

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des nouvelles technologies de l'information et de la communication
Département d'Electronique et des Télécommunications



Mémoire
MASTER PROFESSIONNEL
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Electronique
Spécialité : Instrumentation
Présenté par :

Taiba Oussama

Sadouki Allaeddine

Thème

**Adaptation des paramètres d'un contrôleur PID
par les colonies de fourmis artificielles**

Soutenu publiquement

le : 21/06/2017

Devant le jury :

M. KADRI Salim	MA (A)	Président	UKM Ouargla
M. AOUF Anouar Essadate	MA (A)	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M. DAHRAOUI Nadia	MA (A)	Examineur	UKM Ouargla
M. BEN ATHMANE Khaled	MA (A)	Examineur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2016/2017



DEDICACE

A ceux qui m'ont donné la vie, le symbole de la beauté et de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de l'inspiration et du courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

- ☉ *A ma très chère Mère et à mon cher Père ;*
- ☉ *A ma très chère gronde Mère ;*
- ☉ *A mon chère gronde père ;*
- ☉ *A mes frères et mes sœurs; (Ahmed Ishak, Abdo Amira et Hadjer et Sara et Mon amour Mohamed)*
- ☉ *Et tout ma famille : (Taiba , Sefouane, Bouziane)*
- ☉ *Nos sincères remerciements à notre encadreur Mr Anouar Essadate AOUF qui a bien voulu nous encadrer, et de nous avoir encouragé le long de notre travail.*
- ☉ *A mon Ami et binôme Alaeddine Sadouki pour tous les moments de joies et de peines qu'on a passé ensemble, A sa Famille aussi ;*
- ☉ *A tous mes amis : (Salim Farouk Ouafik Fouad Selman Amine Amine pso Massi pso Mohamed Bilal Abbas chocho djelole bechari islam Taha amine , basite, bido, TCOBSM. ...etc*
- ☉ *A mes collègues sans exception*
- ☉ *A tous les proches que j'ai mentionnés et les autres que j'ai oubliés veuillez m'excuser*

Je vous remercie tous

TAIBA OUSSAMA





DEDICACE

A ceux qui m'ont donné la vie, le symbole de la beauté et de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de l'inspiration et du courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

- ☉ *A ma très chère Mère et à mon cher Père ;*
- ☉ *A ma très chère gronde Mère ;*
- ☉ *A mes frères et mes sœurs*
- ☉ *A mes cher Amis et binôme **oussama taiba** pour tous les moments de joies et de peines qu'on a passé ensemble, A sa Famille aussi ;*
- ☉ *Nos sincères remerciements à notre encadreur **Mr Anouar Essadate AOUF** qui a bien voulu nous encadrer, et de nous avoir encouragé le long de notre travail.*
- ☉ *A tous mes amis*
- ☉ *A mes collègues*
- ☉ *A tous les proches que j'ai mentionnés et les autres que j'ai oubliés veuillez m'excuser*

Je vous remercie tous

SADOUKI ALLAEDDINE



Remerciements



Nous remercions tout d'abord, Allah qui nous a donné la force Et le courage pour terminer nos études et élaborer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes sans lesquelles ces années d'études n'aurait été que le pâle reflet de celles que nous avons passées.

Nos sincères remerciements à notre encadreur **Mr Anouar Essadate AOUF** qui a bien voulu nous encadrer, et de nous avoir encouragé le long de notre travail.

Ainsi nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidés dans la recherche de documentation, pour l'aide qui nous ont donné ainsi que pour leurs efforts et conseils.

Nos remerciements sont destinés également à tous nos enseignants et les responsables de l'Instrumentation pétrolières sans oublier notre famille pour l'effort fourni pendant la durée des études.

- ✓ Oussama Taiba
- ✓ Allaeddine sadouki



La liste des Tableaux

Tableau I.1. l'influence de T_i et de T_d avec les régulateurs PID.	19
Tableau I.2. Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon Ziegler Nichols en BO.	20
Tableau I.3. Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon Ziegler Nichols en BF.	21
Tableau III.1.Effet de l'augmentation des gains P, I et D sur les caractéristiques dynamiques.....	39
Tableau III.2.Méthode Ziegler-Nichols (ZN) pour le réglage du régulateur PID	42
Tableau III.3. Les paramètres de l'ACO	43
Tableau III.4. Paramètres d'optimisations du PID.....	45
Tableau III.5. Les performances du système PID ZN	45
Tableau III.6. Paramètres d'optimisations du PID.....	50
Tableau III.7.Les performances du système PID ACO	50

La liste les Figures

Figure I.1. Le système en boucle ouverte.	5
Figure I.2. Le système en boucle fermée.	6
Figure I.3. processus de la boucle cascade.	6
Figure I.4. La boucle cascade.	7
Figure I.5. Procédé	7
Figure I.6. Procédés autoréglants.	9
Figure I.7. Caractéristiques statiques.	9
Figure I.8. Gain statique.	10
Figure I.9. Procédés intégrateurs.	10
Figure I.10. Exemples de régulations stables.	11
Figure I.11. Réponse indicielle en fonction du coefficient d'amortissement λ d'une fonction de transfert du second ordre.	12
Figure I.12. Relation entre facteur d'amortissement λ et dépassements $D1$ et $D2$ d'une réponse indicielle d'une fonction de transfert du second ordre.	12
Figure I.13. Temps de réponse à $\pm 5\%$ et temps de montée de deux régulations.	13
Figure I.14. Régulateur PID.	13
Figure I.15. Régulation à structure parallèle.	16
Figure I.16. Régulateur à structure série.	16
Figure I.17. Régulateur à structure mixte (classique).	17
Figure I.18. Régulateur à structure mixte (variante).	17
Figure I.19. La réponse type procédé stable.	18
Figure I.20. Courbe d'influence de T_i	19
Figure I.21. Courbe d'influence de T_d	19
Figure I.22. Comparaison des correcteurs de Ziegler Nichols.	21
Figure II.1. Pont binaire de Deneubourg.	26
Figure II.2. Expérience du double pont binaire.	27
Figure II.3. Effet de la coupure d'une piste de phéromone.	29
Figure II.4. Graphe multicouches du déplacement des fourmis.	32
Figure III.1. cascade contrôle d'un système de température du four.	37
Figure III.2. Modèle de système de contrôle PID en cascade de four.	38
Figure III.3. Intégrale faisant intervenir l'erreur.	39
Figure III.4. Modèle MATLAB / Simulink de la conception du contrôleur PID en cascade pour le contrôle de la température du four.	40

La liste les Figures

Figure III.5. Modèle MATLAB / Simulink du système Ziegler-Nichols avec le contrôleur PID.....	41
Figure III.6. Modèle MATLAB / Simulink du système PID ACO du contrôleur PID	43
Figure III.7. Réponse du système avec un contrôleur PID générique	45
Figure III .8. Oscillations soutenues sur le point de consigne	45
Figure III.9 .Les paramètres K_p, K_i et K_d du système PID ACO_ISE.	45
Figure III.10. Erreur du system PID ACO_ISE.....	46
Figure III.11.La réponse du système PID ACO_ISE	46
Figure III.13. Les paramètres K_p, K_i et K_d du système PID ACO_ISE	46
Figure III.13. Erreur du system PID ACO_ITAE	47
Figure III.14. la réponse du système PID ACO_ITAE	47
Figure III.15. Les paramètres K_p, K_i et K_d du système PID ACO_ITAE.....	47
Figure III.16. la réponse du système PID ACO_MSE	48
Figure III.17. Erreur du system PID ACO_MSE	48
Figure III.18. Les paramètres K_p, K_i et K_d du système PID ACO_MSE.....	48
Figure III.19.la réponse du système PID ACO_IAE.....	49
Figure III.20. Erreur du system PID ACO_IAE.....	49
Figure III.21.Les paramètres K_p, K_i et K_d du système PID ACO_IAE.	49
Figure III.22. Comparaison des modèles pour toutes les méthodes.	51
Figure III.23. Comparaison de toutes les réponses	51

La Liste des abréviations

PID : propositionnel, intégrale et dérivateur.

Z(P) : la perturbation.

Y (P) : la sortie de système.

X(P) : la consigne.

C(P) : la fonction de transfert de régulateur.

IAE : l'intégrale de la valeur absolue de l'erreur.

ISE : l'intégrale de l'erreur quadratique.

ITAE : l'intégrale du produit de l'erreur par le temps.

MSE : Erreur carrée moyenne.

H(P) : la fonction de transfert de système.

Δy : la variation de la grandeur de sortie.

Δx : la variation de la grandeur d'entrée.

ϵ_s : l'erreur statique.

Bp : bande proportionnelle.

Ti : constante de temps d'action intégrale.

u0 : valeur initiale de Y.

Td : constante de temps d'action dérivée.

TOR : Régulateur Tout ou Rien.

U : le signal de commande.

BO : boucle ouvert.

BF : boucle fermée.

Krc : le gain critique.

Tocs : les périodes des oscillations de pompage.

τ : la constante de temps du premier ordre.

ACO : ant colony optimization.

PID_ACO : propositionnel , intégrale et dérivateur optimisé par l'optimisation de colonie de fourmi.

PID_Z-N : propositionnel , intégrale et dérivateur optimisé par Ziegler et Nichols.

τ_{ij} : la phéromone.

K : un fourmi.

p_{ij}^k : la probabilité.

$\Delta\tau^k$: la mis à jour de phéromone.

ρ : le taux d'évaporation.

La Liste des abréviations

Q : une constant.

L_k : la longueur du chemin traversé par la k^{eme} fourmi.

f_{worst} : la mauvais valeur.

f_{best} : la meilleur de la fonction objective.

α : montre l'importance relative de la trace de phéromone dans le problème.

β : Indique l'importance accorder à la valeur de visibilité.

ζ : un paramètre utilisé pour le contrôle de la mise à jour globale du phéromone.

Résumé

Résumé:

Plus récemment, une méthode d'optimisation nommée « optimisation par les colonies de fourmis », soit en anglais « Ant Colony Optimization » (ACO), inspirée de l'intelligence des fourmis réelles a attiré les chercheurs et faite exploiter dans différents domaines d'optimisation. Cette méthode est caractérisée par une interaction coopérative dans le comportement de la fourmi. Dans le cadre de ce travail, nous essayons d'appliquer l'algorithme d'ACO pour déterminer les paramètres (K_p, K_i, K_d) optimaux du régulateur PID tout en visualisant notre fonction objective dont on cherche à minimiser l'erreur entre le signal d'entrée et le signal de sortie. Comparer avec la méthode classique de Ziegler-Nichols, la méthode proposée était plus robuste, flexible et efficace en termes de performances dynamiques comme la réduction du dépassement maximal, le temps de montée, le temps de réponse et l'erreur statique.

Mot clé :

Synthèse d'un régulateur PID, optimisation par les colonies de fourmis, méthode de Ziegler-Nichols.

Summary:

More recently, a method of optimization named «Ant Colony Optimization » (ACO), inspired by the intelligence of the real ants attracted the researchers and made exploit in various domains of optimization. This method is characterized by a cooperative interaction in the behavior of the ant. Within the framework of this work, we try to apply the algorithm of ACO to determine the optimal parameters (K_p, K_i, K_d) of regulators PID while visualizing our objective function which we try to minimize the error between the input signal and the output signal. To compare with the classic method of Ziegler-Nichols, the proposed method was more robust, flexible and effective in terms of dynamic performances as the reduction of the over shoot, the rise time, the settling time and steady state error.

Keyword:

Synthesis of a regulator PID, Ant Colony Optimization, Ziegler-Nichols method.

ملخص

وفي الآونة الأخيرة ، الطريقة الأمثل والتي تسمى (" تحسين مستعمرة النمل ") ACO وهي مستوحاة من ذكاء النمل الحقيقي قد ، جذبت الباحثين وجعلت الاستفادة في مناطق مختلفة من التحسين . ويتميز هذا الأسلوب عن طريق تفاعل التعاونية في سلوك النمل. كجزء من هذا العمل ، ونحن نحاول تطبيق الخوارزمية ACO لتحديد أفضل المعايير (K_p, K_i, K_d) من وحدة تحكم PID أثناء عرض وظيفة لدينا الهدف منها هو التقليل من الخطأ بين إشارة المدخل و إشارة المخرج .

للمقارنة مع الطريقة الكلاسيكية زيغلر-نيكولز ، كانت الطريقة المقترحة أكثر قوة ومرونة وكفاءة من حيث الأداء الديناميكي مثل خفض الحد الأقصى لتجاوز ، زمن الارتفاع ، زمن الاستجابة وخطأ ثابت.

المفاتيح: المصحح الكلاسيكي PID تحسين مستعمرة النمل , طريقة زيغلر-نيكولز .

Sommaire

Introduction général	1
CHAPITRE I : Régulateur PID	
I.1.Introduction	4
I.2. Généralité sur les systèmes asservis	4
I.2.1. Régulation et asservissement	4
I.2.2. Boucle de régulation	5
I.3. Caractéristiques des procédés	7
I.3.1.Connaissance du procédé	7
I.3.2. Fonction de transfert	8
I.3.2. Procédé autoréglant	9
I.3.3. Procédé intégrateur	10
I.3.4. Représentation fréquentielle	10
I.4.Qualités d'une régulation	10
I.4.1. Stabilité	11
I.4.2 Amortissement	11
I.4.2Rapidité	12
I.4.3 Précision.....	12
I.5.Régulateur PID	13
I.5.1 Présentation	13
I.5.2. Action proportionnelle	14
I.5.3.Action intégrale	14
I.5.3.Action dérivée	15
I.6.Différente structures du régulateur PID	15
I.6.1.Structure parallèle	15
I.6.3.Structure mixte	16
I.6.4. Réglage d'un PID	18
I.7.Influence des performances sur les régulateurs PID	18
I.7.1.Influence de T_i	18
I.7.2.Influence de T_d	19
I.8. Méthode de Ziegler Nichols	20
I.8.1 Réglages préconisés par Ziegler et Nichols	20
I.7.Conclusion	21
CHAPITRE II : Optimisation par les colonies de fourmis (ACO)	
II.1. Introduction	23

II.2 Optimisation par colonie de fourmis	24
II.2.1 Historique	24
II.2.2 Similarités et différences avec les fourmis réelles	24
II.2.2.1 Points communs	24
II.2.2.2 Différences	25
II.2.3 Expériences	26
II.2.3.1 Pont binaire de Deneubourg	26
II.2.3.2 Expérience du double pont binaire	27
II.2.3.3 Effet de la coupure d'une piste de phéromone	28
II.3 L'algorithme d'ACO	29
II.3.1 Principe d'un algorithme de colonies de fourmis	29
II.3.2 Formulation mathématique de l'ACO	30
II.3.2.1 le nombre de fourmis	30
II.3.2.2 Le comportement d'une fourmi dans l'espace de recherche	30
II.3.2.3 Reconstitution du chemin et la mise à jour du phéromone	31
II.3.2.4 Evaporation de la trace de phéromone	31
II.3.2.5 L'Algorithme	32
II.4 Conclusion	34

CHAPITRE II : Simulation et Résultat

III.1. Introduction	36
III.2. Système de contrôle de cascade de fourneau	37
III.3. Conception du système de contrôle PID cascade	38
III.4. l'effet du régulateur intégrale sur l'erreur	39
III.5. Méthodes de réglage du régulateur PID	40
III.5.1. Contrôle régulateur PID avec la méthode Ziegler-Nichols	40
III.5.2. Régulateur PID avec la méthode des ACO	42
III.7. Résultats de la simulation	44
III.7.1. Méthode de Ziegler-Nichols	44
III.7.2. Méthode Optimisation par les colonies de fourmis (PID_ACO	45
III.7.3. Comparaison des résultats	51
Conclusion générale	54
Bibliographique	55

INTRODUCTION GENERAL

Introduction général

Le domaine de la théorie du contrôle a été considérablement développé au cours des dernières décennies, cependant l'importance du régulateur PID dans l'industrie reste inaltérée. A cause de sa structure simple qui peut être facilement comprise et mise en œuvre. La structure d'un tel dispositif de commande nécessite la spécification de trois paramètres proportionnelle, intégrale et dérivée.

Malheureusement, il a été très difficile de régler le gain de régulateur PID correctement parce que beaucoup d'installations industrielles sont souvent accablés par des problèmes tels que l'ordre supérieur, les retards et les non-linéarités. Il est difficile de déterminer le paramètre PID optimale ou presque optimale avec les méthodes de réglages classique. Pour toutes ces raisons, il est très souhaitable d'augmenter les capacités du contrôleur PID en ajoutant de nouvelles caractéristiques. Plusieurs approches ont été documentées dans la littérature pour déterminer les paramètres du PID, d'abord trouvés par Ziegler Nichols (ZN) réglage. Réseau de neurones, l'approche floue, et les techniques d'optimisation d'essaim de particules (PSO), algorithme génétique ne sont que quelques-uns parmi de nombreuses œuvres.

Ces derniers temps, des techniques d'intelligence artificielle ont été mises en place pour surmonter les défauts susmentionnés des techniques d'optimisation classiques. Différentes techniques envisagées pour résoudre les problèmes d'optimisation dans l'Algorithme génétique (GA), l'optimisation des essaims, l'optimisation des colonies, la recherche Tabu, le recuit simulé, etc.

Plus récemment, une autre méthode d'optimisation nommée « optimisation par les colonies de fourmis », soit en anglais « Ant Colony Optimization » (ACO), inspirée de l'intelligence des fourmis réelles a attiré les chercheurs et faite exploiter dans différents domaines d'optimisation . Cette méthode est devenue de plus en plus populaire. Cette méthode est caractérisée par une interaction coopérative dans le comportement de la fourmi. L'avantage de ces approches sur les techniques traditionnelles est la robustesse et la flexibilité. L'optimisation par les colonies de fourmis cherche à déterminer les paramètres (K_p, K_i, K_d) optimaux du régulateur PID tout en visualisant la fonction objective dont on cherche à minimiser l'erreur entre le signal de consigne et le signal de sortie.

Dans le cadre de ce travail, l'algorithme est illustré sur des systèmes de complexité très différente en vue de voir sa robustesse, sa flexibilité et son efficacité en termes de

INTRODUCTION GENERAL

performances dynamiques comme la réduction du dépassement maximal, le temps de montée, le temps de réponse et l'erreur statique.

Les différentes parties concernant le présent mémoire font l'objet de trois chapitres structurés comme suit :

- Dans le premier chapitre, on rappelle les définitions et les notions de la régulation, les différents correcteurs ainsi que les méthodes classiques de réglage des boucles de régulations tel que la méthode de Ziegler-Nichols.
- Le deuxième chapitre exposera, la nouvelle technique d'optimisation d'ACO, fondée sur la notion du comportement coopératif entre les fourmis. L'échange d'information entre eux fait que, globalement, ils arrivent à résoudre des problèmes d'optimisation difficiles. Un exemple d'optimisation sera traité par la méthode.
- Le troisième chapitre fera l'objet d'implantation de la technique d'ACO, dans le but d'optimiser les paramètres du régulateur PID. Enfin, nous concluons ce travail par une conclusion générale qui portera des perspectives pour la continuité de ce travail dans le futur.

CHAPITRE I

Régulateur PID

I.1.Introduction :

Le contrôleur PID est la forme de réaction la plus commune. C'était un élément essentiel des premiers gouverneurs et il est devenu l'outil standard lorsque le contrôle des processus a émergé dans les années 1940. Dans le processus de contrôle aujourd'hui, plus de 95% des boucles de contrôle sont de type PID, la plupart des boucles sont en fait un contrôle PI. Les contrôleurs PID se trouvent aujourd'hui dans tous les domaines où le contrôle est utilisé. Les contrôleurs sont sous différentes formes. Il existe des systèmes autonomes dans des boîtes pour une ou quelques boucles, qui sont fabriquées par centaines par an. Le contrôle PID est un ingrédient important d'un système de contrôle distribué. Les contrôleurs sont également intégrés dans de nombreux systèmes de contrôle spécialisés. Le contrôle PID est souvent combiné avec la logique, les fonctions séquentielles, les sélecteurs et les blocs fonctionnels simples pour construire les systèmes d'automatisation compliqués utilisés pour la production, le transport et la fabrication d'énergie. De nombreuses stratégies de contrôle sophistiquées, telles que modèle de contrôle prédictif, sont également organisés hiérarchiquement. Le contrôle PID est utilisé au niveau le plus bas; Le contrôleur multi variable donne les points de consigne aux contrôleurs au niveau inférieur. Le contrôleur PID peut donc être considéré comme le «pain et le beurre» de l'ingénierie de contrôle. C'est un élément important dans la boîte à outils de tous les ingénieurs de contrôle.

Les contrôleurs ID ont survécu à de nombreux changements de technologie, de la mécanique et de la pneumatique aux microprocesseurs via des tubes électroniques, des transistors, des circuits intégrés. Le microprocesseur a eu une influence dramatique sur le contrôleur PID. Pratiquement tous les contrôleurs PID fabriqués aujourd'hui sont basés sur des microprocesseurs. Cela a donné l'opportunité de fournir des fonctionnalités supplémentaires telles que l'ajustement automatique, l'ordonnancement des gains et l'adaptation continue.

I.2. Généralité sur les systèmes asservis :[1]

I.2.1. Régulation et asservissement :

- **Régulation de maintien, ou « régulation » :**

La mesure doit être **maintenue** à une valeur constante égale à la consigne quelles que soient les perturbations subies par le procédé. La vitesse de rejet de l'effet perturbateur pour une tolérance donnée évalue sa performance.

- **Régulation de poursuite, ou « asservissement » :**

La mesure doit **suivre** toute évolution de la consigne. La rapidité d'obtention de la consigne et la valeur du dépassement de celle-ci qualifient sa performance.

I.2.2. Boucle de régulation :

- **Étapes nécessaires :**

Pour réaliser une boucle, ou une chaîne, de régulation, trois étapes sont nécessaires (Figure I.1 et Figure I.2) :

- l'**observation** de la grandeur à maîtriser, faite par le capteur-transmetteur.
- la **réflexion** sur l'action à entreprendre, qui est fonction de l'écart en rapport avec l'objectif fixé, effectuée par le régulateur.
- l'**action** sur une grandeur incidente, à l'aide d'un actionneur, vanne ou moteur.

- **Terminologie employée :**

- **Grandeur réglée :** grandeur à maîtriser.
- **Grandeur incidente :** grandeur ayant une influence sur la grandeur réglée.
- **Grandeur réglant :** grandeur incidente commandée par le régulateur.
- **Grandeur perturbatrice :** grandeur incidente non contrôlée.

- **Régulation en chaîne ouverte :**

L'observation n'est pas celle de la grandeur à maîtriser mais celle d'une grandeur incidente (Figure I.1). La réflexion est l'étape où la commande prend en compte une relation préétablie entre la grandeur observée et la grandeur réglant. L'action modifie alors la grandeur à maîtriser.

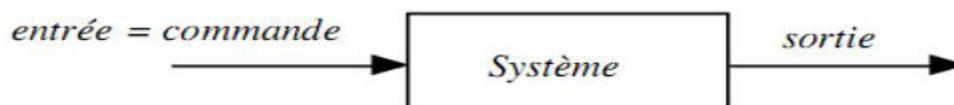


Figure I.1. Le système en boucle ouverte.[1]

- **Régulation en boucle fermée :**

L'observation se porte sur la grandeur à maîtriser. L'étape de réflexion détermine l'écart entre la consigne et la grandeur à maîtriser. En fonction de cet écart et des règles d'évolution fixées, on en déduit l'action à entreprendre. L'action modifie la grandeur réglant et finalement la grandeur à maîtriser.

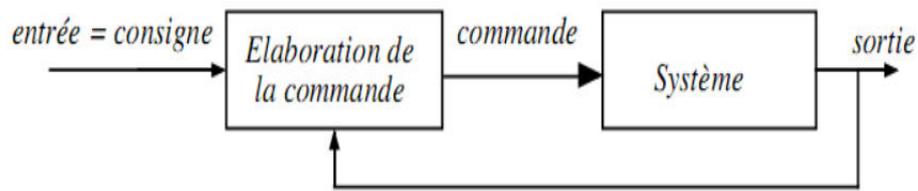


Figure I.2. Le système en boucle fermée.[1]

- **Régulation en boucle cascade :**

La régulation cascade est une technique utilisée pour permettre aux procédés qui ont une dynamique lente d'avoir une réponse rapide face aux perturbations extérieures ainsi qu'aux changements de consigne.

L'idée repose sur la décomposition d'un processus complexe en plusieurs sous-systèmes. Sans perte de généralité, on suppose pour fixer les idées une décomposition en deux sous-systèmes comme le montre la figure suivante :

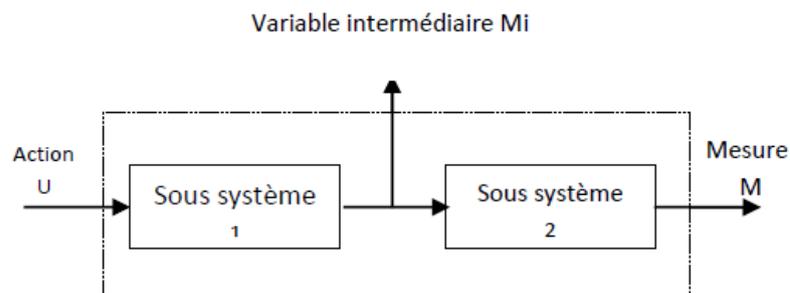


Figure I.3. processus de la boucle cascade.[1]

La variable intermédiaire M_i généralement appelée variable d'état, possède la propriété d'être en avance temporelle par rapport à la grandeur de mesure M . Si par exemple une modification sur l'action U ou une perturbation affectant le sous-système 1, la variable d'état M_i sera la première à être affectée avant la variable de mesure M . En d'autres termes, la grandeur d'état M_i permet de renseigner sur l'état futur de M . Cette forme de prédiction peut être exploitée judicieusement pour réaliser une régulation cascade.

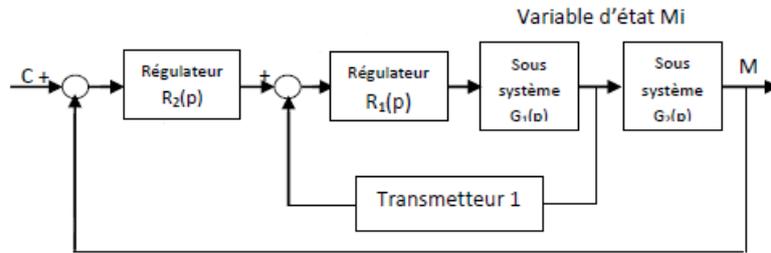


Figure I.4. La boucle cascade.[1]

La grandeur principale est contrôlée par une boucle "maître" avec un régulateur $R_2(p)$, dont la sortie sert de consigne à la boucle secondaire, régulé par le régulateur $R_1(p)$.

Le reproche qu'on fait habituellement à une boucle de régulation classique est que le régulateur ne commence à réagir pour effectuer une correction suite à l'effet d'une perturbation qu'une fois qu'il en est informé, c'est-à-dire qu'une fois que la mesure s'en trouve modifiée. Avec la structure cascade, si une perturbation affecte le sous-système 1, celle-ci sera prise en charge par la boucle interne. Cette boucle doit être bien dimensionnée de manière à ce qu'elle soit rapide, et ainsi l'effet de la perturbation peut être neutralisée sans qu'il y'a une répercussion significative sur la grandeur principale.

Donc, une condition impérative pour l'efficacité de la boucle cascade est que la boucle interne doit être rapide et plus précisément, elle doit plus rapide que la boucle externe. D'ailleurs on note d'après le schéma fonctionnel de la boucle cascade que le sous-système 1 a été remplacé par une boucle interne. Il va de soit que le régulateur R_1 doit être paramétré de manière à assurer cette rapidité.

Mais l'avance temporelle de la variable état M_i sur M ne sera plus acquise si une perturbation affecte le sous-système 2, mais elle continuera à l'être néanmoins en cas de changement de consigne. Compte tenu que l'avantage de la boucle cascade est de diminuer le régime transitoire, ce changement de consigne sera traité plus rapidement.

I.3. Caractéristiques des procédés :[1]

I.3.1. Connaissance du procédé :

La connaissance du procédé est essentielle pour élaborer la stratégie de son contrôle-commande. Elle peut définir le **comportement statique** mais elle doit surtout décrire le **comportement dynamique**, puisque le procédé influencé

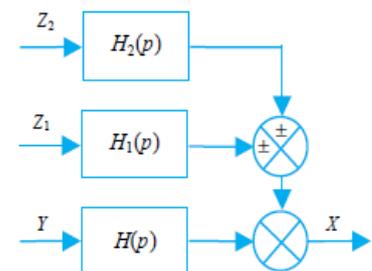


Figure I.5. Procédé[1]

par les perturbations évolue en permanence. L'analyse doit aboutir à l'élaboration d'un schéma Fonctionnel montrant l'influence de chacune des grandeurs Réglant Y et perturbatrices Z1 et Z2 sur la grandeur réglée X (Figure I.5).

Les fonctions de transfert réglant H(p) et perturbatrices H1(p) et H2(p) sont déterminées Par :

- une mise en équation différentielle aboutissant à un modèle de connaissance.
- ou une détermination expérimentale sur le procédé réel, dans le domaine temporel le domaine fréquentiel ,appelée identification.

I.3.2. Fonction de transfert :

Un procédé est autorégulant ou intégrateur, de fonction de transfert générale :

$$H(p) = \frac{X(p)}{Y(p)} = \frac{K(1+Tp)e^{-\tau p}}{p^\alpha(1+\theta_1 p)(1+\theta_2 p)\dots(1+\theta_n p)\left(1+2\lambda\left(\frac{p}{\omega_0}\right)+\left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2\right)} \quad (I.1)$$

p : opérateur de Laplace,

α : classe du procédé, terme précisant le nombre d'intégrations,

$\alpha = 0$: autorégulant	K devient Gs : gain statique Sans unité : X et Y étant exprimés sous forme de pourcentage
$\alpha > 0$: intégrateur	K devient k : gain dynamique Unité : s ⁻¹

T, θ_1 , θ_2 ,..... , θ_n : constante de temps (s).

τ : temps mort ou retard pur (s).

λ : facteur d'amortissement. La réponse est pseud_opériodique pour $0 < \lambda < 1$, et

Apériodique pour $\lambda \geq 1$.

ω_0 : pulsation propre (rad.s⁻¹).

- **Point de fonctionnement** : Le procédé est conçu pour fonctionner à une certaine valeur de la mesure correspondant à une valeur de la commande: c'est le **point de fonctionnement**.

- **Linéarité** : Un procédé industriel n'est pratiquement jamais linéaire, ce qui se traduit par des variations du gain, statique ou dynamique, lorsque l'on s'éloigne du point de fonctionnement, les régimes transitoire et permanent sont alors différents.

I.3.2. Procédé autoréglant :

- **Définition :** Un procédé est autoréglant ou naturellement stable lorsque la grandeur réglée retrouve un nouvel équilibre, suite à un petit incrément de la grandeur réglant. Des exemples de réponses de procédés autoréglants sont montrés en (Figure I.6).

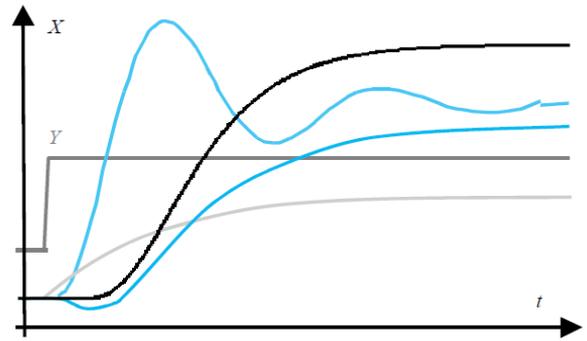


Figure I.6. Procédés autoréglants.[1]

- **Caractéristique statique :**

C'est la représentation graphique de la loi d'évolution en régime permanent de la mesure X en fonction de la commande Y (Figure I.7).

L'interaction entre les grandeurs d'entrées-sorties d'un procédé est souvent complexe à mettre en Équation. Le tracé par calcul est donc délaissé au profit d'un relevé expérimental direct sur le procédé, malgré le dérangement qu'il occasionne à la production. Pour chaque valeur de la commande, on relève la valeur de la mesure établie en régime permanent, en notant la valeur de la grandeur perturbatrice. Pour une autre valeur de la grandeur perturbatrice on obtient une autre caractéristique, et ainsi un réseau de caractéristiques statiques (Z_1 à 30 %, 50 % et 70 %, Figure I.7).

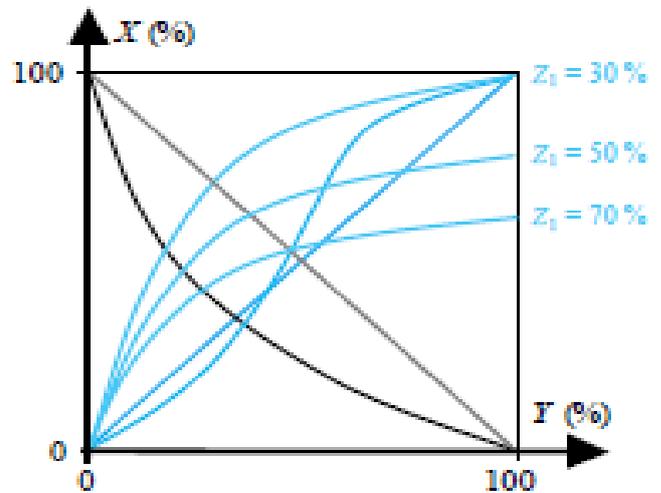


Figure I.7. Caractéristiques statiques.[1]

- **Gain statique :**

À partir de la **fonction de transfert** :
$$G_S = \frac{\lim_{n \rightarrow 0} P.X(P)}{\lim_{n \rightarrow 0} P.Y(P)} = \lim_{n \rightarrow 0} H(P) \quad (I.2)$$

À partir de la caractéristique statique : C'est le coefficient, défini au point de fonctionnement, Quotient de la variation de mesure X à la variation de commande Y :

$$G_s = \Delta X / \Delta Y.$$

Pour un procédé non linéaire, le gain statique est défini par la pente de la tangente à la courbe au point choisi. Par exemple, au point Y = 47 % (Figure I.8).

Y = 47 % (Figure I.8), on a :

$$G_s = (68 - 32) / (57 - 37) = 1,8.$$

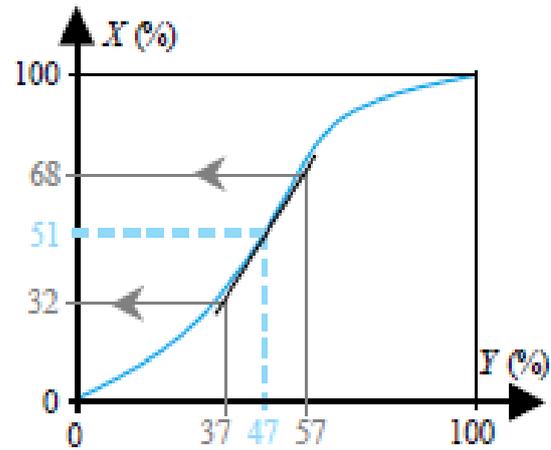


Figure I.8. Gain statique. [1]

I.3.3. Procédé intégrateur :

- **Définition**

Un procédé est intégrateur ou naturellement instable lorsque la grandeur réglée ne se stabilise pas, suite à un petit incrément de la grandeur réglant (Figure I.9).

- **Gain dynamique**

Pour $\alpha = 1$, c'est le coefficient k quotient de la pente de la variation de mesure ΔX à la variation de commande ΔY :

$$k = \frac{\Delta X}{\Delta T} \frac{1}{\Delta Y} \text{ (Figure I.9).}$$

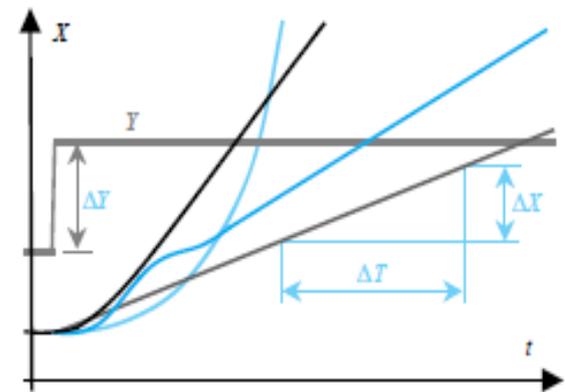


Figure I.9. Procédés intégrateurs. [1]

I.3.4. Représentation fréquentielle :

L'analyse fréquentielle d'un procédé permet l'étude de stabilité, d'amortissement et de rapidité afin de prévoir le meilleur réglage.

La représentation graphique nécessite la connaissance de la fonction de transfert isochrone, c'est-à-dire exprimée pour le régime sinusoïdal avec $p = j\omega$.

I.4. Qualités d'une régulation : [1]

La première qualité à assurer d'une régulation est :

- La **stabilité** puisque toute instabilité conduit à la perte de contrôle du procédé.
- L'**amortissement** quantifie le degré de stabilité dans l'espace temporel.
- La **précision**, statique ou dynamique, est souvent la deuxième qualité attendue d'une régulation.

- La **rapidité** est une qualité opposée à la précision dynamique et liée à l'amortissement.

I.4.1. Stabilité :

- **Stabilité dans le domaine temporel :** La boucle de régulation est stable lorsqu'elle est soumise à un incrément de consigne ou d'une grandeur perturbatrice, la mesure retrouve un état stable (Figure I.10).

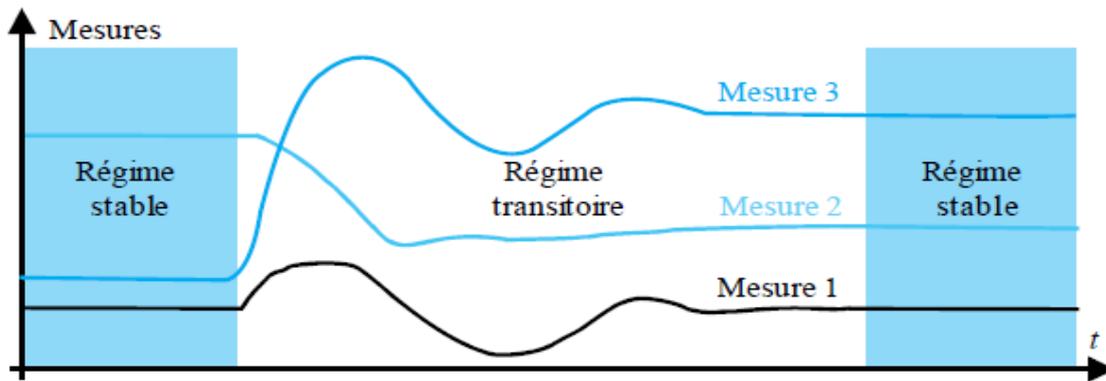


Figure I.10. Exemples de régulations stables. [1]

- **Conditions de stabilité dans le domaine fréquentiel :**

On considère la fonction de transfert réglant $H(p)$ et celle du correcteur $C(p)$ formant la boucle fermée à retour unitaire (Figure I.10). La fonction de transfert réglant en chaîne

$$\text{fermée est : } F(P) = \frac{x(p)}{y(p)} = \frac{c(p)H(p)}{1+c(p)H(p)} \quad (I.3)$$

I.4.2 Amortissement :

Lorsqu'une boucle de régulation est stable, l'**amortissement** caractérise l'atténuation des oscillations de la mesure suite à une variation de consigne ou d'une grandeur perturbatrice.

Un amortissement faible engendre de grands **dépassements**, et des dépassements faibles ou inexistants correspondent à un fort amortissement (Figure I.11).

Le comportement d'une fonction de transfert du second ordre à un échelon unitaire montre l'influence entre la valeur du coefficient d'amortissement λ et les dépassements $D1$ et $D2$ transitoires (Figure I.12).

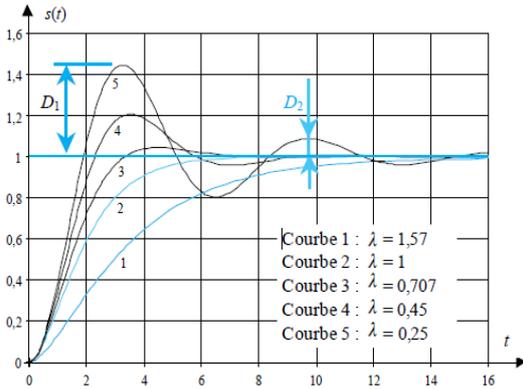


Figure I.11. Réponse indicielle en fonction du coefficient d'amortissement λ d'une fonction de transfert du second ordre. [1]

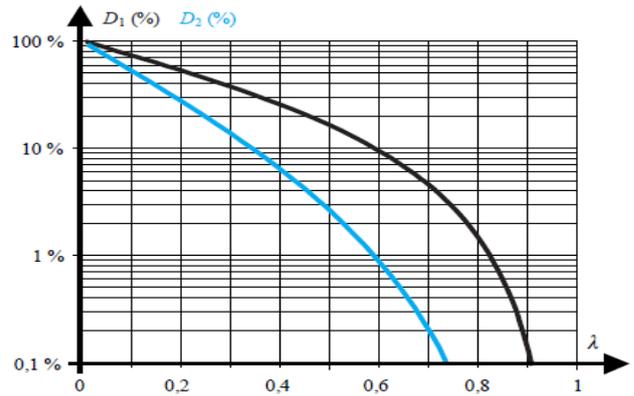


Figure I.12. Relation entre facteur d'amortissement λ et dépassements D_1 et D_2 d'une réponse indicielle d'une fonction de transfert du second ordre[1]

I.4.2 Rapidité :

Elle traduit la durée du régime transitoire et s'évalue, au choix, par :

- le **temps de réponse** t_r correspondant au temps que met la mesure à rester dans une zone à $\pm 5\%$ de la variation finale soit entre 95% et 105% (Figure I.13).
- le **temps de montée** T_m correspondant au temps nécessaire à la mesure pour passer de 10% à 90% de la valeur finale (Figure I.13).

I.4.3 Précision:

Elle est évaluée par son aptitude à obtenir une mesure proche de la consigne en régime permanent ou en régime transitoire lors d'un changement de consigne ou d'une perturbation.

- **En régime permanent :** La précision d'une régulation de maintien ou de poursuite se chiffre par la différence entre la consigne et la mesure en régime permanent. Plus cet écart est petit, plus la régulation est précise.

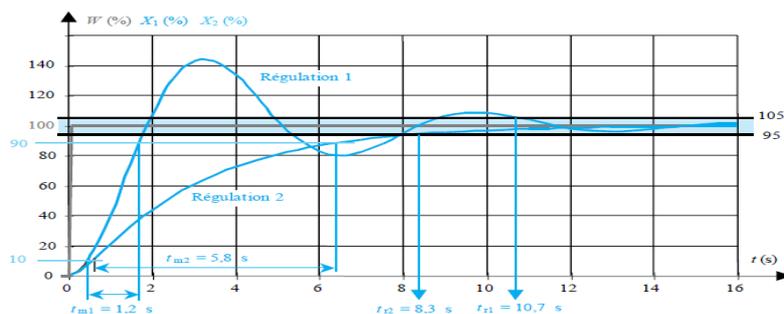


Figure I.13. Temps de réponse à $\pm 5\%$ et temps de montée de deux régulations[1]

- **En régime transitoire :**

La précision dynamique d'une régulation de poursuite est évaluée par l'écart maximal obtenu pour le premier dépassement lors d'un changement de consigne, la précision dynamique d'une régulation de maintien est évaluée par l'écart maximal obtenu entre la consigne et la mesure lors du régime transitoire.

I.5.Régulateur PID :[1]

I.5.1 Présentation :

- **Rôle du régulateur :**

Le régulateur doit maintenir une mesure égale à une consigne quelles que soient les perturbations subies par le procédé, Le réglage des paramètres de son algorithme dépend des performances attendues, en temps de réponse et en précision dynamique lors de ces perturbations, mais aussi des changements de consigne.

- **Régulateur PID :**

Un régulateur est constitué d'un comparateur pour observer l'écart entre la mesure et la consigne, et d'un correcteur dont l'algorithme permet d'obtenir une loi d'évolution de la mesure du procédé conforme au cahier des charges. Le correcteur a une action PID (Proportionnelle, Intégrale et Dérivée) et, associé à un comparateur, forme un régulateur PID

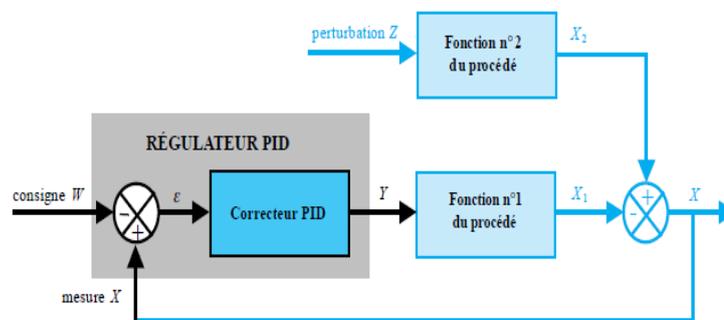


Figure I.14. Régulateur PID. [1]

- **Régulateur physique :**

Le régulateur se présente sous plusieurs formes : un appareil indépendant, un module intégré dans l'unité centrale d'un Automate Programmable Industriel (API), ou un bloc fonctionnel de la bibliothèque de cet API. En bus de terrain, une fonction PID est intégrée dans les capteurs-transmetteurs et les actionneurs.

- **Mode automatique ou mode manuel :**

Deux modes de fonctionnement du régulateur sont disponibles :

- **Le mode automatique :** est le mode normal de fonctionnement de la régulation. La valeur de la sortie Y est calculée par le régulateur et dépend de la valeur de l'écart ε à ce même instant. Le technicien ne peut pas modifier la valeur de la sortie.
- **Le mode manuel :** est le mode permettant au technicien de commander directement le procédé en fixant lui-même la valeur de la sortie. Le correcteur n'agit plus, le régulateur devient alors une station de commande manuelle.

I.5.2. Action proportionnelle :

- **Bande proportionnelle :**

L'action proportionnelle est réglée, au choix du fabricant, soit par :

- le coefficient d'amplification, noté A, aussi appelé « gain » et noté Kr ou Gr.
- la bande proportionnelle (BP ou XP) exprimé en pourcentage : $BP(\%) = 100/A$

- **Équation :**

Régulateur en sens direct	Régulateur en sens inverse
$Y(t) = +A. \varepsilon(t) + Y_0 \quad (I.4)$	$Y(t) = -A. \varepsilon(t) + Y_0 \quad (I.5)$

I.5.3. Action intégrale :

- **Coefficient d'action intégrale :**

L'action intégrale est réglée, au choix du fabricant, soit par :

- la constante de temps d'action intégrale, notée T_i , exprimée très souvent en minute ,
- le coefficient ou taux d'action intégrale K_i , exprimé en min^{-1} : $K_i = 1 / T_i$.

- **Équation :**

Équation temporelle	Fonction de transfert
$Y(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t). dt = k_i \int_0^t \varepsilon(t). dt \quad (I.6)$	$c_i(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{T_i p} = \frac{K_i}{p} \quad (I.7)$

I.5.3. Action dérivée :

- **Coefficient d'action dérivée :**

L'action dérivée est réglée par la constante de temps d'action dérivée, notée T_d ,

Exprimée en seconde.

- **Équations :**

Deux possibilités pour cette action :

Dérivée sur l'écart		Dérivée sur la mesure
Équation temporelle	Fonction de transfert	Équation temporelle
$y(t) = T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (I.8)$	$c_d(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = T_d \cdot p \quad (I.9)$	$Y(t) = T_d \frac{dX(t)}{dt} \quad (I.10)$

I.6. Différente structures du régulateur PID : [1]

Les actions élémentaires d'un régulateur peuvent être associées de plusieurs façons. On parle de la structure d'algorithme du régulateur. Les valeurs des paramètres PID ne donnent pas le même comportement du procédé selon que la structure est parallèle ou mixte. C'est pourquoi il est primordial que l'automaticien connaisse la structure existante du régulateur. La structure est imposé par le fabricant du régulateur.

I.6.1. Structure parallèle :

C'est la structure présentée dans la (Figure I.15).

- Équation temporelle :

$$u(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + u_0 \quad (I.11)$$

- Équation de transfert :

$$c(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} = k_p + \frac{1}{T_i p} + T_d p \quad (I.12)$$

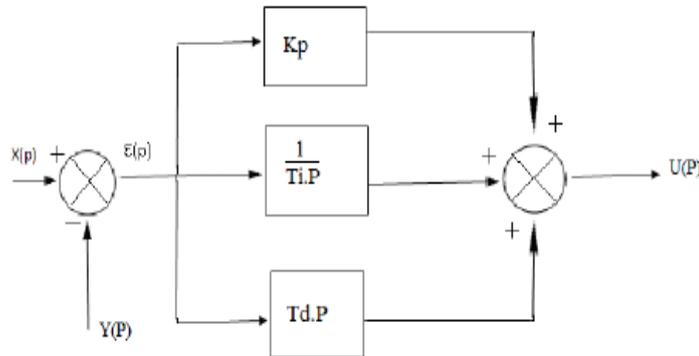


Figure I.15. Régulation à structure parallèle. [1]

I.6.2. Structure série :

C'est la structure présentée dans la (Figure I.16).

- Équation temporelle :

$$u(t) = \alpha \cdot k_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt + k_p \cdot T_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + u_0 \quad (I.13)$$

Où $\alpha = \frac{T_i + T_d}{T_i}$ est le coefficient théorique d'interaction entre action intégrale et action dérivée.

- Équation de transfert :

$$c(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} = k_p + \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) (1 + T_d p) \quad (I.14)$$

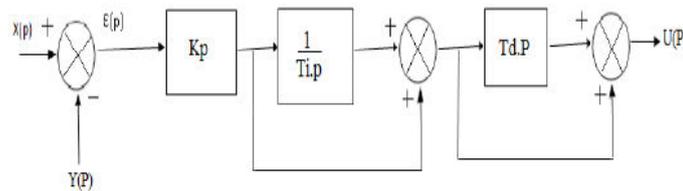


Figure I.16. Régulateur à structure série. [1]

I.6.3. Structure mixte :

C'est la structure présentée dans la (Figure I.17). Elle est la plus utilisée actuellement par les constructeurs.

- Équation temporelle : $u(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt + k_p \cdot T_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + u_0 \quad (I.15)$

- Équation de transfert : $c(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right) \quad (I.16)$

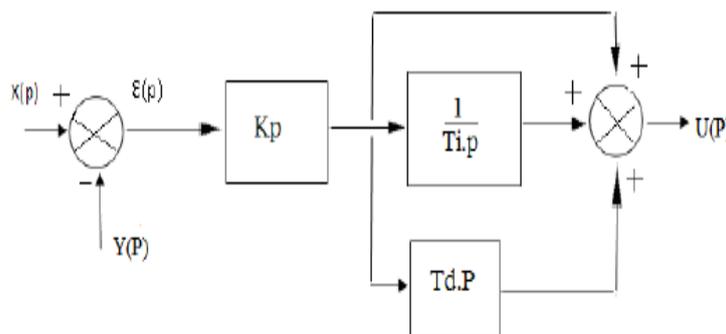


Figure I.17. Régulateur à structure mixte (classique). [1]

D'autres structures mixtes existent aussi comme par exemple (Figure I.18) :

- Equation temporelle :

$$u(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt + T_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + u_0 \quad (I.17)$$

- Fonction de transfert :

$$c(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) + T_d p \quad (I.18)$$

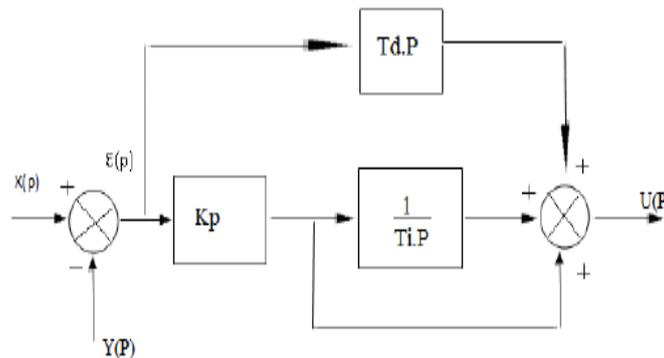


Figure I.18. Régulateur à structure mixte (variante). [1]

I.6.4. Réglage d'un PID :

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients K_p , T_d et T_i afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. L'objectif est d'être robuste, rapide et précise. Il faut pour cela limiter les éventuels dépassements.

- La robustesse est sans doute le paramètre le plus important et délicat. On dit qu'un système est robuste si la régulation fonctionne toujours même si le modèle change un peu. Par exemple, les fonctions de transfert de certains procédés peuvent varier en fonction de la température ambiante. Un régulateur doit être capable d'assurer sa tâche même avec ces changements afin de s'adapter à des usages non prévus (dérive de production, vieillissement mécanique,...).
- La rapidité du régulateur dépend du temps de montée et du temps d'établissement du régime dynamique.
- Le critère de précision est basé sur l'erreur statique (ou de statisme).

La réponse typique d'un procédé stable est la suivante :

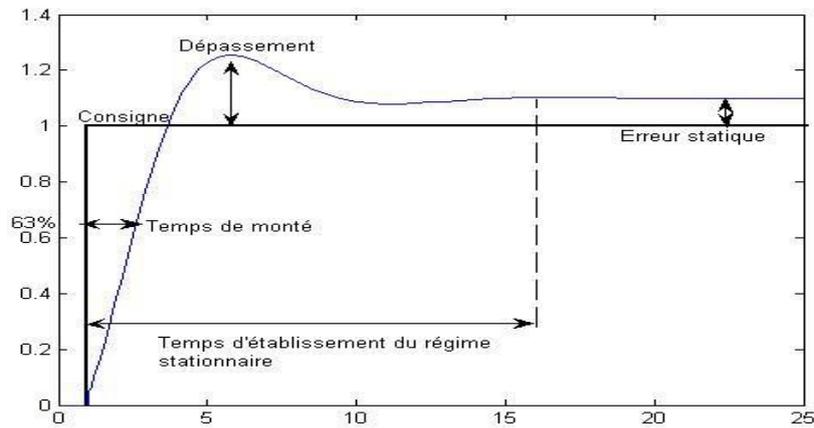


Figure I.19. La réponse type procédé stable. [1]

I.7. Influence des performances sur les régulateurs PID :[1]

I.7.1. Influence de T_i :

Lorsque $1/T_i$ augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement au régime stationnaire s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique nulle. Donc plus ce paramètre est élevé, plus la réponse du système est ralentie.

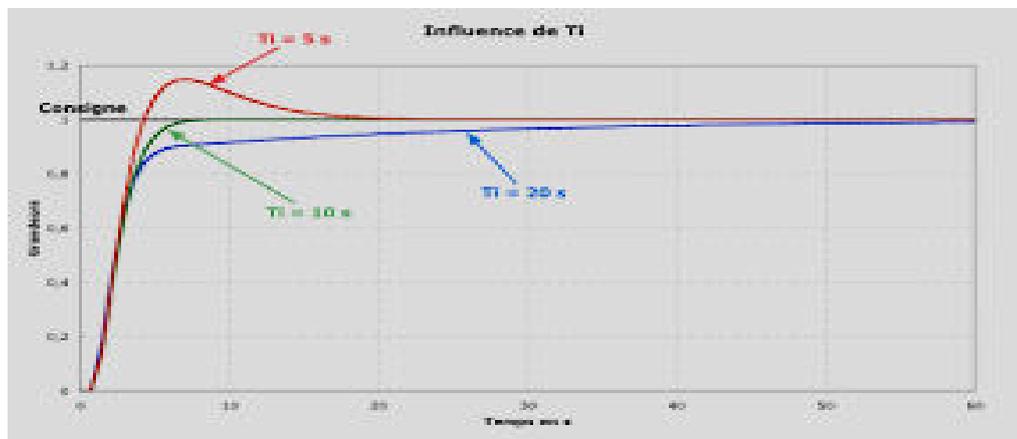


Figure I.20. Courbe d'influence de T_i . [1]

I.7.2. Influence de T_d :

Lorsque T_d augmente, le temps de montée change peu mais le dépassement diminue. Le temps d'établissement au régime stationnaire est meilleur. Pas d'influences sur l'erreur statique. Si ce paramètre est trop élevé dans un premier temps, il stabilise le système en le ralentissant trop, mais, dans un deuxième temps le régulateur anticipe trop et un système à temps mort élevé devient rapidement instable.

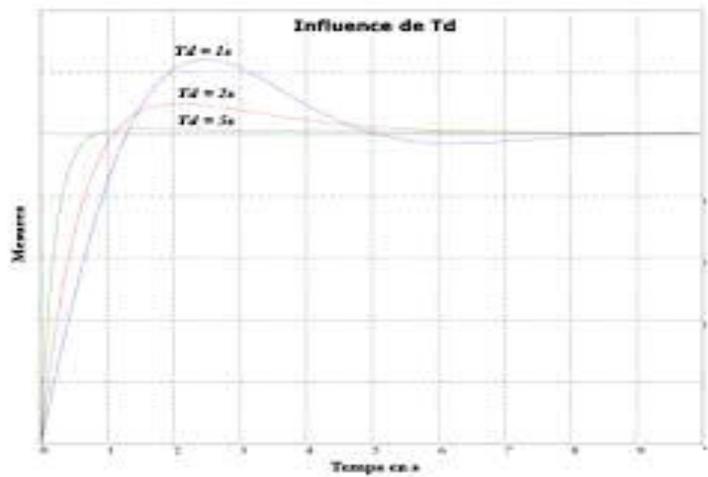


Figure I.21. Courbe d'influence de Td. [1]

Quand augmente	Stabilité	Rapidité	Précision
Ti	Augmente	Diminue	Pas d'influence
Td	Diminue	Augmente	Pas d'influence

Tableau I.1. l'influence de Ti et de Td avec les régulateurs PID. [1]

I.8. Méthode de Ziegler Nichols :[1]

- **Principe :**

Le principe est de trouver expérimentalement le point critique de stabilité du procédé asservi. Pour cela, on met la boucle fermée d'asservissement en oscillation juste entretenue c'est le pompage. À partir des relevés de cet essai, on détermine le réglage du régulateur qui assure une marge de sécurité par rapport à ce point critique.

➤ L'avantage de cette méthode est d'être appliquée sur le procédé réel, et donc de prendre en compte tous les retards et toutes les constantes de temps de la boucle constituée, y compris ceux et celles du régulateur. Ce qui n'est pas toujours le cas lors de simulations numériques. Pendant l'essai, le procédé est contrôlé par le régulateur en mode automatique, contrairement aux essais en boucle ouverte où le régulateur est en mode manuel.

➤ Cette méthode n'est pas très adaptée pour les procédés aux inerties importantes car cela conduit souvent à de fortes amplitudes de la grandeur réglée et à une durée consacrée au réglage qui peut être conséquente.

I.8.1 Réglages préconisés par Ziegler et Nichols :

- **Mesures sur la réponse en boucle ouverte :**

La réponse à un échelon d'amplitude E_0 , sans oscillations, sera assimilée à celle d'un premier ordre avec retard. On devra mesurer la pente de la tangente au point d'inflexion à la valeur finale M et le retard r . La tangente au point d'inflexion est assimilée à la tangente à l'origine du système du premier ordre sans retard. Si τ (Figure I.22) est la constante de temps du premier ordre, on a $a = M/\tau$. Ziegler & Nichols proposent des réglages des correcteurs P, PI ou PID pour avoir une réponse en boucle ouverte (BO) satisfaisante. Le critère utilisé pour savoir si une réponse est satisfaisante ou non est que le rapport entre les deux premiers dépassements (positifs) est de 0,25. Un correcteur PID a comme fonction de transfert :

$$c(p) = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_d \cdot p \right) \quad (I.20)$$

Action	Kp	Ti	Tp
P	Ta/Tu		
PI	0.9 Ta/Tu	3.3 Tu	
PID	1.2 Ta/Tu	2.0 Tu	0.5 Tu

Tableau I.2. Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon Ziegler Nichols en BO.

- **Mesure sur la réponse en boucle fermée :**

Dans le cas où il est impossible d'ouvrir la boucle de régulation pour obtenir la réponse indicielle, une seconde méthode de Ziegler-Nichols permet de régler un correcteur à partir d'un essai en limite de pompage. Pour obtenir la limite de pompage, on place un correcteur proportionnel dans la boucle fermée et on augmente doucement le gain de ce correcteur jusqu'à obtenir des oscillations entretenues (phénomène de pompage). On note le gain K_{cr} qui a amené le système en limite de stabilité et on mesure la période T_{ocs} des oscillations obtenues. Les paramètres de régulation pour que la réponse du système soit satisfaisante sont donnés par le tableau suivant:

Type de régulateur	Gain Kp	Ti	Td
P	0,5.Kcr		
PI	0,45.Kcr	0,83.Tocs	
PID	0,6.Kcr	0,5.Tocs	0.125Tocs

Tableau I.3. Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon Ziegler Nichols en BF.

La (figure I.22) présente les réponses corrigées selon la méthode de Ziegler Nichols. Dans cet Exemple, on peut noter que le correcteur proportionnel laisse une erreur statique, tandis que le correcteur PI est sans erreur statique, mais, il est plus long à stabiliser. Le correcteur PID rend le système relativement stable.

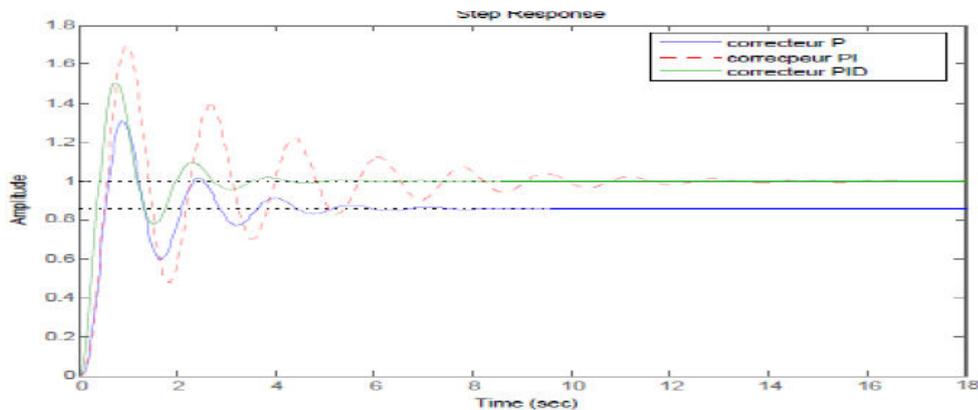


Figure I.22. Comparaison des correcteurs de Ziegler Nichols. [1]

I.7.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné une idée générale sur les systèmes asservis et la régulation PID. L'action associée au régulateur PID permet une régulation optimale en associant les avantages de chaque action: la composante "P "réagit à l'apparition d'un écart de réglage, la composante "D" s'oppose aux variations de la grandeur réglée et stabilise la boucle de régulation et la composante "I" élimine l'erreur statique. Ce type de correcteur est le plus utilisé en milieu industriel. Dans un régulateur PID, il existe plusieurs façons d'associer les paramètres P, I et D. En effet, le correcteur PID peut avoir une structure série, parallèle ou mixte. Il existe de nombreuses méthodes utilisées pour optimiser les paramètres du régulateur PID. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter une méthode d'optimisation basée sur Les Colonies de Fourmis Artificielles (ACO: Ant Colony Optimization).

CHAPITRE II

Optimisation par les colonies de fourmis (ACO)

II.1. Introduction :

Nous présenterons dans notre travail d'étude des nouvelles méta-heuristiques permettant de résoudre des problèmes tels que le voyageur de commerce, en s'inspirant du comportement social des fourmis.

Le comportement des fourmis est un comportement collectif. Chaque fourmi a pour priorité le bien être de la communauté.

Chaque individu de la colonie est à priori indépendant et n'est pas supervisé d'une manière ou d'une autre. Ce concept est appelé Hétéarchie (s'opposant à la Hiérarchie)[2], chaque individu est aidé par la communauté dans son évolution et en retour il aide au bon fonctionnement de celle-ci.

La colonie est donc autocontrôlée par le biais de mécanismes relativement simples à étudier.

En observant une colonie de fourmis à la recherche de nourriture dans les environs du nid, on s'aperçoit qu'elle résout des problèmes tels que celui de la recherche du plus court chemin. Les fourmis résolvent des problèmes complexes par des mécanismes assez simples à modéliser. Il est ainsi assez simple de simuler leur comportement par des algorithmes.

L'optimisation par les colonies de fourmis (soit en anglais « Ant Colony Optimization » (ACO)) est inspirée du comportement des colonies de fourmis réelles. Ce chapitre d'introduction décrit comment les fourmis artificielles inspirées des fourmis réelles peuvent résoudre des problèmes d'optimisation complexes.



II.2 Optimisation par colonie de fourmis :

II.2.1 Historique :

Dans les sections qui viendront plus tard, nous présenterons la méta-heuristique ACO, pour le "Ant Colony Optimization". Toutes ces idées abstraites sont inspirées des travaux de Deneubourg sur les fourmis.

Cette méta-heuristique est relativement récente. Elle a été introduite en 1991 par Colorni, Dorigo et Maniezzo pour résoudre le problème du Voyageur de commerce. Elle s'est popularisée, puis a été l'objet d'améliorations dès 1995 et a été appliquée avec succès à d'autres problèmes d'optimisation combinatoire dès 1994.

Nous allons tout d'abord exposer les différences et les points communs entre les fourmis virtuelles et les fourmis réelles [3], avant d'exposer en termes plus abstraits la métaheuristique proprement dite. Ceci expliquera comment les fourmis virtuelles peuvent être exploitées pour résoudre un problème d'optimisation combinatoire.

II.2.2 Similarités et différences avec les fourmis réelles : [2]

Les fourmis virtuelles ont une double nature. D'une part, elles modélisent les comportements abstraits de fourmis réelles, et d'autre part, elles peuvent être enrichies par des capacités que ne possèdent pas les fourmis réelles, afin de les rendre plus efficaces que ces dernières. Nous allons maintenant synthétiser ces ressemblances et différences.

II.2.2.1 Points communs :

- **Colonie d'individus coopérants.** Comme pour les fourmis réelles, une colonie virtuelle est un ensemble d'entités non-synchronisés, qui se rassemblent ensemble pour trouver une "bonne" solution au problème considéré. Chaque groupe d'individus doit pouvoir trouver une solution même si elle est mauvaise.
- **Pistes de phéromones.** Ces entités communiquent par le mécanisme des pistes de phéromone. Cette forme de communication joue un grand rôle dans le comportement des fourmis : son rôle principal est de changer la manière dont l'environnement est perçu par les fourmis, en fonction de l'historique laissé par ces phéromones.
- **Évaporation des phéromones.** La méta-heuristique ACO comprend aussi la possibilité d'évaporation des phéromones. Ce mécanisme permet d'oublier lentement ce qui s'est passé avant. C'est ainsi qu'elle peut diriger sa recherche vers de nouvelles directions, sans être trop contrainte par ses anciennes décisions.

- **Recherche du plus petit chemin.** Les fourmis réelles et virtuelles partagent un but commun : recherche du plus court chemin reliant un point de départ (le nid) à des sites de destination (la nourriture).
- **Déplacement locaux** Les vraies fourmis ne sautent pas des cases, tout comme les fourmis virtuelles. Elles se contentent de se déplacer entre sites adjacents du terrain.
- **Choix aléatoire lors des transitions.** Lorsqu'elles sont sur un site, les fourmis réelles et virtuelles doivent décider sur quel site adjacent se déplacer. Cette prise de décision se fait au hasard et dépend de l'information locale déposée sur le site courant. Elle doit tenir compte des pistes de phéromones, mais aussi du contexte de départ (ce qui revient à prendre en considération les données du problème d'optimisation combinatoire pour une fourmi virtuelle).

II.2.2.2 Différences :

Les fourmis virtuelles possèdent certaines caractéristiques que ne possèdent pas les fourmis réelles :

- **Elle vivent dans un monde non-continu.** Leurs déplacements consistent en des transitions d'état.
- **Mémoire (état interne) de la fourmi.** Les fourmis réelles ont une mémoire très limitée. Tandis que nos fourmis virtuelles mémorisent l'historique de leurs actions. Elles peuvent aussi retenir des données supplémentaires sur leurs performances.
- **Nature des phéromones déposées.** Les fourmis réelles déposent une information physique sur la piste qu'elles parcourent, là où les fourmis virtuelles modifient des informations dans les variables d'états associées au problème. Ainsi, l'évaporation des phéromones est une simple décrémentation de la valeur des variables d'états à chaque itération.
- **Qualité de la solution.** Les fourmis virtuelles déposent une quantité de phéromone proportionnelle à la qualité de la solution qu'elles ont découverte.
- **Retard dans le dépôt de phéromone.** Les fourmis virtuelles peuvent mettre à jour les pistes de phéromones de façon non immédiate : souvent elles attendent d'avoir terminé la construction de leur solution. Ce choix dépend du problème considéré bien évidemment.
- **Capacités supplémentaires.** Les fourmis virtuelles peuvent être pourvues de capacités artificielles afin d'améliorer les performances du système. Ces possibilités sont liées au problème et peuvent être :

1. l'anticipation : la fourmi étudie les états suivants pour faire son choix et non seulement l'état local.

2. le retour en arrière : une fourmi peut revenir à un état déjà parcouru car la décision qu'elle avait prise à cet état a été mauvaise.

II.2.3 Expériences :

II.2.3.1 Pont binaire de Deneubourg :[2]

L'expérience montre un nid d'une colonie de fourmis, qui est séparé d'une source de nourriture par un pont à deux voies de même longueur. On laisse évoluer les fourmis sur le pont, on trace ainsi en fonction du temps, le graphe du nombre de fourmis empruntant chaque branche. Le résultat de l'expérience est exposé à la (Figure II.1).

L'illustration (a) représente la configuration physique de l'expérience. Le graphique (b) indique l'évolution de ce système en fonction du temps : on constate que les fourmis ont tendance à emprunter le même chemin (par exemple celui du haut) après une dizaine de minutes.

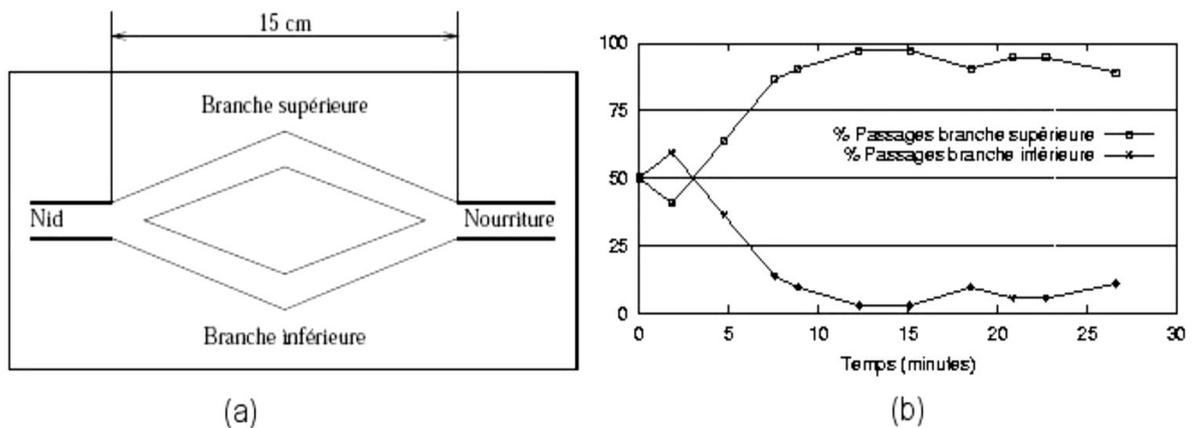


Figure II.1. Pont binaire de Deneubourg. [2]

Explication

Au départ, il n'y a pas de phéromone sur le pont. Donc, chaque branche peut être choisie par une fourmi avec la même probabilité. Néanmoins, dans notre exemple, après une certaine période, des variations aléatoires ont fait qu'un peu plus de fourmis ont choisi le chemin du haut plutôt que celui du bas.

Puisque les fourmis déposent des phéromones en avançant et puisqu'elles sont plus nombreuses en haut qu'en bas, le chemin du haut comportera plus de phéromones. Cette quantité supérieure de phéromone incite plus de fourmis à choisir la branche du haut, donc la quantité de phéromone déposée augmentera encore plus.

On en déduit que plus les fourmis suivent un chemin, plus ce chemin devient intéressant à suivre. Ainsi la probabilité avec laquelle une fourmi choisit un chemin, augmente avec le nombre de fourmis qui ont pris ce chemin précédemment.

II.2.3.2 Expérience du double pont binaire : [3]

On peut se demander à présent quel serait l'effet de l'augmentation de la longueur d'une des deux branches du pont. L'effet produit sera que la branche la plus courte sera sélectionnée.

En effet, les premières fourmis qui reviennent au nid avec de la nourriture sont celles qui ont emprunté le chemin le plus court dans les deux sens. Ce chemin, marqué deux fois par les phéromones, attire plus les autres fourmis que le long chemin, qui lui est marqué une seule fois dans le sens de l'aller. Cet effet se renforce au fur du temps, jusqu'à ce que toutes les fourmis choisissent le chemin le plus court.

C'est ainsi que dans cette expérience, on voit que les variations aléatoires sont réduites, puisque les deux chemins n'ont plus la même longueur. Contrairement à la première expérience, le comportement des fourmis qui consistait à suivre les pistes de phéromones n'est plus le seul mécanisme

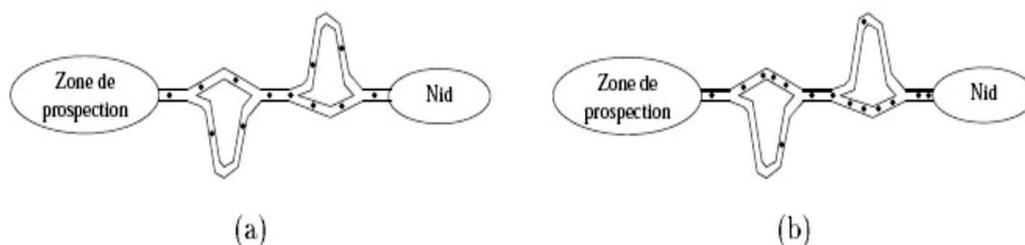


Figure II.2. Expérience du double pont binaire.[3]

présent : maintenant on associe ce mécanisme à une notion de distance.

Toutefois, quand le chemin le plus court n'est ouvert qu'après le chemin plus long (par exemple, quand le chemin était au départ bloqué par un obstacle), les fourmis continuent de parcourir le chemin le plus long car c'est le seul à être recouvert de phéromone. C'est ainsi que , l'évaporation des phéromones joue un rôle capital : les pistes de phéromones sont moins présentes sur les chemins les plus longs, car le réapprovisionnement en phéromone demande plus de temps que sur les chemins plus courts. Donc il suffit alors qu'une poignée de fourmis choisissent le chemin auparavant bloqué pour favoriser celui-ci.

Ainsi, même quand des voies plus courtes ont été découvertes après, les fourmis finissent par les emprunter.

On peut généraliser cela à plus de deux chemins possibles : dans la (Figure II.2) (a), on a utilisé un double pont avec quatre chemins possibles de différentes longueurs. On voit dans le dessin (b) que la plupart des fourmis finissent par choisir le chemin le plus court. Les expériences montrent que quand environ cent fourmis ont déjà emprunté le pont, plus de 90 pourcents d'entre elles sélectionnent le chemin le plus court : les fourmis convergent donc assez rapidement.

II.2.3.3 Effet de la coupure d'une piste de phéromone : [2]

Cette fois, les fourmis sont en train de suivre une piste de phéromones, comme présenté à la figure II.3 (a). À un moment donné, on a un obstacle qui barre la route des fourmis. Les fourmis qui arrivent à côté de l'obstacle doivent choisir soit d'aller à gauche soit d'aller à droite (b). Puisqu'aucune phéromone n'est déposée le long de l'obstacle, il y a autant de fourmis qui partent à gauche qu'à droite.

Néanmoins, puisque le chemin de droite est plus court que celui de gauche, les fourmis qui l'empruntent, vont retrouver plus vite la piste de phéromone de départ. Pour chaque fourmi allant du nid à la nourriture, on associe également une fourmi qui va de la nourriture au nid (en fait elles ont été séparées par l'apparition brutale de l'obstacle). Les phéromones de ces fourmis vont se superposer à droite. Donc quand elles vont rejoindre le chemin initial, le chemin de droite sera deux fois plus imprégnée de phéromone que la piste de gauche, où les deux fourmis n'ont pas encore pu rejoindre la piste initiale (ce chemin étant plus long).

Les fourmis qui arrivent à l'obstacle à partir de ce moment, préféreront suivre la piste de droite. Le nombre de fourmis qui passent par la droite va augmenter, ce qui augmentera encore la concentration de phéromones. De plus, l'évaporation des phéromones sera plus forte sur la piste de gauche du fait que sa longueur est supérieure. La piste de gauche sera donc rapidement abandonnée, parce qu'elle en est beaucoup moins imprégnée : les fourmis passeront toutes très rapidement par la piste la plus courte.

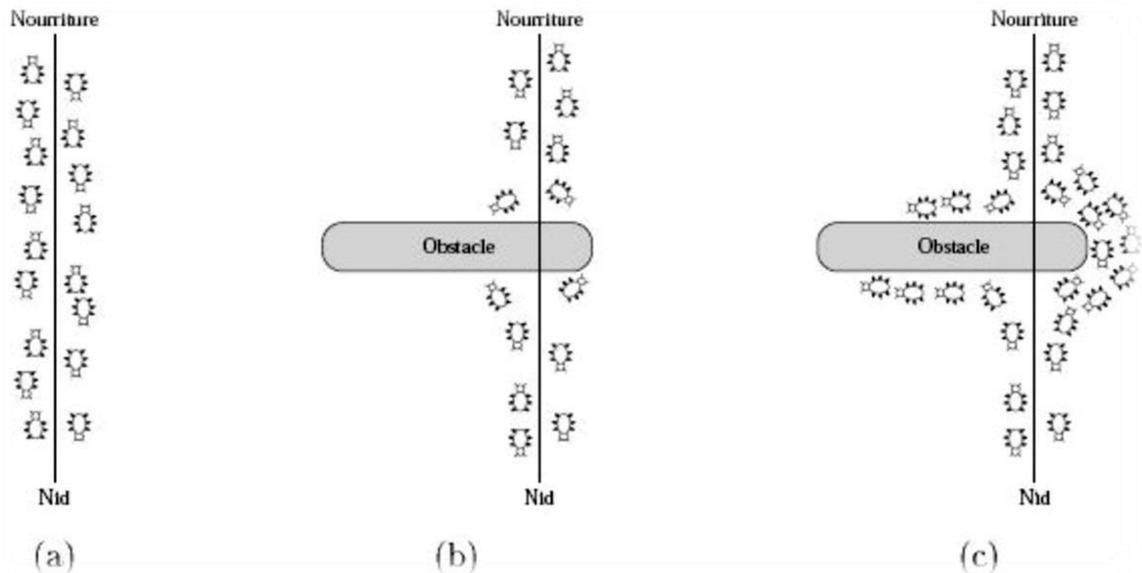


Figure II.3. Effet de la coupure d'une piste de phéromone.[2]

II.3 L'algorithme d'ACO :

II.3.1 Principe d'un algorithme de colonies de fourmis : [4]

Un algorithme de colonies de fourmis est un algorithme itératif à population où tous les individus partagent un savoir commun qui leur permet de guider leurs futurs choix et d'indiquer aux autres individus des directions à suivre ou au contraire à éviter.

Fortement inspiré du déplacement des groupes de fourmis, cette méthode a pour but de construire les meilleures solutions à partir des éléments qui ont été explorés par d'autres individus. Chaque fois qu'un individu découvre une solution au problème, bonne ou mauvaise, il enrichit la connaissance collective de la colonie. Ainsi, chaque fois qu'un nouvel individu aura à faire des choix, il pourra s'appuyer sur la connaissance collective pour pondérer ses choix.

Pour reprendre la dénomination naturelle, les individus sont des fourmis qui vont se déplacer à la recherche de solutions et qui vont sécréter des phéromones pour indiquer à leurs congénères si un chemin est intéressant ou non. Si un chemin se retrouve fortement phéromoné, cela signifiera que beaucoup de fourmis l'ont jugé comme faisant partie d'une solution intéressante et que les fourmis suivantes devront la considérer avec intérêt.

Un risque apparaît lorsqu'un chemin non optimal est marqué. En effet, les fourmis qui s'en trouveront à proximité seront tentées d'y passer augmentant encore le niveau de phéromone de ce chemin. Pour diminuer le risque d'enfoncer la colonie dans un minimum local du problème, on pourra prendre soin de diminuer automatiquement le niveau de phéromone de tout le système, pour rehausser l'intérêt des autres chemins qui pourraient

faire partie de la solution optimale. Ce paramètre, correspondant au taux d'évaporation des phéromone, est l'un des paramètres principaux de l'algorithme.

De la même manière, aucun chemin ne devra être inondé de phéromones et aucun chemin ne devra être totalement invisible, on pourra donc aussi contrôler le niveau de phéromone de chaque chemin pour le maintenir entre des bornes minimum et maximum. Un chemin inondé de phéromones masquerait tous les autres à proximité et un chemin pas du tout phéromonné ne serait jamais choisi par une fourmi, en conséquence nous devons conserver ces chemins avec des valeurs raisonnables. Ces bornes min et max sont aussi des paramètres de l'algorithme.

II.3.2 Formulation mathématique de l'ACO :

II.3.2.1 le nombre de fourmis :

Il faut qu'il y ait suffisamment de fourmis pour qu'elles puissent interagir correctement. Si les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants, le premier réflexe à avoir n'est pas de laisser tourner l'algorithme plus longtemps, mais en priorité d'augmenter la taille de la population des fourmis. À l'inverse, si on prend un nombre de fourmis trop important, le temps mis pour calculer une itération est trop long [5].

II.3.2.2 Le comportement d'une fourmi dans l'espace de recherche :

Une fourmi k , quand elle est placée au nœud i , utilise la valeur de phéromone τ_{ij} appelée trace pour calculer la probabilité de choisir j comme le nœud suivant [6]:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j \in N_i^k} [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} & \text{if } j \in N_i^k \\ 0 & \text{if } j \notin N_i^k \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Où α dénote le degré d'importance des phéromones et N_i^k indique l'ensemble des nœuds voisins de la fourmi k quand elle est placée au nœud i . Le voisinage de nœud contient tous les nœuds directement connectés au nœud i sauf le nœud de prédécesseur. Cela empêchera la fourmi de retourner au même nœud visité immédiatement avant le nœud i . Une fourmi voyage d'un nœud jusqu'à ce qu'elle trouve le nœud de destination.

II.3.2.3 Reconstitution du chemin et la mise à jour du phéromone :

Avant le retour au nœud domestique, la $k^{\text{ème}}$ fourmi dépose $\Delta\tau^k$ de phéromone sur les arcs visités. La valeur de phéromone τ_{ij} sur l'arc (i,j) traversé est mise à jour comme suit [6]:

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \Delta\tau^k \quad (\text{II.2})$$

A cause de l'augmentation de la phéromone, la probabilité de cet arc étant choisie par les prochaines fourmis qui vont l'augmenter.

II.3.2.4 Evaporation de la trace de phéromone :

Quand une fourmi k se déplace vers le noeud suivant, le phéromone s'évapore de tous les arcs (i,j) selon la relation [4]:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}; \forall (i,j) \in A. \quad (\text{II.3})$$

Où $\rho \in (0,1)$ est un paramètre et A dénote l'ensemble des arcs traversés par la fourmi k dans son chemin de son départ à sa destination. La diminution dans l'intensité de phéromone favorise l'exploration de différents chemins pendant le processus de recherche. Cela favorise l'élimination de choix faibles faits dans la sélection de chemin. Cela aide aussi dans la limitation de la valeur du maximum atteinte par les traces de phéromone. Une itération est un cycle complet impliquant le mouvement de la fourmi. L'évaporation de phéromone et le dépôt de phéromone. Après le retour de toutes les fourmis au noeud domestique (le nid), les informations de phéromone sont mises à jour selon la relation suivante :

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \sum_{k=1}^n \Delta\tau_{ij}^k. \quad (\text{II.4})$$

Où $\rho \in (0,1)$ est le taux d'évaporation (le facteur de décrépitude de phéromone) et $\Delta\tau_{ij}^k$ est la quantité de phéromone déposée sur l'arc (i,j) par la meilleur fourmi k . Le but de la mise à jour de phéromone est d'augmenter la valeur de phéromone associée au chemin prometteur (le bon). La phéromone déposée sur l'arc (i,j) par la meilleur fourmis est prise comme :

$$\Delta\tau_{ij}^k = \frac{Q}{l_k} \quad (\text{II.5})$$

Où Q est une constant et l_k est la longueur du chemin traversé par la $k^{\text{ème}}$ fourmi. L'équation (II.5) peut être implémentée comme:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\zeta f_{best}}{f_{worst}} & \text{si } (i,j) \text{ est la meilleur globale} \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Où f_{worst} est la mauvaise valeur et f_{best} est la meilleur valeur de la fonction objective parmi les chemins pris par les N fourmis et ζ est un paramètre utilisé pour le contrôle de la mise à jour globale de la phéromone. Plus la valeur de ζ est grande, plus la phéromone est déposée sur le meilleur chemin global et la capacité d'exploitation est meilleure. Le but de

l'équation (II.6) est de fournir une quantité plus grande de phéromone aux tours des solutions avec les meilleures valeurs de la fonction objective.

II.3.2.5 L'Algorithme :

Le problème de l'algorithme d'ACO pour résoudre un problème de minimisation peut être récapitulé selon le graphe à multicouches montré dans la (Figure II.4) comme suit [6]:

• **Etape 1 :**

Supposer un nombre approprié de fourmis dans la colonie (N). Supposer un ensemble de valeurs discrètes permises pour chacun des n variable de l'espace. On note les valeur discrètes permises des variables de l'espace x_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) comme $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}$. Supposer initialement les quantités de phéromone τ_{ij} pour tous les arcs (i,j). Mettez le nombre d'itération $l=1$.

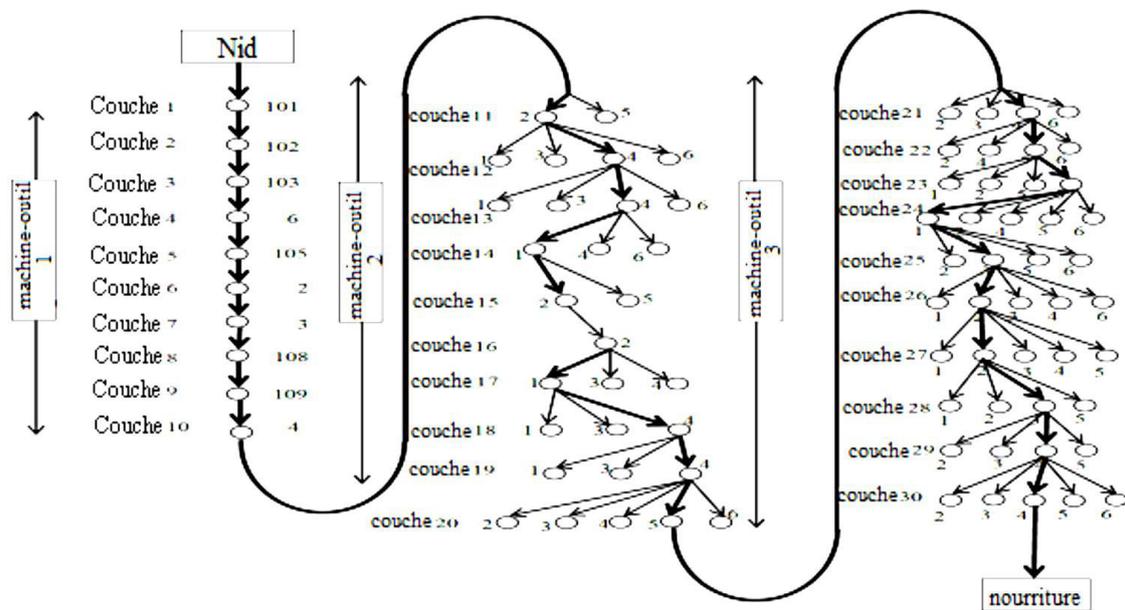


Figure II.4. Graphe multicouches du déplacement des fourmis.[6]

• **Etape 2 :**

(a). Calculer la probabilité (p_{ij}) pour choisir l'arc (ou la valeur discrète) x_{ij} comme :

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{(1)}}{\sum_{m=1}^p \tau_{im}^{(1)}}; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p. \quad (II.7)$$

(b). Le chemin spécifique (ou des valeurs discrètes) choisi par la k^{eme} fourmi peut être déterminé en utilisant des nombres aléatoire générés dans l'intervalle [0,1]. Pour cela, nous trouvons l'intervalle de probabilité cumulatives associées aux différent chemins de (Figure II.5) est basé sur les probabilités données par l'équation (II.7). Le chemin spécifique choisi par la fourmi k sera déterminé en utilisant le processus de sélection dans l'étape 3.(a).

• **Etape 3:**

(a). Générer N nombres aléatoires r_1, r_2, \dots, r_N dans l'intervalle $[0,1]$, pour chaque fourmis. Déterminez la valeur discrète ou le chemin supposé par la fourmi K pour la variable i comme celui pour lequel la probabilité cumulative s'étend (trouvé dans l'étape 2.(b)) inclut la valeur r_i .

(b). Répéter l'étape 3. (a) pour toutes les variables de l'espace $i=1,2,\dots, n$.

(c). Evaluer les valeurs de fourmis objectives correspondant aux chemins complets (les valeurs de l'espace $X^{(k)}$ ou les valeurs de x_{ij} choisis pour toutes les variables de l'espace $i=1,2,\dots, n$ par la fourmi $k, k=1,2,\dots,k$);

$$f_k = f(X^k); k = 1, 2, \dots, N. \quad (\text{II.8})$$

Déterminez le meilleur et le mauvais chemin parmi les N chemins choisis par différentes fourmis :

$$f_{best} = \min(f_k). \quad (\text{II.9})$$

$$f_{worst} = \max(f_k). \quad (\text{II.10})$$

• **Etape 4:**

Tester la convergence du processus. Le processus est supposé avoir convergé si toutes les N fourmis prennent le même meilleur chemin. Si la convergence n'est pas réalisée, supposez que les fourmis rentrent à la maison et recommencent de nouveau dans la recherche de nourriture. Poser le nombre d'itération $l = l+1$ et mettre à jour les phéromones sur différents arcs comme :

$$\tau_{ij}^l = \tau_{ij}^{old} + \sum_k \Delta\tau_{ij}^k. \quad (\text{II.11})$$

Où τ_{ij}^{old} dénote la quantité de phéromone de l'itération précédente laissée après l'évaporation, qui est prise comme :

$$\tau_{ij}^{old} = (1 - p)\tau_{ij}^{(l-1)}. \quad (\text{II.12})$$

$\Delta\tau_{ij}^k$ est la phéromone déposée par la meilleure fourmi k sur son chemin et s'étend sur toutes les meilleures fourmis k (si les fourmis prennent le même meilleur chemin). Notez que le meilleur chemin implique seulement un arc (i,j) pour la variable de l'espace i . Le taux d'évaporation de phéromone p est supposé pour être dans l'intervalle $[0.5 \text{ à } 0.8]$ et la phéromone déposée $\Delta\tau_{ij}^k$ calculée en utilisant l'équation (II.6).

Avec les nouvelles valeurs de τ_{ij}^l , allez à l'étape 2. Les étapes 2, 3 et 4 sont répétées jusqu'à ce que le processus converge, c'est-à-dire jusqu'à ce que toutes les fourmis choisissent le même meilleur chemin. Dans quelques cas, le processus itératif est arrêté après l'achèvement d'un nombre maximal d'itération prédéterminés.

II.4 Conclusion :

En fournissant des très bons résultats les colonies s'avèrent de bons outils pour résoudre ce genre de problèmes. Le partage des données sur les phéromones est le point fort de cette technique qui peut s'apparenter à de l'intelligence artificielle distribuée où chaque agent vient enrichir la connaissance collective. Le réglage des paramètres reste le point le plus délicat tant il est facile de ne plus converger ou d'exploser le temps de convergence.

CHAPITRE III

Simulation et Résultat

III.1. Introduction :

Les régulateurs PID sont les plus populaires dans les milieux industriels de production et les plus utilisés dans le processus industriel car ils permettent de régler à l'aide de ses trois paramètres des performances (dépassement, temps de montée, temps de réponse). L'idée de cet organe de régulation est de modifier intentionnellement la valeur de l'erreur qui subsiste entre la consigne et la mesure effectuée.

Le but de ce chapitre est la synthèse du régulateur PID-ACO. Selon les performances du système (annuler l'erreur statique, diminuer le dépassement, le temps de réponse et le temps de montée), on détermine les paramètres optimales (K_p , K_i , K_d) du régulateur PID en utilisant la méthode d'optimisation par les colonies de fourmis (ACO), afin d'obtenir un système précis, rapide, stable et robuste.

Pour montrer l'efficacité du PID-ACO dans lequel le régulateur résulte d'un processus d'optimisation, nous avons comparé ses performances à celles d'un autre régulateur PID. Ce dernier est un PID dont les coefficients ont été réglés par la méthode empirique de « Ziegler & Nichols », en utilisant une boucle de réaction pour la mise en auto-oscillation.[7]

Le système de contrôle en cascade a des caractéristiques distinctives. Ils sont le contrôle de la qualité, Anti-ingérence, la capacité, la flexibilité et la rapidité. Ainsi, il est généralement utilisé dans les occasions suivantes

- délai plus long dans le canal de commande.
- objet contrôlé et Non linéaire grand changement de charge
- changement aigu dans le système

Principalement, le système de régulation en cascade contient des ensembles intégrés de boucles de régulation. Ils sont la boucle primaire et boucles secondaires. La boucle primaire surveille la grandeur de commande et utilise écart par rapport à son point de consigne pour fournir une sortie de la boucle secondaire. La boucle secondaire reçoit son point de consigne de la boucle primaire et commande la grandeur de référence en conséquence.

III.2. Système de contrôle de cascade de fourneau :

Les constituants d'un système de contrôle de la température du four sont indiqués dans le Figure(III.1). Alors que T_1C est contrôleur principal, T_2C est Contrôleur secondaire, T_1T représente la température de mesure pour les exportations des premières Matériaux, et T_2T représente la température de mesure de la sole du four. Le fonctionnement de base du système de contrôle de la température du four est le suivant.

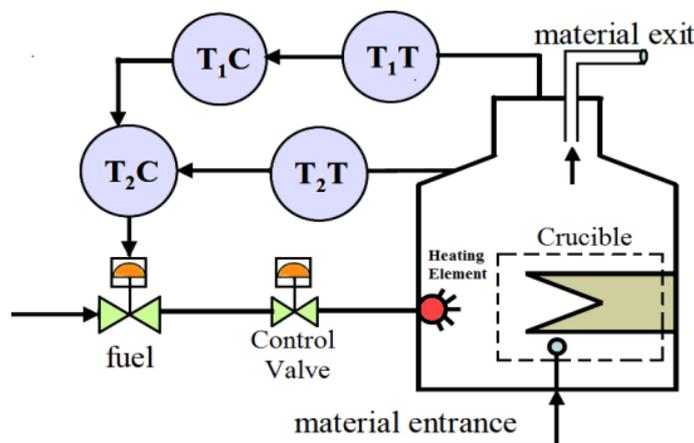


Figure III.1.cascade contrôle d'un système de température du four.

La sortie de l'unité de commande primaire (T_1C) est donnée à point de consigne au contrôleur secondaire (T_2C). T_2C contrôle le débit de carburant. Dans le procédé de chauffage, la matière qui est placée dans le creuset est chauffée jusqu'à une température déterminée à partir de l'entrée vers la sortie. De carburant la chambre de combustion à l'exportation des matières premières, il existe trois composantes de la capacité de la température du système. Ils sont four, poêle et les matières premières chauffées. Les troubles de la charge et à côté des matières premières sont les troubles du système dans un côté et de l'autre côté sont les perturbations du côté de la combustion, tels que le carburant, la pression et le débit d'air.

Dans le système de contrôle de la température du four, l'objet principal est la matière première et l'objet secondaire est le foyer du four. La principale variable commandée est la température de la matière première dans la variable commandée exportation et la variable sous-contrôlée est la température de la sole dans le four. Les troubles primaires sont l'écoulement de la matière première et la température du matériau à l'entrée. Les perturbations secondaires sont la pression du carburant avant que la soupape, la valeur thermique du mélange air-combustible fourni à la chaudière foyer etc.

L'une des précautions importantes qui doivent être prises dans le système de contrôle PID en cascade est que, dans le choix des paramètres de conception assurer qu'il n'y a pas

de problème de correspondance des constantes de temps des boucles principales et les sous afin que la résonance prévention de fonctionnement en toute sécurité peut être possible.

III.3. Conception du système de contrôle PID cascade:

La figure III.2 montre le système de contrôle PID en cascade du four. Les équations (III.1) et (III.2) sont les fonctions de transfert pour les objets primaires et secondaires.

$$G_1(s) = \frac{1/90}{(s+1/30)(s+1/3)} \quad (III.1)$$

$$G_2(s) = \frac{1/10}{(s+1/10)(s+1)^2} \quad (III.2)$$

Ce système est implémenté dans MATLAB / Simulink comme indiqué sur la Figure (III.2) [8]. L'équation (III.3) montre La représentation mathématique du contrôleur PID et du tableau(III.1) montre l'effet de l'augmentation de KP, KI et KD Gains sur les caractéristiques dynamiques.

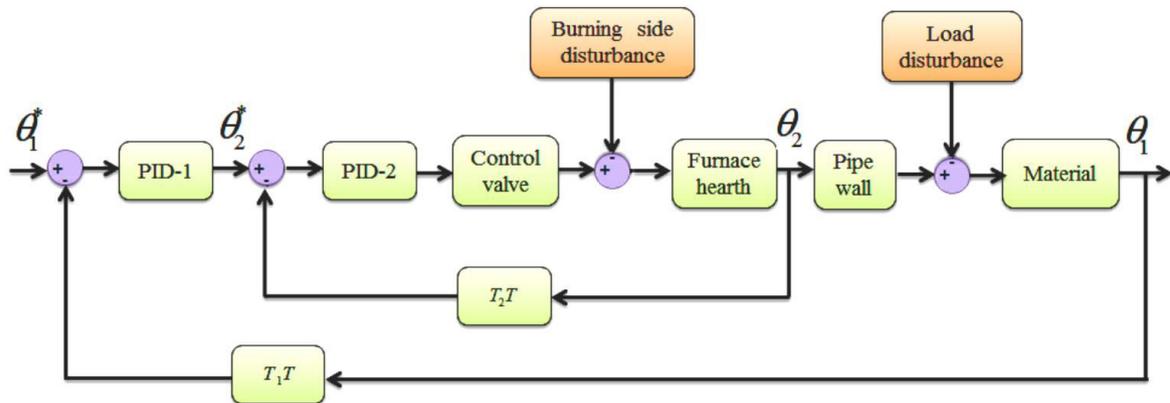


Figure III.2. Modèle de système de contrôle PID en cascade de four

- Équation de transfert :

$$P(t) = K_p + K_I \cdot \frac{1}{s} + K_D \cdot s \quad (III.3)$$

$$K_p = 0.6 \times K_{cr} = \text{Constante de gain proportionnel.} \quad (III.4)$$

$$K_I = \frac{K_{cr}}{T_I} = \text{Constante de gain intégral.} \quad (III.5)$$

$$K_D = K_{cr} \times T_D = \text{Constante de gain dérivé.} \quad (III.6)$$

Paramètre	Temps de montée (Tr)	Dépassement (D)	Temps de stabilisation (Ts)	Error (Ess)
K_p	Diminution	Augmenter	Petite monnaie	Diminution
K_I	Diminution	Augmenter	Augmenter	Réduction significative
K_D	Diminution mineure	Diminution	Diminution	Aucun effet

Tableau III.1.Effet de l'augmentation des gains P, I et D sur les caractéristiques dynamiques.

Par conséquent, le contrôleur PD est utilisé pour un réglage rapide ; Le contrôleur PI est utilisé pour avoir moins d'erreur d'état stable. Et le contrôleur PID est utilisé pour avoir toutes les actions de contrôle individuelles. Par conséquent, différentes combinaisons de contrôleurs devraient être sélectionnées correctement pour obtenir les caractéristiques souhaitées.

III.4.l'effet du régulateur intégrale sur l'erreur :

Pour évaluer la différence existante entre la réponse réelle et la réponse idéale de type échelon (la valeur de consigne), on peut calculer l'intégrale d'un terme positif faisant intervenir l'erreur (voir la figure III.3). Un indice calculé de cette façon prend une valeur d'autant plus élevée que la réponse réelle est éloignée de la réponse idéale. En pratique, l'intégrale est calculée sur un intervalle $[0, T]$ suffisamment étendu pour contenir tout le régime transitoire [9].

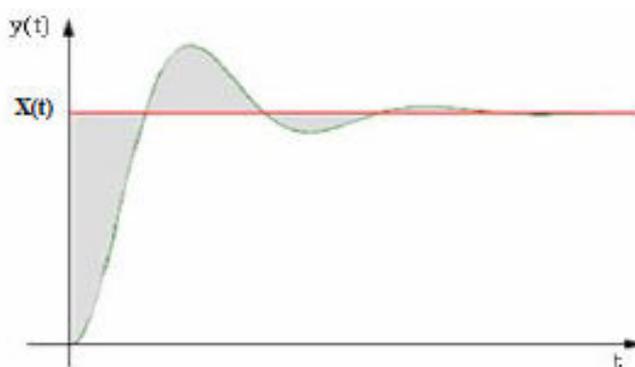


Figure III.3.Intégrale faisant intervenir l'erreur.

L'erreur $e(t) = x(t) - y(t)$; où $y(t)$ est le signal de sortie et $x(t)$ est le signal d'entrée.
L'intégrale de la valeur absolue de l'erreur $e(t)$ est donnée par :

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt = \int_0^t |x(t) - y(t)| dt \quad (III.7)$$

Cet indice exprime la surface générée par la différence entre la valeur de consigne et la valeur réelle. On utilise également l'intégrale de l'erreur quadratique, définie par :

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt = \int_0^t x(t) - y(t)^2 dt \quad (III.8)$$

Pour pénaliser les systèmes dont le régime transitoire dur trop longtemps, on utilise également l'intégrale du produit de l'erreur par le temps, donnée par :

$$ITAE = \int_0^t t|e(t)| dt = \int_0^t t|x(t) - y(t)| dt \quad (III.9)$$

On peut exprimer l'erreur quadratique moyenne en fonction du biais et de la variance de l'estimateur :

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (III.10)$$

III.5. Méthodes de réglage du régulateur PID :

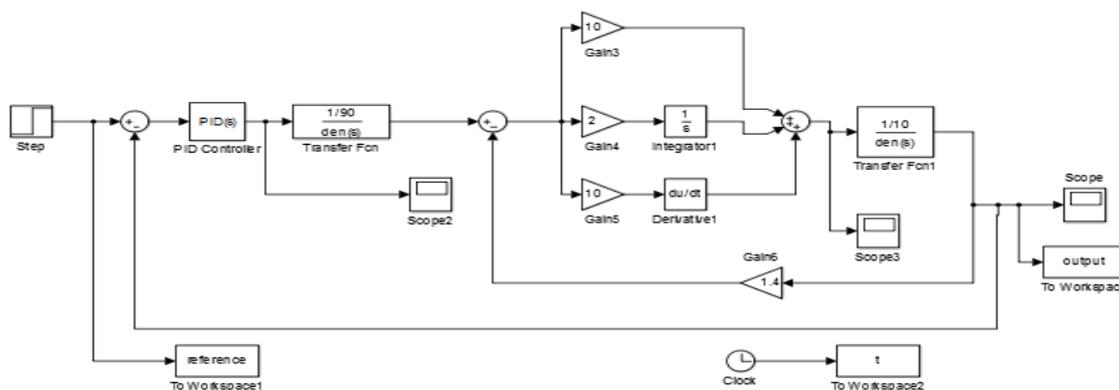


Figure III.4. Modèle MATLAB / Simulink de la conception du contrôleur PID en cascade pour le contrôle de la température du four

III.5.1. Contrôle régulateur PID avec la méthode Ziegler-Nichols :

La méthode de Ziegler-Nichols (ZN) oscillations cyclique est le moyen simple et plus efficace pour la mise en place de gain du régulateur PID. En fait, ce méthode est type, mentionné comme suit [10].

- Ziegler-Nichols (ZN) Méthode de réglage du régulateur PID.

La température du four dans la production industrielle a non linéaire, variant dans le temps et des caractéristiques de retard. Par conséquent, nous ne pouvons pas créer un modèle mathématique absolu. Il est toujours une tâche pénible et difficile de sélectionner des valeurs appropriées pour K_p , K_i , et K_D gains. Pour réduire les problèmes ci-dessus et d'améliorer les spécifications de réponse transitoire, le PID de boucle externe est réglé en utilisant des algorithmes de réglage. Réglage du régulateur PID implique que la meilleure sélection de valeurs pour proportionnel (K_p), intégral (K_i) et dérivé (K_D) gains.

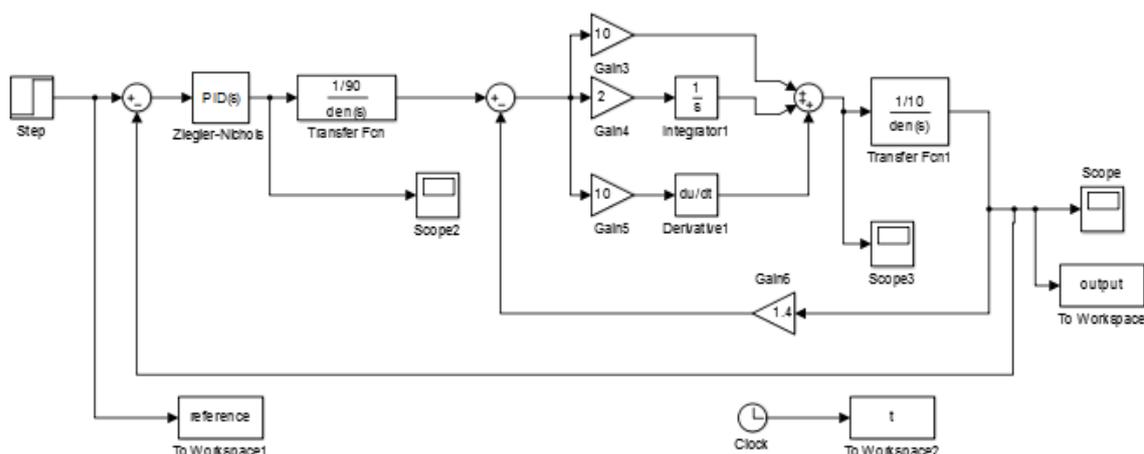


Figure III.5. Modèle MATLAB / Simulink du système Ziegler-Nichols avec le contrôleur PID

Voici les étapes consistant à calculer le gain critique (K_C) et période de temps critique (T_C) Les valeurs [11], [12], [13] et [14], Dans Ziegler-Nichols:

- Réduire les actions intégrées et dérivés à leur effet minimum concevoir-à-dire le système proportionnel avec contrôleur uniquement et en retour de l'unité.
- Peu à peu commencer à augmenter la valeur de gain proportionnel jusqu'à ce que le système présente la durable oscillation.
- Ce gain au cours de laquelle le système présente le vélo stable ou des oscillations entretenues sur le point de consigne est appelé le gain critique (K_c). La période de temps correspondant à ces oscillations est appelée période de temps critique (T_c).
- Notez les valeurs de ces K_c et T_c .
- A partir de ces valeurs, calculer K_p , K_i , et les valeurs de gain K_d en fonction de la méthode considérée comme le montre le Tableau (III.2).

Paramètres	Ziegler-Nichols (ZN) Méthode de réglage du régulateur PID
T_I	$T_I = \frac{T_c}{2}$
T_D	$T_D = \frac{T_c}{8}$
K_p	$K_p = 0.6 \times K_c$
K_I	$K_I = \frac{K_p}{T_I}$
K_D	$K_D = K_p \times T_D$

Tableau III.2. Méthode Ziegler-Nichols (ZN) pour le réglage du régulateur PID

III.5.2. Régulateur PID avec la méthode des ACO :

La conception de ce régulateur exige que les trois principaux paramètres, le gain Proportionnel (K_p), la constante de temps intégrale (K_i) et la constante de temps dérivé (K_d). Sont réglés par la méthode d'erreur basée sur l'expérience et le comportement des plantes. On propose le régulateur PID-ACO, dont l'algorithme d'ACO est utilisé pour optimiser les gains (K_P , K_I et K_D) chaque paramètre de K_p , K_i et K_d est codée par 'n' nœuds, respectivement. Par conséquent, un seul nœud représente les valeurs de la solution optimale de la paramètres K_p , K_i et K_d . L'étape fondamentale dans l'application de la méthode d'optimisation consiste à choisir les critères d'optimisation qui sont utilisés pour évaluer la condition physique. Voici les quatre méthodes utilisées :

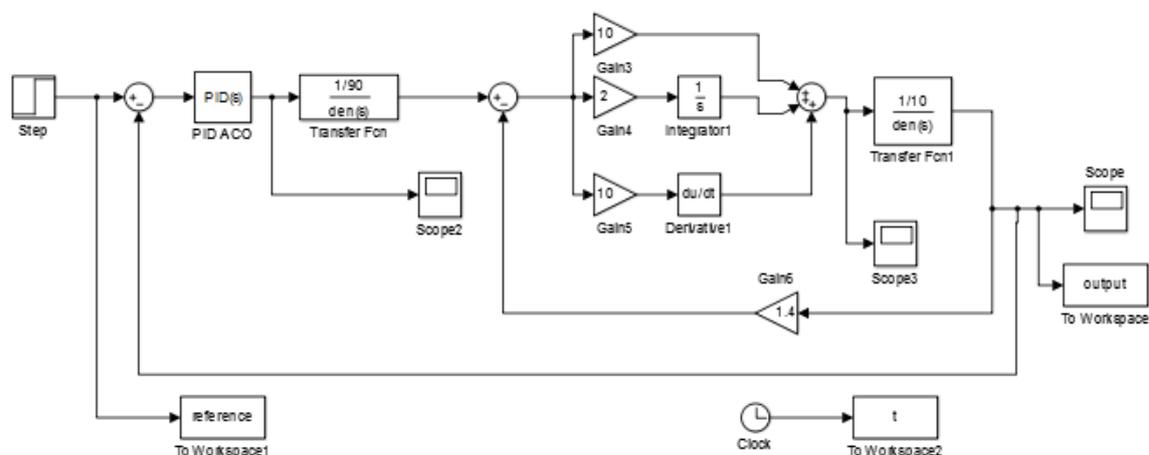


Figure III.6. Modèle MATLAB / Simulink du système PID ACO du contrôleur PID

- ACO_ISE Méthode utilisé également dans l'intégrale de l'erreur quadratique.
- ACO_ITAE Méthode utilisé également dans l'intégrale du produit de l'erreur par le temps.
- ACO_IAE Méthode utilisé dans l'intégrale de la valeur absolue de l'erreur.
- ACO_MSE Méthode utilisé dans Estimation de l'erreur carrée moyenne.

On a choisie les paramètres site dans le Tableau(III.3) afin de trouver les paramètres optimaux du régulateur PID par l'ACO et une bonne réponse de sortie.

Les valeurs des paramètres dans ACO sont présentées dans le Tableau III.3.

Les paramètres	Les valeurs
Nombre de fourmi.	100
Nombre d'itération.	50
Taux d'évaporation de phéromone ρ .	0.7
α	0.8
β	0.2
N_noeud	10000
Nombre de l'espace de recherche n_param	3

Tableau III.3. Les paramètres de l'ACO

III.6. Critères d'optimisation :

La modification de la réponse d'un système en boucle fermée par rapport au temps est appelé en tant que réponse dynamique [15]. Cette réponse de temps peut être analysé en calculant les paramètres suivants :

- **Temps de montée (Tm):** Le temps de montée se réfère au temps nécessaire pour la réponse du système à atteindre d'une faible valeur à une valeur élevée. En règle générale, ces valeurs sont 10% et 90% de la valeur en régime permanent, respectivement.
- **Temps de stabilisation (Ts):** Le temps de stabilisation se réfère au temps nécessaire pour que la réponse à atteindre et reste dans une bande d'erreur spécifiée. La bande d'erreur tolérable est habituellement (2-5)% de la valeur de régime permanent.

- **Erreur en régime permanent (Err):** L'erreur de régime permanent est la différence entre la réponse réelle et la réponse désirée lorsque le système atteint l'état d'équilibre.
- **dépassement de crête (Dés):** Le dépassement de crête se réfère au rapport de la première valeur de crête mesurée à partir de la valeur en régime permanent à la valeur de régime permanent.

Nous avons optimisée les paramètres (K_p, K_i, K_d) de régulateur PID en cascade avec le processus en boucle fermée en utilisant la méthode de Ziegler-Nichols [16] et l'algorithme d'optimisation de colonie de fourmi. Pour comparer entre ces deux méthodes en termes de dépassement, temps de monter et temps de réponse, nous avons représenté la réponse indicielle du système en boucle fermée

III.7. Résultats de la simulation :

Le but principal des simulations est d'évaluer les performances du régulateur PID et pour améliorer les performances de la réponse transitoire du système. Pour voir une image complète de la performance du contrôleur proposé, un ensemble de simulations est réalisé pour assurer la robustesse du régulateur PID.

III.7.1. Méthode de Ziegler-Nichols :

En augmentant le gain proportionnel K_c jusqu'à ce qu'une réponse est obtenue avec des oscillations qui augmentent en parallèle avec le temps soutenues dans la figure (III.8). En remarque que la réponse est plus rapide, mais le dépassement est beaucoup trop élevé (53.4%). Augmenter le gain plus loin rendra le dépassement pire. La figure (III.7). montre la formation d'oscillations autour du point soutenue de consigne. La figure (III.7). Montre la réponse du système avec le contrôleur PID et mises en tableaux comme représenté sur le tableau III.4.

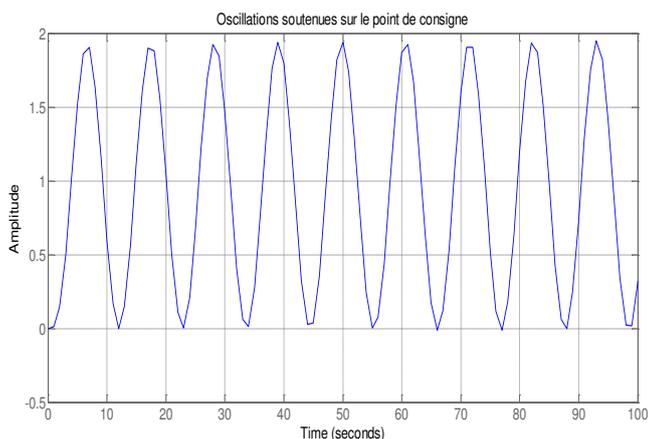


Figure III.8. Oscillations soutenues sur le point de consigne

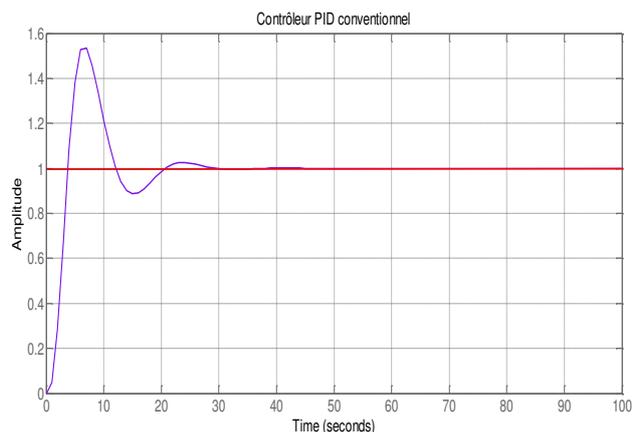


Figure III.7. Réponse du système avec un contrôleur PID générique

L'analyse des deux courbes temporelles nous permet de voir que l'on a :

$$K_{cr} = 39.25, T_{ocs} = 10.9 \text{ s.}$$

	Kp	Ki	Kd
PID-ZN	23.55	4.321	32.08

Tableau III.4. Paramètres d'optimisations du PID

	D_{max} %	T_m (sec)	T_s (sec)
PID-ZN	53.4	2.32	25.7

Tableau III.5. Les performances du système PID ZN

III.7.2. Méthode Optimisation par les colonies de fourmis (PID_ACO :

Il s'agit de la recherche des paramètres K_p , K_i et K_d dans la région de stabilité et ceci en faisant la sélection selon un Le modèle pour contrôleur PID basé sur ACO. La simulation a été effectuée pour quatre critères d'optimisation seront considérés comme fonction coût (fitness).

- Simulation 1 : contrôle utilise le PID _ACO avec l'erreur (ISE) :

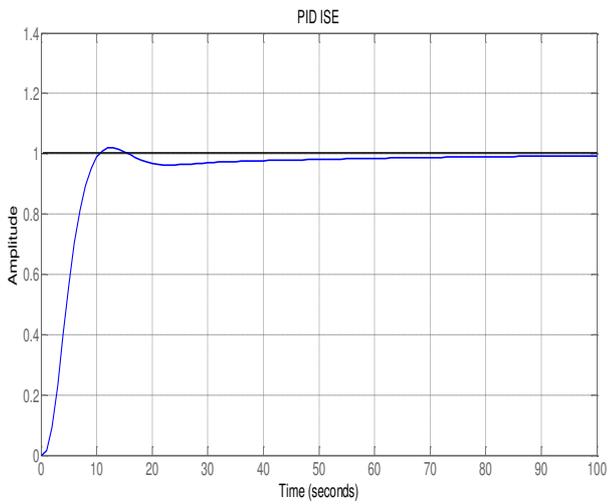


Figure III.11. La réponse du système PID ACO_ISE

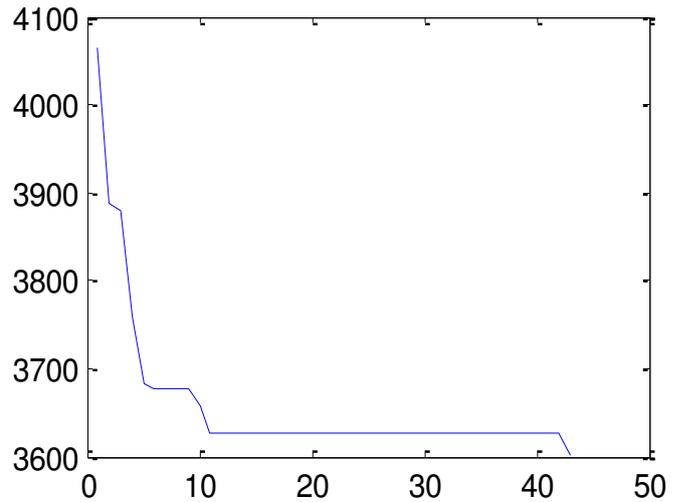


Figure III.10. Erreur du system PID ACO_ISE

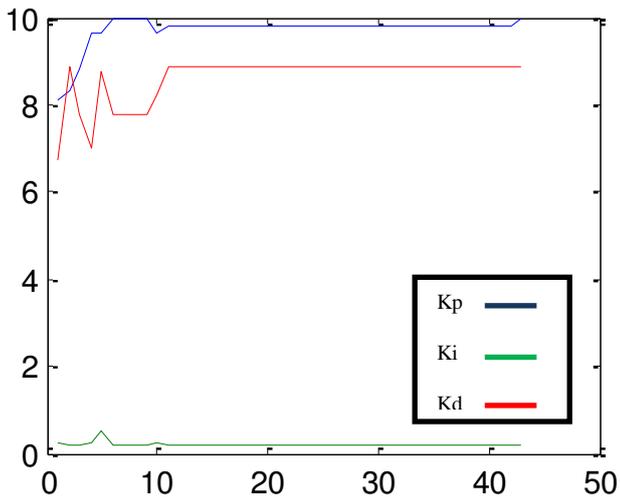


Figure III.9 .Les paramètres K_p , K_i et K_d du système PID ACO_ISE.

Remarque : Notez que le graphe monte après une valeur faible de 6.04 sec et la réponse du système est plus lente de 47.5 sec, mais le dépassement est presque éliminé (1.96%) avec une erreur remarquable de 3.601.

- Simulation 2 : contrôle utilise le PID_ACO avec l'erreur (ITAE) :

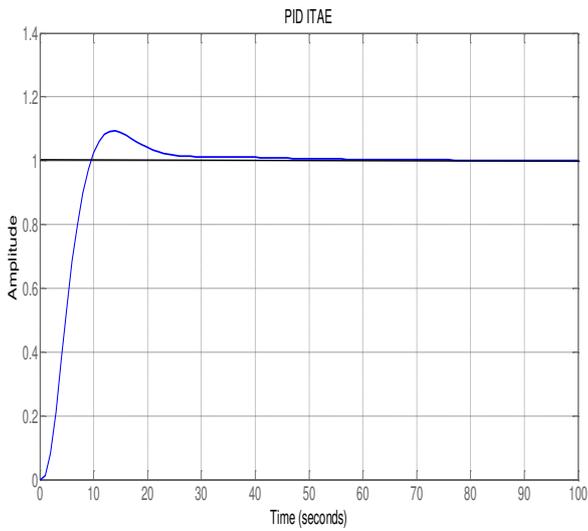


Figure III.14. la réponse du système PID ACO_ITAE

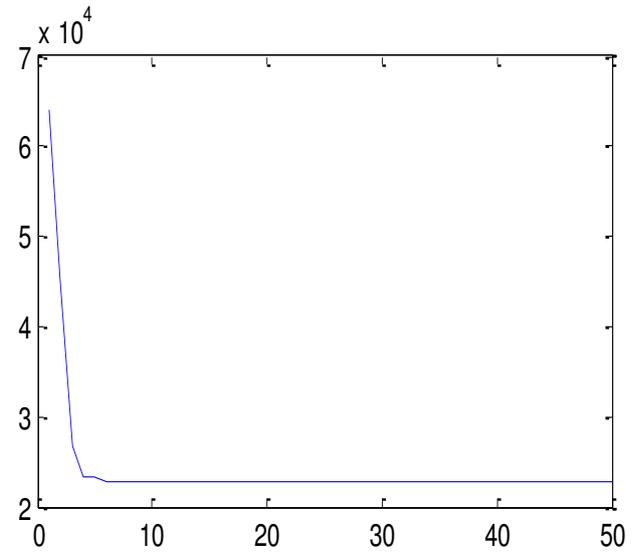


Figure III.13. Erreur du system PID ACO_ITAE

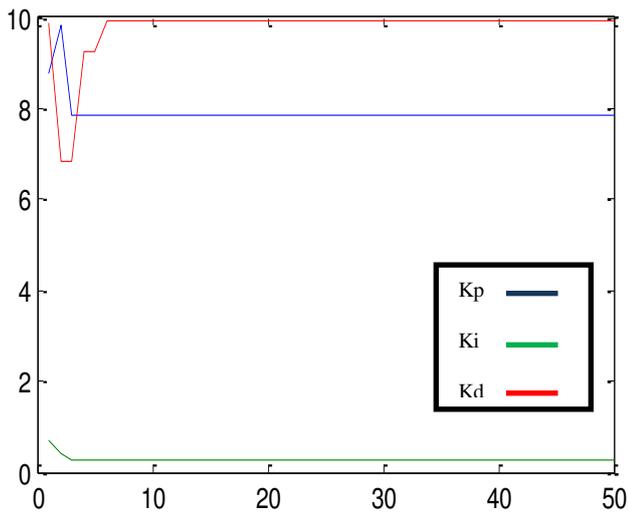


Figure III.15. Les paramètres K_p, K_i et K_d du système PID ACO_ITAE

Remarque : Notez que le graphe monte après une valeur faible de 5.87 sec. La réponse prend un temps moyen pour la stabilisation de 23.7 sec, mais le dépassement est élevé (9.31%) avec une erreur trop élevée de 46.06.

- Simulation 3 : contrôle utilise le PID_ACO avec l'erreur (MSE) :

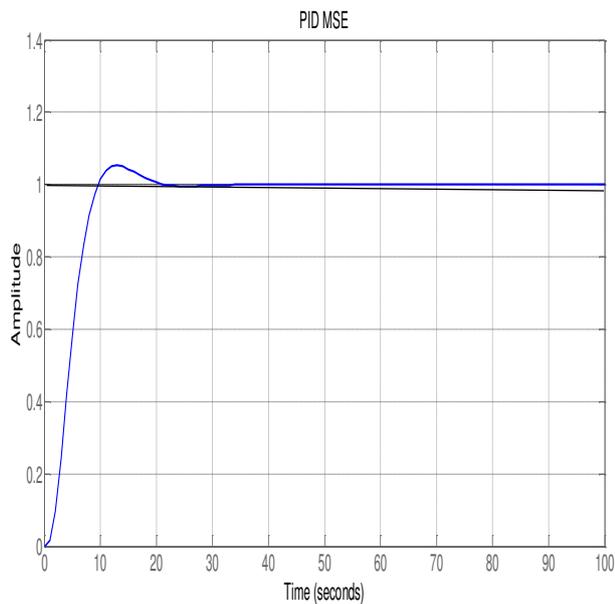


Figure III.16. la réponse du système PID ACO_MSE

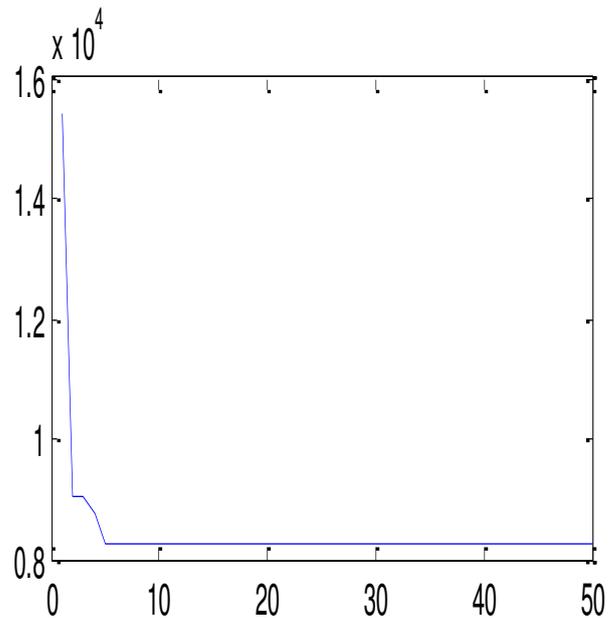


Figure III.17. Erreur du system PID ACO_MSE

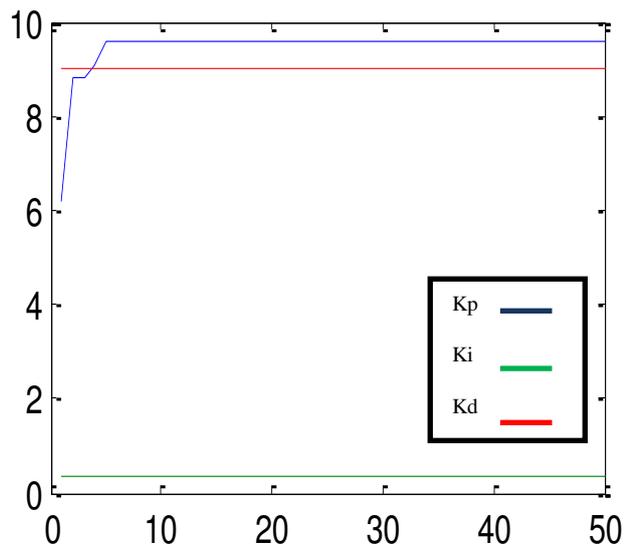


Figure III.18. Les paramètres K_p, K_i et K_d du système PID ACO_MSE

Remarque : Notez que le graphe monte après une valeur faible de 5.81 sec. La réponse est plus rapide de 17.8 sec, et un dépassement moyen de 5.33% avec un écart d'erreur de 7.551.

- Simulation 4 : contrôle utilise le PID_ACO avec l'erreur (IAE) :

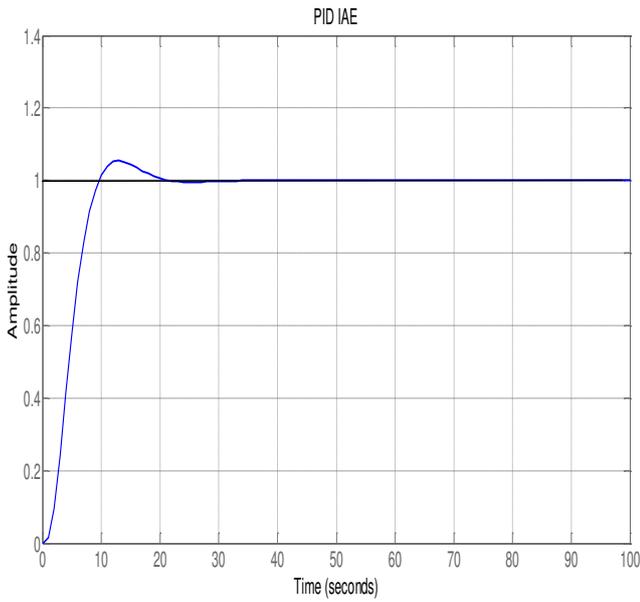


Figure III.19. la réponse du système PID ACO_IAE.

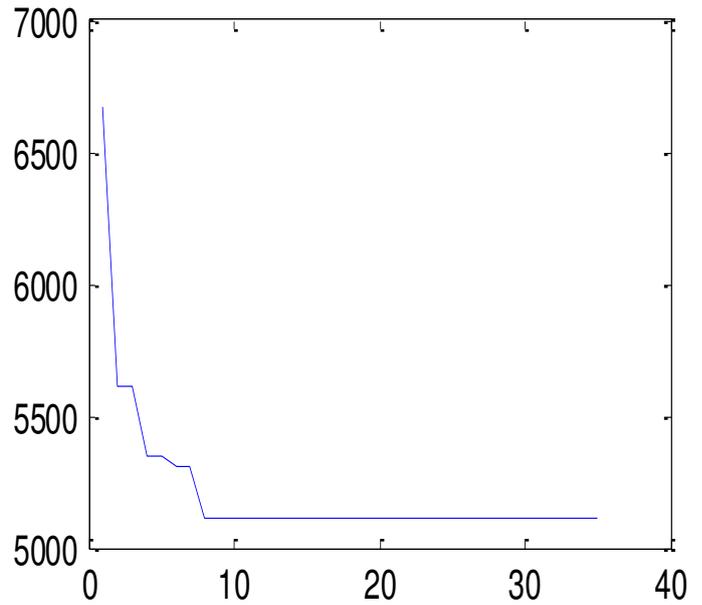


Figure III.20. Erreur du system PID ACO_IAE

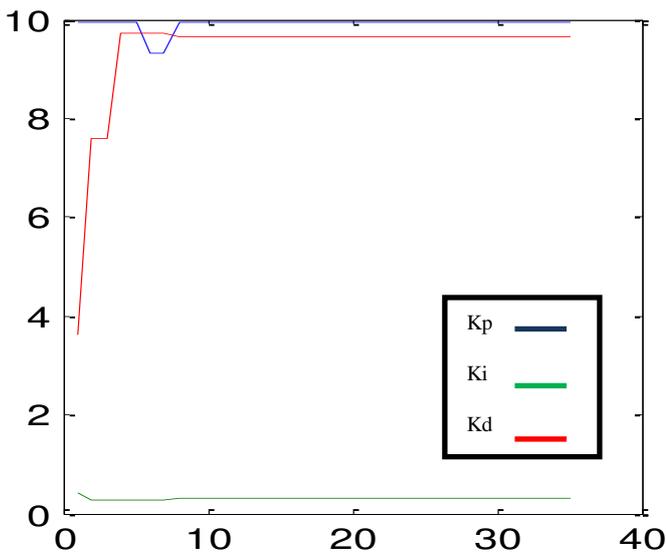


Figure III.21. Les paramètres K_p , K_i et K_d du système PID ACO_IAE.

Remarque : Notez que le graphe monte après une valeur faible de 5.8 sec. La réponse est plus rapide de 17.8 sec, et un dépassement moyen de 5.43% avec un écart d'erreur 5.108.

Les différentes valeurs des paramètres PID accordés à l'aide de la technique ACO pour les quatre fonctions de coûts mentionnées précédemment sont indiquées dans le tableau III.6.

	K_p	K_i	K_d
PID ACO_ISE	9.959	0.2128	8.8999
PID ACO_ITAE	9.3695	0.3836	7.68009
PID ACO_MSE	9.952	0.3177	9.7352
PID ACO_IAE	9.952	0.3177	9.6353

Tableau III.6. Paramètres d'optimisations du PID

En remarque d'après les résultats obtenue dans Tableau III.7 que la méthode PID ACO_IAE elle a les meilleures performances en comparatif avec les autres méthodes.

	$D_{max}\%$	$T_m(sec)$	$T_s(sec)$	Err
PID ACO_ISE	1.96	6.04	47.5	3.601
PID ACO_ITAE	9.31	5.87	23.7	46.06
PID ACO_MSE	5.33	5.81	17.8	7.551
PID ACO_IAE	5.43	5.8	17.8	5.108

Tableau III.7. Les performances du système PID ACO

À partir de ces réponses, il est clair que le PID accordé par ACO pour les quatre fonctions de coût a réussi à amortir toutes les oscillations, à minimiser le temps de montée et à réduire le dépassement. Il est clair que les signaux de contrôle dans les deux zones sont dans des valeurs acceptables. De plus, il est clair que le PID basé sur les fonctions à coût réduit à la meilleure performance.

III.7.3. Comparaison des résultats :

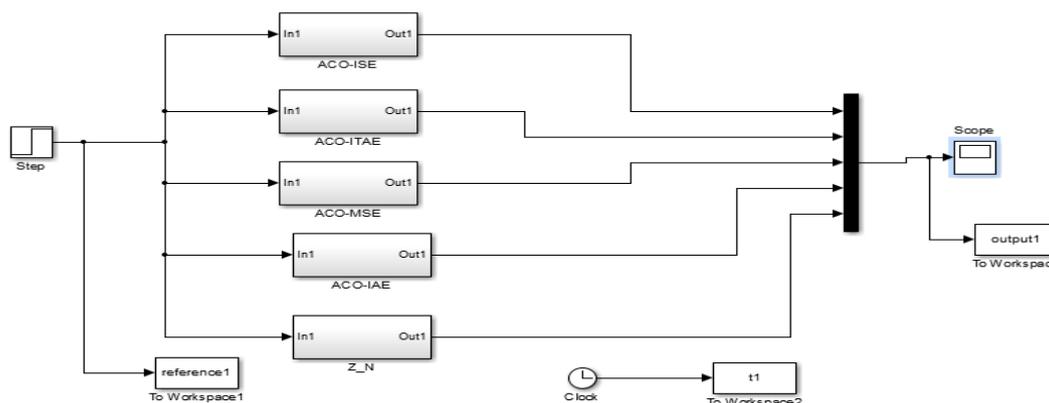


Figure III.22. Comparaison des modèles pour toutes les méthodes.

La comparaison graphique est présentée dans la figure III.21. On constate encore que, selon les quatre critères, le PID-ACO est plus performant que la réponse du système de Ziegler-Nichols.

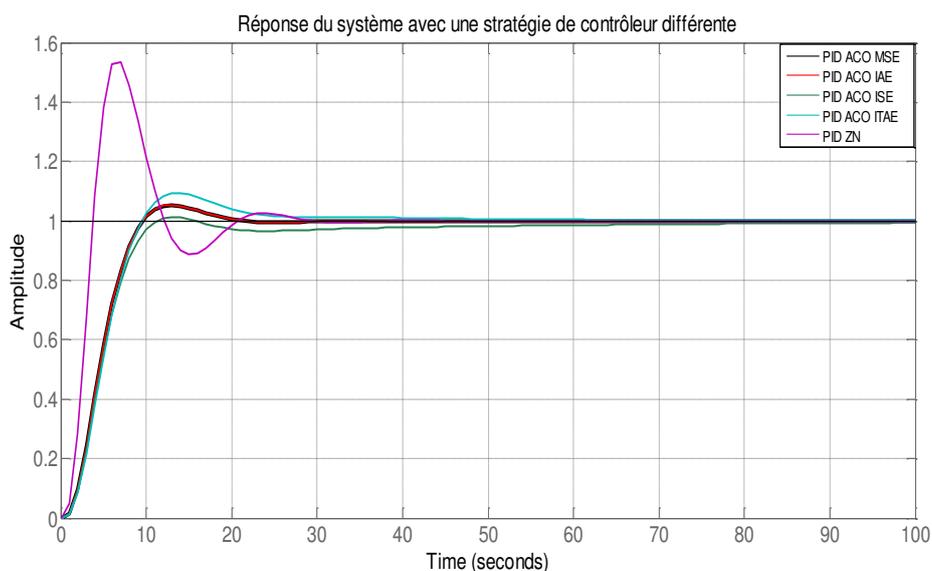


Figure III.23. Comparaison de toutes les réponses .

La simulation a été faite pour différents modèles, et on observe que le réglage PID-ACO avec l'optimisation des colonies de fourmis donne de meilleurs résultats par rapport à la technique de Ziegler Nichols. En outre, le dépassement maximal est élevé dans la technique de Ziegler Nichols. La performance de l'accord PID basé sur ACO et la technique Ziegler Nichols sont illustrées à la figure (III-22) et les tableaux (III.7) et (III.5).

III.8.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des exemples d'application de la méthode d'optimisation basée sur les colonies de fourmis artificielles (ACO) décrite dans le chapitre II pour la synthèse d'un régulateur PID optimale. Durant le processus d'optimisation, les solutions possibles sont évaluées par l'intermédiaire d'une fonction qui fait intervenir les critères de performance calculés sur la réponse du système global.

Les simulations réalisées les cinq méthodes, nous montrent que le régulateur PID optimisé par l'algorithme d'ACO est plus performant que le PID dont les paramètres sont fixés par la méthode de Ziegler-Nichols. Le régulateur PID-ACO est le meilleur, car il présente des performances satisfaisantes et possède une bonne robustesse. Les résultats montrent que le contrôleur ACO-PID est capable de contrôler le système presque exactement avec le pourcentage d'erreur et le dépassement. Dans les travaux futurs, d'autres améliorations doivent être réalisées.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

- Le premier chapitre de ce mémoire a rappelé les définitions et les notions de bases sur la régulation dans les systèmes asservis, les différents régulateurs P.I.D ainsi que les méthodes classiques de réglage des boucles de régulations tel que la méthode de Ziegler Nichols.
- Le deuxième chapitre a été réservé à un exposé sur la théorie de l'optimisation par Les colonies de fourmis « Ant Colony Optimization » (ACO), son apparition, son principe de fonctionnement et ses différentes applications dans les divers domaines de l'industrie, le chapitre a été clôturé par un exemple d'optimisation par la technique d'ACO, le résultat a montrée que l'ACO est plus robuste et flexible.
- Le troisième chapitre a cité les différents indices de performances utilisés pour l'évaluation d'une fonction objective. Comparer avec la méthode classique de Ziegler-Nichols, les résultats des simulations montrent que la méthode proposée était plus robuste, flexible et efficace en termes de performances dynamiques comme la réduction du dépassement maximal, le temps de montée, le temps de réponse et l'erreur statique. L'algorithme d'ACO était capable d'entreprendre la recherche locale avec un taux de convergence rapide. D'après nos résultats de simulation, on a trouvé que cette méthode converge vers l'optimum global. Une simulation sur le moteur à courant continue à excitation séparée sans et avec charge come perturbation a été opté dans le but de voir l'insensibilité de la méthode vis-à-vis les perturbations. Dans cet exemple, il a été approuvé la puissance d'ACO pour l'optimisation des gains, (K_p , K_i et K_d) avec une très bonne performance. Bien que, les objectives visées dans l'introduction ont été suffisamment atteints, toutefois, le travail du présent mémoire n'offre pas la solution idéale pour faire face aux contraintes liées à l'utilisation de la technique d'ACO pour avoir un meilleur mécanisme de réglage. En effet, reste comme perspectives de suggérer l'identification des paramètres du modèle et d'optimiser les gains de réglage par l'ACO avec une implantation réelle.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie :

- [1] Instrumentation et régulation en 30 Fiches, © Dunod, Paris, 2010 ISBN 978-2-10-054825-5
ISSN 1778 4514
- [2] Un chapitre dans son livre qui parle de la méta-heuristique ACO, d'une manière Simplifiée
- [3] Un chapitre dans son livre qui parle des algorithmes élaborés des colonies de fourmis Notamment adaptés pour le TSP et divers problèmes d'optimisation dynamiques.
- [4] <http://khayyam.developpez.com/articles/algo/voyageur-de-commerce/colonies-de-fourmis/#LII>
- [6] Résolution de conflits par algorithmes stochastiques parallèles ('Xavier OLIVE'), École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Février à juillet 2006 à Toulouse .p11
- [5] Engineering Optimization: Theory and Practice, Fourth Edition Singiresu S. Rao
Copyright © 2009 by John Wiley & Sons, Inc. p715-716,718.
- [7] Tuning PID controller using Multi-Objective Ant Colony Optimization ('Ibtissem Chiha, Nouredine Liouane and Pieree Borne'), p2-3,6 .
- [8]. Liu Jinkun, "MATLAB Simulation of Advanced PID Control [M]," Electronic Industry Press, Beijing, 2006, pp. 102-129.
- [9] Thème : Contribution à la Commande Robuste d'une Machine Asynchrone par la Technique PSO « Particle Swarm Optimization », ('M. BAZI Smail'), Université de Batna, 07/05/2009 . p55-56.
- [10]. Zhuzhen wang, Xiaodong Zhao, and Haiyan Wang, Design of series leading correction PID controller," In the proc. of IEEE International Conference, 2009
- [11]. Guo Lin ,Jin Jing, the new PID parameters selection in the furnace control applications, industrial instrumentation and automation equipment, 2010(1): 92-93
- [12]. Tang Xianlun, Li Yinguo, Chou Guoqing, ,and Cao Xiu, the PID algorithm in cascade control system based on MATLAB, Chongqing University,2005 (9): 61-63
- [13]. Wang Zhenglin, Guo Yangkuan,. Process control engineering and simulation. Beijing: Electronic Industry Press, 2009.
- [14]. Ge Lusheng Tao Yonghua, and Yin Yixin, "New Type of PID Control and Its Application [M]," 2000, pp.101-142.
- [15]. Curtis D Johnson, "Process Control Instrumentation Technology," Pearson Education, 2009.
- [16] J.G.Ziegler and N.B.Nichols , "Optimum settlings for automatic controllers", Trans .on ASME, vol. 64, 1942,pp.759-768.