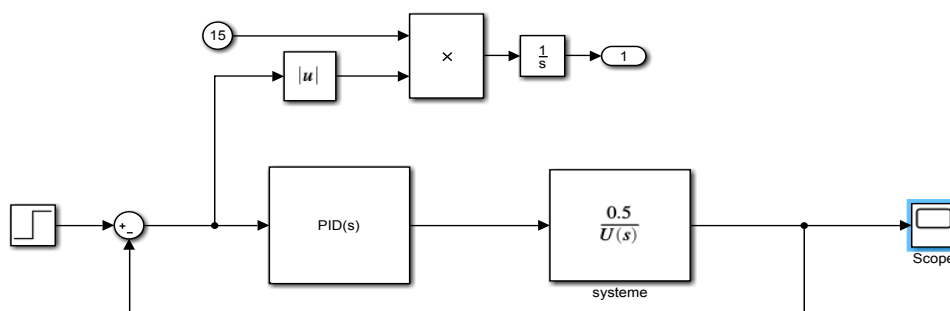


Figure III.5 Modèle SIMULINK (PID optimal)

Application sur un modèle d'un système de commande de la température d'une salle

La réponse indicielle du système en boucle fermée corrigé par $K_{PID_{opt}}(s)$ est représentée sur la figure suivante :

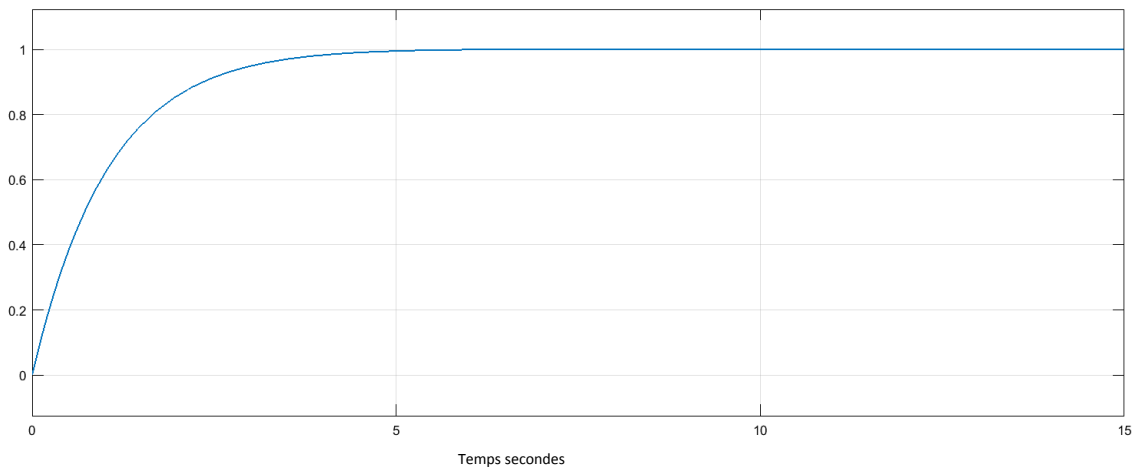


Figure III.6 Réponse indicielle du système en boucle fermée (Méthode optimale)

Nous constatant une très grande amélioration du temps de réponse (≈ 3 secondes), ainsi qu'un dépassement nul. La stabilité est aussi améliorée par rapports aux deux méthodes précédentes.

III.6 Application de la structure du PID inspirée de la réaction du système immunitaire

Dans ce qui suit, nous allons appliquer la structure du régulateur PID inspirée de la réaction du système immunitaire biologique (que nous appellerons PID_{imm}), pour la commande de notre modèle de système de contrôle de la température dans une salle.

Comme nous l'avons mentionné dans le deuxième chapitre, la loi de commande du PID_{imm} est la suivante :

$$U(t) = K_{PID_{imm}}(s) \left(1 + \frac{T_i}{s} + T_d s \right) e(t), \text{ avec :}$$

$$K_{pimm} = K_p \{ 1 - \mu f[U(k), \Delta U(k-d)] \}.$$

Nous avons choisi de modéliser la fonction non linéaire $f[U(k), \Delta U(k-d)]$ par un modèle de logique floue (voir chapitre II), il nous reste donc quatre paramètres à régler (K_p, T_i, T_d, μ). Pour cela, nous avons appliqué la méthode optimale avec le modèle SIMULINK suivant :

Application sur un modèle d'un système de commande de la température d'une salle

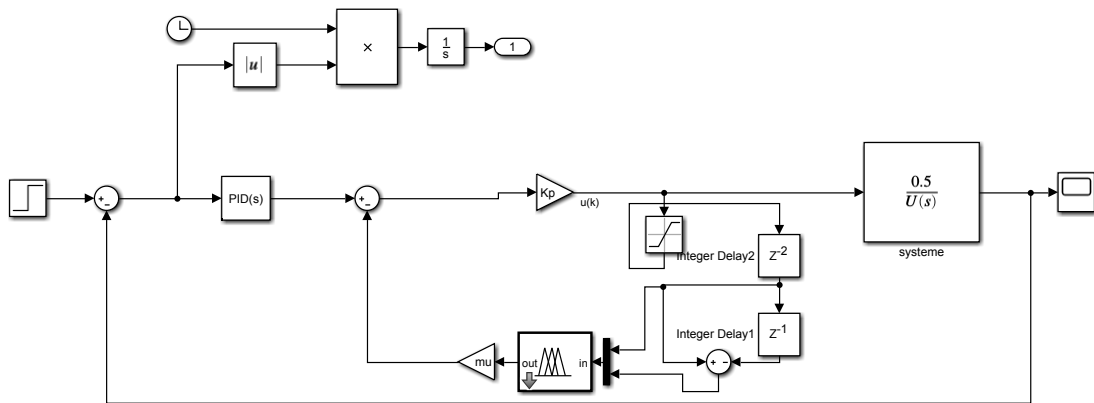


Figure III.7Modèle SIMULINK (PID immunitaire)

La solution du problème d'optimisation a donné les valeurs des paramètres du régulateur $K_{PID_{imm}}(s)$ suivant :

$$K_p = 278.7160, T_i = 0.0001, T_d = 2.3698, \mu = 0.0532.$$

La réponse indicielle du système en boucle fermée corrigé par $K_{PID_{imm}}(s)$ est représentée sur la figure suivante :

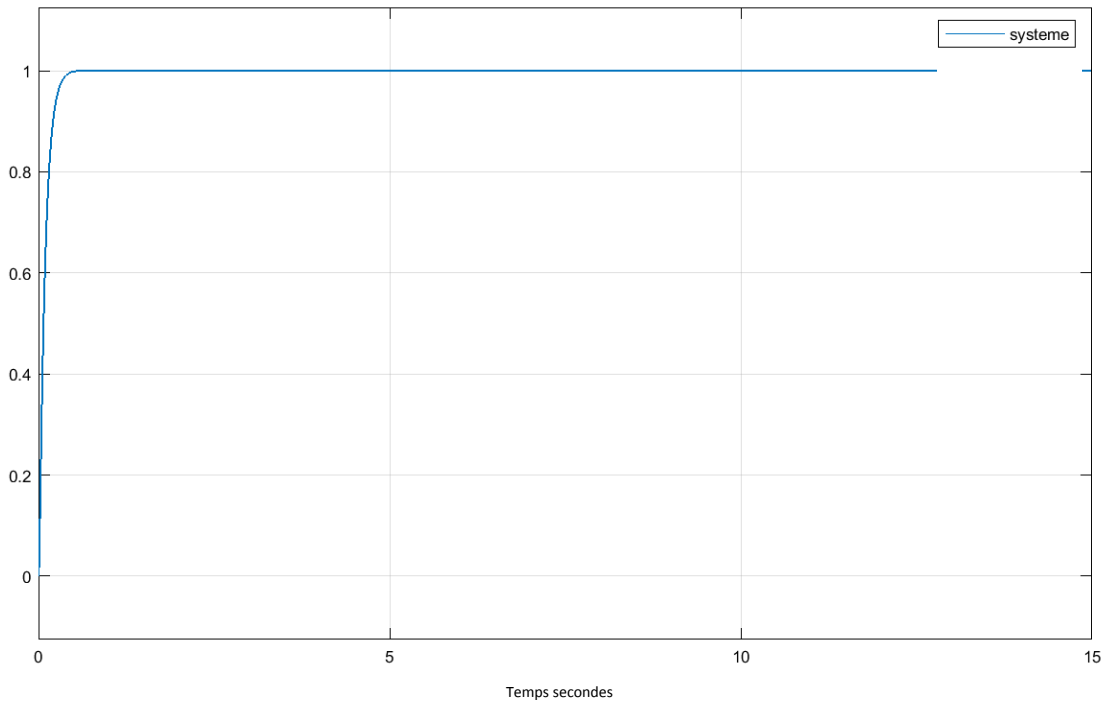


Figure III.8Réponse indicielle du système en boucle fermée (Régulateur immunitaire)

Application sur un modèle d'un système de commande de la température d'une salle

On constate encore une autre amélioration au niveau du temps de réponse (≈ 0.5 secondes) par rapport aux résultats obtenus par le régulateur $K_{PID_{opt}}(s)$, avec un dépassement nul. Ceci est sans doute dû aux paramètres supplémentaires (μ et $f(\cdot)$), qui offrent plus de possibilités de solutions du problème d'optimisation.

III.7 Conclusion

La structure du régulateur PID inspirée de la réaction du système immunitaire a permis de part ces paramètres supplémentaires, d'améliorer les performances temporelles de la boucle de commande de notre système. Ceci confirme l'intérêt de ce type de régulateur PID.

Les systèmes bio-inspirés ont connus un développement considérables ses dernières années, et maintenant ils utilisés dans beaucoup de domaines dont celui de la commande des systèmes. Dans ce cadre, nous avons présenté dans ce mémoire une nouvelle structure du régulateur PID directement inspirée de la réaction du système immunitaire biologique. Cette structure présente plusieurs similitudes avec celle d'un régulateur PID classique, et présente quelques avantages dont la possibilité d'utiliser cinq paramètres (dont un non linéaire), ce qui permet plus de solutions possibles pour leurs réglages surtout avec les méthodes optimales.

Afin de valider cette nouvelle structure bio-inspirée, nous l'avons appliquée pour la commande d'un modèle de système de contrôle de la température d'une salle. D'abord, nous avons conçu un modèle SIMULINK de cette structure, ensuite, nous avons régler ses paramètres avec la méthode optimale. Afin de comparés les résultats trouvés, nous avons aussi conçus des régulateur PID classiques dont les paramètres ont été régler par les méthodes classiques (Ziegler-Nichols, Astrom-Hagglund), et la méthode optimale. Les résultats ont confirmé l'efficacité de cette structure en termes de performances de commande.

Comme perspectives, nous pouvons envisagés la modélisation de la fonction non linéaire par d'autres méthodes que la logiques floue, ainsi que la détermination des paramètres du PID immunitaire par d'autres algorithmes d'optimisation tels que les essais particuliers ..etc.

Bibliographie

- [1] K.J. Åström and T. Hägglund, 'PID Controllers: Theory, Design and Tuning'. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995.
- [2] M. Rivoire, J.L. Ferrier, 'Cours d'automatique, Tome 2 : Asservissement-Regulation-Commande analogique', Eyrolles, 1992.
- [3] Ziegler. J.G, Nichols.N.B, 'Optimum settings for automatic controllers'. Trans ASME, 1942.
- [4] G.P.Liu, S.Daley 'Optimal-tuning PID control for industrial systems'. Control Engineering Practice, Volume 9, Issue 11, November 2001, Pages 1185-1194
- [5] M. Zhuang and D. P. Atherton, 'Automatic tuning of optimum PID controllers' in IEE Proceedings D - Control Theory and Applications, vol. 140, no. 3, pp. 216-224, May 1993, doi: 10.1049/ip-d.1993.0030.
- [6] Optimization toolbox, 'MATLAB User's Guide', The MathWorks inc, 2014.
- [7] Takahashi K , Yamada T., "Application of an Immune Feedback Mechanism to Control Systems". JSME Int J ,Series C, 1(2): 184. 1998.
- [8] Rochdi BOUCHEBBAT, 'Algorithmes bio-inspirés appliqués pour la commande des systèmes', Thèse de doctorat LMD, Spécialité : AUTOMATIQUE, Université 20 août 1955, Skikda, Mai 2016.
- [9] Xinyi, R et al., "Application of Fuzzy Immune PID control based on PSO", International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics 2009
- [10] Jiangjiang, W et al., "Fuzzy Immune Self-tuning PID Control of HVAC System", Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2008.
- [11] André (2020) Automatique PID Tuning.zip, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46864-automatic-pid-tuning-zip>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved September 20, 2020.