

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Automatique

Option : Automatique Avancée Et Génie des Systèmes Industriels

Réf:

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

*Optimisation d'un régulateur PID par
Les Colonies de Fourmis Artificielles (ACO)*

Présenté par :

Benabdi Sofiane & Saoudi Abd Erraouf

Soutenu le : 03 Juin 2012

Devant le jury composé de :

Mr. ZITOUNI Athmane

Dr

Président

Melle . RECHID Naima

Dr

Encadreur

Mr. KOURD Yahia

Dr

Examineur

Année universitaire : 2011 / 2012



I.1.Introduction

Les régulateurs PID répondent à plus du 90% des besoins industriels et le nombre de régulateurs installés dans une usine pétrolière, par exemple, se compte par milliers. Malheureusement, malgré l'expérience acquise au fil des ans, les valeurs choisies pour les paramètres P, I et D ne sont pas toujours satisfaisantes, ni adaptées au processus à régler.

L'histoire des régulateurs est déjà longue et il peut être intéressant de rappeler quelques étapes importantes. Les premiers régulateurs de type centrifuge apparaissent vers 1750 pour régler la vitesse des moulins à vent, suivi en 1788 du fameux contrôleur de vitesse d'une machine à vapeur de James Watt.

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux démarches permettant de trouver facilement les paramètres optimums pour une installation donnée. Au fil des ans, les propositions de Ziegler et Nichols ont été adaptées ou modifiées selon les besoins.

Au début des années 1990 et dans le but de fournir des règles d'ajustement simples mais plus performantes que celles de Ziegler-Nichols, Åström et ses collaborateurs ont analysé le comportement dynamique d'un grand nombre de processus. Cette analyse a conduit à l'établissement de tableaux servant aux calculs des paramètres P, I et D à partir de mesures simples.

I.2.Généralité sur les systèmes asservis

I.2.1.Définitions

- **La régulation** regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler une grandeur physique. Par exemples: Pression, température, débit, niveau etc...
- **La grandeur réglée** est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation. Par exemple : une régulation de température.
- **La consigne** est la valeur que doit prendre la grandeur réglée.
- **La grandeur réglante** est la grandeur physique qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée. Elle n'est pas généralement de la même nature que la grandeur réglée.
- **Les grandeurs perturbatrices** sont les grandeurs physiques qui influencent la grandeur réglée. Elles ne sont pas généralement de la même nature que la grandeur réglée.
- **L'organe de réglage** est l'élément qui agit sur la grandeur réglante [35].

I.2.2.Régulation ou Asservissement

- Dans une régulation, on s'attachera à maintenir constante la grandeur réglée d'un système soumis à des perturbations.
- Dans un asservissement, la grandeur réglée devra suivre rapidement les variations de la consigne [35].

I.2.3.Principe de fonctionnement

Pour réguler un système physique, il faut [35]:

- **Mesurer** la grandeur réglée avec un capteur.
- **Réfléchir** sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la grandeur réglée avec la consigne et élabore le signal de commande.
- **Agir** sur la grandeur réglante par l'intermédiaire d'un organe de réglage.

On peut représenter une régulation de la manière suivante dans la figure (I.1):

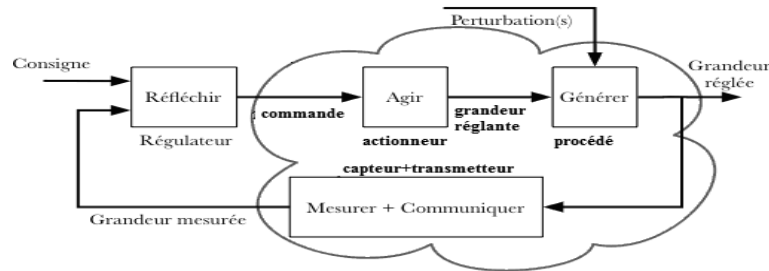
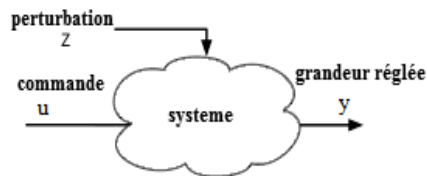


Figure (I.1): Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation.

I.2.4.Fonctionnement en boucle ouverte

On parle de fonctionnement en boucle ouverte (figure I.2), quand c'est l'opérateur qui contrôle l'organe de réglage [35].



Figure(I.2): Le système en boucle ouverte.

I.2.5.Fonctionnement en boucle fermée

C'est le fonctionnement normal d'une régulation. Le régulateur compare la mesure de la grandeur réglée et la consigne et agit en conséquence pour s'en rapprocher (figure I.3) [35].

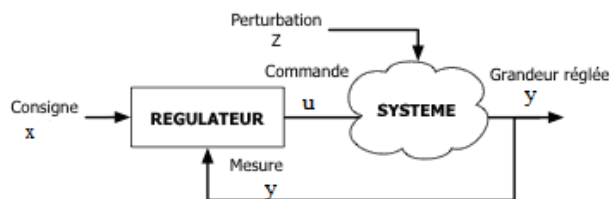


Figure (I.3):Le système en boucle fermée.

I.2.6.Schéma fonctionnel

Le schéma fonctionnel tente de représenter les relations entre les différentes grandeurs physiques des boucles de régulation. Il sera composé uniquement des éléments suivants [35]:

- Ligne de parcours d'une grandeur physique (figure I.4) : Cette ligne représente le parcours d'une même grandeur physique de la boucle de régulation.



Figure(I.4): Ligne de parcours d'une grandeur physique.

- Bloc gain (figure I.5) : Le bloc représente la relation entre deux grandeurs physiques, relation réalisé par un élément de la boucle de régulation :

$$Y(P) = H(P) \times X(P) \tag{I.1}$$

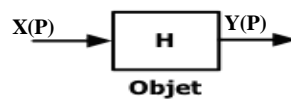
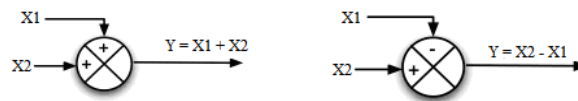


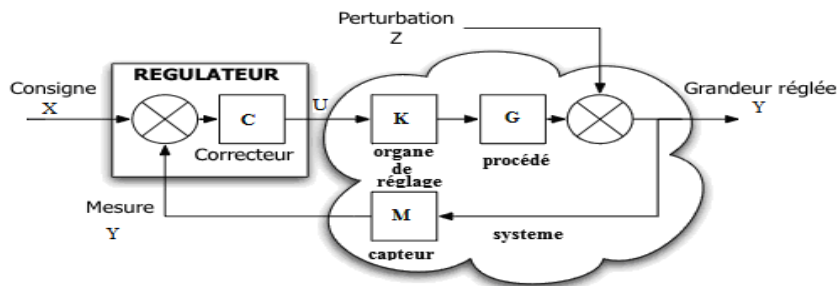
Figure (I.5): Bloc gain.

- Sommateur et soustracteur (figure I.6) : Ce bloc représente l'addition ou la soustraction de grandeurs physique de même nature.



Figure(I.6): Sommateur et soustracteur.

La figure I.7 résume les différentes fonctionnalités dans une boucle de régulation [35].



Figure(I.7):Boucle de régulation.

I.2.7.L'influence des perturbations

Une perturbation est une entrée supplémentaire au système qu'on ne peut pas contrôler ou maîtriser. Ces perturbations ont une influence sur l'asservissement des systèmes (figure. I.8).

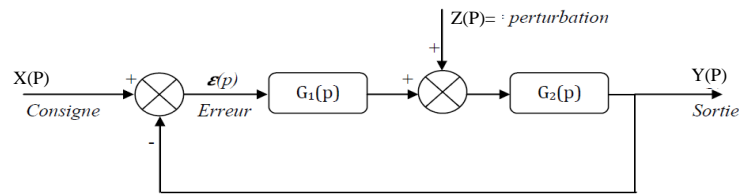


Figure. I.8: Schéma bloc d'un asservissement avec une perturbation.

La fonction de transfert du bloc d'asservissement est représentée comme suit :

Calculons $Y(p)$ en fonction de $Z(p)$, (En posant $X(p) = 0$) :

$$Y_R(p) = \frac{G_2(p)}{1 + G_1(p).G_2(p)} Z(p) \quad (I.2)$$

Calculons $Y(p)$ en fonction de $X(p)$, (En posant $Z(p) = 0$) :

$$Y_E(p) = \frac{G_1(p).G_2(p)}{1 + G_1(p).G_2(p)} X(p) \quad (I.3)$$

La sortie totale est :

$$Y(p) = \frac{G_2(p)}{1 + G_1(p).G_2(p)} Z(p) + \frac{G_1(p).G_2(p)}{1 + G_1(p).G_2(p)} X(p) \quad (I.4)$$

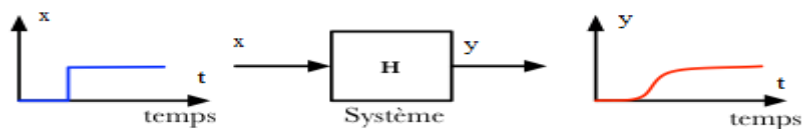
Une manière pratique de caractériser une perturbation sera d'utiliser l'intégrale de la valeur absolue de l'erreur due à une perturbation de charge sous la forme d'un échelon unitaire appliqué à l'entrée du système

I.3.caractéristiques statique et dynamiques d'un procédé

I.3.1.Stabilité

I.3.1.1.Procédés naturellement stables

Un procédé est dit naturellement stable (figure I.9) si à une variation finie de la grandeur réglante X correspond une variation finie de la grandeur réglée Y [35].



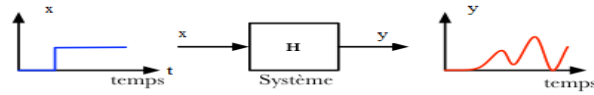
Figure(I.9) : Le système naturellement stable.

Exemple 1:

Grandeur réglée : température d'une pièce ; Grandeur réglant : puissance du radiateur.

I.3.1.2.Procédés naturellement instables :

Un procédé est dit naturellement instable (figure I.10) si à une variation finie de la grandeur réglante X correspond une variation continue de la grandeur réglée Y [35].



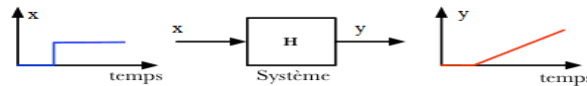
Figure(I.10):Le système naturellement instable.

Exemple 2:

Grandeur réglée : niveau ; Grandeur réglant : débit d'alimentation.

I.3.1.3. Procédés intégrateurs

On dit qu'un procédé est intégrateur (figure I.11), si pour une entrée X constante, la sortie Y est une droite croissante [35].

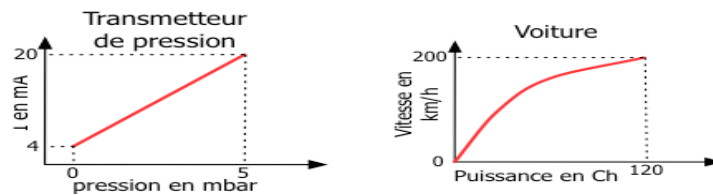


Figure(I.11) : Le procédé intégrateur.

I.3.2. Caractéristiques statiques d'un procédé

I.3.2.1. Courbe caractéristique

La caractéristique statique est la courbe représentative de la grandeur de sortie Y en fonction de la grandeur d'entrée X (figure I.12) [35].



Figure(I.12): Caractéristique statique d'un procédé

I.3.2.2. Gain statique

Le gain statique G_s est le rapport entre la variation de la grandeur de sortie Δy et la variation de la grandeur d'entrée Δx . [35]

$$G_s = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (I.5)$$

I.3.2.3. Erreur statique

L'erreur statique $\varepsilon(P)$ est la différence entre la consigne $X(P)$ et la mesure $Y(P)$ en régime statique [35].

$$\varepsilon(P) = X(P) - Y(P) \quad (I.6)$$

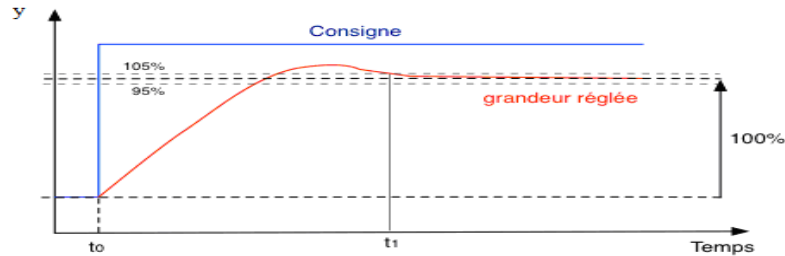
I.3.2.4. Linéarité

Un système linéaire obéit au principe de superposition. L'effet de la somme d'excitations est égal à la somme des effets de chaque excitation [35].

I.3.3. Caractéristiques dynamiques d'un procédé

I.3.3.1. Temps de réponse

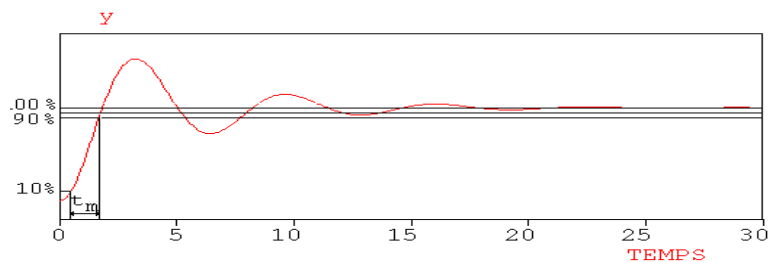
C'est l'aptitude du procédé à suivre les variations de la consigne . Dans le cas d'un échelon de la consigne , la croissance de la grandeur réglée définit les différents temps de réponse . Dans l'exemple ci-dessous de la figure (I.13) , on mesure le temps de réponse à $\pm 5\%$ qui est égal à $t_1 - t_0$ [35].



Figure(I.13): Temps de réponse .

I.3.3.2. Temps de montée

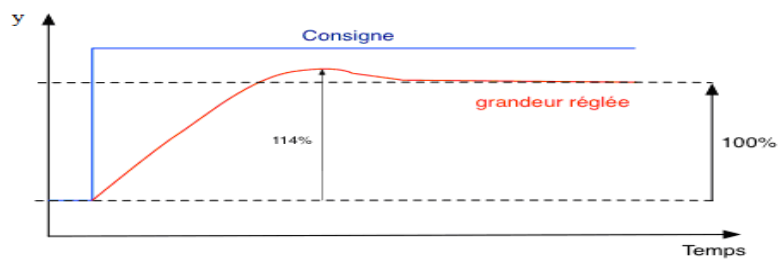
Le temps de montée (figure I.14) est l'intervalle de temps séparant les instants auxquels la réponse indicielle vaut 10% et 90% de la valeur finale [36].



Figure(I.14): Temps de montée.

I.3.3.3. Dépassement

Le premier dépassement permet de qualifier la stabilité d'un système . Plus celui-ci sera important, plus le système sera proche de l'instabilité. Dans certaines régulations, aucun dépassement n'est toléré, dans d'autre un dépassement inférieur à 15 % est considéré comme acceptable. Dans la réponse indicielle ci-dessous (figure I.15) , le premier dépassement est de 14% [35].



Figure(I.15) : Dépassement .

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Automatique

Option : Automatique Avancée Et Génie des Systèmes Industriels

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

*Optimisation d'un régulateur PID par
Les Colonies de Fourmis Artificielles (ACO)*

Présenté par :

Benabdi Sofiane & Saoudi Abd Erraouf

Avis favorable de l'encadreur :

M^{elle}. Rechid Naima

signature

Avis favorable du Président du Jury

Mr. ZITOUNI Athmane

Signature

Cachet et signature



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Automatique

Option : Automatique Avancée Et Génie des Systèmes Industriels

Thème :

Optimisation d'un régulateur PID par Les Colonies de Fourmis Artificielles (ACO)

Proposé par : Melle. Rechid Naima

Dirigé par : Melle. Rechid Naima

RESUME

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) optimums 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 .

الخلاصة

وفي الأونة 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_d, K_i, K_p) 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.

بِسْمِ
الرَّحْمَنِ
الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

السلام عليكم ورحمة الله وبركاته



Dédicaces

Avant tout , je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées .

Plus que tout , je dédie ce modeste travail à mes parents qui n'a jamais cessé de m'encourager et qui a fait l'impossible pour mes donner une belle vie , leur patience et leur amour ...ils sont à l'origine de tout ce que j'ai accompli de bien .

Je dédie à mes frères : RIDHA , RAMZI , FATHI , MASSAOUD , NADJIB , RAMI et me sœur : NOUR EL HOUDA , qui m'encouragent et m'aident dans ma vie et tous la famille BENABDI et HOUHOU . je dédie ce travail spécialement à mon encadreuse **RACHID NAIMA**.

A Tous mes amis : SAMI , MA3I , ILYACE , MOURAD ,BACHIRE ZAHRA , FAROUK , KHALED , AMINE, RYAD ,AZA,SALAH SASSI , BABI ,KARIM , FAROUK , MOHAMED ,ARYECH, HOSINE, SABER PSYCO,SABER ABA , ALI , MOURADE ,OKBA , HMAYDA , AMINE , AZA , HAMZA , MOUSTAFA , HAYDAR, RAMZI , TAREK BENHORIA et mes amis de l'université :TAREK , YASINE ,BAKI , NOWARI , YOUSEF, MOURAD, ALHAJE.

Tous mes collègues de la promotion 2012 et les amis de filière automatique . Et Tous qui m'aiment et a mon binôme SAOUDI ABDERRAOUF.

Merci

Dédicaces

Je remercie en premier lieu à Allah djalla djallaloooh qui ma donné le courage et la fois pour réussir dans ma vies et dans mes études.

En deuxième lieu à mes chers parents, A ma mère qui n'a jamais cessé de m'encourager et qui a fait l'impossible pour me donner une belle vie, et mon père qui à sacrifié sa vie chaque seconde pour notre famille et qui travaille jour nuit pour qu'on soit toujours les meilleurs. Merci mes parents. Spéciale dédie A mon encadreuse Mrs. RECHID NAIMA .

A mes frère :MOURAD ,DJAMEL ,ADEL ,HAYDAR , BADRI et ma jumeau KHALED A la plus charmante 'tawam rohi ' , A mes sœurs SOUHILA , HANANE ,et HOUDA et les fleurs de mes famille MERIEM ,AZIZA, HADILE, OSAMA et FARES , Toute la famille SAOUDI et famille de FERHATTE.

A mon l'équipe de GEDACHA :AMINE , ABA , RYAD , AZA , LASWADE , SAIDE , SALAH , AKRAM , SABER et pour tout les remplaçants de mon équipe , je dédie aussi a mes amis d'enfance: SASSI,BABI LEHLO, KARIM ,FAROUK ,ARYECH , MOHAMED, ALI , HOSINE , SABER PSYCO , SABER ABA , MOUNIR , OKBA, MOURADE , HMAYDA , MOUSTAFA ,HAMZA et pour mes amis de l'université: TAREK , YASINE , BAKI , NOWARI , SAID , HISHAME ,YOUSEF,SAID LACITY, MOURAD, ALHAJE, et mes amis de la karfour : MOUDY, DOUMA, MOUH, ZOUOO, FATHI , et pour toutes mes collègues de promotion de automatique 2011-2012. A Mon binôme BENABDI SOFIANE.

Merci

Remerciement

- ☞ Nous tenons à remercier le bon ALLAH pour le courage et la patience qu'il nous a offert pour aboutir à la réalisation de ce mémoire .
- ☞ Nos sincères et profond remerciement pour notre encadreuse madame RECHID NAIMA pour l'aide qu' elle ont apporté pour mener ce travail .
- ☞ A tous les enseignants du filière d' automatique .
- ☞ A tous ceux qui ont contribués de près ou de loin la finalisation de ce travail . nous tenons à leur exprimer notre vive gratitude .
- ☞ Enfin , nos respectueuses salutations et remerciement aux membres du jury qui ont l'honneur d'apprécier et de juger ce modeste travail.

Merci

Liste des tableaux	N° page
Tableaux (I.1) : L'influences de T_i et T_d avec les régulateurs PID.	20
Tableaux (I.2) : Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon Ziegler Nicholas en BO	21
Tableaux (I.3) : Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon Ziegler Nichols avec les mesures en BF.	22
Tableaux (I.4) : Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon méthode de Chien-Hrones-Reswick	23
Tableaux (I.5) : Choix du régulateur Modèle non évolutif.	24
Tableaux (I.6) : Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon Modèle non évolutif.	24
Tableaux (I.7) : Choix du régulateur Modèle évolutif.	24
Tableaux (I.8) : Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon Modèle évolutif.	24
Tableau (III.1) : Les caractéristiques du révélateur PID.	40
Tableau (III.2) : Les paramètres de ACO .	45
Tableau (III.3) : Paramètre d'optimisations du PID	46
Tableau (III.4) : Les performances du système de second ordre .	47
Tableau (III.5) : Les Paramètres d'optimisations du PID pour le système de troisième ordre .	48
Tableau (III.6) : Les performances du système de troisième ordre .	48
Tableau (III.7) : Paramètres d'optimisations de PID pour le système de quatrième ordre .	50
Tableau (III.8) : Les performances de système de quatrième ordre .	50
Tableau (III.9) : Paramètres d'optimisations de PID pour le MCC sans charge .	53
Tableau (III.10) : Les performances du MCC sans charge .	53
Tableau (III.11) : Paramètres d'optimisations de PID pour le MCC avec charge	54
Tableau (III.12) : Les performances de MCC avec charge .	55
Tableau (III.13) : Les symboles utilisés du MCC .	59
Tableau (III.14) : Les paramètres du MCC .	60

Liste des figure	Nº page
Figure (I.1): Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation.	5
Figure(I.2): Le système en boucle ouverte.	5
Figure (I.3): Le système en boucle fermée.	5
Figure(I.4): Ligne de parcours d'une grandeur physique.	6
Figure (I.5): Bloc gain.	6
Figure(I.6): Sommateur et soustracteur.	6
Figure(I.7): Boucle de régulation.	6
Figure(I.8): Schéma bloc d'un asservissement avec une perturbation.	7
Figure(I.9) : Le système naturellement stable.	7
Figure(I.10): Le système naturellement instable.	8
Figure(I.11) : Le procédé intégrateur.	8
Figure(I.12): Caractéristique statique d'un procédé	8
Figure(I.13): Temps de réponse .	9
Figure(I.14): Temps de montée.	9
Figure(I.15) : Dépassement .	9
Figure(I.16): Représentation des bandes proportionnelles de 50% et de 200%.	10
Figure(I.17): Schéma fonctionnel du régulateur P.	13
Figure(I.18): Réponse indicielle du régulateur P.	13
Figure(I.19) : Schéma électronique d'un régulateur P	13
Figure(I.20): Schéma fonctionnel du régulateur PI	14
Figure(I.21): Réponse indicielle du régulateur PI.	14
Figure (I.22): Schéma électronique du régulateur PI.	14
Figure(I.23): Schéma fonctionnel du régulateur PD.	15
Figure(I.24): Réponse indicielle du régulateur PD.	15
Figure(I.25) : Schéma électronique du régulateur PD.	15
Figure(I.26) : Régulateur Tout Ou Rien (TOR)	16
Figure(I.27): Régulation à structure parallèle.	17
Figure(I.28): Régulateur à structure série.	18
Figure(I.29) : Régulateur à structure mixte (classique).	18
Figure(I.30) : Régulateur à structure mixte (variante).	19
Figure(I.31) : La réponse type procédé stable.	19
Figure(I.32) : Courbe d'influence de T_i .	20

Figure(I.33) : Courbe d'influence de T_d .	20
Figure(I.34) : Identification en boucle ouverte par Ziegler-Nichols	22
Figure(I.35) : Mise en oscillation d'un système par contre-réaction.	22
Figure(I.36) : Comparaison des correcteurs de Ziegler Nichols.	23
Figure (II.1) : Expérience du double pont binaire.	29
Figure (II.2) : Effet de la coupure d'une piste de phéromone.	30
Figure (II.3) : Graphe multicouches du déplacement des fourmis.	34
Figure (II.4) : Automate représentant le comportement individuel d'une fourmi.	36
Figure (II.5) : Fonction de Rastrigin avec optimum global au point $f(0,0)=0$.	38
Figure (III.1) :Schéma de principe d'un régulateur PID	39
Figure (III.2) :Le temps de montée t_r , le temps d'établissement t_s e le dépassement maximal D	41
Figure (III.3) : Intégrale faisant intervenir l'erreur.	41
Figure (III.4) : Le régulateur PID-ACO	43
Figure (III.5) : Organigramme de l'ACO.	43
Figure (III.6) : Le graphe de l'optimisation de colonie de fourmis.	44
Figure (III.7) : Les réponses de système de second ordre pour le PID avec Z-N et ACO	46
Figure (III.8) : Les réponses de la fonction objectif et les paramètres K_p , K_i et K_d du système de second ordre pour le PID-ACO	46
Figure (III.9) : Les réponses du système de troisième ordre pour le PID avec Z-N et ACO	48
Figure (III.10) : Les réponses de la fonction objective et les paramètres K_p , K_i , K_d du système de troisième ordre pour le PID-ACO	48
Figure (III.11) : Les réponses du système de quatrième ordre pour le PID avec Z-N et ACO	49
Figure (III.12) : Les réponses de la fonction objective et le paramètre K_p , K_i , K_d du système de quatrième ordre pour le PID-ACO	50
Figure (III.13) : Circuit équivalent du MCC à excitation séparée.	51
Figure (III.14) : La réponse de vitesse du MCC sans charge par le PID-ACO	53
Figure (III.15) : Les réponses de la fonction objective et les paramètres K_p , K_i , K_d de MCC avec le PID-ACO	53
Figure (III.16) : La réponse de vitesse du MCC avec charge par le PID-ACO.	54
Figure (III.17) : Les réponses de la fonction objectif et les paramètres K_p , K_i , K_d de MCC avec Le PID-ACO	54



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
ITSE	: l'intégrale du produit de l'erreur quadratique par le temps
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
T_i	: constante de temps d'action intégrale
u_0	: valeur initiale de Y
T_d	: constante de temps d'action dérivée
TOR	: Régulateur Tout ou Rien
U	: le signal de commande
BO	: boucle ouvert
BF	: boucle fermée
K_{rc}	: le gain critique
T_{ocs}	: 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 mise à jour de phéromone
ρ	: le taux d'évaporation



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
ζ	: un paramètre utilisé pour le contrôle de la mise à jour globale du phéromone
α	: le degré d'importance des phéromones
MCC	: moteur à courant continu
i_{ex} et i_{ind}	: Excitation courant et courant induite .
w_r	: Vitesse angulaire du MCC
V_{ex} et V_{ind}	: Voltage d'excitation et voltage induite
R_{ex} et R_{ind}	: Résistance d'excitation et résistance d'induction
L_{ex} , L_{ind} et L_{index}	: Inductance d'excitation, Inductance d'induction et Inductance mutuelle
J	: Moment d'inertie
C_r	: Couple résistif
f_c	: Coefficient de frottement

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) optimums 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_d, K_i, K_p) 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 ، التحسين مستعمرة النمل ، طريقة زيغلر-نيكولز.

Le titre	Nº page
Introduction	1
<u>Chapitre NºI : Système Asservis et Régulation PID.</u>	
I.1.Introduction.	4
I.2.Généralité sur les systèmes asservis .	4
I.2.1.Définitions .	4
I.2.2.Régulation ou Asservissement	4
I.2.3.Principe de fonctionnement .	5
I.2.4.Fonctionnement en boucle ouverte .	5
I.2.5.Fonctionnement en boucle fermée .	5
I.2.6.Schéma fonctionnel	6
I.2.7.L'influence des perturbations	6
I.3.caractéristiques statique et dynamiques d'un procédé	7
I.3.1.Stabilité	7
I.3.1.1.Procédés naturellement stables	7
I.3.1.2.Procédés naturellement instables	7
I.3.1.3.Procédés intégrateurs	8
I.3.2.Caractéristiques statiques d'un procédé	8
I.3.2.1.Courbe caractéristique	8
I.3.2.2.Gain statique	8
I.3.2.3.Erreur statique	8
I.3.2.4.Linéarité	8
I.3.3.Caractéristiques dynamiques d'un procédé	9
I.3.3.1.Temps de réponse	9
I.3.3.2.Temps de montée	9
I.3.3.3.Dépassement	9
I.4.Action élémentaires (proportionnelle , intégrale , dérivée)	10
I.4.1.Action proportionnelle	10
I.4.1.1.Rôle et domaine d'utilisation de l'action proportionnelle	10
I.4.2. Action intégrale	11
I.4.2.1.Rôle et domaine d'utilisation de l'action intégrale	11
I.4.3.Action dérivée	11
I.4.3.1.Rôle et domaine d'utilisation de l'action dérivée	12

I.4.4.Résumé	12
I.4.3.1.Rôle et domaine d'utilisation de l'action dérivée	13
I.4.4.Résumé	13
I.5.2. Régulateurs à action proportionnelle-intégrale (PI)	14
I.5.3. Régulateur à action proportionnelle-dérivée (PD)	15
I.5.4.Régulateur Tout ou Rien (TOR)	16
I.5.4.Régulateur à action Proportionnel-Intégral-Dérivée (PID)	16
I.5.4.1.Principe général	17
I.5.4.2.Différente structures du régulateur PID	17
I.5.2.1.Structure parallèle	17
I.5.2.2. Structure série	18
I.5.2.3.Structure mixte	18
I.5.4.3.Réglage d'un PID	19
I.5.4.4.Influence des performances sur les régulateurs PID	20
I.5.4.4.1.Influence de T_i	20
I.5.4.4.2.Influence de T_d	20
I.5.4.5.Loi de commande du régulateur PID	21
I.5.4.6.Fonction de transfert du régulateur PID	21
I.6.Méthodes Industrielles De Synthèse D'un régulateur PID	21
I.6.1. Méthodes empiriques	21
I.6.1.1. Méthode de Ziegler Nichols	21
I.6.1.1.1.Mesures sur la réponse en boucle ouverte	21
I.6.1.1.2. Mesure sur la réponse en boucle fermée	22
I.6.1.1.2. Méthode de Chien-Hrones-Reswick	23
I.6.2.Réglages après identification du procédé	23
I.6.2.1.Modèle non évolutif:	23
I.6.2.2. Modèle évolutif :	24
I.7.Conclusion	25
<u>Chapitre №2: Optimisation par les colonies de fourmis (ACO).</u>	
II.1.Introduction :	27
II.2. Système de colonie de fourmis	27
II.2.1.La sociabilité de la fourmi	27
II.2.2.La communication	27

II.2.3.La division du travail	28
II.2.4.Capacités individuelles	28
II.2.5.Les phéromone des fourmis	29
II.2.6.Expérience du double pont binaire	29
II.2.7.Effet de la coupure d'une piste de phéromone	29
II.2.8.Similarités et différences avec les fourmis réelles	30
II.2.8.1. Les points communs [28]	30
II.2.8.2 Les Différences [28]	30
II.3. Optimisation par les colonies de fourmis (Ant Colony Optimization) (ACO)	31
II.3.1. Introduction	31
II.3.2. L'exploration	32
II.3.3. L'exploitation	32
II.3.4. La diversification	32
II.3.5. L'intensification	32
II.4. Formulation mathématique de l'ACO	32
II.4.1. le nombre de fourmis	32
II.4.2. Le comportement d'une fourmi dans l'espace de recherche	32
II.4.3. Reconstitution du chemin et la mise à jour du phéromone	33
II.4.4. Evaporation de la trace de phéromone	33
II.4.5. L'algorithme d'ACO	34
II.4.6. La fourmi se comporte comme un automate	36
II.5. Exemple D'application	36
II.6.Conclusion	37
Chapitre №3: Simulation et Résultat.	
III.1.Introduction .	39
III.2. Critères de performance	39
III.2.1. Paramètres caractéristiques du régulateur PID [33]	39
III.2.2. Performances dans le régime transitoire	40
III.2.3. Intégrales faisant intervenir l'erreur	41
III.3. Optimisation par la méthode de Ziegler-Nichols (Z-N)	42
III.4. Optimisation par les colonies de fourmis (ACO)	42
III.5. Exemple de simulation pour des systèmes de types différents	44
III.5.1. Le système du second ordre	45



III.5.2. Le système du troisième ordre	47
III.5.3. Le système du quatrième ordre	49
III.6. Application à un moteur à courant continu à excitation séparée	50
III.6.1. Moteur à courant continu sans charge	52
III.6.2. Moteur à courant continu avec charge	53
III.7. Conclusion	55
Conclusion générale	57
Bibliographie	59
Annexe	63

Introduction Générale

Introduction générale

Le correcteur PID est la technique la plus utilisée dans la commande des processus industriels pour des décennies. Les raisons majeures de sa large acceptation en industrie sont sa capacité de commander la majorité des processus, ces actions sont bien comprises et son implémentation est très simple. La conception et le réglage du correcteur PID a été un sujet de recherche depuis le jour où Ziegler et Nichols ont présenté leur méthode de réglage en 1942. Bien que toutes les techniques existantes pour le réglage des paramètres du correcteur PID, un travail de recherche continu et intensif est encore en cours pour le rehaussement de la qualité et l'amélioration des performances de la commande.

Dans le domaine de la commande, plusieurs techniques ont été établies pour assurer un réglage désiré. Ces techniques sont élaborées afin de rendre le système insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques [4]. Les techniques de commande classique de type PI ou PID couvrent une large gamme dans les applications industrielles. Ce sont des techniques de commande linéaires et présentent l'intérêt de la simplicité de mise en œuvre et la facilité de la synthèse. Au cours de temps, ses applications seront non efficaces, notamment si les processus à commander ont des structures complexes et non-linéaires. De plus, l'application de ces techniques exige la connaissance des différents paramètres du modèle de la machine. Cela peut influencer sur le fonctionnement du processus et peut entraîner une robustesse médiocre face à la variation de ces paramètres et des dépassements importants lors des régimes transitoires [1,4]. Il y a dès lors plusieurs raisons qui poussent à développer des méthodes d'optimisation intelligente pour le réglage de contrôleurs PID. On peut citer la logique floue [1] [2], les réseaux de neurones [3], l'algorithme génétique (GA) [5] [6] et l'optimisation par l'essaim particulaire (PSO) [7].

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 [8]. 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 [2]. 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 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 chapitre structuré 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

Systemes Asservis et Régulation PID



I.1.Introduction

Les régulateurs PID répondent à plus du 90% des besoins industriels et le nombre de régulateurs installés dans une usine pétrolière, par exemple, se compte par milliers. Malheureusement, malgré l'expérience acquise au fil des ans, les valeurs choisies pour les paramètres P, I et D ne sont pas toujours satisfaisantes, ni adaptées au processus à régler.

L'histoire des régulateurs est déjà longue et il peut être intéressant de rappeler quelques étapes importantes. Les premiers régulateurs de type centrifuge apparaissent vers 1750 pour régler la vitesse des moulins à vent, suivi en 1788 du fameux contrôleur de vitesse d'une machine à vapeur de James Watt.

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux démarches permettant de trouver facilement les paramètres optimums pour une installation donnée. Au fil des ans, les propositions de Ziegler et Nichols ont été adaptées ou modifiées selon les besoins.

Au début des années 1990 et dans le but de fournir des règles d'ajustement simples mais plus performantes que celles de Ziegler-Nichols, Åström et ses collaborateurs ont analysé le comportement dynamique d'un grand nombre de processus. Cette analyse a conduit à l'établissement de tableaux servant aux calculs des paramètres P, I et D à partir de mesures simples.

I.2.Généralité sur les systèmes asservis

I.2.1.Définitions

- **La régulation** regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler une grandeur physique. Par exemples: Pression, température, débit, niveau etc...
- **La grandeur réglée** est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation. Par exemple : une régulation de température.
- **La consigne** est la valeur que doit prendre la grandeur réglée.
- **La grandeur réglante** est la grandeur physique qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée. Elle n'est pas généralement de la même nature que la grandeur réglée.
- **Les grandeurs perturbatrices** sont les grandeurs physiques qui influencent la grandeur réglée. Elles ne sont pas généralement de la même nature que la grandeur réglée.
- **L'organe de réglage** est l'élément qui agit sur la grandeur réglante [35].

I.2.2.Régulation ou Asservissement

- Dans une régulation, on s'attachera à maintenir constante la grandeur réglée d'un système soumis à des perturbations.
- Dans un asservissement, la grandeur réglée devra suivre rapidement les variations de la consigne [35].

I.2.3.Principe de fonctionnement

Pour réguler un système physique, il faut [35]:

- **Mesurer** la grandeur réglée avec un capteur.
- **Réfléchir** sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la grandeur réglée avec la consigne et élabore le signal de commande.
- **Agir** sur la grandeur réglante par l'intermédiaire d'un organe de réglage.

On peut représenter une régulation de la manière suivante dans la figure (I.1):

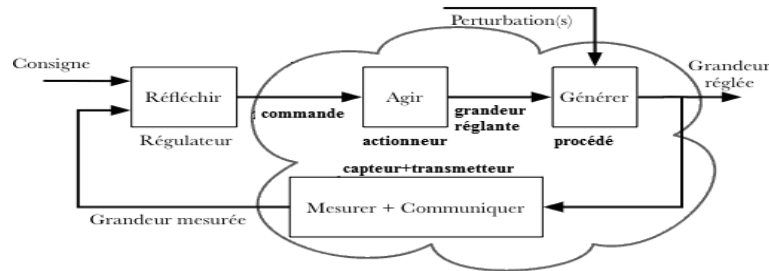
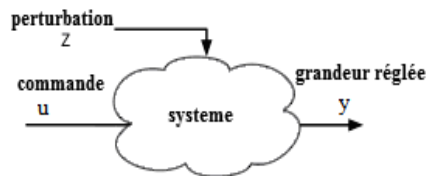


Figure (I.1): Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation.

I.2.4.Fonctionnement en boucle ouverte

On parle de fonctionnement en boucle ouverte (figure I.2), quand c'est l'opérateur qui contrôle l'organe de réglage [35].



Figure(I.2): Le système en boucle ouverte.

I.2.5.Fonctionnement en boucle fermée

C'est le fonctionnement normal d'une régulation. Le régulateur compare la mesure de la grandeur réglée et la consigne et agit en conséquence pour s'en rapprocher (figure I.3) [35].

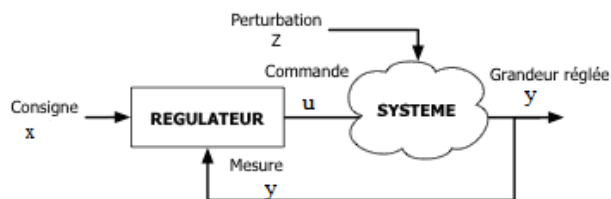


Figure (I.3):Le système en boucle fermée.

I.2.6.Schéma fonctionnel

Le schéma fonctionnel tente de représenter les relations entre les différentes grandeurs physiques des boucles de régulation. Il sera composé uniquement des éléments suivants [35]:

- Ligne de parcours d'une grandeur physique (figure I.4) : Cette ligne représente le parcours d'une même grandeur physique de la boucle de régulation.



Figure(I.4): Ligne de parcours d'une grandeur physique.

- Bloc gain (figure I.5) : Le bloc représente la relation entre deux grandeurs physiques, relation réalisé par un élément de la boucle de régulation :

$$Y(P) = H(P) \times X(P) \tag{I.1}$$

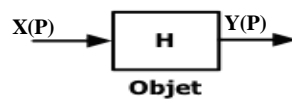
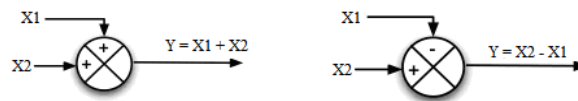


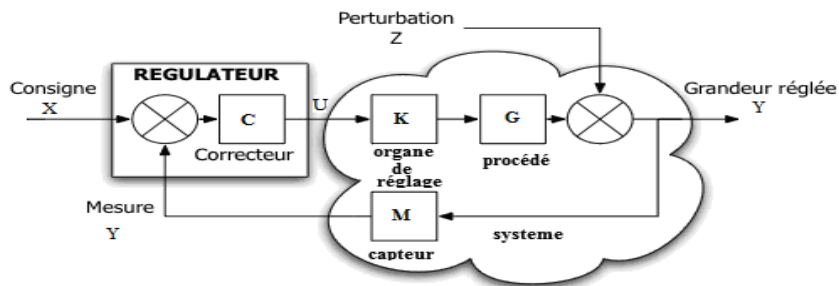
Figure (I.5): Bloc gain.

- Sommateur et soustracteur (figure I.6) : Ce bloc représente l'addition ou la soustraction de grandeurs physique de même nature.



Figure(I.6): Sommateur et soustracteur.

La figure I.7 résume les différentes fonctionnalités dans une boucle de régulation [35].



Figure(I.7):Boucle de régulation.

I.2.7.L'influence des perturbations

Une perturbation est une entrée supplémentaire au système qu'on ne peut pas contrôler ou maîtriser. Ces perturbations ont une influence sur l'asservissement des systèmes (figure. I.8).

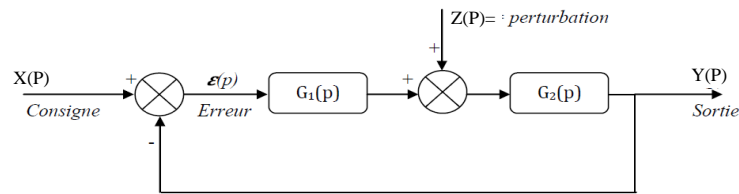


Figure. I.8: Schéma bloc d'un asservissement avec une perturbation.

La fonction de transfert du bloc d'asservissement est représentée comme suit :

Calculons $Y(p)$ en fonction de $Z(p)$, (En posant $X(p) = 0$) :

$$Y_R(p) = \frac{G_2(p)}{1 + G_1(p).G_2(p)} Z(p) \quad (I.2)$$

Calculons $Y(p)$ en fonction de $X(p)$, (En posant $Z(p) = 0$) :

$$Y_E(p) = \frac{G_1(p).G_2(p)}{1 + G_1(p).G_2(p)} X(p) \quad (I.3)$$

La sortie totale est :

$$Y(p) = \frac{G_2(p)}{1 + G_1(p).G_2(p)} Z(p) + \frac{G_1(p).G_2(p)}{1 + G_1(p).G_2(p)} X(p) \quad (I.4)$$

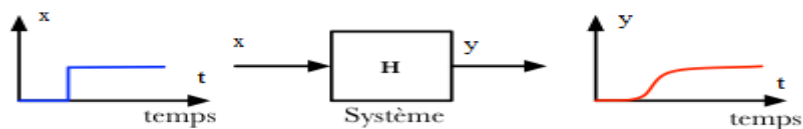
Une manière pratique de caractériser une perturbation sera d'utiliser l'intégrale de la valeur absolue de l'erreur due à une perturbation de charge sous la forme d'un échelon unitaire appliqué à l'entrée du système

I.3.caractéristiques statique et dynamiques d'un procédé

I.3.1.Stabilité

I.3.1.1.Procédés naturellement stables

Un procédé est dit naturellement stable (figure I.9) si à une variation finie de la grandeur réglante X correspond une variation finie de la grandeur réglée Y [35].



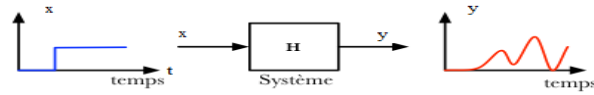
Figure(I.9) : Le système naturellement stable.

Exemple 1:

Grandeur réglée : température d'une pièce ; Grandeur réglant : puissance du radiateur.

I.3.1.2.Procédés naturellement instables :

Un procédé est dit naturellement instable (figure I.10) si à une variation finie de la grandeur réglante X correspond une variation continue de la grandeur réglée Y [35].



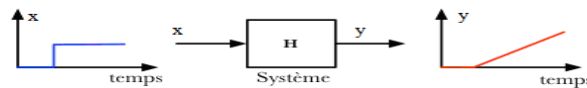
Figure(I.10):Le système naturellement instable.

Exemple 2:

Grandeur réglée : niveau ; Grandeur réglant : débit d'alimentation.

I.3.1.3. Procédés intégrateurs

On dit qu'un procédé est intégrateur (figure I.11), si pour une entrée X constante, la sortie Y est une droite croissante [35].

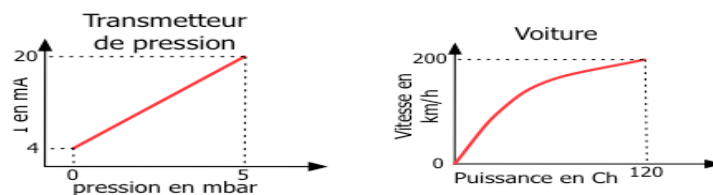


Figure(I.11) : Le procédé intégrateur.

I.3.2. Caractéristiques statiques d'un procédé

I.3.2.1. Courbe caractéristique

La caractéristique statique est la courbe représentative de la grandeur de sortie Y en fonction de la grandeur d'entrée X (figure I.12) [35].



Figure(I.12): Caractéristique statique d'un procédé

I.3.2.2. Gain statique

Le gain statique G_s est le rapport entre la variation de la grandeur de sortie Δy et la variation de la grandeur d'entrée Δx .[35]

$$G_s = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (I.5)$$

I.3.2.3. Erreur statique

L'erreur statique $\varepsilon(P)$ est la différence entre la consigne $X(P)$ et la mesure $Y(P)$ en régime statique [35].

$$\varepsilon(P) = X(P) - Y(P) \quad (I.6)$$

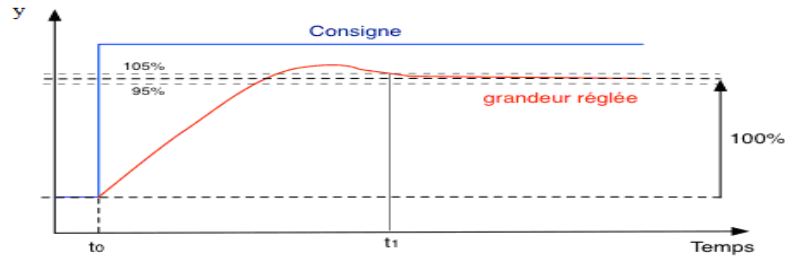
I.3.2.4. Linéarité

Un système linéaire obéit au principe de superposition . L'effet de la somme d'excitations est égal à la somme des effets de chaque excitation [35].

I.3.3. Caractéristiques dynamiques d'un procédé

I.3.3.1. Temps de réponse

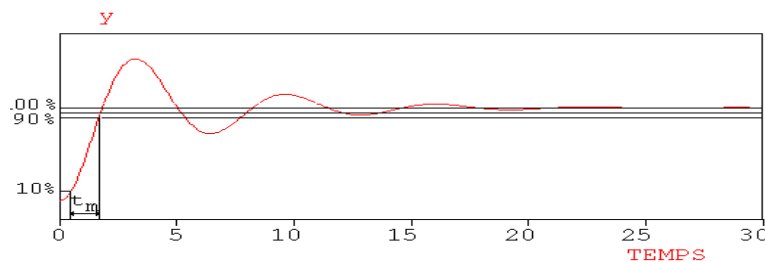
C'est l'aptitude du procédé à suivre les variations de la consigne . Dans le cas d'un échelon de la consigne , la croissance de la grandeur réglée définit les différents temps de réponse . Dans l'exemple ci-dessous de la figure (I.13) , on mesure le temps de réponse à $\pm 5\%$ qui est égal à $t_1 - t_0$ [35].



Figure(I.13): Temps de réponse .

I.3.3.2. Temps de montée

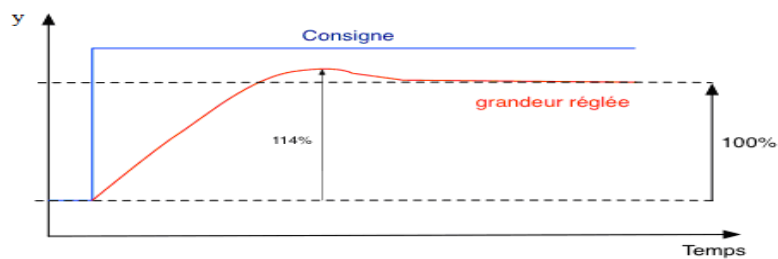
Le temps de montée (figure I.14) est l'intervalle de temps séparant les instants auxquels la réponse indicielle vaut 10% et 90% de la valeur finale [36].



Figure(I.14): Temps de montée.

I.3.3.3. Dépassement

Le premier dépassement permet de qualifier la stabilité d'un système . Plus celui-ci sera important, plus le système sera proche de l'instabilité. Dans certaines régulations, aucun dépassement n'est toléré, dans d'autre un dépassement inférieur à 15 % est considéré comme acceptable. Dans la réponse indicielle ci-dessous (figure I.15) , le premier dépassement est de 14% [35].



Figure(I.15) : Dépassement .

I.4. Action élémentaires (proportionnelle , intégrale , dérivée)

I.4.1. Action proportionnelle :

- Equation temporelle [9]:

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + u_0 \quad \text{ou} \quad u(t) = \frac{1}{Bp} \varepsilon(t) + u_0 \quad (\text{I.7})$$

K_p : Gain ou amplification. Cette constante est exprimée sans unité.

u_0 : Lorsque l'écart $\varepsilon(t)$ est nul , u_0 permet de commander l'actionneur avec une valeur non nulle.

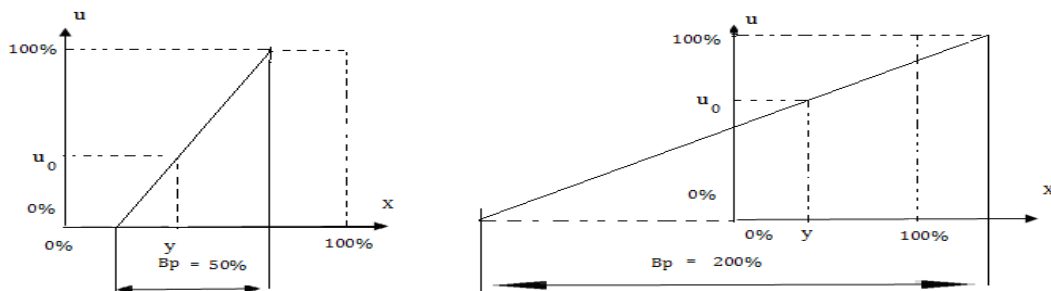
Bp : Bande proportionnelle (figure I.16).

Exemple 3 :

$$Bp=50\% \text{ donne } K_p = \frac{1}{50\%} = \frac{100}{50} = 2$$

Exemple 4 :

$$Bp=200\% \text{ donne } K_p = \frac{1}{200\%} = \frac{100}{200} = 0.5$$



Figure(I.16): Représentation des bandes proportionnelles de 50% et de 200%.

La fonction de transfert se déduit de l'équation temporelle .En effet, pour une variation $\varepsilon(t)$ on a une variation

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) \quad (\text{I.8})$$

- La fonction de transfert est :

$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = K_p = \frac{1}{Bp} \quad (\text{I.9})$$

I.4.1.1. Rôle et domaine d'utilisation de l'action proportionnelle

Le rôle de l'action P est de réduire l'erreur de réglage qui est inversement proportionnelle au gain , mais rend la réponse plus au moins oscillatoire . On choisit un gain qui permet d'avoir un bon taux d'amortissement. On utilise un régulateur P lorsque la précision n'est pas importante . Par exemple, le réglage du niveau d'eau dans un réservoir de stockage. L'action P est souvent suffisante pour régler plusieurs systèmes dans l'industrie . Elle est simple à réaliser (simple amplificateur) d'où son grand avantage [31].



I.4.2. Action intégrale

- Equation temporelle [9]:

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + u_0 = k_i \int_0^t \varepsilon(t) dt + u_0 . \quad (\text{I.10})$$

T_i : constante de temps de l'action intégrale . Cette constante est souvent exprimée en minutes .

K_i : coefficient d'action intégrale ou taux d'action intégrale. K_i est exprimé en min^{-1} .

u_0 : valeur initiale de u . Cette valeur n'est pas réglable directement ; c'est une mise en mémoire de l'évolution de $u(t)$ avant $T=0$.

- Fonction de transfert :

$$C(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{T_i p} = \frac{k_i}{p} . \quad (\text{I.11})$$

I.4.2.1. Rôle et domaine d'utilisation de l'action intégrale

Dans les régulateurs industriels on affiche $1/T_i$, alors T_i est d'autant plus grand que l'action intégrale est faible . Le rôle principal de l'action intégrale est d'éliminer l'erreur statique . Toute fois l'action intégrale est un élément à retard de phase, donc l'augmentation de l'action intégrale (diminué T_i) produit une instabilité car elle déplace le lieu de Nyquist vers la gauche. La valeur optimale est choisie pour satisfaire un compromis stabilité-rapidité. Si le système possède lui même un intégrateur (exemple niveau), l'action I est quand même nécessaire pour annuler l'écart de perturbation car, suite aux variations de la consigne l'intérêt de l'action I est moindre car l'écart s'annule naturellement. Dans l'industrie, on utilisera l'action I chaque fois que nous avons besoin, pour des raisons technologiques, d'avoir une précision parfaite, exemple: la régulation de la pression ou température dans un réacteur nucléaire. De plus, il faut souligner que l'action I est un filtre donc il est intéressant de l'utiliser pour le réglage des paramètres très dynamiques tels que la pression [31]. On peut conclure que l'action intégrale :

- ajoute dans la chaîne de commande une intégration afin d'annuler l'erreur statique en régime permanent.
- améliore la précision.
- mais introduit un déphasage de -90° et risque de rendre le système instable.

I.4.3. Action dérivée

- Equation temporelle [9]:

$$u(t) = T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} . \quad (\text{I.12})$$

T_d : constante de temps de l'action dérivée. Cette constante est, le plus souvent, exprimée en secondes.



- Fonction de transfert :

$$c(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = T_d p . \quad (\text{I.13})$$

I.4.3.1. Rôle et domaine d'utilisation de l'action dérivée

L'action dérivée compense les effets du temps mort du processus. Elle a un effet stabilisateur mais une valeur excessive peut entraîner une instabilité. Sur le plan de Nyquist l'action D permet de déplacer le lieu de transfert vers la droite car elle possède une avance de phase (de +90 degré). La présence de l'action dérivée permet donc d'augmenter la rapidité du système en augmentant le gain sans être inquiété par la stabilité. Dans l'industrie, l'action D n'est jamais utilisée seule mais en général avec l'action intégrale. On recommande de l'utiliser pour le réglage des paramètres lents tels que la température. Par contre en présence des paramètres bruités, l'action dérivée est déconseillée [31].

I.4.4. Résumé

P → L'action P s'apparente à la vitesse et à la rapidité. Elle répond de manière instantanée à l'écart constaté sur la grandeur à régler ; par son gain, elle permet de vaincre les inerties du système. Le régulateur P est appréciable lorsque la précision n'est pas essentielle. Afin de diminuer l'écart de réglage et rendre le système plus rapide, on augmente le gain (on diminue la bande proportionnelle) mais, on est limité par la stabilité du système. Le régulateur P est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante, exemple : régler le niveau dans un bac de stockage.

I → L'action I s'apparente à la position et à la précision. Elle complète et améliore la précision de l'action P en atténuant l'écart de statisme. Elle permet d'éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent. Afin de rendre le système plus dynamique (diminuer le temps de réponse), on diminue l'action intégrale mais, ceci provoque l'augmentation du déphasage ce qui provoque l'instabilité en état fermé. L'action intégrale est utilisée lorsqu'on désire avoir en régime permanent, une précision parfaite, en outre, elle permet de filtrer la variable à régler d'où l'utilité pour le réglage des variables bruitées telles que la pression

D → L'action D s'apparente à l'accélération de la réponse et à la stabilité. Pour le réglage des variables lentes, elle compense les temps morts et les inerties en permettant notamment un amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une perturbation ou à une variation subite de la consigne. Dans la pratique, l'action dérivée est appliquée aux variations de la grandeur à régler seule et non de l'écart mesure-consigne afin d'éviter les à-coups dus à une variation subite de la consigne. L'action D est utilisée dans l'industrie pour le réglage des variables lentes telles que la température, elle n'est pas recommandée pour le réglage d'une variable bruitée ou trop dynamique (la pression). En dérivant un bruit, son amplitude risque de devenir plus importante que celle du signal utile [37].

I.5. Type de régulateurs

I.5.1. Régulateur à action proportionnelle (P)

Le régulateur à action proportionnelle, ou régulateur P est une action simple et puisqu'il construit une commande $u(t)$ proportionnelle à l'erreur $e(t)$.

Cette action s'apparente à un effet de ressort (ressort de rappel) [10].

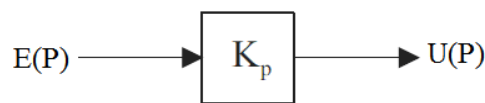
- Loi de commande du régulateur P :

$$u(t) = k_p \cdot e(t) \quad (\text{I.14})$$

- Fonction de transfert du régulateur P :

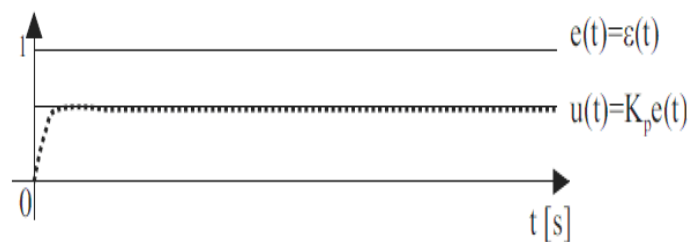
$$G_c(P) = \frac{U(P)}{E(p)} = k_p \quad (\text{I.15})$$

- Schéma fonctionnel du régulateur P :



Figure(I.17): Schéma fonctionnel du régulateur P.

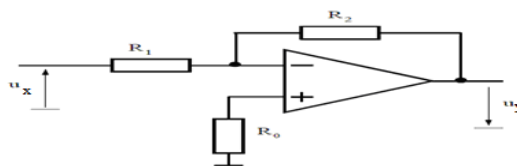
- Réponse indicielle du régulateur P :



Figure(I.18): Réponse indicielle du régulateur P.

- Réalisation pratique du régulateur P :

La figure (I.19) présente le schéma électronique d'un régulateur P [11].



Figure(I.19) : Schéma électronique d'un régulateur P

On peut écrire la relation générale au nœud (-) de l'amplificateur

$$u_x \frac{1}{R_1} = u_y \frac{1}{R_2} \quad (\text{I.16})$$

Et finalement la fonction de transfert est :

$$G_R(P) = \frac{U_y(P)}{U_x(p)} = \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{I.17})$$

I.5.2. Régulateurs à action proportionnelle-intégrale (PI) [10]

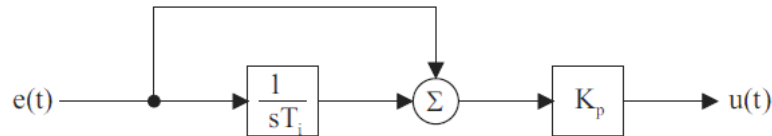
- Fonction de transfert du régulateur PI :

$$C(p) = k_p \cdot \frac{1 + T_i p}{T_i p} \quad (\text{I.18})$$

- Equation temporelle :

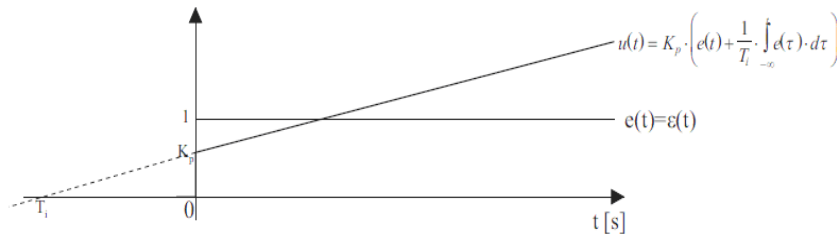
$$u(t) = k_p (\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt) \quad (\text{I.19})$$

- Schéma fonctionnel du régulateur PI :



Figure(I.20): Schéma fonctionnel du régulateur PI

- Réponse indicielle du régulateur PI:



Figure(I.21): Réponse indicielle du régulateur PI.

- Réalisation pratique :

La Figure (I.22) présente le schéma électronique d'un régulateur PI (proportionnel-intégrateur [11])

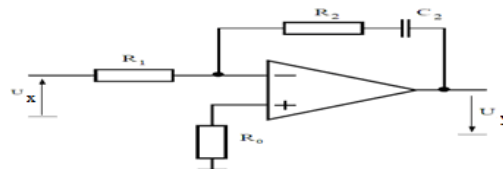


Figure (I.22): Schéma électronique du régulateur PI.

Il possède un circuit de contre-réaction formé d'un condensateur C2 mis en série avec la résistance R2.

On peut écrire la relation générale au nœud (-) de l'amplificateur

$$U_x \frac{1}{R_1} = U_y \frac{1 + P \cdot R_2 \cdot C_2}{P \cdot C_2} \quad (\text{I.20})$$

Et finalement la fonction de transfert

$$G_R(P) = \frac{U_y(P)}{U_x(P)} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + P \cdot R_2 \cdot C_2}{P \cdot R_2 \cdot C_2} \quad (\text{I.21})$$

avec $T_i = R_2 \cdot C_2$. et $K_p = R_2 / R_1$.

I.5.3. Régulateur à action proportionnelle-dérivée (PD) [10]

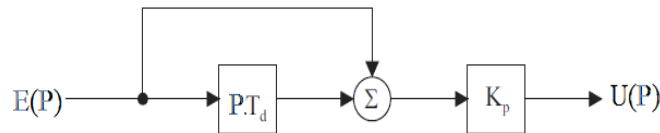
- Fonction de transfert du régulateur PD :

$$c(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = k_p(1 + T_d p). \tag{I.22}$$

- Equation temporelle :

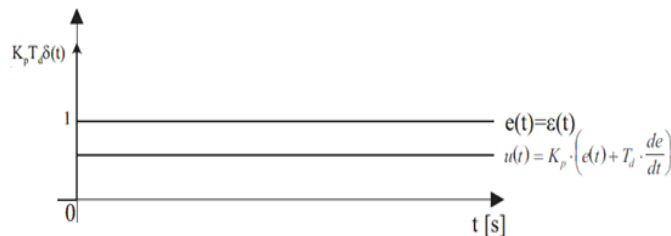
$$u(t) = k_p \left(e(t) + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right). \tag{I.23}$$

- Schéma fonctionnel du régulateur PD :



Figure(I.23): Schéma fonctionnel du régulateur PD.

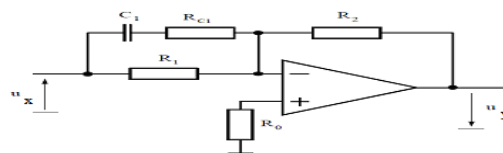
- Réponse indicielle du régulateur PD :



Figure(I.24): Réponse indicielle du régulateur PD.

- Réalisation pratique:

En pratique, il existe un grand nombre de façon de réaliser un régulateur PD, toutefois le choix de l'amplificateur opérationnel reste un point déterminant. La figure (I.25) illustre un tel régulateur [11].



Figure(I.25) : Schéma électronique du régulateur PD.

On peut écrire la relation générale au nœud (-) de l'amplificateur

$$U_x \frac{1 + P.(R_{c1} + R_1)C_1}{1 + P.R_{c1}C_1} \frac{1}{R_1} = U_y \frac{1}{R_2} \tag{I.24}$$

Et finalement la fonction de transfert :

$$G_R(s) = \frac{U_y(P)}{U_x(P)} = \frac{R_2(1 + P.(R_{c1} + R_1)C_1)}{R_1(1 + P.R_{c1}C_1)} \tag{I.25}$$

avec

$$K_p = \frac{R_2}{R_1} \tag{I.26}$$

$$w_z = \frac{1}{(R_{C1} + R_1)C_1} \quad (I.27)$$

$$w_p = \frac{1}{R_{c1}C_1} \quad (I.28)$$

I.5.4.Régulateur Tout ou Rien (TOR) :

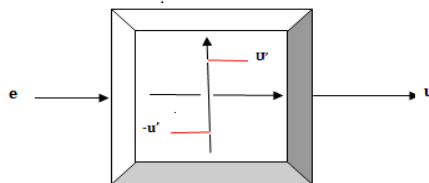
La plus simple des régulations est la régulation par tout ou rien (figure I.26). Elle est utilisée quand la dynamique du procédé est très lente (grande constante du temps). C'est une régulation discontinue. Sa réalisation impose de se fixer une limite inférieure et une limite supérieure de la grandeur réglée.

Lorsque la mesure atteint la limite inférieure l'actionneur, commandé par le régulateur TOR ou tout simplement un relais, prend une position particulière (arrêt ou marche pour une pompe, ouvert ou fermé pour une vanne). De façon analogue, le fait d'atteindre la limite supérieure place l'actionneur dans la position contraire. La mesure oscille donc entre ces deux valeurs extrêmes et sa variation prend une allure en dents de scie. Ce réglage simple, bon marché présente l'inconvénient d'être peu précis.

- Deux états possibles de la commande
- La grandeur réglée oscille autour du point de fonctionnement
- Utilisés pour la commande des systèmes ayant une grande inertie où la précision de régulation n'est pas importante Régulation d'un four à l'aide d'une résistance chauffante un régulateur de figure (I.26) génère la grandeur de commande "u", en fonction de l'écart "e".

$$u = \begin{cases} u' = \bar{u} & \text{si } e > 0. \\ -u' = \underline{u} & \text{si } e \leq 0. \end{cases} \quad (I.29)$$

\bar{u} et \underline{u} sont des nombres réels fixes, suivant les applications on choisit : ($\underline{u} = 0$) ou ($u = -\bar{u}$). On peut réaliser un régulateur tout ou rien par : interrupteur et relais.



Figure(I.26) : Régulateur Tout Ou Rien (TOR)

I.5.4.Régulateur à action Proportionnel-Intégral-Dérivée (PID)

Le régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivée) est la combinaison des trois actions de base P, I et D. Grâce aux termes P et I, ils permettent l'annulation d'une erreur statique tout en autorisant grâce à l'action D des performances de rapidité supérieures à celles d'un régulateur PI.

Le régulateur PID est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système industriel. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, et il permet de contrôler un grand nombre de procédés.

I.5.4.1.Principe général :

Le PID est une correction dite "série", c'est-à-dire qu'elle agit à la sortie du comparateur, sur l'erreur. L'erreur est la différence entre la consigne et la mesure. Le correcteur PID agit de 3 manières :

- **Action Proportionnelle (P) :** Elle assure la rapidité. L'erreur est multipliée par un gain K_p . Sur la plupart des régulateurs, on règle la Bande Proportionnelle au lieu de régler le gain du régulateur

$$BP(\%) = \frac{100}{K_p} . \quad (I.30)$$

- **Action Intégrale (I) :** Elle annule l'erreur statique. L'erreur est intégrée et divisée par un gain T_i ,
- **Action Dérivée (D) :** Elle améliore la stabilité. L'erreur est dérivée et multipliée par un gain T_d .

I.5.4.2.Différente structures du régulateur PID

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 [9].

I.5.2.1.Structure parallèle

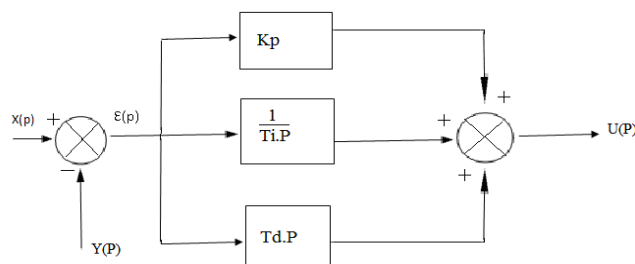
C'est la structure présentée dans la (figure. I.27).

- Équation temporelle :

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + u_0 \quad (I.31)$$

- Équation de transfert :

$$C(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{1}{T_i p} + T_d p \quad (I.32)$$



Figure(I.27): Régulation à structure parallèle.

I.5.2.2. Structure série

C'est la structure présentée dans la (figure. I.28).

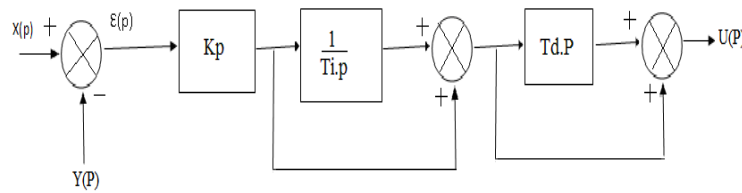
- Équation temporelle :

$$u(t) = \alpha \cdot K_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_p T_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + u_0 \quad (\text{I.33})$$

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

- Équation de transfert :

$$C(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) (1 + T_d p) \quad (\text{I.34})$$



Figure(I.28): Régulateur à structure série.

I.5.2.3. Structure mixte

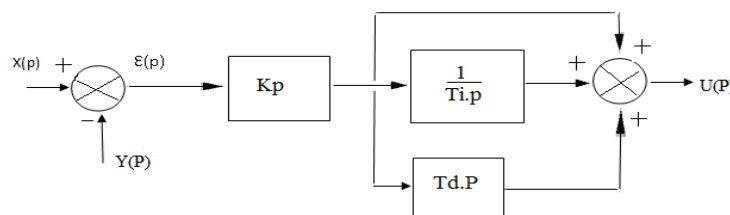
C'est la structure présentée dans la (figure. I.29.). Elle est la plus utilisée actuellement par les constructeurs.

- Équation temporelle :

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_p T_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + u_0 \quad (\text{I.35})$$

- Équation de transfert :

$$C(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right) \quad (\text{I.36})$$



Figure(I.29) : Régulateur à structure mixte (classique).

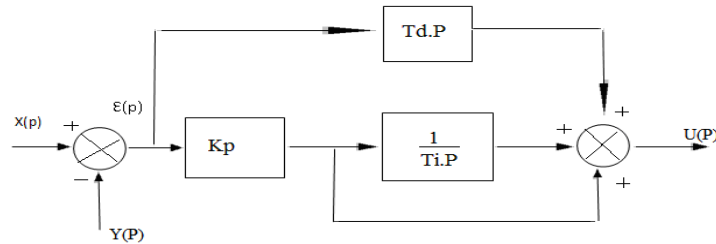
D'autres structures mixtes existent aussi comme par exemple (figure I.30) :

- Equation temporelle :

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + u_0 \quad (\text{I.37})$$

- Fonction de transfert :

$$C(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) + T_d p \quad (\text{I.38})$$



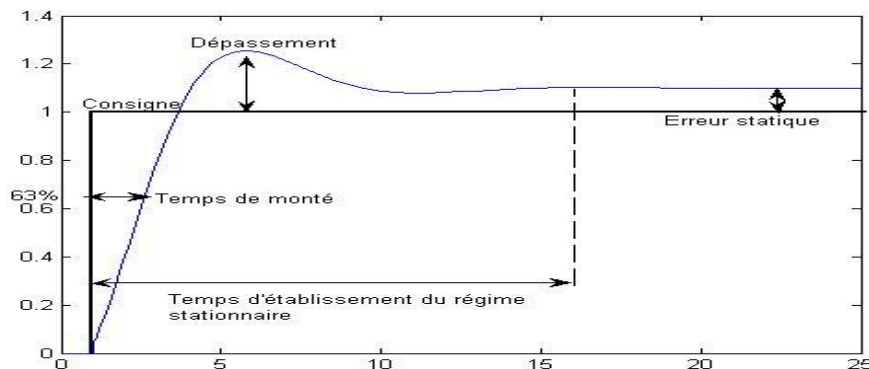
Figure(I.30) : Régulateur à structure mixte (variante).

I.5.4.3. 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 :

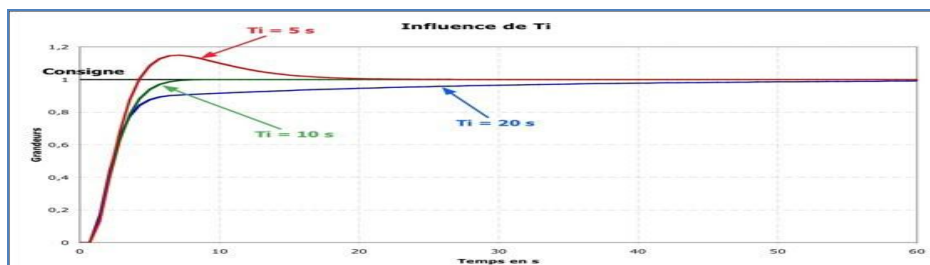


Figure(I.31) : La réponse type procédé stable.

I.5.4.4. Influence des performances sur les régulateurs PID [12]

I.5.4.4.1. Influence de T_i :

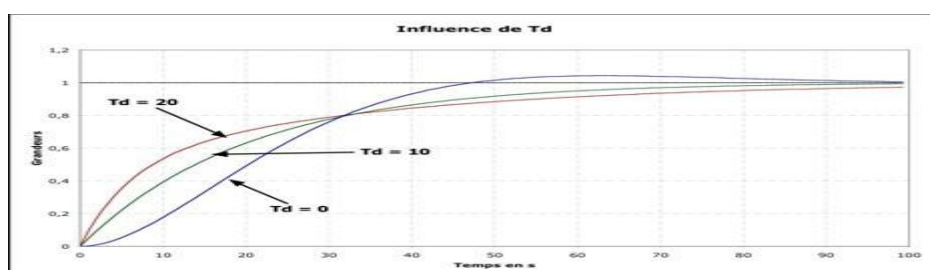
Lorsque $1/T_i$ augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement au régime stationnaire s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique nulle. Donc plus ce paramètre est élevé, plus la réponse du système est ralentie.



Figure(I.32) : Courbe d'influence de T_i .

I.5.4.4.2. 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.33) : Courbe d'influence de T_d .

Quand augmente	Stabilité	Rapidité	Précision
T_i	Augmente	Diminue	Pas d'influence
T_d	Diminue	Augmente	Pas d'influence

Tableau (I.1) : l'influence de T_i et de T_d avec les régulateurs PID.



I.5.4.5. Loi de commande du régulateur PID :

$$u(t) = k_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(\tau) \cdot d\tau + T_d \cdot \frac{de}{dt}) \quad (I.39)$$

I.5.4.6. Fonction de transfert du régulateur PID :

$$G_c(P) = \frac{U(P)}{E(P)} = k_p \cdot \frac{1 + P \cdot T_i + P^2 T_i \cdot T_d}{P \cdot T_i} \quad (I.40)$$

I.6. Méthodes Industrielles De Synthèse D'un régulateur PID :

Le problème de synthèse d'un régulateur PID n'est plus alors qu'un problème de réglage des actions proportionnelle, intégrale et dérivée. Comme les méthodes doivent être utilisées en milieu industrielle, elles doivent d'être rapides et simples à mettre en œuvre, tout en étant le plus précises et efficaces possible. Il existe deux types de méthodes : empiriques et analytiques [38].

I.6.1. Méthodes empiriques

I.6.1.1. Méthode de Ziegler Nichols

C'est une méthode empirique qui permet d'ajuster les paramètres d'un régulateur PID. Pour commander un processus à partir des mesures sur sa réponse indicielle [13].

I.6.1.1.1. Mesures sur la réponse en boucle ouverte

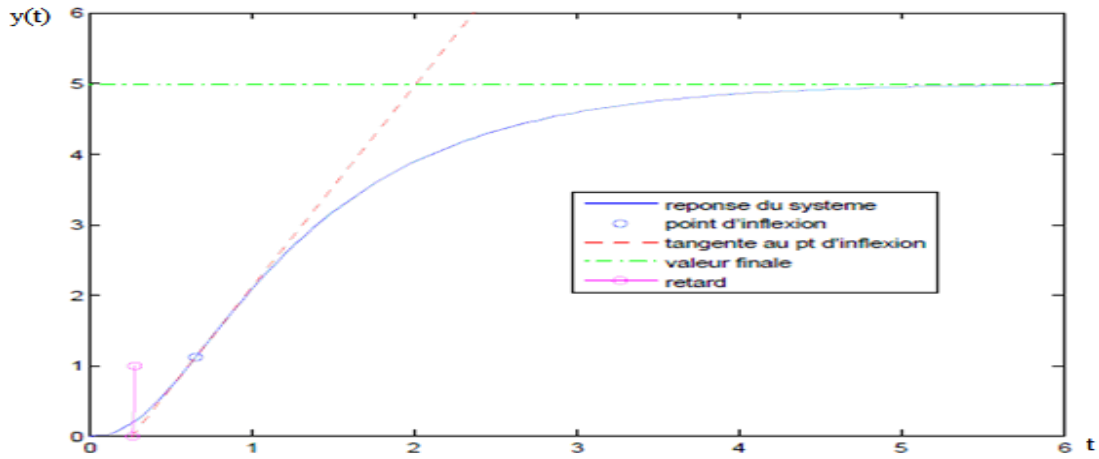
La réponse à un échelon d'amplitude E_0 , sans oscillations, sera assimilée à celle d'un premier ordre avec retard. On devra mesurer la pente de la tangente au point d'inflexion à, la valeur finale M et le retard r (figure I.34). La tangente au point d'inflexion est assimilée à la tangente à l'origine du système du premier ordre sans retard. Si τ 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 (I.36) : $c(p) = k_p \cdot (1 + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_d \cdot p)$

Action	K_p	T_i	T_p
P	T_a/T_u		
PI	$0.9 T_a/T_u$	$3.3 T_u$	
PID	$1.2 T_a/T_u$	$2.0 T_u$	$0.5 T_u$

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



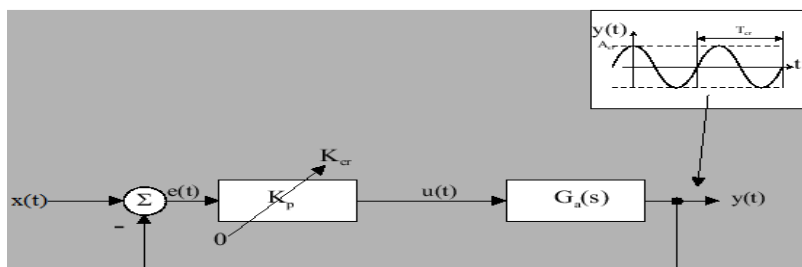
Figure(I.34) : Identification en boucle ouverte par Ziegler-Nichols

I.6.1.1.2. 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) (figure I.35). 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 K_p	T_i	T_d
P	$0,5.K_{cr}$		
PI	$0,45.K_{cr}$	$0,83.T_{ocs}$	
PID	$0,6.K_{cr}$	$0,5.T_{ocs}$	$0.125T_{ocs}$

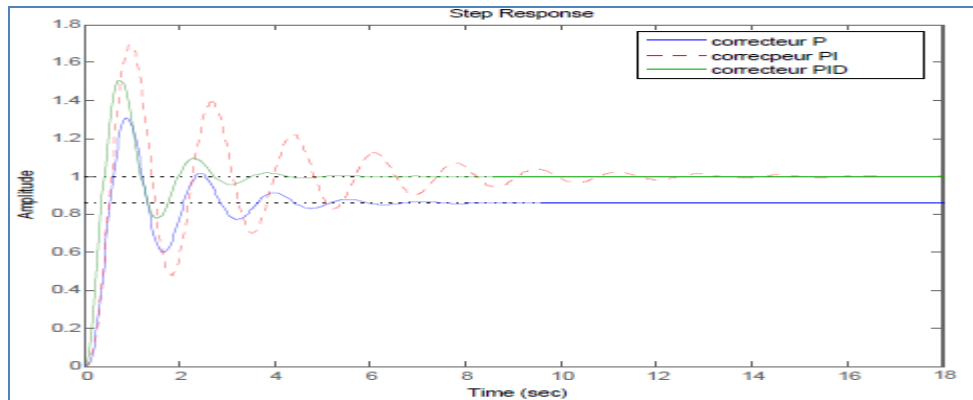
Tableau I.3: Réglage d’un correcteur P, PI ou PID selon Ziegler Nichols en BF.



Figure(I.35): Mise en oscillation d'un système par contre-réaction.

La figure (I.36) 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 et sans erreur statique.



Figure(I.36) : Comparaison des correcteurs de Ziegler Nichols.

I.6.1.1.2. Méthode de Chien-Hrones-Reswick

Cette méthode s'appuie sur un modèle de processus de type [38]:

$$F(s) = \frac{K.e^{-T.s}}{1 + \tau.s} \quad (\text{I.41})$$

Le réglage (Table I.4) se fait à partir d'un essai en boucle ouverte et permet de régler le correcteur selon que le système bouclé travaille en régulation ou en poursuite.

Régulateur	Réglage en régulation	Réglage en poursuite
P	$K_p = 0.3\tau/T$	$K_p = 0.3\tau/T$
PI	$K_p = 0.6\tau/T, T_i = 4T$	$K_p = 0.6\tau/T, T_i = 1.2\tau$
PID	$K_p = 0.95\tau/T, T_i = 2.4T, T_d = 0.4T$	$K_p = 0.6\tau/T, T_i = \tau, T_d = 0.5T$

Tableau I.4 : Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon la méthode de Chien-Hrones-Reswick .

I.6.2. Réglages après identification du procédé

Dans le but d'améliorer la précision des méthodes précédentes, on identifie dans un premier temps le système à commander.

I.6.2.1. Modèle non évolutif:

Le modèle choisi étant de Broïda [38] :

$$F(P) = \frac{K.e^{-T.P}}{1 + \tau.P} \quad (\text{I.42})$$

Le choix du régulateur est lié au rapport τ/T selon le tableau I.5 :



$\tau/T > 20$	TOR
$10 < \tau/T < 20$	P
$5 < \tau/T < 10$	PI
$2 < \tau/T < 5$	PID
$\tau/T < 2$	Cascade

Tableau I.5 : Choix du régulateur selon le modèle non évolutif.

Les réglages se font selon la structure du régulateur PID de la manière suivante :

Action	P	PI série	PI parallèle	PID série	PID parallèle	PID mixte
K_p	$0.8 \tau / KT$	$0.8 \tau / KT$	$0.8 \tau / KT$	$0.8 \tau / KT$	$0.8 \tau / KT$	$0.8 \tau / KT$
T_i	max	τ	$K\tau/0.8$	τ	$K\tau/0.75$	$\tau + 0.4T$
T_d	0	0	0	0.4τ	$0.35\tau/K$	$T\tau/(T + 2.5\tau)$

Table I.6 : Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon le modèle non évolutif.

1.6.2.2. Modèle évolutif :

L'identification est faite en boucle fermée. On relève le gain critique K_{cr} et les périodes des oscillations de pompage T_{ocs} . Le modèle choisi étant plus simple [22].

$$F(P) = \frac{K.e^{-T.P}}{s} \quad (I.43)$$

On obtient alors les paramètres K et T , qui s'écrivent $K = \frac{K_{cr}}{6.28T_{acs}}$ et $T = \frac{T_{ocs}}{4}$. Le choix du régulateur

et le réglage des paramètres successifs sont donnés par le tableau suivant :

$KT > 0.05$	TOR
$0.05 < KT < 0.1$	P
$0.1 < KT < 0.2$	PI
$0.2 < KT < 0.5$	PID
$KT < 0.5$	Cascade

Tableaux I.7 : Choix du régulateur selon le modèle évolutif.

Les réglages se font selon la structure du régulateur PID de la manière suivante :

Action	P	PI série	PI parallèle	PID série	PID parallèle	PID mixte
K_p	$0.8 / KT$	$0.8 / KT$	$0.8 / KT$	$0.8 / KT$	$0.8 / KT$	$0.8 / KT$
T_i	max	$5T$	$KT^2/0.15$	$4.8T$	$KT^2/0.15$	$5.2T$
T_d	0	0	0	$0.4T$	$0.35 / K$	$0.4T$

Tableau I.8 : Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon le modèle évolutif.



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 :

Les colonies de fourmis sont des sociétés d'insectes sociaux. Elles sont des systèmes distribués, en dépit de la simplicité de leurs groupes, elles présentent une organisation très structurée sociale. En conséquence de cette organisation, les colonies de fourmis peuvent accomplir des tâches complexes qui, dans certains cas dépassent les capacités individuelles d'une seule fourmi. Le domaine d'études des algorithmes de fourmis issus de l'observation du comportement des fourmis réelles, les utilise comme une source d'inspiration pour la conception de nouveaux algorithmes pour la solution de problèmes d'optimisation. L'idée principale est que les principes d'auto-organisation qui permettent un comportement hautement coordonné des fourmis réelles peuvent être exploités afin de coordonner les populations d'agents artificiels qui collaborent pour résoudre des problèmes informatiques. Plusieurs aspects différents du comportement des colonies de fourmis ont inspiré les différents types d'algorithmes de fourmi. 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 inspiré des fourmis réelles peuvent résoudre des problèmes d'optimisation complexes.

II.2. Système de colonie de fourmis

II.2.1.La sociabilité de la fourmi

La vie en société est caractérisée par les échanges de signaux entre ses individus, la société est alors une unité qui repose sur le transfert d'informations [14]. Toutes les fourmis vivent en société. La sociabilité des insectes est dite avancée, si l'espèce présente les caractéristiques suivantes [30]:

- La superposition, dans un même groupe social, de plusieurs générations adultes .
- La cohésion entre les membres du groupe.
- La division des rôles avec spécialisation d'un nombre restreint d'individus dans, la fonction reproductrice, les autres étant stériles (au moins partiellement) et s'engagent dans des actes altruistes.
- L'élevage coopératif des jeunes.

II.2.2.La communication

Les insectes sociaux en général, et les fourmis en particulier, ont développé des mécanismes de communication très élaborés pour les insectes sociaux et les animaux en général. Il a été défini douze types de réponse mettant en œuvre une forme de communication [29] :

- L'alarme .
- L'attraction simple .
- Le recrutement (pour une source de nourriture ou un site de nidification) .



- L'entretien et la transition.
- La trophallaxie (échange de liquides) .
- L'échange d'aliments solides .
- Les effets de groupe (augmentation ou inhibition d'une activité) .
- La reconnaissance des apparentés ou de caste.
- La détermination de caste .
- La compétition pour la reproduction .
- Le marquage du territoire et du nid .
- La reproduction (différenciation du sexe, de l'espèce, de la colonie...).

La communication chimique est la plus présente chez les fourmis. Les phéromones (mélange d'hydrocarbures) sont à la base de la communication de nombreuses espèces. Elle présente les avantages suivants [30]:

- La diversité des molécules pouvant intervenir permet de fournir des informations qualitatives .
- La stabilité du signal pour une molécule peu volatile permet d'assurer une certaine permanence .

Par contre, les principaux inconvénients de la communication chimique sont les suivants :

- Elle n'offre que peu d'informations sur la direction .
- Sa propagation est relativement lente et elle est peu adaptée pour la transmission de messages urgents ou pour l'intégration de deux stimulations successives sous une forme temporelle .

II.2.3.La division du travail

Une des caractéristiques particulièrement intéressante est la capacité des sociétés d'insectes à se partager le travail. Les tâches que doivent accomplir les ouvrières sont en effet multiples [14]:

- La recherche de nourriture.
- La défense du nid.
- L'entretien et la construction du nid.
- L'entretien des larves et leur approvisionnement en nourriture.

Toutes ces activités, dont l'importance est variable dans le temps et l'espace, doivent être assurés simultanément pour la survie et le développement de la colonie.

II.2.4.Capacités individuelles

Les capacités individuelles des fourmis peuvent servir de modèle à des systèmes artificiels tant leur adaptation à leur environnement qui peut être efficace. Nous citons par exemple les points suivants [14]:

- Individuellement, une fourmi possède certaines capacités d'apprentissage, et notamment quand elle se déplace autour du nid.

- les fourmis sont capables de faire des bonds impressionnants et dotées de capacités visuelles inhabituelles ce qui les a rendues difficiles à observer.

II.2.5. Les phéromone des fourmis

Les fourmis sont équipées de glandes produisant des phéromones. Les phéromones sont des substances chimiques odorantes que seules les fourmis peuvent sentir. Ce signal chimique est formé d'hydrocarbures cuticulaires qui portent l'information à la fois sur l'espace, la société mais aussi sur la voisine et le stade auxquelles appartiennent les fourmis rencontrées. C'est en sécrétant cette substance qu'une fourmi éclaireuse marque le chemin qu'elle a utilisé et revient avertir ses semblables de la présence de nourriture ou d'un danger, ainsi que de sa localisation [40].

II.2.6. Expérience du double pont binaire

Dans la figure II.1- (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 plusieurs fourmis ont déjà emprunté le pont, plus de 90% d'entre elles sélectionnent le chemin le plus court [28]: les fourmis convergent donc assez rapidement.

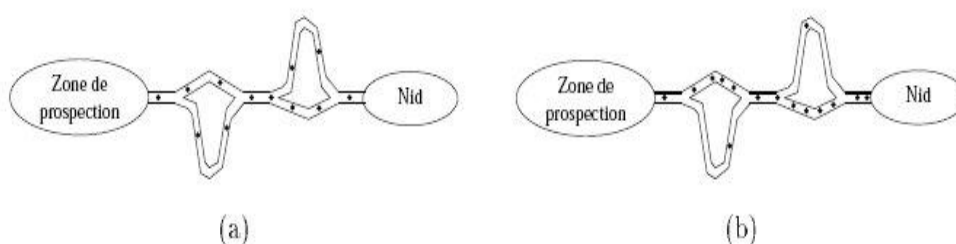


Figure (II.1) : Expérience du double pont binaire.

II.2.7. Effet de la coupure d'une piste de phéromone

Cette fois, les fourmis sont en train de suivre une piste de phéromones, comme présenté à la figure II.2 -(a). 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. Le nombre de fourmis qui passent par la droite va augmenter (c), 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 [26].

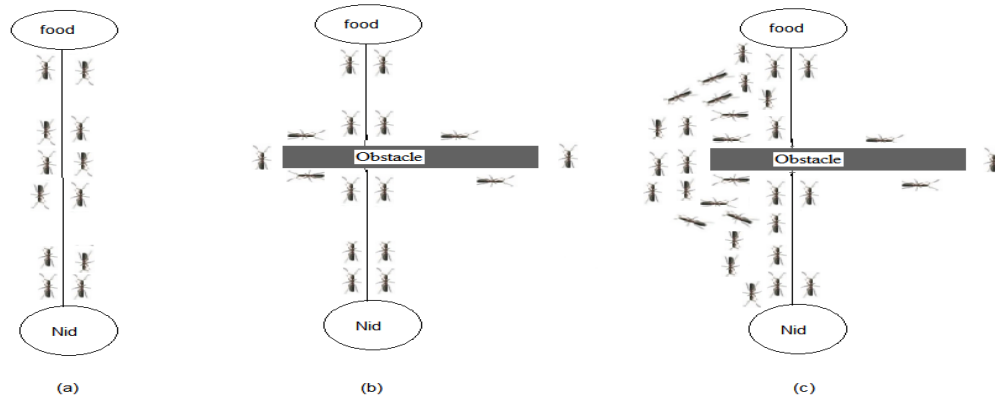


Figure (II.2) : Effet de la coupure d'une piste de phéromone.

II.2.8. Similarités et différences avec les fourmis réelles

Les fourmis artificielles 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 [26].

II.2.8.1. Les points communs [16]

- Colonie de groupes coopérants : une colonie de fourmis réelles ou artificielle est un ensemble d'entités non-synchronisés, qui se rassemblent pour trouver une "bonne" solution au problème considéré.
- Pistes de phéromones : Ces entités communiquent par le mécanisme des pistes de phéromone.
- Évaporation des phéromones : Ce mécanisme permet d'oublier ce qui s'est passé avant. Ce qui permet de diriger sa recherche vers de nouvelles directions, sans être contrainte par ses anciennes décisions.
- Recherche du plus court chemin : Les fourmis réelles et artificielles prennent partagent le plus court chemin reliant un point de départ (le nid) à des sites de destination (la nourriture).
- Déplacement locaux : Les fourmis réelles et artificielles se déplacent entre sites adjacents du terrain.
- Choix aléatoire lors des transitions : La transition des fourmis réelles et artificielles se fait au hasard et dépend de l'information locale déposée sur le site courant.

II.2.8.2 Les Différences [16]

Les fourmis artificielles possèdent des caractéristiques que ne possèdent pas les fourmis réelles

- Elles vivent dans un monde non-continu : Leurs déplacements consistent en des transitions d'état.



- Mémoire de la fourmi : Les fourmis réelles ont une mémoire très limitée. Tandis que nos fourmis artificielles mémorisent leurs historiques et peuvent retenir des données sur leurs performances.
- Nature des phéromones déposées : Les fourmis réelles déposent une information physique sur la piste qu'elles parcourent, là où les fourmis artificielles 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 artificielles déposent une quantité de phéromone proportionnelle à la qualité de la solution qu'elles ont découverte.
- Retard dans le dépôt de phéromone : Les fourmis artificielles attendent d'avoir terminé la construction de leur solution pour mettre à jour les pistes de phéromones.
- L'anticipation : la fourmi étudie l'état local et les états suivants pour faire son choix.
- 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.3. Optimisation par les colonies de fourmis (Ant Colony Optimization) (ACO)

II.3.1. Introduction

L'optimisation par les colonies de fourmi (ACO) est une approche à base de population présentée par Marco Dorigo et collègues et inspirée par le comportement des colonies de fourmi réelles. Ce concept a été appliqué aux problèmes d'optimisation combinatoires qui recherchent la solution optimale selon les contraintes du problème [23] [24].

Dans l'algorithme d'ACO, les fourmis artificielles sont définies en tant qu'agents simples qui construisent à plusieurs reprises des solutions candidates présentées comme des solutions partielles. Des solutions partielles sont vues comme des états du procédé de construction et la fourmi transite d'un état à l'autre jusqu'à la construction de la solution complète.

Dans un cadre probabiliste, chaque fourmi, se déplaçant de l'état i à l'état j qui est guidée par la trace de phéromone artificiel $\tau(i, j)$. Chaque fourmi met à jour les traces de phéromone ($\tau(i, j)$) après chaque construction d'une solution complète. Le but de ce processus de mise à jour est l'augmentation de la probabilité de choisir les traces qui favorisent le chemin vers la bonne solution, tout en diminuant tous les autres traces.

Les algorithmes d'ACO ont été appliqués avec succès aux problèmes combinatoires d'optimisation comme le voyageur de commerce [25], la tâche quadratique [27] et le cheminement de véhicule [22].



II.3.2. L'exploration

Elle permet la construction de nouvelles solutions en choisissant d'une manière probabiliste les composants de la solution : une probabilité plus élevée est donnée aux composants avec une trace de phéromone forte [39].

II.3.3. L'exploitation

Elle est basée sur le choix des composants avec une trace de phéromone forte et un coût décroissant. En outre la phéromone est mise à jour dans deux étapes. Une règle local mettant à jour la phéromone est appliqué après qu'une fourmi ait établi une solution candidate au problème. Une fois que toutes les fourmis ont établi des solutions, seulement la bonne solution est employée pour augmenter globalement la trace de phéromone [39].

II.3.4. La diversification

La mise à jour locale a un effet de diversification. Chaque fois qu'une fourmi choisit un composant de la solution, la quantité de la trace de phéromone associée à ce choix est diminuée, et il devient moins attrayant que d'autres [39].

II.3.5. L'intensification

La mise à jour globale a un effet d'intensification parce qu'elle permet d'intensifier la recherche dans le voisinage de la bonne solution calculée pendant la prochaine itération [39].

II.4. Formulation mathématique de l'ACO

II.4.1. 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 [17].

II.4.2. 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 [15]:

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



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.4.3. 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 [15]:

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

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

II.4.4. Evaporation de la trace de phéromone

Quand une fourmi k se déplace vers le nœud suivant, le phéromone s'évapore de tous les arcs (i,j) selon la relation [15]:

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

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 nœud 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 meilleure 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 meilleure fourmis est prise comme :

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

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:

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

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 meilleur. 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.4.5. L'algorithme d'ACO

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.3 comme suit [15]:

- **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 $\tau_{ij}^1 = 1$ pour tous les arcs (i,j) . Mettez le nombre d'itération $l=1$.

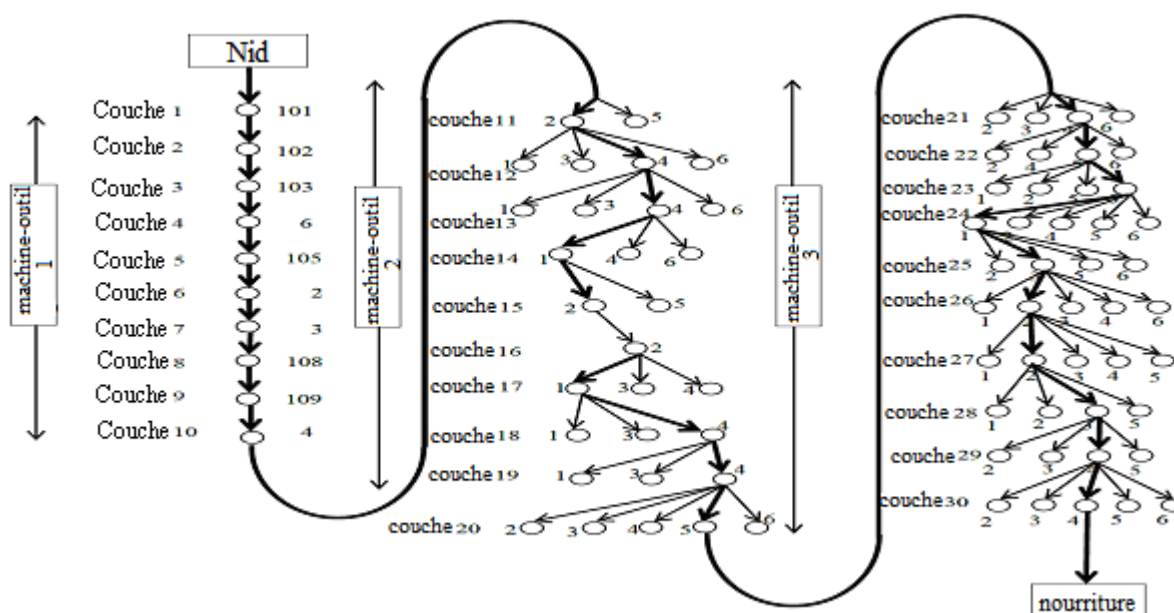


Figure (II.3) : Graphe multicouches du déplacement des fourmis.



- **Etape 2 :**

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

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

(b). Le chemin spécifique (ou des valeur 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 l'image(II.3) est basé sur les probabilité 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 supposer 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 valeur de fourmis objectives correspondant aux chemins complets (les valeur de l'espace $X^{(k)}$ ou les valeur de x_{ij} choisi pour toutes les variable de l'espace $i=1, 2, \dots, n$ par la fourmis 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 différent 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 réalisées, supposez que les fourmis rentrent à la maison et recommence de nouveau dans la recherche de nourriture. Poser le nombre d'itération $l=l+1$ et mettre à jour les phéromones sur différent 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 :

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

$\Delta\tau_{ij}^k$ est le 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 ρ 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 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.4.6. La fourmi se comporte comme un automate

L'automate de la figure (II.4) résume le comportement individuel d'une fourmi. n_s représente le nombre de sites que la fourmi mémorise à un instant donné (le nombre de sites de chasse dans la mémoire de la fourmi). e_j donne le nombre d'échecs successifs du site s_j mémorisé (le nombre d'échecs successifs rencontrés sur le site s_j) [15].

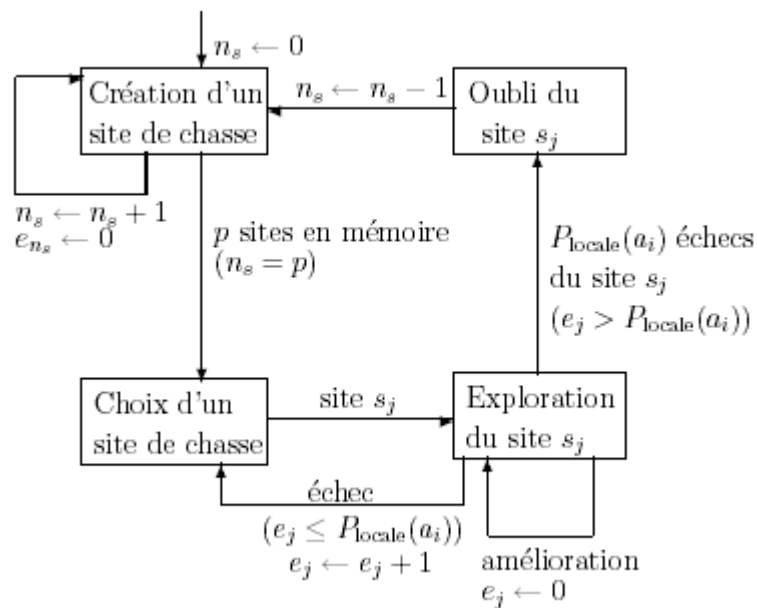


Figure (II.4) : Automate représentant le comportement individuel d'une fourmi.

II.5. Exemple D'application

Nous avons choisi de chercher l'optimum global de la fonction de Rastrigin définie par :

$$f(x, y) = 20 + x^2 + y^2 - 10 \cdot (\cos(2\pi \cdot x) + \cos(2\pi \cdot y)) \quad (\text{III.13})$$

Cette fonction, comme le montre la figure (II.5) , a plusieurs optimums locaux et n'admis qu'un seul optimum global défini au point (0,0) tel que $f(0,0) = 0$.

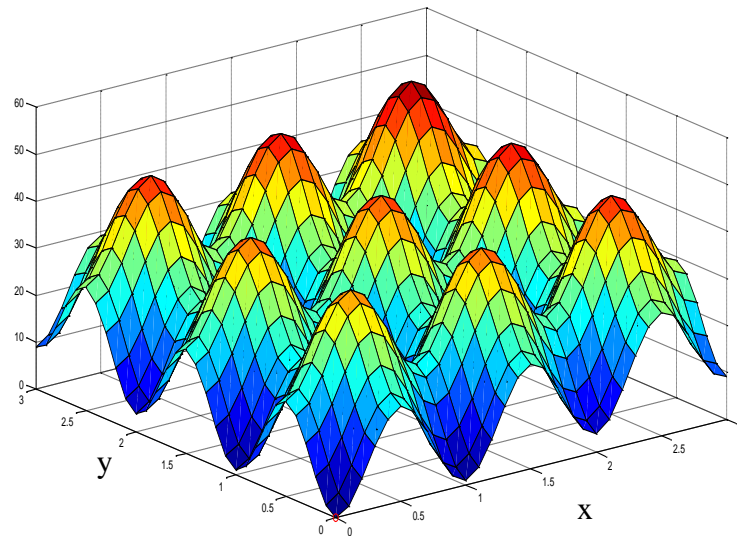


Figure (II.5) : Fonction de Rastrigin avec optimum global au point $f(0,0)=0$.

II.6.Conclusion

Les algorithmes de colonies de fourmis sont des systèmes formant une classe des métaheuristiques récemment proposée pour résoudre des problèmes d'optimisation difficile, qu'il n'est pas possible de résoudre avec des méthodes classiques. Ces algorithmes s'inspirent des comportements collectifs de dépôt et de suivi de piste observés dans les colonies de fourmis réelles. Une colonie d'agents simples (les fourmis) communiquent indirectement via des modifications dynamiques de leur environnement (les pistes de phéromone) et construisent ainsi une solution à un problème, en s'appuyant sur leur expérience collective.

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 optimaux (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.

Nous avons appliqué le régulateur PID-ACO sur des systèmes d'ordre différents définis dans [20] à savoir un système du second ordre avec retard pur, un système du troisième ordre, un système du quatrième ordre et un moteur à courant continu à excitation séparée.

III.2. Critères de performance

III.2.1. Paramètres caractéristiques du régulateur PID [18]

Le régulateur PID largement utilisé dans les systèmes de contrôle industriel est composé d'une action de commande proportionnelle, d'une action de contrôle intégral et d'une action de contrôle dérivé. La figure III.1 montre le schéma du régulateur PID sous sa forme parallèle simple.

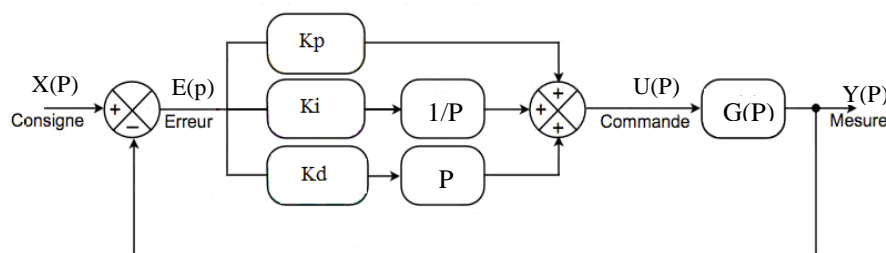


Figure III.1: Schéma de principe d'un régulateur PID

Le signal de commande est donnée par

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{III.1})$$

La fonction de transfert du régulateur PID en transformée de Laplace est définie par :

$$C(P) = K_p + \frac{K_i}{P} + K_d.P \quad (\text{III.2})$$

où K_p , K_i et K_d sont les gains proportionnels, intégrale et dérivé, respectivement.

L'action proportionnelle K_p améliore le temps du système et réduit l'erreur en régime permanent. Cela signifie qu'en augmentant le gain proportionnel, le signal de contrôle augmente pour corriger l'erreur. Toutefois, une grande valeur de K_p peut produire un dépassement grand et le système peut être oscillant.

L'action intégrale K_i est utilisée pour éliminer l'erreur en régime permanent. Malgré le contrôle intégral, en réduisant l'erreur en régime permanent, il peut engendrer une réponse transitoire mauvaise.

L'action dérivé K_d aura pour effet d'augmenter l'amortissement dans le système, la réduction du dépassement et l'amélioration de la réponse transitoire.

Comme indiqué précédemment, chacun des trois actions du régulateur PID classique a un effet sur la réponse du système en boucle fermée. Le tableau (III.1) résume les effets de chacun des paramètres de régulation PID. Il sera connu que toute évolution de l'un des trois gains aura une incidence sur la caractéristique de la réponse du système.

La réponse en boucle fermée	Tempe de montée	Dépassement	Un temps d'établissement	Erreur en régime permanent
K_p Croissant	rapide	Augmenter	Petit / Non effet	Diminuer
K_i Croissant	rapide	Augmenter	augmenter	Diminuer
K_d Croissant	Petit / Non effet	Diminuer	Diminuer	Petit / Non effet

Tableau III.1: Les caractéristiques du régulateur PID.

III.2.2. Performances dans le régime transitoire [18]

Pour concevoir le régulateur proposé, quatre caractéristiques importantes de la sortie du système sont utilisés. En outre, ils seront définis comme suit :

Le temps de montée (t_m) est défini comme le temps requis pour l'étape de la réponse à augmenter de 10 % à 90 % de la valeur de consigne.

Le temps d'établissement (t_r) est défini comme le temps requis pour l'étape de réponse à rester à 2% de la valeur de consigne.

Le dépassement (D) est le maximum de la valeur de crête qui sera atteinte au cours d'un point de la consigne. Si y_{\max} désigne la valeur maximale de y et y_{ss} indique la valeur de l'état d'équilibre de celui-ci, le dépassement maximal sera exprimé comme suit:

$$D = y_{\max} - y_{ss} \quad (\text{III.7})$$

III.2.3. Intégrales faisant intervenir 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.2). 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 [19].

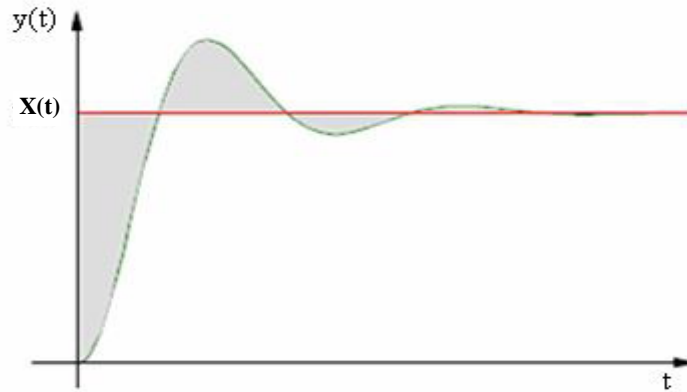


Figure (III.2) : Intégrale faisant intervenir l'erreur.

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 :

$$\text{IAE} = \int_0^t |e(t)| dt = \int_0^t |x(t) - y(t)| dt \quad (\text{III.8})$$

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 :

$$\text{ISE} = \int_0^t e(t)^2 dt = \int_0^t (x(t) - y(t))^2 dt \quad (\text{III.9})$$

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

$$\text{ITAE} = \int_0^t t|e(t)| dt = \int_0^t t|x(t) - y(t)| dt \quad (\text{III.10})$$

Et également l'intégrale du produit de l'erreur quadratique par le temps, donnée par :

$$ITSE = \int_0^t te(t)^2 dt = \int_0^t t(x(t) - y(t))^2 dt \quad (III.11)$$

III.3. Optimisation par la méthode de Ziegler-Nichols (Z-N)

Ce procédé est basé sur la réponse du système en boucle fermée. Initialement les gains K_i et K_d sont remis à zéro . Le gain proportionnel K_p est augmenté jusqu'à ce que l'oscillation du processus se produise . Qu'il atteigne le gain critique K_{cr} valeur à laquelle la sortie de la boucle commence à osciller . Utilisation de la valeur d'un gain de K_{cr} critique ou ultime et l'oscillation ou de la période ultime T_{ocs} , les valeurs des paramètres du PID (K_p , K_i et K_D) sont données en termes de gain ultime et de la période ultime (Ziegler et Nichols, 1942) [18] :

$$\begin{aligned} K_p &= K_{cr}/2 . \\ K_i &= 1/T_i = 2/T_{ocs} . \\ K_d &= 1/T_d = T_{ocs}/8 . \end{aligned} \quad (III.12)$$

III.4. Optimisation par les colonies de fourmis (ACO)

L'optimisation par les colonies de fourmis (ACO) est une méthode évolutionnaire basé sur le comportement collectif émergent qui s'est avérée efficace dans la résolution des problèmes d'optimisation complexes.

Le régulateur conventionnel PID est une technique bien connue pour le contrôle des processus industriels. 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) qui seront appliquées dans le contrôle du processus comme le montre la figure III.3 [20].

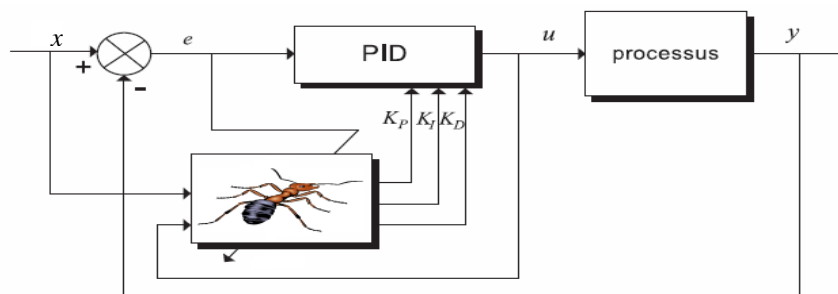


Figure III.3 : Le régulateur PID-ACO

L'organigramme pour le contrôleur PID basé sur l'ACO est présenté sur la figure III.4.

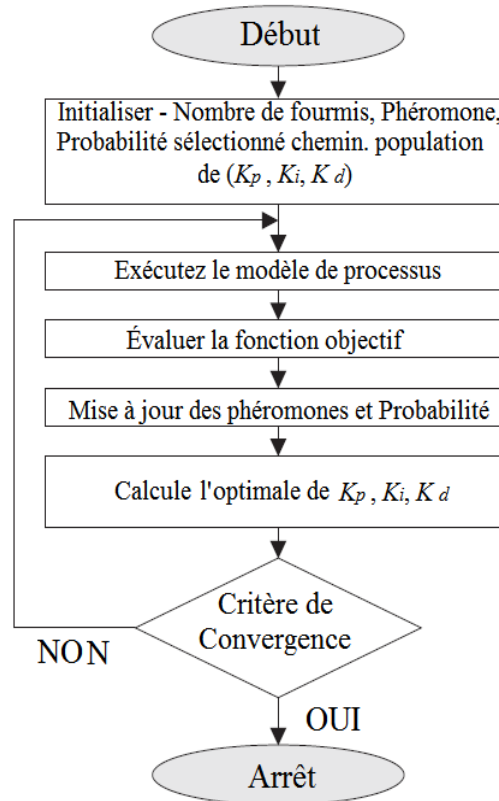


Figure III.4: Organigramme de l'ACO.

Les gains K_p , K_i et K_d du régulateur PID sont générés par l'algorithme ACO pour une installation donnée . Afin d'exploiter l'algorithme ACO , il vaudrait mieux pour représenter notre problème d'optimisation par une voie directe sous la forme de graphe de construction (figure III.5) .

La population est représenté par une matrice (n x 3) , où la fourmi sélectionner l'optimum paramètres K_p , K_i et K_d du système de commande PID en minimisant la fonction objective . Le graphique montre la figure III.5 illustre le problème de conception utilisant l'algorithme PID colonie de fourmis.

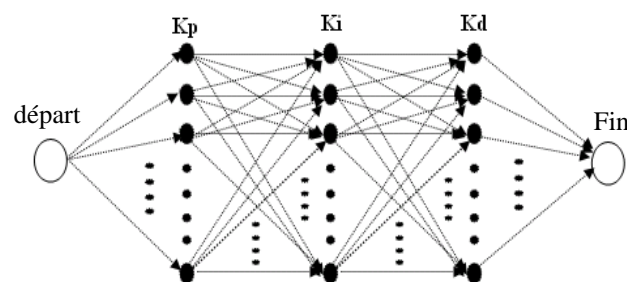


Figure III.5 : Le graphe de l'optimisation de colonie de fourmis.

Dans cette étude , 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 . Depuis le régulateur PID a



beaucoup performances des indices de la réponse transitoire, alors nous pouvons les combiner en une seule fonction objective composée de la somme pondérée des objectifs.

La fonction objective doit être réglée:

$$\text{Min}(\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 + \lambda_4 f_4 + \lambda_5 f_5 + \lambda_6 f_6 + \lambda_7 f_7) \quad (\text{III.13})$$

Où:

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ et λ_7 sont des valeurs positives.

f_1 : Le temps de réponse (tr).

f_2 : Le temps de montée (tm).

f_3 : Le dépassement (D).

f_4 : L'erreur absolue intégrée (IAE).

f_5 : L'erreur quadratique intégrée (ISE).

f_6 : L'erreur de temps intégrale absolue (ITAE).

f_7 : La moyenne de l'erreur quadratique (ISTE).

III.5. Exemple de simulation pour des systèmes de types différents

Dans cette section, nous allons présenter les résultats numériques pour améliorer la performance de l'algorithme de la solution proposée. Tout le calcul est mis en œuvre avec Matlab / Simulink 7.5 (R2007b). Les valeurs des paramètres dans ACO sont présentées dans le tableau (III.2). Dans cette étude, nous avons utilisé trois exemples des systèmes avec un ordre différent [20] et appliqué sur le moteur à courant continue avec excitation séparée pour illustrer l'efficacité de l'algorithme proposé.

Les fonctions de transfert de ces systèmes sont les suivantes :

$$1. \text{ le système de second ordre avec retard pur } G_1(p) = \frac{e^{-0.5}}{(p+1)^2}. \quad (\text{III.14})$$

$$2. \text{ le système de troisième ordre } G_2(p) = \frac{4.228}{(P+0.5)(P^2+1.64s+8.456)}. \quad (\text{III.15})$$

$$3. \text{ le système de quatrième ordre } G_3(p) = \frac{27}{(P+1)(P+3)^3}. \quad (\text{III.16})$$

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 [32] et l'algorithme d'optimisation de colonie de fourmi. Pour comparer entre ces deux méthodes en termes D_{\max} , T_m et T_r , nous avons représenté la réponse indicielle du système en boucle fermée .

On a choisie la fonction objective donnée par l'équation (III.13) afin de trouver les paramètres optimaux du régulateur PID par l'ACO et une bonne réponse de sortie.

La fonction objective, nous avons choisit chaque fois une valeur de $(\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7)$ et annulé les autre puis tracer sur la même figure (voire les figures (III.6), (III.8), (III.10)). Par exemple choisir $\lambda_1=\lambda_2=1$, $\lambda_3=5$, $\lambda_4=10$ et les autre $(\lambda_5, \lambda_6, \lambda_7)$ égale 0.

Les Paramètre	Les valeurs
Nombre de fourmi.	10
Nombre itération.	100
Taux d'évaporation de phéromone ρ .	0.5
α	1
ζ	2
P est les valeurs discrètes permises des variables de l'espace de recherche.	20
Nombre de l'espace de recherche m.	3

Tableau III.2: les paramètres de l'ACO

III.5.1. Le système du second ordre

Les réponses du système du second ordre avec retard pur pour chacun des deux méthodes d'optimisation appliqué sur le régulateur PID sont présentées sur la figure (III.6). Pour la méthode de Ziegler-Nichols, on a augmenté le gain K_{cr} jusqu' à gain d'oscillation présenté par la valeur $K_{cr}=4.6905$ et mesure la période des auto-oscillations $T_{ocs}= 3.2707$ puis calculé les paramètres de PID (voire le tableau (III.3)). pour la méthode de ACO est donné le meilleur paramètre de régulateur PID et améliore le bien de la performance, puisque la réponse de sortie du système est la plus proche de la réponse idéale d'entrée de type échelon.

Selon les critères de performances, la comparaison quantitative présentée dans les tableaux (III.3) et (III.4) confirme les résultats de la comparaison qualitative. Donc la réponse du système par la méthode PID-ACO est plus performante que la réponse du système par la méthode de Ziegler-Nichols.

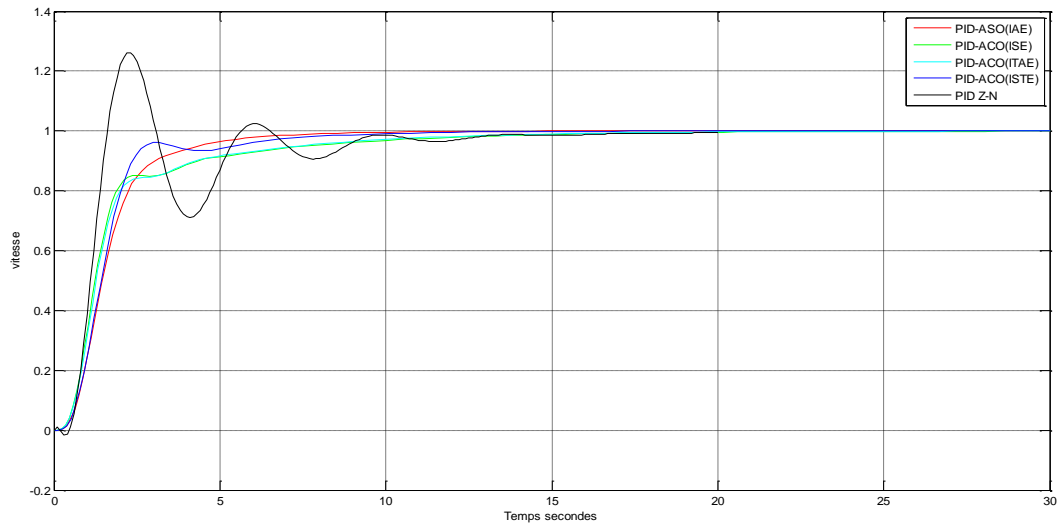


Figure III.6 : Les réponses de système de second ordre pour le PID avec Z-N et ACO

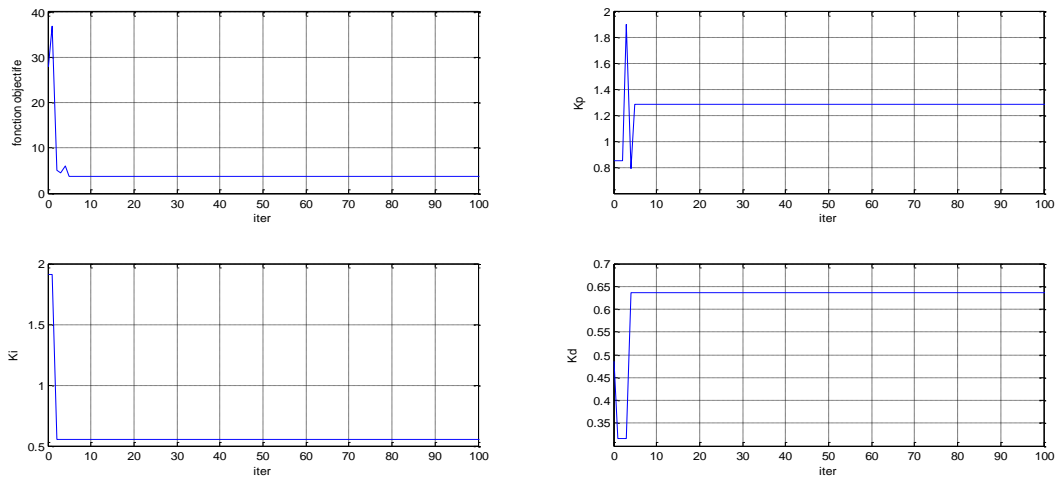


Figure III.7 : Les réponses de la fonction objectif et les paramètres K_p , K_i et K_d du système de second ordre pour le PID-ACO

	K_p	K_i	K_d
PID Z-N	2.8143	1.7209	1.1506
PID ACO (IAE)	1.285	0.557	0.6361
PID ACO (ISE)	1.9050	0.4794	0.9890
PID ACO (ITAE)	1.8190	0.4794	0.9890
PID ACO (ISTE)	1.2850	0.5709	0.3161

Tableau III.3 : Paramètres d'optimisations du PID

	$D_{\max}(\%)$	T_m (sec)	T_r (sec)
PID Z-N	26.13	0.8326	12.7390
PID ACO (IAE)	0.94	1.9557	3.6076
PID ACO (ISE)	0	1.7230	10.8160
PID ACO (ITAE)	0.0044	2.0522	10.2313
PID ACO (ISTE)	0.4127	1.6528	7.3314

Tableau III.4 : Les performances du système de second ordre

III.5.2. Le système du troisième ordre

Les réponses du système du troisième ordre pour les deux méthodes d'optimisation appliqué sur le régulateur PID sont présentées sur la figure (III.8). Pour la méthode de Ziegler-Nichols, gain de période de oscillation est présente par $K_{cr}=3.6951$, $T_{ocs}=2.0630$ et les paramètres de régulateur présenté dans le tableau (III.5). pour la méthode d'ACO est donné le meilleur paramètre de régulateur PID et améliore le bien de la performance.

La comparaison quantitative est présentée dans les tableaux (III.5) et (III.6). On constate encore que, selon les quatre critères, le PID-ACO est plus performant que la réponse du système de Ziegler-Nichols.

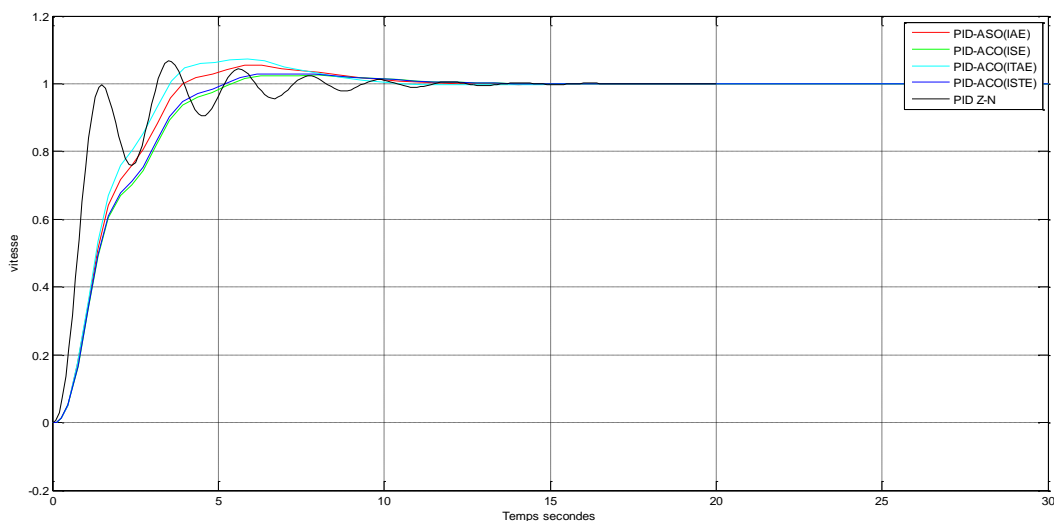


Figure III.8 : Les réponses du système de troisième ordre pour le PID avec Z-N et ACO

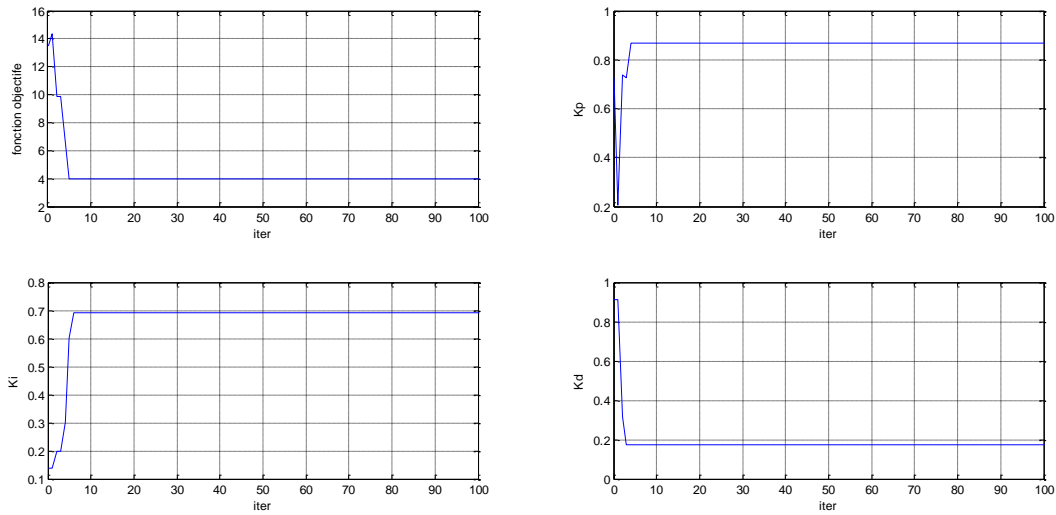


Figure III.9 : Les réponses de la fonction objective et les paramètres K_p , K_i , K_d du système de troisième ordre pour le PID-ACO

	K_p	K_i	K_d
PID Z-N	2.2171	2.1494	0.5717
PID ACO (IAE)	0.8671	0.6929	0.1734
PID ACO (ISE)	0.8671	0.5827	0.1734
PID ACO (ITAE)	0.8671	0.7843	0.1734
PID ACO (ISTE)	0.8671	0.6011	0.1734

Tableau III.5 : Les paramètres d'optimisations du PID pour le système de troisième ordre

	$D_{max}(\%)$	T_m (sec)	T_r (sec)
PID Z-N	6.7400	0.8416	8.8869
PID ACO (IAE)	5.4722	2.6534	9.0265
PID ACO (ISE)	2.5026	3.0069	8.8599
PID ACO (ITAE)	7.4353	2.4055	8.6675
PID ACO (ISTE)	2.9727	2.9252	8.9989

Tableau III.6 : Les performances du système de troisième ordre



III.5.3. Le système du quatrième ordre

Les réponses du système du quatrième ordre représentée dans la figure (III.10) pour chaque des méthodes . Pour le Ziegler-Nichols, les paramètres sont présentée par les valeurs suivantes : $K_{cr}=5.1200$, $T_{ocs}= 2.7039$. le algorithme de ACO est optimisé la fonction objective pour rechercher les meilleurs paramètres de régulateur PID et encore le plus performant de système . Les critères de performance évalués sur ces deux réponses sont présentés dans les tableaux (III.7) et (III.8).. On constate également que, selon les quatre critères, la réponse de système de régulateur PID par ACO est plus performante que le PID de Ziegler-Nichols .

Nous constatons que les paramètres de régulateur PID par ACO est le meilleur avec l'indice de erreur absolue intégré (IAE). Pour cette raison on a choisi avec l'application qui suivie (application à un moteur courant continue à excitation séparée) .

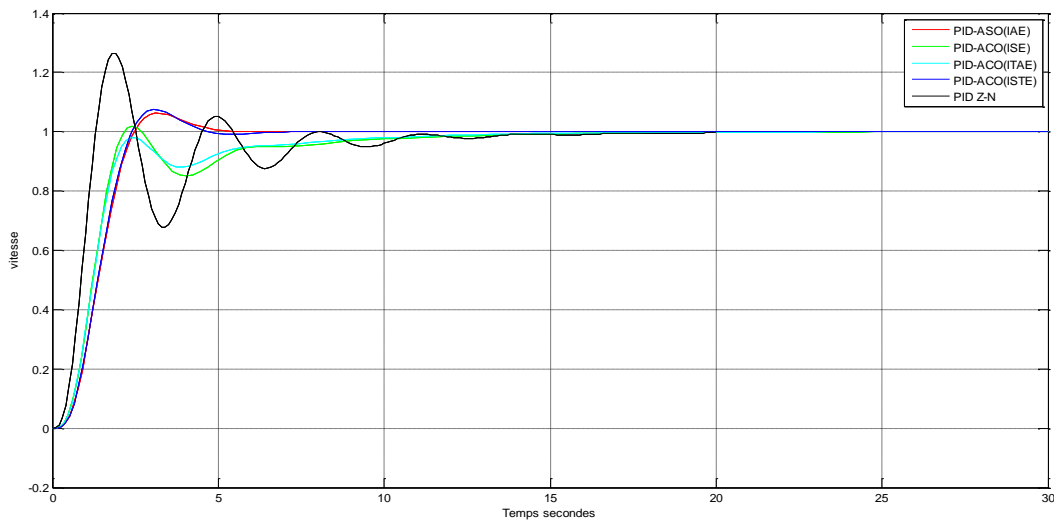


Figure III.10 : Les réponses du système de quatrième ordre pour le PID avec Z-N et ACO

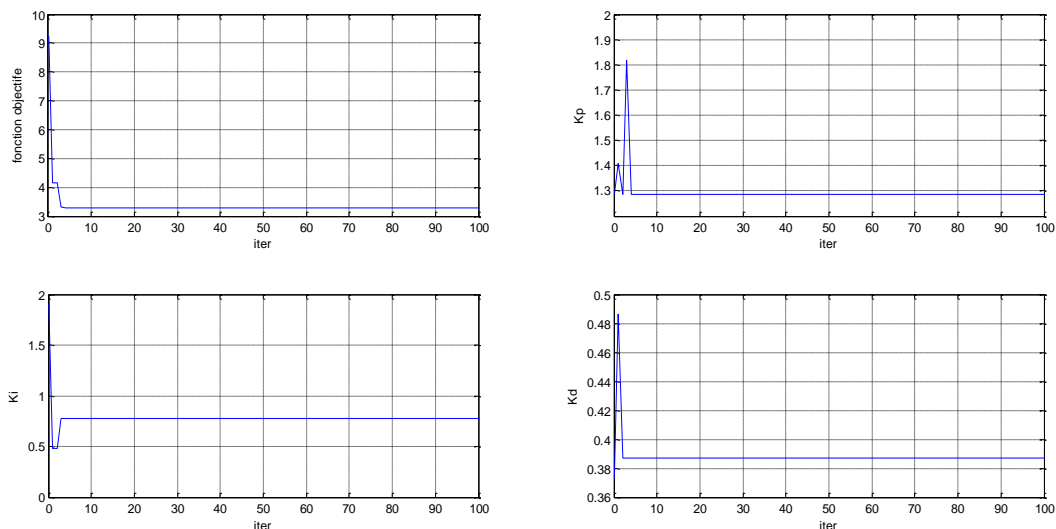


Figure III.11 : Les raiponces de la fonction objective et le paramètre K_p , K_i , K_d du système de quatrième ordre pour le PID-ACO

	K_p	K_i	K_d
PID Z-N	3.0720	2.2723	1.0383
PID ACO (IAE)	1.2850	0.7718	0.3870
PID ACO (ISE)	1.8190	0.5570	0.3161
PID ACO (ITAE)	1.8190	0.5709	0.4861
PID ACO (ISTE)	1.2850	0.7718	0.3161

Tableau III.7 : Paramètres d'optimisations du PID pour le système de quatrième ordre

	$D_{max}(\%)$	T_m (sec)	T_r (sec)
PID Z-N	26.40	0.7761	12.9174
PID ACO (IAE)	6.22	1.4291	4.4004
PID ACO (ISE)	1.9450	1.2076	10.9258
PID ACO (ITAE)	0	1.2835	10.0602
PID ACO (ISTE)	7.51	1.3935	4.2028

Tableau III.8 : Les performances de système de quatrième ordre

III.6. Application à un moteur à courant continu à excitation séparée

Le moteur à courant continu est commandé par une tension appliquée. La Figure (III.12) montre le circuit équivalent du moteur à courant continu avec excitation séparée. Les équations caractéristiques de moteur à courant continu sont représentées comme suit [21] :

$$\frac{di_{ex}}{dt} = \left(-\frac{R_{ex}}{L_{ex}} \right) i_{ex} + \left(\frac{1}{L_{ex}} \right) V_{ex}. \quad (III.17)$$

$$\frac{di_{ind}}{dt} = \left(-\frac{R_{ind}}{L_{ind}} \right) i_{ind} + \left(\frac{-L_{index}}{L_{ind}} \right) w_r i_{ex} + \left(\frac{1}{L_{ind}} \right) V_{ind}. \quad (III.18)$$

$$\frac{dw_r}{dt} = \left(\frac{L_{index}}{J} \right) i_{ex} i_{ind} + \left(\frac{-Cr}{J} \right) + \left(\frac{-fc}{J} \right) w_r. \quad (III.19)$$

Le circuit équivalent de moteur à courant continu à excitation séparée illustré dans la Figure (III.13)

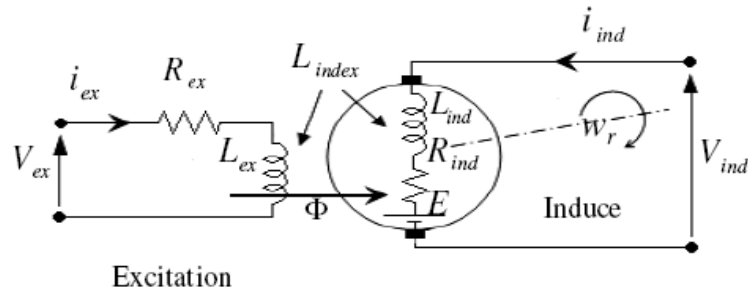


Figure (III.12) : Circuit équivalent du MCC à excitation séparée.

Nous avons expliquée dans l'annexe le modèle du moteur à courant continu et son schéma de Simulink , ainsi que ses différents paramètres.

la fonction de transfert du MCC

On pose $v_{ex} = \text{constant}$, alors l'équation (III.17) devient :

$$I_{ex} = \frac{v_{ex}}{R_{ex}} \quad (III.20)$$

Nous avons remplacé l'équation (III.20) dans les équations (III.18) et (III.19), afin d'obtenir les équations suivantes:

$$\frac{di_{ind}}{dt} = \left(-\frac{R_{ind}}{L_{ind}} \right) i_{ind} + \left(\frac{-L_{index}}{L_{ind}} \right) \omega_r \frac{v_{ex}}{R_{ex}} + \left(\frac{1}{L_{ind}} \right) V_{ind} \quad (III.21)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \left(\frac{L_{index}}{J} \right) \frac{v_{ex}}{R_{ex}} i_{ind} + \left(\frac{-Cr}{J} \right) + \left(\frac{-fc}{J} \right) \omega_r \quad (III.22)$$

Pour représenté l'équation d'état , on choisit $\omega_r = x_1$ et $i_{ind} = x_2$:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -fc & \frac{L_{index} \cdot v_{ex}}{R_{ex}} \\ \frac{-L_{index} \cdot v_{ex}}{L_{ind} \cdot R_{ex}} & \frac{-R_{ind}}{L_{ind}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_{ind}} \end{bmatrix} \cdot V_{ind} \quad (III.23)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

On calcule la fonction de transfert de MCC à partir de l'équation suivante :

$$H(p) = C(Pi - A)^{-1}B + D \quad (III.24)$$

Donc la fonction de transfert du MCC est:

$$H(P) = \frac{L_{\text{index}} \cdot v_{\text{ex}}}{L_{\text{ind}} \cdot R_{\text{ex}} \cdot p^2 + R_{\text{ex}} \cdot (R_{\text{ind}} + f_c \cdot L_{\text{ind}}) \cdot p + f_c \cdot R_{\text{ex}} \cdot R_{\text{ind}} + L_{\text{index}}^2 \cdot \frac{v_{\text{ex}}^2}{R_{\text{ex}}}} \quad (\text{III.25})$$

Le résultat de la fonction de transfert est représenté dans l'annexe.

III.6.1. Moteur à courant continu sans charge

Nous prenons l'essai habituel, démarrage à vide. On a utilisé la fonction objective avec le critère d'optimisation IAE, parce qu'il a donné une bonne performance pour les autres systèmes :

$$F = \text{IAE} \cdot \beta + D \cdot \alpha + T_m \cdot \gamma + T_r \cdot \sigma \quad (\text{III.26})$$

Avec : $\beta = 5$.

$\alpha = 2$.

$\gamma = 15$.

$\sigma = 20$.

Pour une vitesse de référence 100 rad/s, on aura la figure (III.13) qui présente la réponse de vitesse d'un MCC sans charge pour l'indice de performance F. La vitesse atteint la valeur de consigne sans dépassement et avec une erreur de position parfaitement nulle et se stabilise (régime statique).

La figure (III.14) présente les meilleures valeurs des paramètres (K_p , K_i , K_d) en fonction des itérations, selon le critère de performance F pour le régulateur PID-ACO.

À partir du tableau (III.10), la réponse de vitesse du MCC sans charge est sans erreur statique, stable, plus rapide, mais, présente un dépassement négligeable.

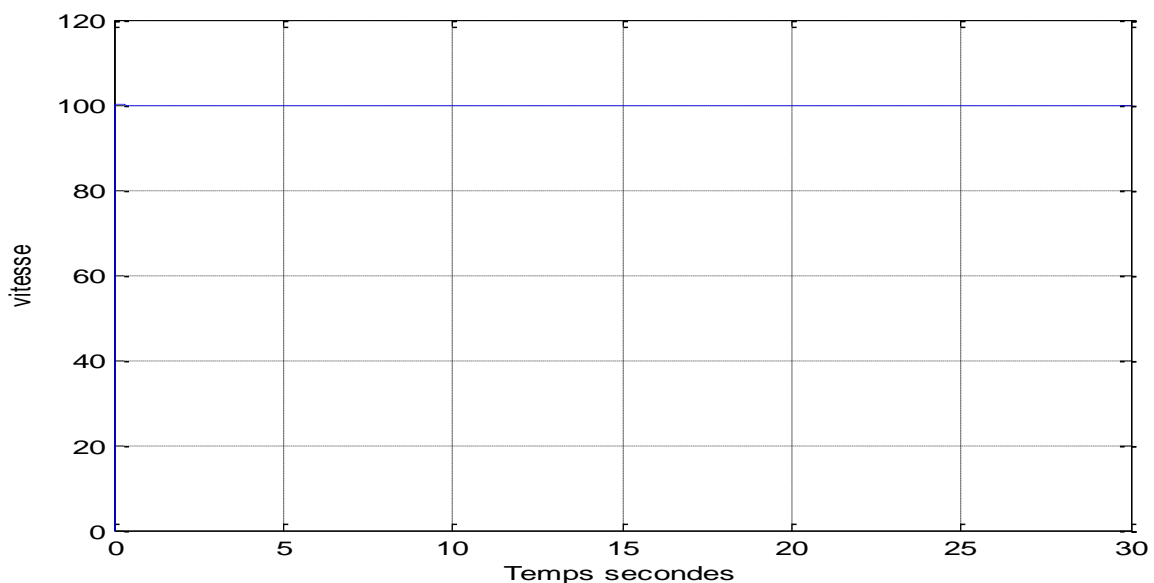


Figure III.13 : La réponse de vitesse du MCC sans charge par le PID-ACO

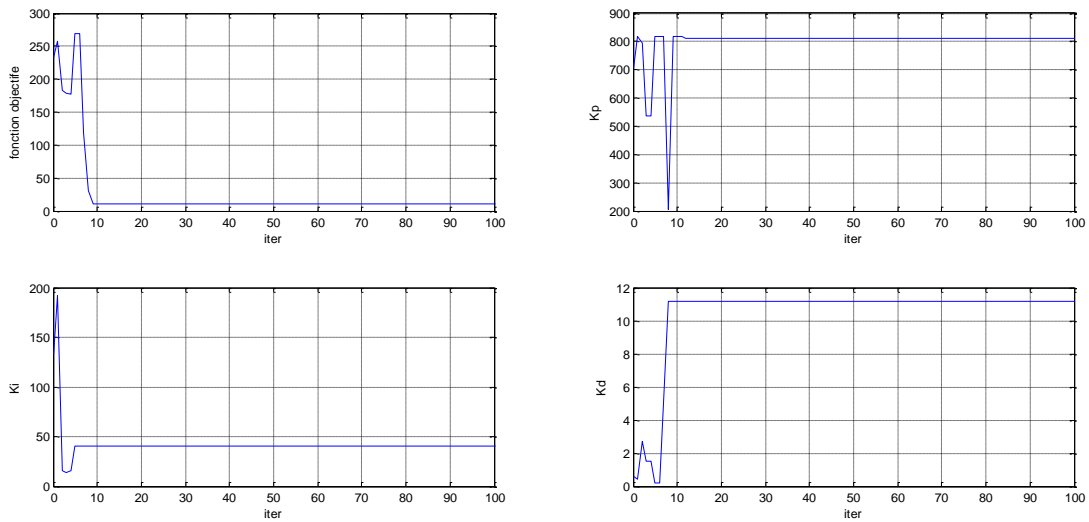


Figure III.14 : Les réponses de la fonction objective et les paramètres K_p , K_i , K_d de MCC avec le PID-ACO

	K_p	K_i	K_d
PID ACO (IAE)	812.8157	40.1649	11.1498

Tableau III.9 : Paramètres d'optimisations de PID pour le MCC sans charge

	$D_{max}(\%)$	T_m (sec)	T_r (sec)
PID ACO (IAE)	8.2	0.0271	0.0482

Tableau III.10 : Les performances du MCC sans charge

III.6.2. Moteur à courant continu avec charge

Dans le but de voir la robustesse du régulateur PID-ACO, on a appliqué comme perturbation, un couple de charge $C_r=150[Nm]$ à l'instant $t=20s$. La courbe de la figure (III.15) illustre le résultat de la simulation appliquée au MCC. On remarque que le régulateur a annulé la perturbation sur la consigne de vitesse. La figure (III.16) présente la fonction objective et les meilleures valeurs des paramètres du régulateur (K_p, K_i, K_d) en fonction des itérations, selon le critère d'optimisation F .

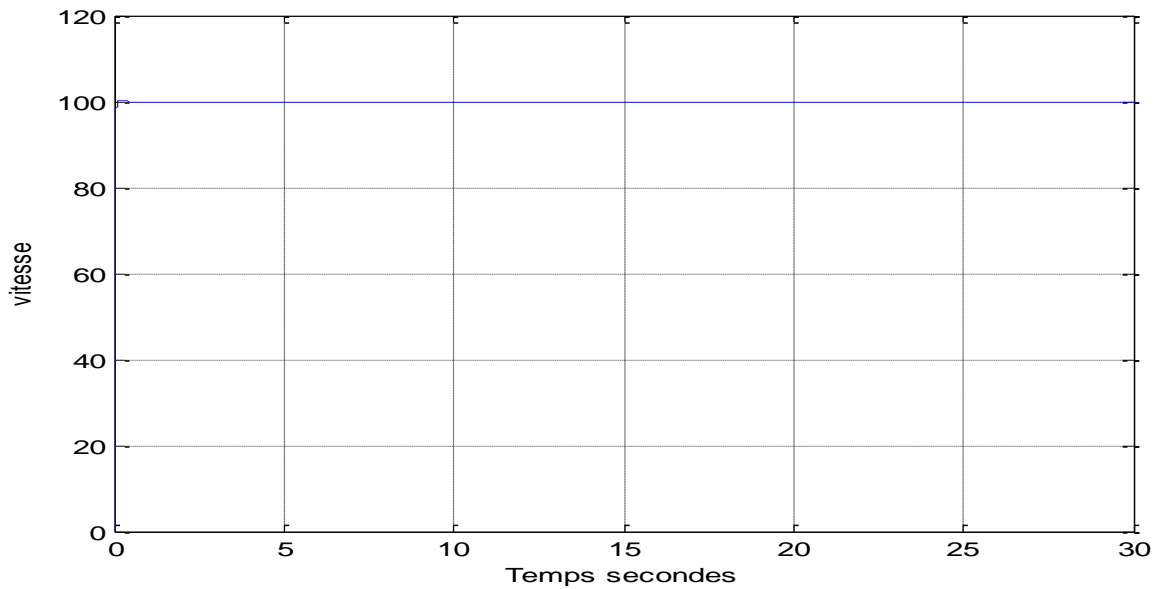


Figure III.15 : La réponse de vitesse du MCC avec charge par le PID-ACO.

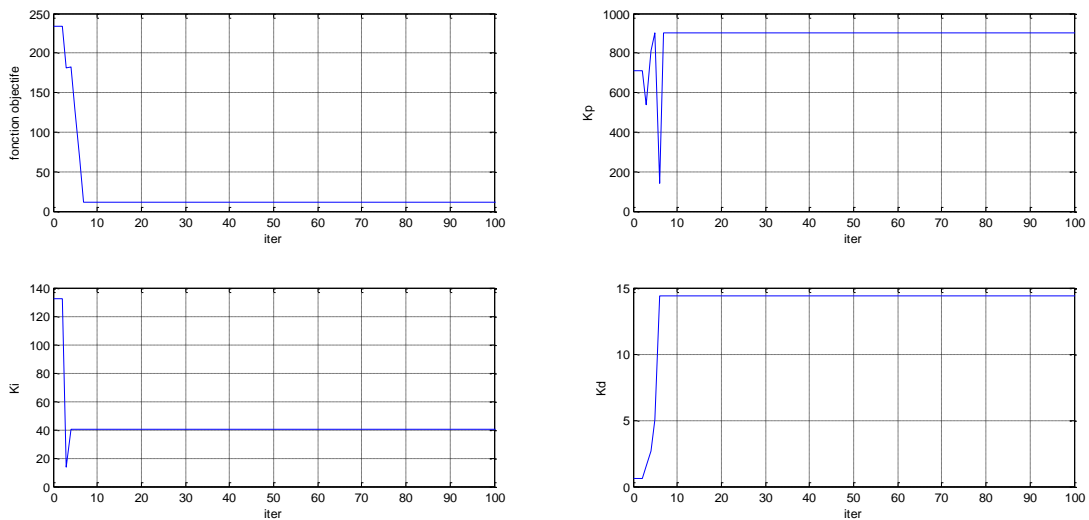


Figure III.16 : Les réponses de la fonction objectif et les paramètres K_p , K_i , K_d de MCC avec Le PID-ACO

Le tableau (III.12) présente les performances de la réponse de la vitesse du MCC avec charge. On remarque que la réponse est sans erreur statique, stable, plus rapide, mais, présente un dépassement négligeable. La réponse est plus proche de la réponse de consigne (échelon).

	K_p	K_i	K_d
PID ACO (IAE)	903.7909	40.1649	14.3712

Tableau III.11 : paramètres d'optimisations du PID pour le MCC avec charge



	$D_{\max}(\%)$	T_m (sec)	T_r (sec)
PID ACO (IAE)	6	0.0310	0.0635

Tableau III.12 : Les performances de MCC avec charge

III.7. 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 sur trois systèmes d'ordre différents, 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.

D'après les simulations obtenues du MCC, les résultats montrent que l'ACO peut donner une recherche efficace d'un régulateur PID optimale insensible aux perturbations sous forme de couple de charge. Le régulateur PID-ACO est le meilleur, car il présente des performances satisfaisantes et possède une bonne robustesse.

Conclusion Générale



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 montré 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 continu à excitation séparée sans et avec charge comme 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.

Bibliographies

Bibliographie

- [1] *Young-Hyun Moon*, et al., “Fuzzy Logic based extended integral control for load frequency control”, Proc. of *IEEE Power Engg. Society winter meeting*, Vol.3, Issue 1, 2001, 1289-1293.
- [2] application of ANN technique for automatic generation control for multi-area power system”, *Electric power and Energy systems*, 24(2002), 345-354.
- [3] *D.M.Vinod Kumar*, “Intelligent Controllers for Automatic Generation Control”, Proc. of *IEEE region 10 International conference on global connectivity in Energy, Computer, Communication and Control*, 1998, p557-574.
- [4] *A.Soundarrajan*, et al., Intelligent controllers for Automatic Generation Control., In the proceedings of International conference on Robotics, Vision , Information and signal Processing , January 2003. pp307-311.
- [5] *Zwe-Lee Gaing* , “A Particle swarm optimization approach for optimum design of PID Controller in AVR system” , *IEEE Transactions on Energy Conversion* , Vo.19, No.2, 2004.
- [6] *D.B.Fogel* , “Evolutionary Computation: Towards a New Philosophy of machine Intelligence”, 2nd Edition, *IEEE Press* , New York.2000.
- [7] *Duan Hai-bin* et al., “Novel Approach to Nonlinear PID parameter optimization using Ant Colony Optimization Algorithm” , *Journal of Bionic Engineering*, 2006,p 73-78.
- [8] *Colori A.,Dorigo M, Manieozzo V.*, “Distributed optimization by ant colonies”, Proc. of the First European Conference on Artificial Life , 1992, 134-142.
- [9] livre :Automatique (contrôle et régulation : *patrick prouvost*)
- [10]Régulation automatique (*Prof. Michel ETIQUE, mars 2007,Yverdon-les-Bains*), *Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD)* , p164 ,172 ,179-180.
- [11] (*Marc Correvon*) : Systèmes électroniques ,chapitre 7(' LES REGULATEURS STANDARDS') , *houte ecole spécialisée de suisse occidentale* ,p 6-7,11,18.
- [12] *Vincent Courboulay* ,Analyse et Contrôle de Systèmes Linéaires Continus , *Université de La Rochelle* ,p 54-55,58.



- [13] Cours de Systèmes Asservis (*J.Baillou, J.P.Chemla, B. Gasnier, M.Lethiecq*) ,p 72-74.
- [14] Algorithmes de fourmis artificielles : applications à la classification et à l'optimisation (*'Professeur Gilles Venturini'*) ,Université François Rabelais Tours ,Ecole Doctorale : Santé, Sciences et Technologies Année Universitaire : 1999-2000 ,p 7, 9-12 .
- [15] Engineering Optimization: Theory and Practice, Fourth Edition *Singiresu S. Rao* Copyright © 2009 by *John Wiley & Sons, Inc.* p715-716,718.
- [16] Optimisation par colonies de fourmis (*'COSTANZO Andrea, LUONG Thé, Van MARILL Guillaume'*), 19 mai 2006.p6-9.
- [17] 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
- [18] Multi-objective bee colony optimization to tuning PID controller (*'Özden ERÇİN'*). *ÇUKUROVA UNIVERSITY ,INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES* , p29-31-32-34
- [19] 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.
- [20] Tuning PID controller using Multi-Objective Ant Colony Optimization (*'Ibtissem Chiha, Noureddine Liouane and Pieree Borne'*) ,p2-3,6 .
- [21] The Efficiency of Particle Swarm Optimization Applied on Fuzzy Logic DC Motor Speed Control(*'Boumediene Allaoua, Abdessalam Abderrahmani, Brahim Gasbaoui, Abdelfatah Nasri'*) , Vol. 5, No. 2, November 2008, 247-262
- [22] *BULLNHEIMER B., HARTL R., STRAUSS C.* « An Improved Ant system Algorithm for the Vehicle Routing Problem », *Annals of Operations Research*, vol. 89, 1999, p. 319–328.
- [23] *DORIGO M.*, « Optimization, Learning and Natural Algorithms (in Italian) », PhD thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- [24] *DORIGO M., MANIEZZO V., COLORNI A.*, « The Ant System : Optimization by a Colony of Cooperating Agents », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B*, vol. 26, no 1, 1996, p. 29–41.
- [25] *DORIGO M., GAMBARDELLA L.*, « Ant Colony System : A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem », *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no 1, 1997, p. 53–66.
- [26] *Dréo* ,Un chapitre dans son livre qui parle de la méta-heuristique ACO, d'une manière simplifiée.

- [27] GAMBARDELLA L., TAILLARD E., DORIGO M., « Ant Colonies for the Quadratic Assignment Problem », *Journal of the Operational Research Society*, vol. 50, 1999, p. 167– 176.
- [28] Dorigo, 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
- [29] Hölldobler, B. and Wilson, E. (1990). *The Ants*. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- [30] Hölldobler, B. and Wilson, E. (1996). *Voyage chez les Fourmis*. Seuil.
- [31] Bonabeau, E. and Theraulaz, G. (1994). *Intelligence Collective*. Hermes.
- [32] J.G.Ziegler and N.B.Nichols, "Optimum settlings for automatic controllers", *Trans .on ASME*, vol. 64, 1942,pp.759-768.
- [33] Halila A., Étude des machines à courant continu, MS Thesis, *University of LAVAL*, (in French), May 2001.
- [34] Capolino G.A., Cirrincione G., Cirrincione M., Henao H., Grisel R., Digital Signal Processing for Electrical Machines, *Invited paper*, Proceedings of ACEMP'01 (Aegan International Conference on Electrical Machines and Power Electronics), Kusadasi, Turkey, June 2001, p. 211 – 219.

Les sites Internet

- [35] <http://btscira.perso.sfr.fr/page1/page64/page64.html>
- [36] <http://www-hadoc.lag.ensieg.inpg.fr/hadoc/continu/n00/dtm.htm>
- [37] http://fr.wikipedia.org/wiki/Choix_des_boucles_de_r%C3%A9gulation PDF boucle de régulation
- [38] <http://www.scribd.com/doc/35039799/112/a-Methode-de-Ziegler-Nichols>
- [39] liris.cnrs.fr/Documents/Liris-4147.pdf
- [40] <http://www.artezia.net/animaux/fourmis/fourmis.htm>

Annexe

Annexe

Modèle du moteur à courant continu à excitation séparée [21]

Les moteurs sont caractérisés par leur polyvalence. Au moyen des combinaisons diverses de shuntent-, la série - et des aérages(enroulements) séparément excités de terrain(des champs) ils peuvent être conçus pour montrer(afficher) une large variété d'ampère de volt ou des caractéristiques de moment de torsion de vitesse pour l'opération tant dynamique que stationnaire. À cause du bien-être(de la facilité) avec lequel ils peuvent être les systèmes contrôlés de machines de DC étaient fréquemment utilisés dans beaucoup de demandes (d'applications) exigeant une vaste gamme de vitesses du moteur et un contrôle de moteur de production précis [33 , 34] .

Symboles	Désignations	Unités
i_{ex} et i_{ind}	Excitation courant et courant induite .	[A]
w_r	Vitesse angulaire du MCC	[Rad / Sec]
V_{ex} et V_{ind}	Voltage d'excitation et voltage induite	[V]
R_{ex} et R_{ind}	Résistance d'excitation et résistance d'induction	[Ω]
L_{ex} , L_{ind} et L_{index}	Inductance d'excitation, Inductance d'induction et Inductance mutuelle	[mH]
J	Moment d'inertie	[Kg.m ²]
C_r	Couple résistif	[N.m]
f_c	Coefficient de frottement	[N.m.Sec/Rad]

Tableau (III.13) : Les symboles utilisés du MCC .

A partir des équations (III-17) , (III-18) et (III-19), on peut construire le modèle avec l'environnement MATLAB 7.5 (R2007b) dans le Simulink . Le modèle du MCC dans le Simulink est présenté dans la Figure (III.18) . Les différents paramètres du MCC sont présentés dans le Tableau (III.14) . Les différents symboles utilisés du MCC sont présentés dans le Tableau (III.13) .

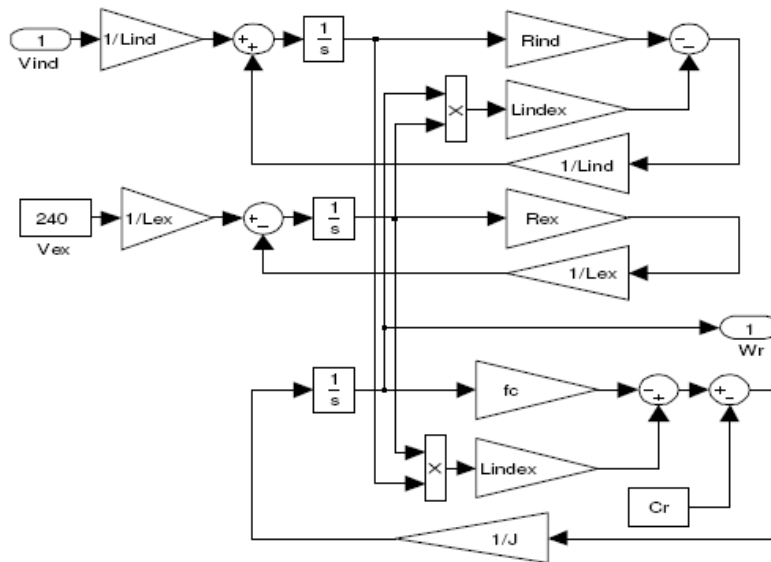


Figure (III.18) : Modèle du MCC dans le Simulink .

$V_{ex} = 240$ [V]	$L_{ind} = 0.012$ [mH]
$V_{ind} = 240$ [V]	$L_{index} = 1.8$ [mH]
$R_{ex} = 240$ [Ω]	$J = 1$ [Kg.m ²]
$R_{ind} = 240$ [Ω]	$C_r = 29.2$ [N.m]
$L_{ex} = 240$ [mH]	$f_c = 0.0005$ [N.m.Sec/Rad]

Tableau (III.14) : Les paramètres du MCC .

La fonction de transfert de MCC

Nous avons calculé la fonction de transfert par MATLAB , le programme suivant présenté de cet calcul :

```
clear all, close all, clc
```

```
Vex = 240
```

```
Rex = 240
```

```
Rind = 0.6
```

```
Lex = 120
```

```
Lind = 0.012
```

```
Lindex = 1.8
```

```
%Cr = 29.2
```

```
fc = 0.0005
```

$s = \text{tf}('s')$

$G = (\text{Lindex} * \text{Vex}) / (\text{Lind} * \text{Rex} * s^2 + \text{Rex} * (\text{Rind} + \text{fc} * \text{Lind}) * s + \text{fc} * \text{Rex} * \text{Lind} + ((\text{Lindex}^2 * \text{Vex}^2) / \text{Rex}))$

$h1 = -\text{fc};$

$h2 = (\text{Lindex} * \text{Vex}) / (\text{Rex});$

$h3 = -(\text{Lindex} * \text{Vex}) / (\text{Lind} * \text{Rex});$

$h4 = -(\text{Rind} / \text{Lind});$

$a = [h1 \ h2 \ ; h3 \ h4]$

$b = [0; 1 / \text{Lind}]$

$c = [1 \ 0]$

$\text{sys} = \text{ss}(a, b, c, 0)$

$[\text{num}, \text{den}] = \text{ss2tf}(a, b, c, 0, 1)$

$\text{moteur} = \text{tf}(\text{num}, \text{den})$

Le résultat est :

$$\text{moteur}(P) = \frac{150}{P^2 + 50P + 270P} \quad (\text{III.27})$$