



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electromécanique
Electromécanique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Guedidi Abd Jalil et Aouiche Salah Chems Eddine

Le : lundi 2 juin 2025

Techniques de calcul des paramètres du régulateur dans les systèmes de contrôle

Jury :

M.	Boussabeur Mohamed Tayeb	MAB	Université Mohamed Khider de Biskra	Président
Mme.	Amel Hadri Hamida	Pr	Université Mohamed Khider de Biskra	Rapporteur
M.	Kraa Okba	Pr	Université Mohamed Khider de Biskra	Examineur



Année universitaire : 2024/2025

Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electromécanique
Electromécanique

Réf. : Entrez la référence du document

Techniques de calcul des paramètres du régulateur dans les systèmes de contrôle

Le : lundi 2 juin 2025

Présenté par :

-Guedidi Abd Jalil

- Aouiche Salah Chems Eddine

Avis favorable de l'encadreur :

- Amel Hadri Hamida

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature



Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Allah, Le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la santé, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je remercie sincèrement madame Amel Hadri Hamida, mon encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils pertinents, son suivi rigoureux et ses encouragements tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants du département de génie électrique pour la qualité de l'enseignement reçu durant mon parcours universitaire.

Je remercie du fond du cœur ma famille, en particulier mes parents, pour leur amour, leur soutien inconditionnel, leurs sacrifices et leurs prières. Leur présence a été une source de motivation essentielle.

Enfin, j'adresse mes remerciements à mes amis et collègues de promotion pour leur soutien moral et les bons moments partagés tout au long de ces années universitaires.

Dédicace

À mes chers parents,

Pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices silencieux et votre foi inébranlable en moi. Vous êtes mes racines et ma force. Ce travail est le témoignage de ma gratitude éternelle envers vous.

À mes frères et sœurs,

Pour votre soutien constant, vos encouragements et votre présence précieuse dans ma vie. Vous êtes une source de joie et de réconfort. Merci d'être toujours à mes côtés.

À mes ami(e)s,

Pour vos encouragements sincères, vos conseils avisés et votre bienveillance. Vous avez su me motiver et me faire croire en mes capacités.

Merci d'être là, dans les bons comme dans les moments plus difficiles.

Résumé

Ce mémoire traite du réglage des paramètres du régulateur PID, largement utilisé dans les systèmes industriels. La partie théorique aborde les bases des systèmes de contrôle ainsi que les méthodes classiques de réglage telles que Ziegler-Nichols, Cohen-Coon et la méthode d'essai-erreur, en plus de certaines approches modernes comme les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones et la commande adaptative. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une étude théorique, et la partie pratique repose sur une simulation sous MATLAB pour comparer les méthodes classiques en termes de stabilité, de rapidité de réponse et de précision. Les résultats montrent que le choix de la méthode dépend des caractéristiques du système.

Mots clés : Régulateur PID, Réglage des paramètres, Systèmes de contrôle, Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Méthode d'essai-erreur, Algorithmes génétiques, Réseaux de neurones, Commande adaptative, MATLAB, Simulation, Stabilité, Rapidité de réponse, Précision.

الملخص

تعالج هذه المذكرة ضبط معاملات المنظم PID ، المستخدم على نطاق واسع في الأنظمة الصناعية. يتناول الجزء النظري أساسيات أنظمة التحكم، بالإضافة إلى الطرق الكلاسيكية لضبط المعاملات مثل طرق Ziegler-Nichols ، Cohen-Coon ، وطريقة التجربة والخطأ، إلى جانب بعض الأساليب الحديثة مثل الخوارزميات الجينية، الشبكات العصبية، والتحكم التكيفي. يندرج هذا العمل ضمن دراسة نظرية، ويعتمد الجزء التطبيقي على محاكاة باستخدام برنامج MATLAB لمقارنة الطرق الكلاسيكية من حيث الاستقرار، سرعة الاستجابة، والدقة. تظهر النتائج أن اختيار الطريقة المناسبة يعتمد على خصائص النظام.

الكلمات المفتاحية: منظم PID ، ضبط المعاملات، أنظمة التحكم، Ziegler-Nichols ، Cohen-Coon ، طريقة التجربة والخطأ، الخوارزميات الجينية، الشبكات العصبية، التحكم التكيفي، MATLAB، المحاكاة، الاستقرار، سرعة الاستجابة، الدقة.

Abstract

This thesis deals with the tuning of PID controller parameters, which is widely used in industrial systems. The theoretical part covers the fundamentals of control systems as well as classical tuning methods such as Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, and the trial-and-error method, in addition to some modern approaches like genetic algorithms, neural networks, and adaptive command. This work is part of a theoretical study, and the practical part is based on a MATLAB simulation to compare the classical methods in terms of stability, response speed, and accuracy. The results show that the choice of method depends on the characteristics of the system.

Keywords: PID controller, Parameter tuning, Control systems, Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Trial-and-error method, Genetic algorithms, Neural networks, Adaptive command, MATLAB, Simulation, Stability, Response speed, Accuracy.

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

PID : Proportionnel Intégrale Dérivée

AG : Algorithme génétique

ISE : Integral of Square Error

IAE : Integral of Absolute Error

ITAE : Time multiplied by Absolute Error

ITSE : Time multiplied by Square Error

RN : Réseau de Neurones

STR : Self-Tuning Regulator (La commande Adaptative auto-ajustable)

MRAC : Model Reference Adaptive Control

ZN : Ziegler-Nichols

CC : Cohen-Coon

MIMO : Multiple-Input Multiple-Output

SISO : Single-Input Single-Output

SAMR : Le système adaptatif à modèle de référence.

Symboles

P : Proportionnel

I : Intégrale

D : Dérivée

Gr, K, K_p : Action proportionnel

BP, PB, XP%, P% : La bande passante

K_i : Action Intégral

T : le temps

T_i : la constante de temps intégral

T_d : la constante de temps dérivée

K_d : action dérivée

$u(t)$: Signal de commande

$e(t)$: Signal d'erreur

$y(t)$: Sortie du système

$r(t)$: Référence ou consigne

T : Constante de temps

τ : temps mort relatif

a : Gain statique du système

$G(s)$: Fonction de transfert du système

$C(s)$: Fonction de transfert du correcteur

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	I
Dédicace	II
Résumé	III
Listes des Acronymes et Symboles.....	IV
TABLE DES MATIÈRES	VI
Liste des figures.....	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
Introduction générale	1
Chapitre 01 : Fondements de la Régulation des Systèmes de Contrôle	
1.1) Introduction	4
1.2) Systèmes de contrôle	4
1.2.1) Système	4
1.2.2) Système de contrôle	4
1.3) Composants et Terminologie Fondamentale d'un Système de Contrôle	5
1.4) Classification des systèmes de contrôle	6
1.4.1) Système de contrôle naturel et système de contrôle artificiel	6
1.4.1.1) Systèmes de contrôle naturel	6
1.4.1.2) Systèmes de contrôle artificiels	6
1.4.2) Système de contrôle automatique et système de contrôle combinatoire	7
1.4.2.1) Système de contrôle automatique	7
1.4.2.2) Système de contrôle combinatoire	7
1.4.3) Système de contrôle variant dans le temps et système de contrôle invariant dans le temps	7
1.4.3.1) Système de contrôle variant dans le temps	7
1.4.3.2) Système de commande invariant dans le temps	7
1.4.4) Systèmes linéaires et non linéaires	7
1.4.5) Systèmes de contrôle à temps continu et à temps discret	10
1.4.6) Systèmes de contrôle déterministes et stochastiques	11
1.4.7) Systèmes de contrôle des paramètres regroupés et distribués	11
1.4.8) Systèmes SISO et MIMO	11
1.5) Système de contrôle en boucle ouverte et système de contrôle en boucle fermée	11
1.5.1) Système de contrôle en boucle ouverte	11
1.5.2) Système de contrôle en boucle fermée	12
1.5.3) Comparaison du système de contrôle en boucle ouverte et en boucle fermée	14
1.6) Régulateur PID	15
1.6.1) Action Proportionnel	15

TABLE DES MATIÈRES

1.6.2) Action intégrale (I)	16
1.6.3) Action dérivée (D)	17
1.7) Structures du régulateur PID	18
1.8) Critères de performance	19
1.9) Conclusion	19
Chapitre 02 : Méthodes de réglage classiques	
2.1) Introduction	21
2.2) Méthodes de Ziegler et Nichols	21
2.2.1) Méthode basée sur la réponse indicielle en boucle ouverte	21
2.2.2) Méthode basée sur la réponse indicielle en boucle fermée	24
2.3) Méthode Cohen-coon	25
2.4) Méthode essai _ erreur	26
2.5) Conclusion	27
Chapitre 03 : Techniques modernes basés sur l'optimisation	
3.1) Introduction	29
3.2) Historique des algorithmes génétiques	29
3.3) Le principe des algorithmes génétiques	30
3.4) Les étapes de l'algorithme génétique	31
3.5) Les opérateurs des A.G	33
3.5.1) Le Codage	33
3.5.1.1) Le codage binaire	33
3.5.1.2) Le codage réel (caractères multiples)	34
3.5.1.3) Codage sous forme d'arbre	34
3.5.2) L'opérateur de mutation	35
3.5.3) L'opération de Croisement ou Crossover	35
3.5.3.1) Croisement simple	36
3.5.3.2) Croisement uniforme	36
3.5.4) L'opérateur de sélection	37
3.5.4.1) La sélection par tournois	37
3.5.4.2) La méthode élitiste	37
3.5.4.3) La sélection par roulette	38
3.5.5) La fonction fitness (la fonction d'évaluation)	38
3.6) Le critère d'arrêt de l'algorithme	39
3.7) Neurone Biologique et Neurone Formel	39
3.7.1) Neurone Biologique	39
3.7.2) Neurone Formel (Artificiel)	40
3.8) Architecture des réseaux de neurones	42

TABLE DES MATIÈRES

3.8.1) Les réseaux statiques	43
3.8.2) Réseaux dynamiques	44
3.9) Les caractéristiques des réseaux de neurones	44
3.9.1) Le parallélisme	44
3.9.2) La capacité de généralisation	44
3.9.3) L'apprentissage	45
3.10) Les Types D'apprentissage	45
3.10.1) Le mode supervisé	45
3.10.2) Le renforcement	45
3.10.3) Le mode non supervisé (ou auto-organisationnel)	45
3.10.4) Le mode hybride	46
3.11) Application des Réseaux de Neurones	46
3.12) Principe général de la commande adaptative	46
3.13) Les approches de la commande adaptative	48
3.13.1) Commande adaptative directe	48
3.13.2) Commande adaptative indirect	48
3.14) Types de Commande adaptative	49
3.14.1) Commande adaptative a Modèle De Référence (MRAC)	49
3.14.2) Commande adaptative à Gain Programmé	52
3.14.3) Commande Auto-Ajustable (STR)	53
3.15) Identification des systèmes	54
3.16) Algorithme d'identification	54
3.16.1) Modèle de processus	54
3.16.2) Moindre carrée récursif	55
3.17) Régulateur RST	55
3.17.1) Calcul les polynômes R, S et T	56
3.17.1.1) Commande Auto-Ajustable indirecte	56
3.17.1.2) Commande Auto-Ajustable directe	56
3.18) L'objectif de la commande adaptative	57
3.19) Conclusion	58
 Chapitre 04 : Application des méthodes classiques de réglage PID	
4.1) Introduction	60
4.2) Présentation du système à réguler	60
4.2.1) Réponse du système sans régulation	61
4.3) Application de la méthode de Ziegler-Nichols	61
4.3.1) Boucle Ouverte	61

TABLE DES MATIÈRES

4.3.1.1) Détermination des paramètres	61
4.3.1.2) Résultat et analyse	62
4.3.2) Boucle fermée	62
4.3.2.1) Détermination des paramètres	62
4.3.2.2) Résultat et analyse	63
4.4) Application de la méthode de Cohen-Coon pour le réglage PID	63
4.4.1) Calcul des paramètres PID selon Cohen-Coon	63
4.4.2) Résultat du système régulé	64
4.5) Application de la méthode Essai-Erreur pour le réglage PID	64
4.5.1) Paramètres PID déterminés par essai-erreur	64
4.5.2) Résultat du système régulé	65
4.6) Conclusion	66
Conclusion générale	68
Liste des Références	70

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1.1: Système physique

Figure 1.2: Système de contrôle

Figure 1.3 : La relation causale entre les intrants et les extrants dans une usine

Figure 1.4 : Exemple de système linéaire

Figure 1.5: Non-linéarités

Figure 1.6 : Exemple de système non linéaire

Figure 1.7 : Signaux de Systèmes à Temps Continu et Discret

Figure 1.8 : Schéma du système de contrôle en boucle ouverte

Figure 1.9 : Schéma du système de contrôle en boucle fermée

Figure 1.10: Action proportionnelle

Figure 1.11: Action intégrale I

Figure 1.12: Action dérivée D

Figure 2.1: Détermination des paramètres K , T_a et T_u , utilisées par la méthode de ZN en boucle ouverte

Figure 2.2: détermination des paramètres p et T_u utilisées par la méthode de ZN en boucle ouverte pour un système intégrateur

Figure 2.3 : Structure de commande en boucle fermée

Figure 2.4 : Réponse indicielle d'un processus en régime oscillatoire bouclé avec un correcteur proportionnel K_c (limite de stabilité)

Figure 3.1: Fonctionnement des AGs

Figure 3.2 : les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique

Figure 3.3 : illustration schématique du codage des variables réelles

Figure 3.4: la mutation

Figure 3.5 : Procédure de croisement dans le cas d'un codage binaire

Figure 3.6: Procédure de croisement uniforme dans le cas d'un codage entier

Figure 3.7 : Exemple de sélection par roulette

Figure 3.8: La fonction fitness

Figure 3.9: Un neurone biologique

Figure 3.10 : Modèle d'un neurone formel

Figure 3.11 : Modèle d'un neurone formel

LISTE DES FIGURES

Figure 3.12 : (a) : Architecture simple, (b) : architecture d'un RN statique multicouches, (c) : architecture d'un RN dynamique de Hop Field

Figure 3.13 : Réseau de neurones dynamique

Figure 3.14: Apprentissage supervisé

Figure 3.15: Apprentissage non supervisé

Figure 3.16 : Principe de la commande adaptative

Figure 3.17 : Structure de la commande adaptative directe

Figure 3.18 : Structure de la commande adaptative indirecte

Figure 3.19 : Schéma-bloc d'un Système Adaptatif à Modèle de Référence (SAMR)

Figure 3.20: Structure parallèle

Figure 3.21: Structure série

Figure 3.22: Structure série-parallèle

Figure 3.23 : Schéma-bloc d'un système adaptatif à Gain programmé

Figure 3.24 : Schéma-bloc d'un Système Adaptatif Auto-Ajustable (STR)

Figure 3.25 : Principe de la synthèse du régulateur RST

Figure 4.1 : Réponse du système sans régulateur

Figure 4.2 : Réponse régulée – ZN Boucle Ouverte

Figure 4.3 : Réponse régulée – ZN Boucle Fermée

Figure 4.4 : Réponse indicielle du système – méthode de Cohen-Coon

Figure 4.5 : Réponse régulée – PID Cohen-Coon

Figure 4.6 : Réponse du système sans régulateur

Figure 4.7 : Régulation P uniquement - Réponse oscillatoire

Figure 4.8 : Régulation PI – après ajustement de T_i

Figure 4.9 : Régulation PID final (essai-erreur)

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Comparaison du système de contrôle en boucle ouverte et en boucle fermée

Tableau 1.2 : Caractéristiques du régulateur PID

Tableau 1.3 : Structures du régulateur PID

Tableau 1.4 : Fonction objective intégrale commune

Tableau 2.1: Paramètres des régulateurs P, PI et PID obtenus à partir d'une réponse indicielle en Boucle ouverte

Tableau 2.2: Paramètres des régulateurs P, PI et PID obtenus à partir d'une réponse indicielle en boucle ouverte pour un système intégrateur

Tableau 2.3 : Paramètres des régulateurs P, PI et PID obtenus à partir d'une réponse indicielle en boucle fermée

Tableau 2.4 : Paramètres du régulateur PID obtenus par la méthode Cohen-Coon

Tableau 3.1: Fonctions d'activation

Tableau 4.1 : Comparaison entre boucle ouverte et boucle fermée

Tableau 4.2: Analyse comparative

Tableau 4.3: Analyse comparative

Tableau 4.4 : Résumé comparatif des performances

Introduction générale

Introduction générale :

Avec l'évolution rapide de la technologie et la complexification croissante des systèmes industriels, la commande automatique est devenue un outil incontournable pour garantir la performance, la stabilité et l'efficacité dans divers domaines d'application, tels que l'industrie, l'énergie, la robotique et les systèmes intelligents. Le régulateur constitue un élément fondamental de ces systèmes, notamment le régulateur PID (Proportionnel – Intégral – Dérivatif), qui reste largement utilisé en raison de sa simplicité et de son efficacité. Cependant, la performance de ce régulateur dépend fortement de la précision du réglage de ses trois paramètres (K_p , K_i , K_d), ce qui représente un véritable défi dans la pratique.

Dans ce contexte, ce mémoire vise à étudier plusieurs méthodes classiques de réglage du régulateur PID, telles que les méthodes de Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, et l'approche empirique Essai-Erreur. Nous nous sommes également intéressés à des techniques modernes, apparues pour répondre aux limitations des approches traditionnelles, notamment dans les systèmes non linéaires ou à dynamique variable. Ces techniques incluent les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones artificiels, ainsi que la commande adaptative, qui permettent de proposer des solutions plus souples et précises dans des environnements complexes.

Ce travail est structuré en quatre chapitres principaux :

Dans le **chapitre 1**, nous allons aborder les principes fondamentaux des systèmes de commande, en détaillant leurs composants, leurs classifications, et en présentant le régulateur PID avec ses principales caractéristiques.

Dans le **chapitre 2**, nous allons étudier en détail les principales méthodes classiques de réglage du PID, à savoir les approches de Ziegler-Nichols, de Cohen-Coon, et l'approche Essai-Erreur, tout en analysant leurs principes de fonctionnement et domaines d'application.

Dans le **chapitre 3**, nous allons explorer des techniques modernes basées sur l'intelligence artificielle et les méthodes d'optimisation, notamment les algorithmes génétiques, les réseaux neuronaux et la commande adaptative, afin de présenter les perspectives d'évolution dans ce domaine.

Enfin, dans le **chapitre 4**, nous allons passer à l'application pratique, à travers des simulations sous MATLAB mettant en œuvre les trois méthodes classiques (Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Essai-Erreur), et comparer leurs performances selon des critères comme la stabilité, la rapidité de réponse et la précision.

À travers ce mémoire, nous espérons offrir une contribution complète combinant l'approche théorique et la mise en œuvre pratique, tout en approfondissant la compréhension des

INTRODUCTION GENERALE

techniques de réglage des régulateurs PID et leur impact sur la performance des systèmes asservis.

Chapitre 01 :

Fondements de la Régulation des Systèmes de Contrôle

1.1) Introduction :

Le contrôle automatique constitue la pierre angulaire de nombreuses applications en ingénierie moderne, tant dans les domaines industriels que technologiques. Avec l'évolution des systèmes et leur complexification, il est devenu essentiel de maîtriser les concepts fondamentaux qui régissent ces systèmes en termes de structure et de fonctionnement.

Ce chapitre a pour objectif de présenter une vue d'ensemble sur les systèmes asservis, en mettant l'accent sur leur classification, leurs types, ainsi que sur des notions clés telles que les systèmes en boucle ouverte et en boucle fermée. Il traite également des composants des systèmes, à savoir les entrées, les sorties et les perturbations, tout en introduisant le régulateur PID, l'un des plus utilisés dans les systèmes industriels. Ce cadre théorique constitue une base nécessaire à la compréhension des chapitres suivants, dédiés aux techniques de réglage.

1.2) Systèmes de contrôle :**1.2.1) Système :**

Un système est une combinaison ou un arrangement de différents composants physiques qui agissent ensemble comme une unité entière pour atteindre un certain objectif.

Chaque objet physique est en fait un système. Une salle de classe est un bon exemple de système physique. Une salle avec la combinaison de bancs, tableau noir, ventilateurs, éclairage, etc. peut être appelée salle de classe qui agit comme système élémentaire.

Un autre exemple de système est une lampe. Une lampe composée de verre, de filament est un système physique. De même, un cerf-volant composé de papier et de bâtons est un exemple de système physique.

De même, un système peut être de n'importe quel type, c'est-à-dire physique, écologique, biologique, etc. [1].

1.2.2) Système de contrôle :

Contrôler signifie réguler, diriger ou commander. Par conséquent, un système de contrôle est un arrangement de différents éléments physiques connectés de manière à se réguler, à se diriger ou à se commander lui-même ou un autre système.

Par exemple, si dans une salle de classe, un professeur donne son cours, la combinaison devient un système de contrôle comme ; il essaie de réguler, de diriger ou de commander les étudiants afin d'atteindre l'objectif qui est de leur transmettre de bonnes connaissances. De

même, si une lampe est allumée ou éteinte à l'aide d'un interrupteur, l'ensemble du système peut être qualifié de système de contrôle. Le concept de système physique et de système de contrôle est illustré dans les figures 1.1 et 1.2.

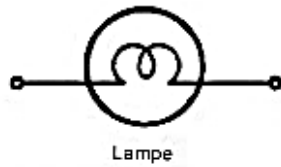


Figure 1.1 : Système physique [1]

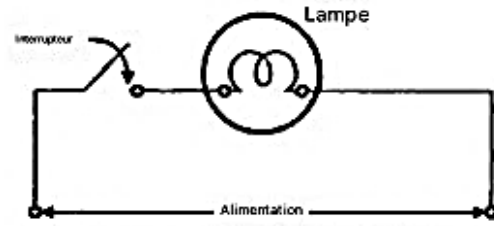


Figure 1.2 : Système de contrôle [1]

En résumé, un système de contrôle peut être défini, dans son acception la plus large, comme une interconnexion de composants physiques agencés de manière à assurer une fonction spécifique, tout en intégrant un mécanisme d'action ou de régulation [1].

1.3) Composants et Terminologie Fondamentale d'un Système de Contrôle :

- **Le Processus ou Système à Contrôler (Process/Plant) :** La partie d'un système qui doit être contrôlée ou réglementée [1].
- **Contrôleur :** L'élément du système lui-même ou externe au système qui contrôle l'usine ou le processus est appelé contrôleur [1].

Pour chaque système, il doit y avoir excitation et le système l'accepte comme entrée. Et pour analyser le comportement d'un système vis-à-vis de cette entrée, il est nécessaire de définir la sortie d'un système.

- **Entrée :** C'est un signal appliqué ou un signal d'excitation appliqué au système de contrôle à partir d'une source d'énergie externe afin de produire une sortie spécifiée [1].
- **Sortie :** C'est le signal particulier d'intérêt ou la réponse réelle obtenue à partir d'un système de contrôle lorsque l'entrée y est appliquée [1].
- **Perturbations :** Une perturbation est un signal qui a tendance à affecter négativement la valeur de sortie d'un système. Si une telle perturbation est générée dans le système lui-même, elle est appelée perturbation interne. La perturbation générée à l'extérieur du système agissant comme une entrée supplémentaire au système en plus de son entrée normale, affectant négativement la sortie est appelée une perturbation externe [1].

Les systèmes de commande peuvent avoir plus d'une entrée ou sortie. A partir des informations concernant le système, il est possible de bien définir toutes les entrées et sorties des systèmes.

La variable d'entrée est généralement appelée l'entrée de référence et la sortie est généralement appelée la sortie contrôlée.

La relation de cause à effet entre l'entrée et la sortie d'une usine peut être illustrée comme dans la Figure 1.3.



Figure 1.3 : La relation causale entre les intrants et les extrants dans une usine [1]

1.4) Classification des systèmes de contrôle :

1.4.1) Système de contrôle naturel et système de contrôle artificiel :

1.4.1.1) Systèmes de contrôle naturel :

Les systèmes biologiques, les systèmes à l'intérieur de l'être humain sont de type naturel [1].

Exemple : Le système de transpiration à l'intérieur de l'être humain est un bon exemple de système de contrôle naturel. Ce système active les glandes sécrétrices, sécrète la sueur et régule la température du corps humain.

1.4.1.2) Systèmes de contrôle artificiels :

Les différents systèmes que nous utilisons dans notre vie quotidienne sont conçus et fabriqués par des êtres humains. Ces systèmes comme les véhicules, les commutateurs, divers contrôleurs etc. sont appelés des systèmes de contrôle artificiels [1].

Exemple : Un système automobile avec engrenages, accélérateur, système de freinage est un bon exemple de système de contrôle artificiel.

1.4.2) Système de contrôle automatique et système de contrôle combinatoire :**1.4.2.1) Système de contrôle automatique :**

Il s'agit d'un système de contrôle conçu à partir des principes fondamentaux des mathématiques et de l'ingénierie. Il est généralement composé de capteurs, d'actionneurs et des répondeurs [1].

1.4.2.2) Système de contrôle combinatoire :

Systèmes de commande combinatoire : Un système de commande combinatoire est une combinaison de systèmes naturels et artificiels : c.-à-d. le conducteur conduit un véhicule. Dans un tel système, pour le bon fonctionnement du système, il est nécessaire que les systèmes naturels du conducteur et les systèmes des véhicules fabriqués par l'homme soient actifs [1].

1.4.3) Système de contrôle variant dans le temps et système de contrôle invariant dans le temps :**1.4.3.1) Système de contrôle variant dans le temps :**

C'est un système de contrôle où un ou plusieurs paramètres du système de contrôle varient avec le temps [1].

1.4.3.2) Système de commande invariant dans le temps :

C'est un système de commande dont aucun des paramètres ne varie avec le temps, c.-à-d. un système de commande composé uniquement d'inductances, de condensateurs et de résistances [1].

1.4.4) Systèmes linéaires et non linéaires :

Un système de contrôle est dit linéaire s'il satisfait les propriétés suivantes [14] :

a) Le principe de superposition s'applique au système. Cela signifie que la réponse à plusieurs entrées peut être obtenue en considérant une entrée à la fois, puis en additionnant algébriquement les résultats individuels.

Mathématiquement, le principe de superposition s'exprime par deux propriétés:

1) La propriété additive qui dit que pour x et y appartenant au domaine de la fonction f , alors nous avons:

$$f(x + y) = f(x) + f(y) \quad (1.1)$$

2) Propriété homogène qui dit que pour tout x appartenant au domaine de la fonction f et pour toute constante scalaire α nous avons,

$$f(\alpha x) = \alpha \cdot f(x) \quad (1.2)$$

b) L'équation différentielle décrivant le système est linéaire et ses coefficients sont des constantes.

c) En pratique, la sortie, c'est-à-dire la réponse, varie linéairement avec l'entrée, c'est-à-dire la fonction de forçage pour les systèmes linéaires.

Exemple en temps réel : un réseau résistif représenté sur la figure 1.4 (a) est un système linéaire. La figure 1.4 (b) montre la relation linéaire existant entre l'entrée et la sortie.

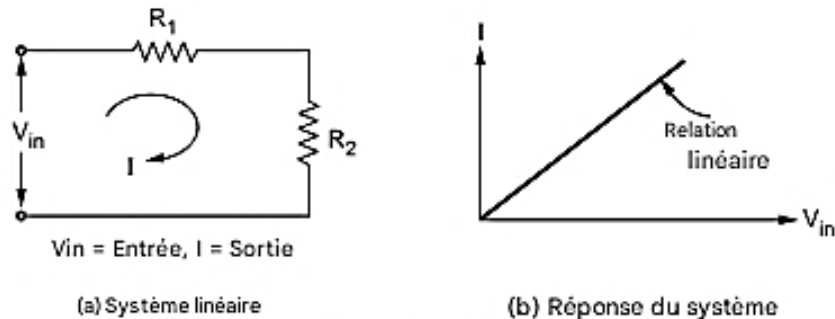


Figure 1.4 : Exemple de système linéaire [1]

Un système de contrôle est dit non linéaire si,

- Il ne satisfait pas au principe de superposition.
- Les équations décrivant le système sont de nature non linéaire.

La fonction $f(x) = x^2$ est non linéaire parce que

$$f(x_1 + x_2) = (x_1 + x_2)^2 \neq (x_1)^2 + (x_2)^2 \quad (1.3)$$

et $f(\alpha x) = (\alpha x)^2 \neq \alpha x^2$ où $\alpha = \text{Constante}$

Les équations d'un système non linéaire impliquent de telles fonctions non linéaires.

- La sortie ne varie pas linéairement pour les systèmes non linéaires.

Les diverses non-linéarités pratiquement présentes dans le système sont présentées dans la Figure 1.5 (a), (b) et (c).

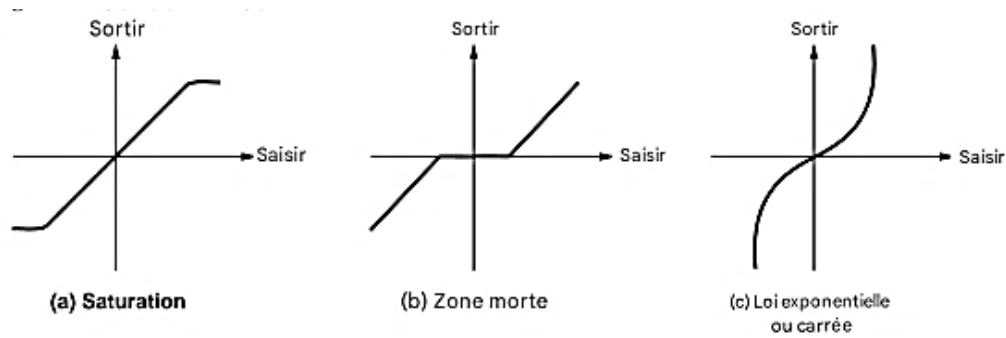


Figure 1.5 : Non-linéarités [1]

La saturation signifie que si l'entrée dépasse une certaine limite, la sortie reste constante, c'est-à-dire qu'elle n'est pas linéaire. La relation flux-courant (courbe B-H) illustre la saturation en pratique. Dans certaines grandes vannes, même si la force augmente jusqu'à une certaine valeur, la vanne ne fonctionne pas. Il n'y a donc pas de réponse pendant un certain temps, appelé zone morte [1].

L'équation tension-courant d'une diode est exponentielle et non linéaire donc le circuit de la diode est un exemple de système non linéaire. Ceci est illustré à la figure 1.6.

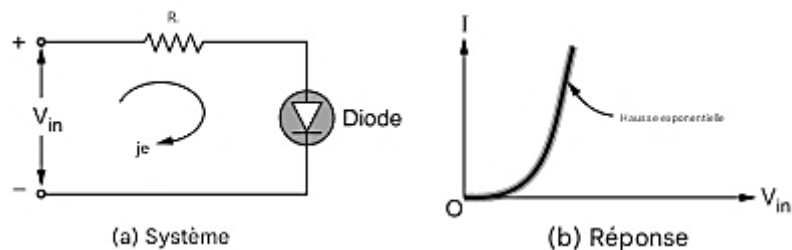


Figure 1.6 : Exemple de système non linéaire [1]

On peut voir que tant que V_{in} augmente jusqu'à une certaine valeur, le courant reste presque nul. Il s'agit d'une zone morte et par la suite le courant de tension sont exponentiellement liés les uns aux autres, ce qui est une fonction non linéaire .

Point clé : En pratique, il est difficile de trouver un système parfaitement linéaire. La plupart des systèmes physiques sont non linéaires dans une certaine mesure .

Mais si la présence d'une certaine non-linéarité est négligeable et n'affecte pas la réponse du système, alors la non-linéarité peut être négligée .

Les procédures pour trouver des solutions à des problèmes de systèmes non linéaires sont compliquées et longues. En raison de cette difficulté, la plupart des systèmes non linéaires sont traités comme des systèmes linéaires pour la gamme limitée d'opération avec quelques

hypothèses et approximations. Le nombre de méthodes linéaires, peut alors être appliqué pour l'analyse de tels systèmes linéaires [1].

1.4.5) Systèmes de contrôle à temps continu et à temps discret :

Dans un système de contrôle à temps continu, toutes les variables du système sont les fonctions d'une variable à temps continu « t ». Le contrôle de la vitesse d'un moteur à courant continu à l'aide d'une rétroaction tachymétrique est un exemple de système de données continues. À tout instant « t », elles dépendent du temps. Dans les systèmes à temps discret, une ou plusieurs variables du système ne sont connues qu'à certains intervalles de temps discrets. Elles ne dépendent pas continuellement du temps. Les systèmes basés sur un microprocesseur ou un ordinateur utilisent de tels signaux à temps discret [16].

Les raisons d'utiliser de tels signaux dans les contrôleurs numériques sont [16] :

- 1) Ces signaux sont moins sensibles au bruit.
- 2) Le partage du temps d'un équipement avec d'autres canaux est possible.
- 3) Avantageux du point de vue de la taille, de la vitesse, de la mémoire, de la flexibilité, etc.

Les systèmes utilisant de tels contrôleurs numériques ou signaux échantillonnés sont appelés systèmes de données échantillonnées.

Le système à temps continu utilise les signaux tels qu'illustrés dans la Figure 1.7 (a) qui sont continus dans le temps tandis que le système discret utilise les signaux tels qu'illustrés dans la Figure 1.7 (b).

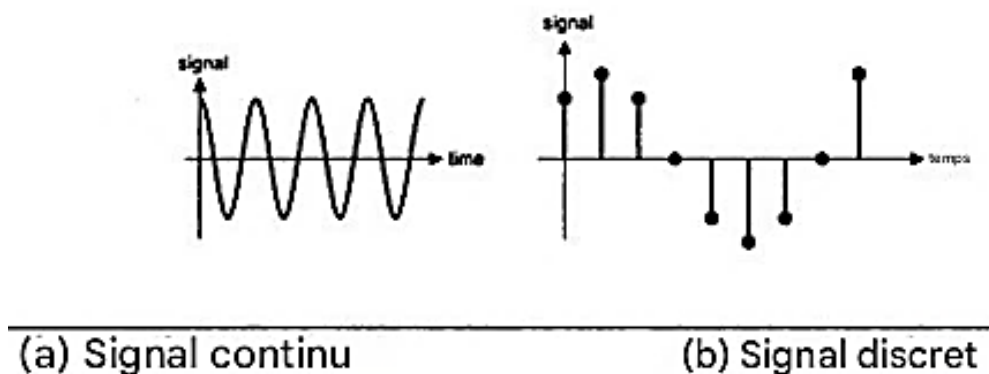


Figure 1.7 : Signaux de Systèmes à Temps Continu et Discret [1]

1.4.6) Systèmes de contrôle déterministes et stochastiques :

On dit qu'un système de contrôle est déterministe lorsque sa réponse aux entrées ainsi que son comportement aux perturbations externes sont prévisibles et répétables. Si cette réponse est imprévisible, on dit que le système est de nature stochastique [1].

1.4.7) Systèmes de contrôle des paramètres regroupés et distribués :

Le système de contrôle qui peut être décrit par des équations différentielles ordinaires est appelé système de contrôle des paramètres groupés. Par exemple, les réseaux électriques avec différents paramètres comme la résistance, l'inductance, etc. sont des systèmes de paramètres groupés. Les systèmes de contrôle qui peuvent être décrits par des équations aux dérivées partielles sont appelés systèmes de contrôle des paramètres distribués. Par exemple, une ligne de transmission ayant ses paramètres résistance et inductance totalement répartis le long de celle-ci. Par conséquent, la description des caractéristiques de la ligne de transmission est toujours faite à l'aide d'équations aux dérivées partielles [1].

1.4.8) Systèmes SISO et MIMO :

Un système qui n'a qu'une seule entrée et une seule sortie est appelé système à entrée unique. Par exemple, un système de commande de position ne comporte qu'une seule entrée (position souhaitée) et une seule sortie (position réelle). Certains systèmes peuvent avoir plusieurs types d'entrées et de sorties multiples, on les appelle des systèmes à entrées multiples.

1.5) Système de contrôle en boucle ouverte et système de contrôle en boucle fermée :**1.5.1) Système de contrôle en boucle ouverte :**

Définition : Un système dans lequel la sortie dépend de l'entrée mais qui contrôle l'action ou l'entrée est totalement indépendante de la sortie ou des changements dans la sortie du système, est appelé système à boucle ouverte [15].

De manière générale, il peut être représenté comme dans la Figure 1.8.

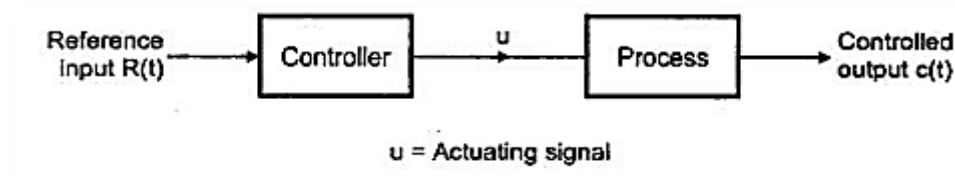


Figure 1.8 : Schéma du système de contrôle en boucle ouverte [1]

L'entrée de référence $[R(t)]$ est appliquée au contrôleur qui génère le signal d'actionnement (u) nécessaire pour contrôler le processus à contrôler. Le processus donne la sortie contrôlée nécessaire $C(t)$.

Avantages :

- 1) Ces systèmes sont de construction simple .
- 2) Très pratique lorsque la production est difficile à mesurer .
- 3) Ces systèmes sont faciles à entretenir .
- 4) En général, ceux-ci ne sont pas préoccupés par les problèmes de stabilité .
- 5) Ces systèmes sont simples à concevoir et donc économiques .

Inconvénients :

- 1) De tels systèmes sont imprécis et peu fiables parce que la précision de ces systèmes dépend totalement du pré-étalonnage exact du contrôleur .
- 2) De tels systèmes donnent des résultats inexacts s'il y a des variations dans l'environnement externe, c.-à-d. qu'ils ne peuvent pas détecter les changements environnementaux .
- 3) De même, ils ne peuvent pas détecter les perturbations internes dans le système, après l'étape du contrôleur .
- 4) Pour maintenir la qualité et l'exactitude, le recalibrage du contrôleur est nécessaire, de temps en temps.

1.5.2) Système de contrôle en boucle fermée :

Définition : Un système dans lequel l'action de contrôle ou d'entrée est en quelque sorte dépendante de la sortie ou des changements dans la sortie est appelé système à boucle fermée.

Pour avoir une dépendance de l'entrée sur la sortie, un tel système utilise la propriété rétroaction [15].

Rétroaction : La rétroaction est une propriété du système par laquelle elle permet de comparer le résultat avec l'entrée de référence afin que des mesures de contrôle appropriées puissent être prises [17].

Dans un tel système, la sortie ou une partie de la sortie est renvoyée à l'entrée pour comparaison avec l'entrée de référence appliquée.

Le système en boucle fermée peut être représenté comme dans la Figure 1.9.

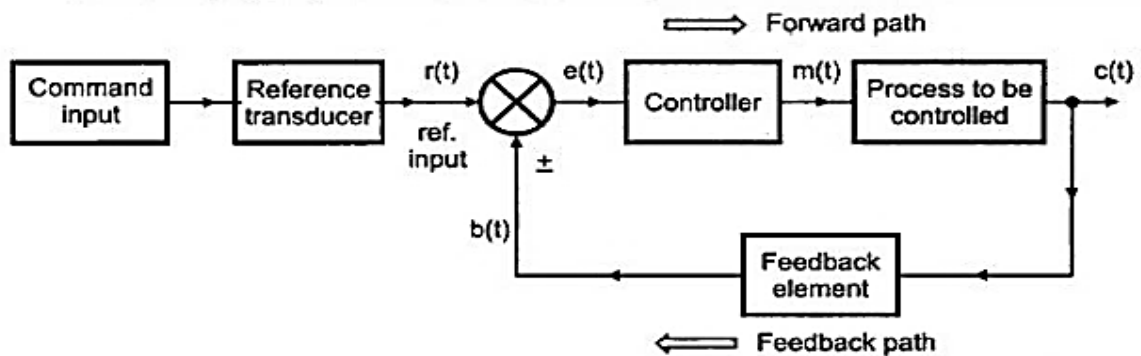


Figure 1.9 : Schéma du système de contrôle en boucle fermée [1]

$r(t)$ = Reference Input $e(t)$ = Error signal $c(t)$ = Controlled output

$m(t)$ = Manipulated signal $b(t)$ = Feedback signal

Il n'est pas possible dans tous les systèmes que le signal disponible puisse être appliqué comme entrée au système. Selon la nature du contrôleur et de l'installation, il est nécessaire de le réduire ou de l'amplifier ou de modifier sa nature, c.-à-d. en le rendant discret par rapport au type de signal continu, etc. Cette entrée modifiée conformément aux exigences est appelée entrée de référence qui doit être générée en utilisant la référence transducteur. L'excitation principale du système est appelée entrée de commande qui est ensuite appliquée au transducteur de référence pour générer une entrée de référence [1].

La partie de la sortie, qui doit être décidée par l'élément de rétroaction, est renvoyée à l'entrée de référence. Le signal émis par l'élément de rétroaction est appelé 'signal de rétroaction' $b(t)$.

Il est ensuite comparé à l'entrée de référence donnant le signal d'erreur $e(t) = r(t) + b(t)$. Lorsque le signe de rétroaction est positif, les systèmes sont appelés comme des systèmes de rétroaction positive et si c'est négatif, les systèmes sont appelés comme des systèmes de rétroaction négative.

Ce signal d'erreur est ensuite modifié par le contrôleur et décide du signal manipulé proportionnellement pour le processus à contrôler.

Cette manipulation est telle que l'erreur approche de zéro. Ce signal actionne alors le système réel et produit une sortie. Comme la sortie est contrôlée, elle est appelée sortie contrôlée $c(t)$.

Avantages :

- 1) La précision d'un tel système est toujours très élevée parce que le contrôleur modifie et manipule le signal de déclenchement de telle sorte que l'erreur dans le système sera zéro.
- 2) Ce système détecte les changements environnementaux, ainsi que les perturbations internes et modifie l'erreur en conséquence.
- 3) Dans un tel système, il y a effet réduit des non-linéarités et des distorsions.
- 4) La bande passante de ce système, c.-à-d. la zone de fréquence d'exploitation pour un tel système est très élevée.

Inconvénients :

- 1) De tels systèmes sont compliqués et prennent du temps du point de vue de la conception, ce qui les rend plus coûteux.
- 2) En raison de la rétroaction, le système tente de corriger l'erreur de temps à autre. La tendance à surcorriger l'erreur peut entraîner des oscillations sans contrainte dans le système. Par conséquent, le système doit être conçu en tenant compte des problèmes d'instabilité dus à la rétroaction.

1.5.3) Comparaison du système de contrôle en boucle ouverte et en boucle fermée :

Boucle ouverte	Boucle fermée
1) Tout changement dans la sortie n'a aucun effet sur l'entrée, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de rétroaction.	1) Les changements dans la sortie, affecte l'entrée qui est possible par l'utilisation de rétroaction.
2) La mesure de sortie n'est pas requise pour le fonctionnement du système	2) La mesure de sortie est nécessaire.
3) L'élément de rétroaction est absent.	3) L'élément de rétroaction est présent.
4) Le détecteur d'erreur est absent.	4) Un détecteur d'erreur est nécessaire.
5) Il est inexact et peu fiable.	5) Très précis et fiable.
6) Très sensible aux perturbations.	6) Moins sensible aux perturbations.
7) Très sensible aux changements environnementaux.	7) Moins sensible aux changements environnementaux.
8) La bande passante est petite.	8) La bande passante est grand.
9) Simple à construire et bon marché.	9) Complicé à concevoir et donc coûteux.

10) Ils sont généralement de nature stable.	10) La stabilité est le facteur principal lors de la conception.
11) Fortement affecté par les non-linéarités.	11) Effet réduit des non-linéarités.

Tableau 1.1 : Comparaison du système de contrôle en boucle ouverte et en boucle fermée [1]

1.6) Régulateur PID :

Le régulateur PID, souvent désigné comme contrôleur ou correcteur, est composé de trois éléments fondamentaux : proportionnel (P), intégral (I) et dérivatif (D). Il s'agit de l'un des types de régulation les plus répandus dans les systèmes de commande industrielle. En effet, même les architectures de contrôle les plus sophistiquées peuvent inclure un module PID en tant que composant central du réseau de régulation. Ce type de contrôleur repose sur le principe de la rétroaction et permet, d'une part, de corriger les erreurs à l'état stable grâce à l'intégration, et d'autre part, d'anticiper les variations futures du système par l'effet dérivatif [2].

1.6.1) Action Proportionnel :

Une action est considérée comme proportionnelle lorsque le signal de commande correspond directement au signal d'erreur. Elle corrige rapidement tout écart par rapport à la quantité souhaitée, permettant des ajustements rapides pour surmonter l'inertie importante du système. Pour minimiser l'écart de réglage et optimiser la vitesse du système, le gain est augmenté (ce qui réduit la bande proportionnelle), tout en veillant à la stabilité du système. Le régulateur P est utilisé lorsque la précision du paramètre ajusté n'est pas importante figure (1.10) [2].

L'action proportionnelle d'un régulateur peut être exprimée soit par le gain G (également noté K ou K_p), soit par la bande proportionnelle (BP), également désignée par PB, XP% ou P%. Cette bande correspond à la variation, exprimée en pourcentage, qu'il faut appliquer à l'entrée du régulateur pour provoquer une variation de 100 % à sa sortie. Ainsi, la relation peut être exprimée comme suit :

$$BP\% = 100/G_r \quad (1.4)$$

L'équation de la commande u de l'action proportionnelle P est comme suit :

$$U(t) = K_p e(t) = K_p (y_c(t) - y(t)) \quad (1.5)$$

Et la fonction de transfert de l'action proportionnelle P est :

$$C(s) = K_p \quad (1.6)$$



Figure 1.10 : Action proportionnelle P [2]

1.6.2) Action intégrale (I) :

L'action intégrale est mise en œuvre lorsque le signal de commande est proportionnel à l'intégrale du signal d'erreur dans le temps. Elle vient compléter l'action proportionnelle et permet de supprimer l'erreur résiduelle à l'état stationnaire. Pour rendre le système plus réactif (réduire le délai de réponse), on réduit l'action intégrale. Cependant, cela entraîne une augmentation du décalage de phase qui cause l'instabilité en mode fermé. L'action intégrale est employée lorsque l'on vise une précision absolue en régime permanent. De plus, elle contribue à filtrer la variable à réguler, ce qui en fait un outil précieux pour le contrôle des variables affectées par le bruit, comme illustré à la figure (1.11) [2].

L'équation de la commande u de l'action intégrale I est comme suit :

$$U(t) = K_i \int_0^t (y_c(\tau) - y(\tau)) d\tau = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t (y_c(\tau) - y(\tau)) d\tau \quad (1.7)$$

Et la fonction de transfert de l'action intégrale I est :

$$C(s) = \frac{K_p}{T_i s} = \frac{K_i}{s} \quad (1.8)$$

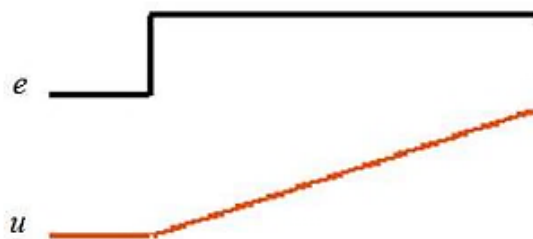


Figure 1.11 : Action intégrale I [2]

1.6.3) Action dérivée (D) :

L'action dérivée intervient lorsque la commande est fonction de la variation temporelle du signal d'erreur. Son rôle principal consiste à compenser les phénomènes d'inertie liés au retard du système, ce qui a pour effet d'accélérer la dynamique de la réponse et de renforcer la stabilité globale du système, notamment en réduisant rapidement les oscillations provoquées par une perturbation ou une variation soudaine de la consigne (voir figure 1.12).

En pratique, cette action est le plus souvent appliquée aux variations de la variable à réguler uniquement, plutôt qu'à l'écart entre la mesure et la consigne.

L'action D est généralement utilisée en milieu industriel pour gérer des variables à évolution lente comme la température ; il est déconseillé de l'utiliser pour réguler des variables bruyantes ou très variables, comme la pression. En dérivant un bruit, son amplitude risque de devenir plus importante que celle du signal utile [2].

La formule de la commande u pour l'action dérivée D est la suivante :

$$U(t) = K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.9)$$

La fonction de transfert pour l'action dérivée D est :

$$C(s) = K_p T_d s \quad (1.10)$$

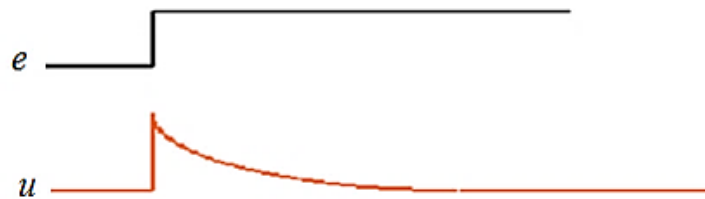


Figure 1.12 : Action dérivée D [2]

Coefficient	Temps de montée	Temps de stabilisation	Dépassement	Erreur Statique
Kp	Diminue	Augmente	Augmente	Diminue
Ki	Diminue	Augmente	Augmente	Annule
Kd	-	Diminue	Diminue	-

Tableau 1.2 : Caractéristiques du régulateur PID [2]

1.7) Structures du régulateur PID :

Trois types de régulateurs distincts peuvent être établis sur la base des trois corrections : proportionnelle, intégrale et dérivée [2].

Structure	Symbole	Equation
Série		$u(t) = K_p * \left\{ \left(1 + \frac{T_d}{T_i} \right) e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e * dt + T_d * \frac{de}{dt} \right\}$
Parallèle		$u(t) = K_p * e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e * dt + T_d * \frac{de}{dt}$
Mixte		$\{ u(t) = K_p * e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e * dt + T_d * \frac{de}{dt} \}$

Tableau 1.3 : Structures du régulateur PID [2]

1.8) Critères de performance :

Les critères d'erreur intégrale considèrent l'ensemble de la réponse des processus. Le tableau (1.4) synthétise les indicateurs de performance les plus couramment employés [2] :

Étiquette	Légende	Formule
ISE	Intégrale de l'Erreur quadratique (Integral of Squared Error)	$f_{ISE} = \int_0^t e^2(t) dt$
IAE	Intégrale de la valeur absolue de l'erreur Integral of Absolute Error	$f_{IAE} = \int_0^t e(t) dt$
ITSE	Integral of Time Squared Error	$f_{ITSE} = \int_0^t t e^2(t) dt$
ITAE	Integral of Time Absolute Error	$f_{ITAE} = \int_0^t t e(t) dt$

Tableau 1.4 : Fonction objective intégrale commune [2].

1.9) Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a permis de fournir une vision globale des fondements théoriques des systèmes asservis, tout en mettant en lumière les notions essentielles qui forment le socle de la compréhension du comportement et du contrôle de ces systèmes. L'étude des différents types de systèmes, de leurs composants et du régulateur PID a ainsi posé les jalons nécessaires pour aborder les méthodes classiques et modernes de réglage dans les chapitres suivants.

Chapitre 02 :

Méthodes de réglage classiques

2.1) Introduction :

Le réglage des paramètres du régulateur PID constitue une étape cruciale dans l'optimisation des performances des systèmes de contrôle. Plusieurs méthodes ont été développées au fil du temps pour déterminer les valeurs optimales des trois paramètres essentiels du PID : le gain proportionnel (K_p), le temps intégral (T_i) et le temps dérivatif (T_d). Parmi ces méthodes, certaines se distinguent par leur simplicité et leur efficacité, en particulier dans un contexte industriel.

Ce chapitre présente une étude approfondie de trois techniques classiques de réglage des régulateurs PID : la méthode de Ziegler-Nichols, la méthode de Cohen-Coon, et la méthode empirique dite d'essai-erreur. Chacune de ces approches sera décrite en mettant en évidence ses principes de fonctionnement, ses avantages, ainsi que ses limites.

Ces méthodes serviront de base pour les études de cas présentées dans les chapitres suivants, où leur mise en œuvre pratique à l'aide de simulations sous MATLAB permettra d'évaluer leur impact sur la stabilité, la rapidité et la précision des systèmes régulés.

2.2) Méthodes de Ziegler et Nichols :

En 1942, Ziegler et Nichols ont introduit deux méthodes empiriques pour le réglage rapide des paramètres des régulateurs P, PI et PID [3], s'appuyant sur leur expertise pratique et quelques essais numériques. La première approche repose sur l'analyse de la réponse à un échelon du système en boucle ouverte, tandis que la seconde consiste à ajuster le gain du système en boucle fermée jusqu'à atteindre le seuil de stabilité. Ces deux techniques visent à déterminer les coefficients optimaux d'un correcteur PID classique, dont la fonction de transfert $C(s)$ est donnée par

$$C(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad (2.1)$$

2.2.1) Méthode basée sur la réponse indicielle en boucle ouverte :

La méthode de Ziegler-Nichols (ZN) en boucle ouverte repose sur les paramètres extraits de la réponse à un échelon du système. Cette approche permet d'obtenir deux types de réponses possibles [3].

- Système sans intégrateur :

La détermination des paramètres du régulateur PID peut se faire simplement en enregistrant la réponse indicielle (de l'amplitude E) du procédé lui-même (c'est-à-dire sans le régulateur) ; Ensuite, nous traçons la tangente au point d'inflexion de la courbe. Ensuite, nous mesurons le temps (T_g) et le retard apparent (T_u) correspondant au point d'intersection de la tangente à l'entrée d'amplitude E avec l'axe des abscisses. Nous pouvons alors calculer $T_a = T_g - T_u$ et le gain $K = y_\infty / E$ (figure 2.1), où y_∞ représente la valeur de sortie à l'état stationnaire. Il est alors possible d'utiliser les relations données dans le tableau (2.1) pour calculer les coefficients du régulateur choisi [3].

Type	K_c	T_i	T_d
P	$\frac{T_a}{(K T_u)}$		
PI	$\frac{0.9 T_a}{(K T_u)}$	$3T_u$	
PID	$\frac{1.2 T_a}{(K T_u)}$	$2T_u$	$0.5T_u$

Tableau 2.1: Paramètres des régulateurs P, PI et PID obtenus à partir d'une réponse indicielle en Boucle ouverte [3]

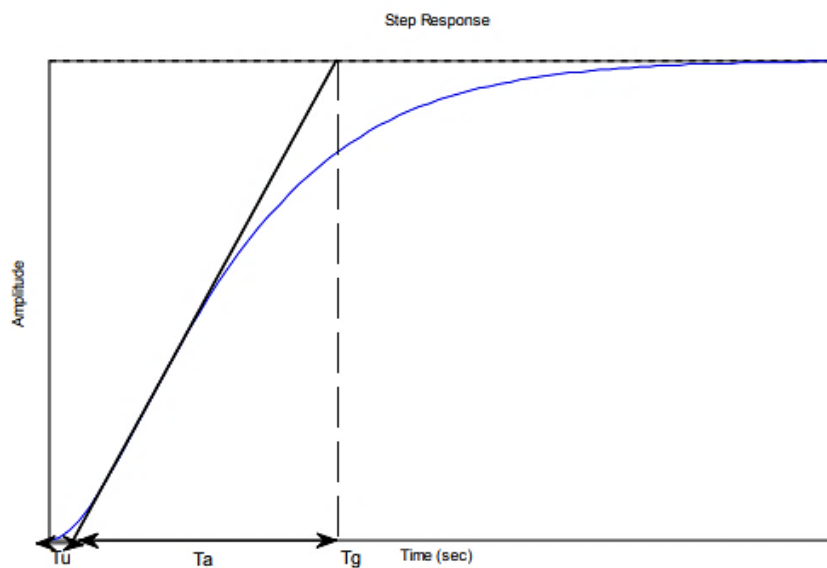


Figure 2.1: Détermination des paramètres K , T_a et T_u , utilisées par la méthode de ZN en boucle ouverte [3]

- Système avec intégrateur :

Ce procédé d'ajustement peut également être utilisé pour les systèmes comportant un intégrateur [3]. Il suffit d'enregistrer la réponse à un échelon d'amplitude E du processus seul, puis de tracer l'asymptote sur la partie finale de la courbe, comme illustré dans la figure (2.2). Ensuite, nous mesurons le retard apparent T_u correspondant au point où l'asymptote coupe l'abscisse, puis nous pouvons calculer la valeur de K en utilisant l'expression de pente donnée par $p=K.E$.

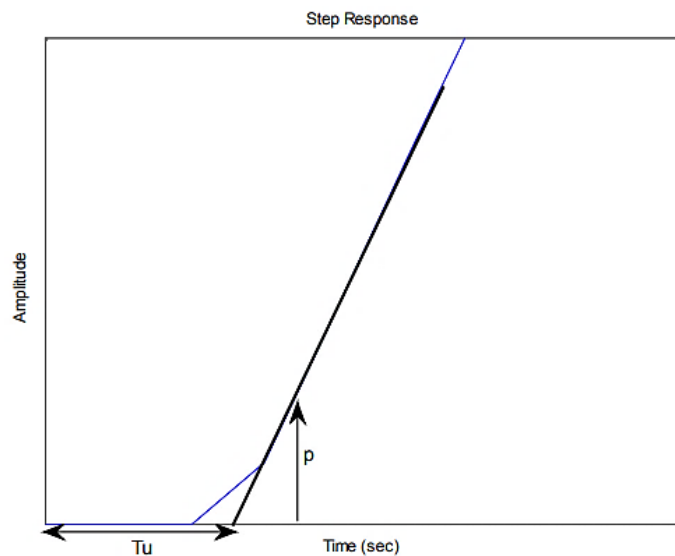


Figure 2.2: détermination des paramètres p et T_u utilisées par la méthode de ZN en boucle ouverte pour un système intégrateur [3]

Nous pouvons ensuite déterminer les coefficients du régulateur sélectionné en utilisant les relations fournies dans le tableau (2.2).

Type	K_c	T_i	T_d
P	$\frac{1}{(K T_u)}$		
PI	$\frac{0.9}{(K T_u)}$	$3.33T_u$	
PID	$\frac{1.2}{(K T_u)}$	$2T_u$	$0.5T_u$

Tableau 2.2: Paramètres des régulateurs P, PI et PID obtenus à partir d'une réponse indicielle en boucle ouverte pour un système intégrateur [3]

2.2.2) Méthode basée sur la réponse indicielle en boucle fermée :

Cette technique se base sur la détection du point critique du processus, déterminé par l'émergence d'oscillations ou l'atteinte de la limite de pompage. Elle est employée dans les situations où il n'est pas viable d'ouvrir la boucle de contrôle pour obtenir une réponse à un échelon. Pour réaliser ce test, le schéma de contrôle illustré à la figure (2.3) est créé et le contrôleur PID est configuré de manière à ce que seule l'action proportionnelle fonctionne, où le minimum T_d tend vers 0 et le maximum T_i tend vers l'infini. Le correcteur subit une augmentation progressive de son gain jusqu'à ce que des oscillations auto-entretenues (phénomène de pompage) se manifestent. Le gain K_c qui a conduit le système à sa limite de stabilité, ainsi que la période T_0 des oscillations observées, ont été observés, comme le montre la figure (2.4) [3].

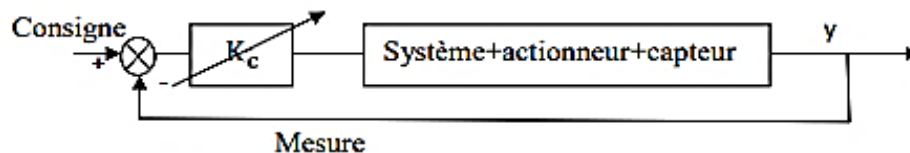


Figure 2.3 : Structure de commande en boucle fermée [3]

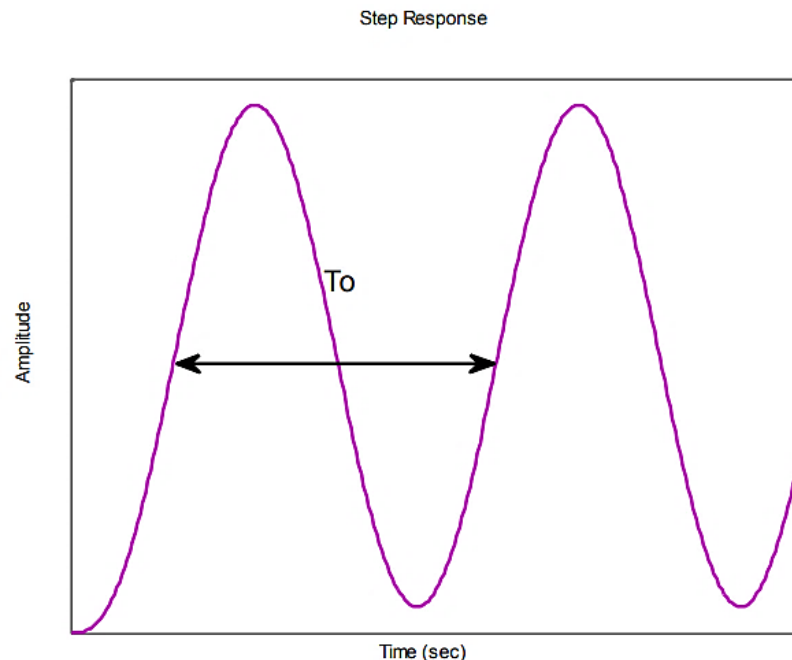


Figure 2.4 : Réponse indicielle d'un processus en régime oscillatoire bouclé avec un correcteur proportionnel K_c (limite de stabilité) [3]

En analysant le gain critique K_c du régulateur ainsi que la période d'oscillation T_0 de la réponse, il est possible de déterminer les paramètres du régulateur choisi à l'aide des formules présentées dans le tableau (2.3).

Type	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_c$		
PI	$0.4K_c$	$0.8T_0$	
PID	$0.6K_c$	$0.5T_0$	$0.125T_0$

Tableau 2.3 : Paramètres des régulateurs P, PI et PID obtenus à partir d'une réponse indicielle en boucle fermée [3]

Remarque :

Lorsque les paramètres recommandés par Ziegler-Nichols sont appliqués à un régulateur PID, la réponse du système en boucle fermée présente un comportement assez oscillatoire, avec un dépassement compris entre 30 % et 40 %, et un rapport d'amplitude des oscillations de 1/4, soit ($D_2 = 1/4D_1$), où D_1 et D_2 représentent respectivement le premier et le deuxième dépassement.

2.3) Méthode Cohen-coon :

L'approche de réglage Cohen-Coon est basée sur la méthode Ziegler-Nichols, mais intègre des informations système supplémentaires pour améliorer considérablement les performances de régulation. Cette méthode de réglage est classée comme une technique hors ligne. Elle identifie trois paramètres : a représente le gain en régime permanent, L le retard et T la constante de temps [4].

Les formules de réglage associées à Cohen-Coon, illustrées dans le tableau (2.4), ont été obtenues à partir de calculs analytiques et numériques. Les paramètres $a = K_p L/T$ et $\tau = L/(L+T)$ sont utilisés dans le tableau, T = constante de temps apparente et τ = temps mort relatif. Les paramètres de contrôle initiaux sont mesurés en fonction de la réponse du système, la constante de temps et le retard étant la sortie d'un changement d'échelon en régime permanent. L'objectif principal de cette méthode est de rejeter efficacement les perturbations de charge, réduisant ainsi l'erreur en régime permanent.

Les avantages de la méthode de réglage Cohen-Coon sont la réduction des erreurs d'approximation du gain et du retard en régime permanent grâce à l'utilisation du gain, une performance suffisante pour les systèmes avec retard, et une réponse en boucle fermée plus rapide que la méthode Ziegler-Nichols. L'inconvénient de la méthode de réglage Cohen-Coon est son inapplicabilité en ligne.

Régulateur	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{a}(1 + \frac{0.35\tau}{1-\tau})$		
PI	$\frac{0.9}{a}(1 + \frac{0.92\tau}{1-\tau})$	$\frac{3.3 - 3.0\tau}{1 + 1.2\tau} L$	
PD	$\frac{1.24}{a}(1 + \frac{0.13\tau}{1-\tau})$		$\frac{0.27 - 0.36\tau}{1 - 0.87\tau} L$
PID	$\frac{1.35}{a}(1 + \frac{0.18\tau}{1-\tau})$	$\frac{2.5 - 2.0\tau}{1 - 0.39\tau} L$	$\frac{0.37 - 0.37\tau}{1 - 0.81\tau} L$

Tableau 2.4 : Paramètres du régulateur PID obtenus par la méthode Cohen-Coon [4]

2.4) Méthode essai _ erreur :

Dans un premier temps [5], le régulateur est configuré en mode purement proportionnel. Cela implique de fixer T_i maximum (rendant $1/T_i$ très petit) et de réduire T_d au minimum.

Ensuite, on commence avec une faible valeur du gain proportionnel, que l'on augmente progressivement jusqu'à ce que la réponse du système devienne sinusoïdale. Cette valeur du gain est appelée gain critique. Qui faut réduire d'un facteur 2, et cette nouvelle valeur est adoptée comme réglage du terme proportionnel.

Par la suite, on diminue T_i par petits incréments jusqu'à réapparaître des oscillations maintenues. La valeur de T_i est fixée à trois fois, et elle est retenue comme réglage de la partie intégrale

Enfin, on augmente T_d jusqu'à observer des oscillations de type pompage (oscillations limites). On fixe alors T_d à un tiers de cette valeur et on le garde comme réglage de D.

2.5) Conclusion :

Ce chapitre a présenté les principales méthodes classiques utilisées pour le réglage des régulateurs PID, notamment les approches de Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, ainsi que la méthode empirique d'essai-erreur. Cette revue théorique a permis de comprendre les fondements de ces techniques, tout en identifiant leurs avantages, leurs limites et leurs domaines d'application dans l'industrie.

Cependant, face à la complexité croissante des systèmes modernes et à la variabilité de leurs comportements, ces méthodes peuvent montrer certaines insuffisances. Cela justifie l'émergence de techniques de réglage plus avancées basées sur l'intelligence artificielle et l'optimisation, telles que les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones et la commande adaptative, qui seront abordées dans le chapitre suivant. Ces approches offrent une meilleure adaptabilité et une plus grande efficacité dans les environnements dynamiques et non linéaires.

Chapitre 03 :

Techniques modernes basés sur l'optimisation

3.1) Introduction :

Avec l'évolution des systèmes industriels et l'augmentation de leur complexité, les méthodes de réglage classiques ne suffisent plus à garantir des performances optimales dans toutes les situations, en particulier lorsqu'il s'agit de systèmes non linéaires, variables dans le temps ou difficiles à modéliser avec précision. Dans ce contexte, de nouvelles approches de commande ont émergé, basées sur l'intelligence artificielle et les algorithmes d'optimisation intelligents, afin de dépasser les limitations imposées par les méthodes traditionnelles.

Ce chapitre se concentre sur l'étude de plusieurs de ces techniques avancées, notamment les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones artificiels, et la commande adaptative. Les principes théoriques de chaque méthode seront présentés, ainsi que leur fonctionnement, leurs avantages et leurs inconvénients par rapport aux approches classiques. Cette introduction vise à explorer de nouvelles perspectives dans le domaine du contrôle, en mettant en lumière des solutions plus flexibles et efficaces pour les systèmes complexes.

3.2) Historique des algorithmes génétiques :

En 1860, Charles Darwin a proposé sa théorie de l'évolution des espèces, selon laquelle les êtres vivants s'adaptent à leur environnement naturel par le biais du processus de reproduction. À partir du XXe siècle, la notion de mutation génétique a été mise en lumière et exploitée dans le domaine du traitement de l'information. Cette découverte a suscité l'intérêt des chercheurs en informatique, ouvrant la voie à l'émergence de la programmation évolutionnaire [6].

Dans les années 1960, John Holland s'est attaché à étudier de manière formelle le phénomène d'adaptation tel qu'il se manifeste dans la nature. Il a ainsi cherché à transposer les mécanismes de l'adaptation naturelle vers les systèmes informatiques. Ces travaux ont conduit à l'élaboration du premier modèle formel des algorithmes génétiques, connu sous le nom de « canonical genetic algorithm (AGC) », présenté dans son ouvrage *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [9] .

Par la suite, l'ouvrage de Goldberg (1989) a démontré l'applicabilité des algorithmes génétiques à des problématiques concrètes [10], contribuant ainsi à leur diffusion et stimulant de nombreuses recherches. Les algorithmes génétiques ont depuis été largement utilisés avec succès dans le domaine de l'optimisation combinatoire, comme en témoignent les synthèses de Reeves (1996), ou encore celles de Fleurent et Ferland (1996) en français. D'autres contributions majeures incluent les travaux de Davis (1991), Dejong et Spears (1989), Grefenstette et al. (1985), ainsi que Michalewicz (1992).

Ce travail se focalise exclusivement sur les algorithmes génétiques basés sur le néo-darwinisme, qui allie la théorie de l'évolution et les concepts de la génétique contemporaine. Ces algorithmes reposent principalement sur des mécanismes tels que le croisement, la mutation et la sélection [6].

3.3) Le principe des algorithmes génétiques :

De nombreux problèmes informatiques exigent que les programmes soient capables de s'adapter afin de maintenir un bon niveau de performance dans des environnements en constante évolution. Cela se manifeste, par exemple, dans le domaine du contrôle des robots, où un robot doit accomplir une tâche malgré les variations des conditions extérieures, ainsi que dans les interfaces logicielles qui doivent être personnalisées en fonction des caractéristiques propres à chaque utilisateur.

L'algorithme génétique de Holland constitue une méthode permettant de faire évoluer une population de "chromosomes" (représentés, par exemple, par des chaînes de bits — 0 et 1) vers une nouvelle population, en s'inspirant du principe de la sélection naturelle. Cette évolution repose sur des opérateurs génétiques tels que le croisement, la mutation et l'inversion. Un chromosome est constitué de "gènes" (les bits), chacun représentant une version possible d'un "allèle" (comme 0 ou 1) [9].

L'opérateur de sélection choisit les chromosomes qui auront la possibilité de se reproduire ; en général, les individus les plus performants génèrent un plus grand nombre de descendants que ceux dont l'aptitude est moindre. Le croisement consiste à échanger des segments entre deux chromosomes, imitant ainsi la recombinaison biologique entre deux organismes haploïdes. La mutation, quant à elle, modifie aléatoirement la valeur de certains allèles à des positions données, tandis que l'inversion réorganise l'ordre d'une séquence contiguë de gènes au sein du chromosome.

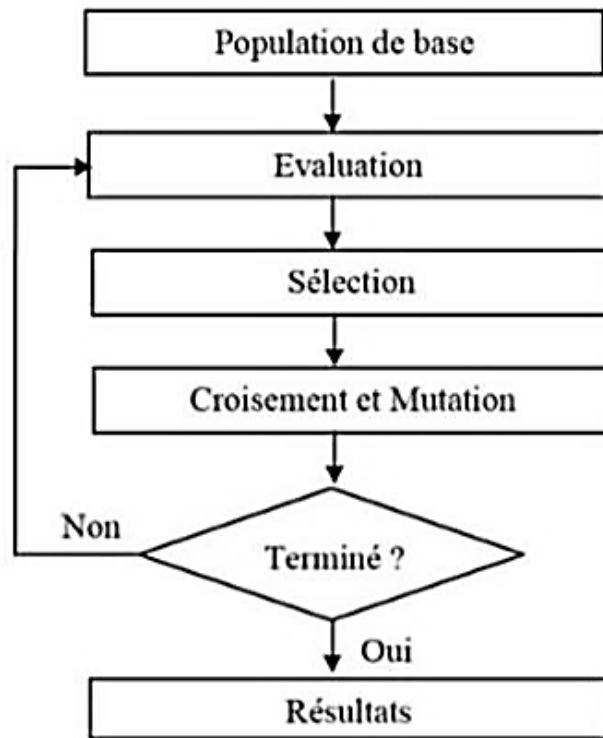


Figure 3.1 : Fonctionnement des AGs [6]

Les algorithmes évolutionnaires (ou algorithmes génétiques - AG) représentent une approche innovante, qui ne cherche pas nécessairement à obtenir une solution analytique exacte, ni même une approximation numérique précise. L'objectif principal est plutôt d'identifier des solutions acceptables, qui satisfont au mieux un ensemble de critères, souvent en conflit les uns avec les autres.

Même si ces algorithmes ne garantissent pas l'obtention de la solution optimale dans l'ensemble de l'espace de recherche, il est souvent constaté que les résultats produits sont, en moyenne, plus performants que ceux obtenus par des méthodes traditionnelles, et ce pour un même temps de calcul.

D'un côté, la modélisation de ces processus permet une meilleure compréhension des mécanismes fondamentaux à l'origine de la vie. De l'autre, elle offre la possibilité d'exploiter librement ces mécanismes dans des contextes variés, ouvrant ainsi la voie à une grande diversité d'applications.

3.4) Les étapes de l'algorithme génétique :

Pour mettre en œuvre un algorithme génétique, plusieurs éléments essentiels doivent être définis au préalable [18] :

- a) Le codage d'un élément de la population repose sur l'attribution, à chaque point de l'espace des états, d'une structure de données spécifique, élaborée à la suite d'une modélisation mathématique du système.
- b) Un dispositif de création de la population initiale : la sélection de cette population initiale est primordiale, car il influence directement la vitesse de convergence vers un optimum global. Une population bien choisie peut considérablement améliorer l'efficacité de l'algorithme.
- c) Une fonction objectif, également connue sous le nom de fonction d'évaluation ou de fonction d'adéquation, est utilisée pour mesurer la performance ou l'excellence de chaque individu au sein de la population.
- d) Afin de préserver la diversité génétique de la population, différents opérateurs sont mis en œuvre, notamment le croisement (ou recombinaison) et la mutation. Ces mécanismes sont essentiels pour explorer efficacement de nouvelles pistes de solution au sein de l'espace de recherche.
- e) Un critère d'arrêt, qui peut être défini en fonction du nombre maximal de générations, d'un seuil de convergence, ou encore de probabilités associées aux opérateurs.

Un algorithme génétique doit être à la forme suivante [6] :

- 1) Initialiser la population initiale P.
- 2) Évaluer P.
- 3) Tantque (Pas Convergence) faire :
 - a) P' = Sélection des Parents dans P
 - b) P' = Appliquer Opérateur de Croisement sur P'
 - c) P' = Appliquer Opérateur de Mutation sur P'
 - d) P = Remplacer les anciens de P par leurs descendants de P'
 - e) Évaluer p
- Fin Tantque

Le critère de convergence peut revêtir plusieurs formes, selon le contexte du problème traité. Il peut s'agir, par exemple [6] :

- Un seuil minimal de performance que l'on souhaite voir atteindre par la population afin d'assurer une adaptation satisfaisante au problème posé.
- D'une contrainte temporelle imposant une limite maximale au temps de calcul.
- D'une combinaison de ces deux critères, permettant de concilier efficacité et contrôle des ressources de calcul.

3.5) Les opérateurs des A.G :

3.5.1) Le Codage :

Dans une solution, chaque paramètre est assimilé à un gène, et les différentes valeurs que ce paramètre peut prendre sont appelées allèles. Il est essentiel de coder chaque allèle de manière unique afin de garantir une représentation précise des solutions.

Un chromosome est constitué d'une séquence de gènes. Il est possible, par exemple, de regrouper les paramètres similaires au sein d'un même chromosome, où chaque gène est identifié par sa position spécifique, appelée locus, sur ce chromosome.

Ainsi, chaque individu est représenté par un ensemble de chromosomes, tandis que la population est formée d'un ensemble d'individus [6].

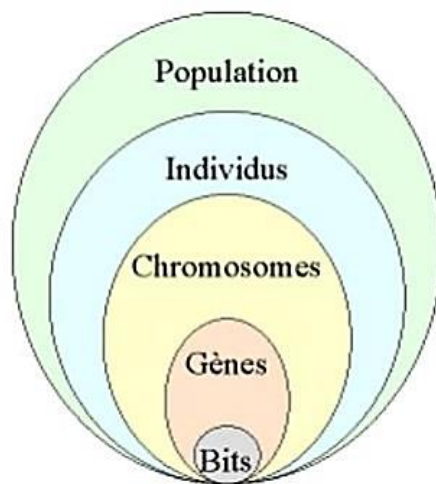


Figure 3.2 : les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique [6]

Il y a trois principaux types de codage utilisables :

3.5.1.1) Le codage binaire :

Le codage binaire constitue une méthode de représentation essentielle, basée sur l'encodage des solutions en séquences de bits. Une suite de bits représente une séquence de chiffres en binaire

, Une séquence binaire est composée de chiffres ne pouvant prendre que deux valeurs possibles 0 ou 1.

La structure de données la plus couramment employée pour ce type de codage est le vecteur de variables booléennes, également appelé tableau. Chaque composante X_j , avec $j=0, \dots, N$, représente une variable booléenne qui prend l'une des deux valeurs possibles.

Ce mode de codage est largement répandu dans le domaine des algorithmes génétiques, en raison de sa simplicité et de son efficacité dans de nombreux cas d'application [6].

3.5.1.2) Le codage réel (caractères multiples) :

À l'opposé du codage binaire, les chromosomes d'un algorithme génétique peuvent être représentés au moyen d'un alphabet à caractères multiples. Dans bien des cas, cette forme de représentation se révèle plus intuitive et plus adaptée que le codage binaire [6].

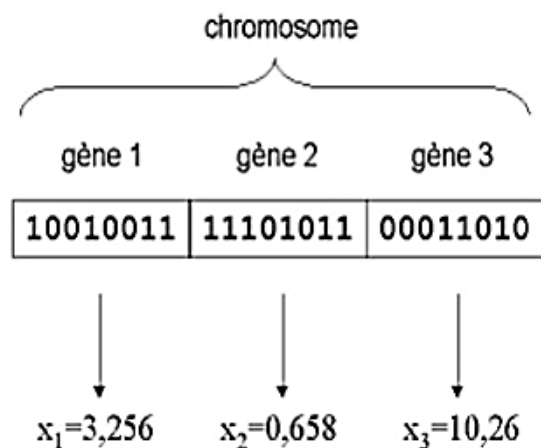


Figure 3.3 : illustration schématique du codage des variables réelles [6].

3.5.1.3) Codage sous forme d'arbre :

Ce type de codage repose sur une structure arborescente, c'est-à-dire une structure de données organisée autour d'une racine, à partir de laquelle peuvent se développer un ou plusieurs nœuds fils.

L'un des principaux avantages de cette représentation est sa capacité à traiter des problèmes dont les solutions n'ont pas de taille fixe ou prédéfinie. En effet, il est possible de générer des arbres de taille variable par l'intermédiaire des opérateurs génétiques tels que le croisement (crossing-over) et la mutation [6].

3.5.2) L'opérateur de mutation :

L'opération de mutation a pour objectif d'introduire un certain niveau de perturbation dans la population, afin de limiter les risques de convergence prématurée vers des optima locaux, qui pourraient empêcher l'algorithme d'explorer efficacement l'ensemble de l'espace de recherche.

Cette opération dépend essentiellement de deux facteurs :

- Le type de codage utilisé (binaire, réel, arborescent, etc.),
- La probabilité de mutation P_m , qui détermine la fréquence à laquelle un individu peut subir une mutation.

Propose de choisir la probabilité de mutation avec :

$$1/m \leq P \leq 1/m$$

Où m représente la longueur du chromosome.

Dans le cas d'un codage binaire, l'opération de mutation consiste à générer aléatoirement un entier compris entre 1 et la longueur du chromosome. La position du code à muter correspond à la valeur du nombre aléatoire généré [6].

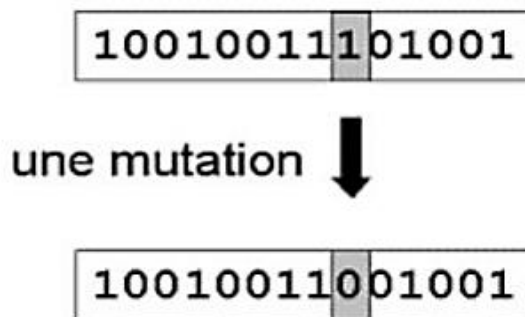


Figure 3.4 : la mutation [6]

3.5.3) L'opération de Croisement ou Crossover :

La procédure de sélection vise à identifier les individus les plus aptes à se reproduire, autrement dit les parents. Le processus de reproduction repose principalement sur deux opérations fondamentales : le croisement et la mutation.

L'opération de croisement a pour but de renforcer la performance globale de la population en générant de nouveaux individus – les enfants – qui possèdent potentiellement de meilleures caractéristiques que leurs parents.

Cette opération dépend directement de la nature du codage utilisé pour représenter les chromosomes. Elle s'applique généralement à une paire d'individus sélectionnés, issus de la population, en tant que parents [6].

3.5.3.1) Croisement simple :

Le croisement entre deux individus dépend principalement de deux paramètres : la probabilité de croisement et le nombre de points de croisement. Cette opération vise à produire deux nouveaux individus dont la structure génétique résulte de la combinaison partielle des chromosomes des parents sélectionnés.

Dans le cas d'un codage binaire, la première étape consiste à déterminer les points de croisement. Chaque chromosome est défini par une longueur correspondant au nombre de bits ou d'unités codées qu'il contient. Selon le nombre de points de croisement souhaité, on génère un ou plusieurs nombres aléatoires compris entre 1 et la longueur du chromosome, afin de déterminer les positions où les segments seront échangés [6].

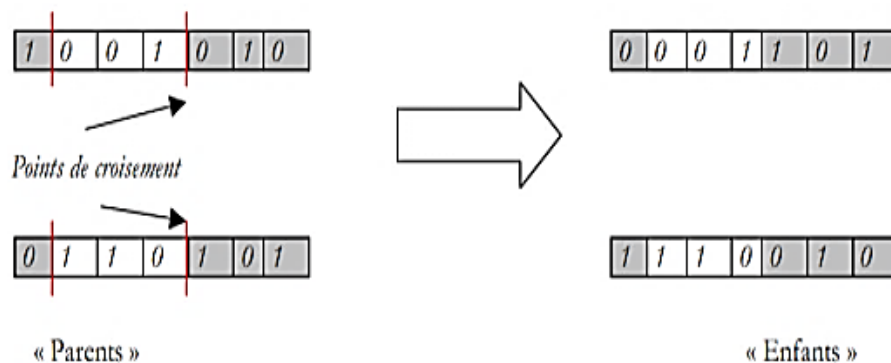


Figure 3.5 : Procédure de croisement dans le cas d'un codage binaire [6]

3.5.3.2) Croisement uniforme :

Cette opération consiste à appliquer un masque de croisement à un chromosome donné. Ce masque est représenté par un vecteur binaire aléatoire. Le type de codage utilisé pour représenter les variables de décision peut être binaire, réel, entier ou alphabétique, selon la nature du problème traité.

Pour chaque position du chromosome, la valeur de la composante du vecteur binaire détermine le parent dont l'information génétique sera transmise à l'enfant. Ainsi, la valeur du gène à cette position proviendra soit du premier parent, soit du second.

Le deuxième chromosome (enfant) est généré en symétrie par rapport au premier, c'est-à-dire qu'il reçoit la valeur du parent opposé à celui sélectionné pour la même position dans le premier enfant. Par exemple, si une position du premier enfant hérite d'un gène du premier parent, alors cette même position chez le second enfant héritera du second parent [6].

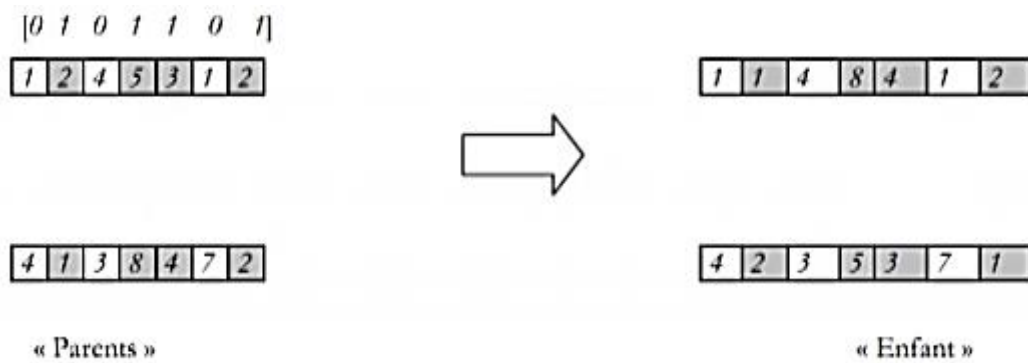


Figure 3.6: Procédure de croisement uniforme dans le cas d'un codage entier [6]

3.5.4) L'opérateur de sélection :

Cet opérateur de sélection joue un rôle fondamental dans le processus évolutif, car il détermine la capacité des individus à survivre, se reproduire ou disparaître. Plusieurs méthodes de sélection ont été développées, chacune visant à favoriser les individus les plus aptes selon certains critères d'évaluation [6].

3.5.4.1) La sélection par tournois :

Deux individus sont sélectionnés aléatoirement avec remise à partir de la population P, puis mis en compétition [6].

Celui qui possède la meilleure valeur de fitness est retenu avec une probabilité P, telle que $0.5 \leq p \leq 1$.

Cette opération est répétée n fois afin de générer une nouvelle population P', composée des individus choisis pour servir de géniteurs de la génération suivante.

3.5.4.2) La méthode élitiste :

Cette méthode repose sur la sélection des n meilleurs individus de la population P, après avoir classé les individus par ordre décroissant selon leur valeur de fitness.

Ainsi, les individus les plus performants sont directement retenus pour constituer la nouvelle génération P', sans recours au hasard [6].

3.5.4.3) La sélection par roulette :

Il s'agit de la méthode de sélection la plus répandue et la plus utilisée, elle repose sur le principe de répliquer chaque individu proportionnellement à son milieu. Ainsi, les individus les mieux adaptés disposent d'une probabilité plus élevée d'être sélectionnés.

Concrètement, chaque individu occupe une portion de la roue proportionnelle à sa valeur de fitness, et une sélection aléatoire sur cette roue détermine les individus autorisés à se reproduire [6].

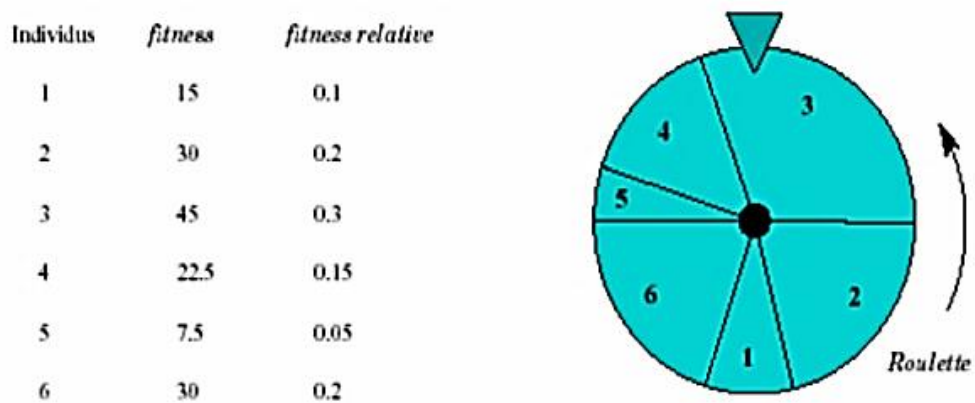


Figure 3.7 : Exemple de sélection par roulette [6]

3.5.5) La fonction fitness (la fonction d'évaluation) :

Holland a défini la fonction de fitness par f où f représente la fonction d'évaluation appliquée à la population.

Pour estimer la qualité d'un point dans l'espace de recherche, on fait appel à cette fonction d'évaluation.

L'évaluation d'un individu est indépendante de celle des autres, et le résultat obtenu sert à accepter ou rejeter l'individu, selon son coût relatif dans la population actuelle.

Ainsi, la fonction de fitness joue un rôle central dans la sélection des meilleurs individus.

Cette approche garantit la préservation des solutions performantes, tandis que les individus moins adaptés sont progressivement éliminés de la population [6].

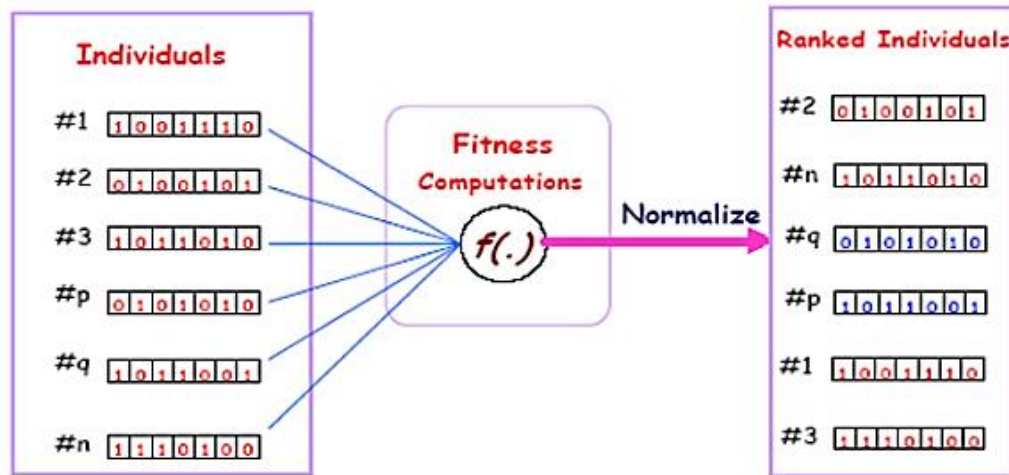


Figure 3.8 : La fonction fitness [6]

3.6) Le critère d'arrêt de l'algorithme :

Déterminer quand arrêter la progression d'un algorithme génétique peut être simple si les critères appropriés sont établis.

- Nombre maximal d'itérations atteint.
- Convergence atteinte.
- Si la valeur d'erreur devient inférieure à un seuil prédéfini.

3.7) Neurone Biologique et Neurone Formel :

3.7.1) Neurone Biologique :

Le neurone biologique est constitué d'un soma (corps cellulaire) contenant un noyau. De ce soma émergent des prolongements appelés dendrites, qui peuvent être très nombreux, formant ce que l'on qualifie souvent de chevelure dendritique. Ces dendrites assurent la réception des signaux provenant de l'extérieur, lesquels sont ensuite transmis vers le corps du neurone.

L'information, une fois intégrée par le neurone, est conduite le long de l'axone jusqu'à d'autres neurones. Toutefois, la communication entre deux neurones ne s'effectue pas par contact direct, un mince espace intercellulaire, mesurant quelques dizaines d'angströms, les sépare. La jonction entre deux neurones est appelée la synapse (figure 3.9) [7].

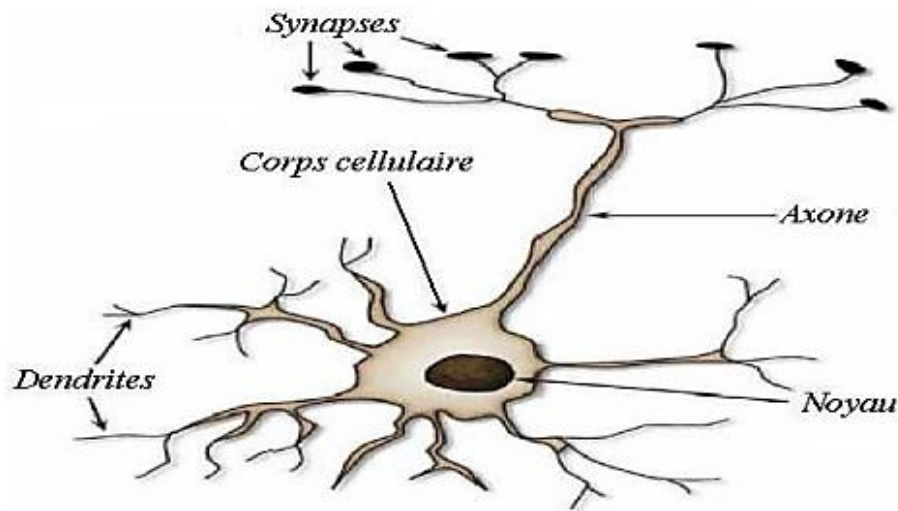


Figure 3.9 : Un neurone biologique [11]

3.7.2) Neurone Formel (Artificiel) :

Le neurone formel représente un automate simplifié qui reproduit, de manière approximative, la structure et le fonctionnement d'un neurone biologique. Le premier modèle de ce type a été introduit en 1943 par McCulloch et W. Pitts. En se basant sur les propriétés observées dans les neurones biologiques, ces deux chercheurs ont développé un modèle mathématique dans lequel le neurone formel réalise une somme pondérée de ses entrées, puis applique une fonction d'activation (ou fonction de transfert) pour produire une sortie [7].

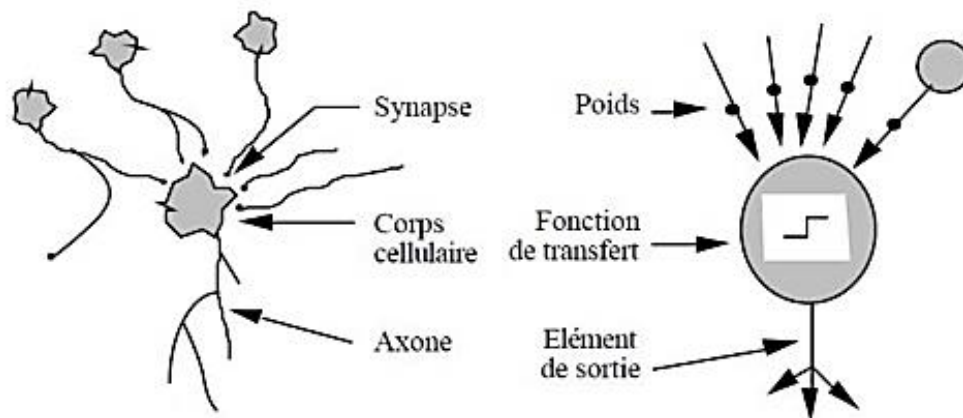


Figure 3.10 : Modèle d'un neurone formel (1) [12]

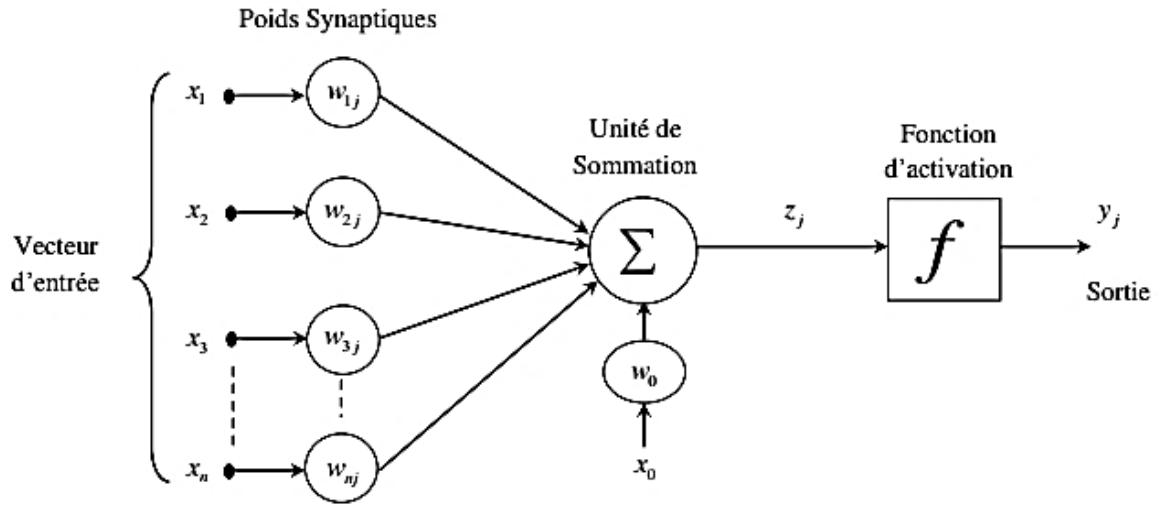


Figure 3.11 : Modèle d'un neurone formel (2) [7]

Le neurone formel agit comme un opérateur de sommation [7] et le calcul de sa sortie se déroule en deux phases :

- Une combinaison linéaire des entrées :

$$Z_j = x_0 w_0 + \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i \quad (3.1)$$

On désigne les w_{ij} comme des poids synaptiques ou simplement des poids, tandis que w_0 est connu sous le nom de biais. On peut voir le biais comme une pondération de l'entrée x_0 qui est fixée à 1.

Z_j On parle de potentiel du neurone.

- Mise en œuvre d'une fonction d'activation sur la somme pondérée des entrées :

$$y_j = f(z_j) = f(w_0 + \sum_{i=0}^n w_{ij} x_i) \quad (3.2)$$

La fonction f représente la fonction d'activation du neurone formel. Il existe un grand nombre de formes possibles pour cette fonction, mais certaines sont plus fréquemment utilisées, comme illustré dans le tableau 3.1. Contrairement aux neurones biologiques, dont l'état de sortie est généralement binaire (actif ou inactif), la majorité des fonctions d'activation utilisées dans les réseaux de neurones artificiels sont continues, ce qui permet d'obtenir une infinité de valeurs possibles.

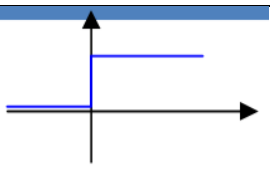
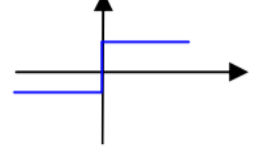
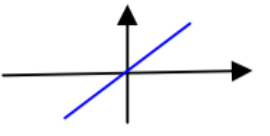
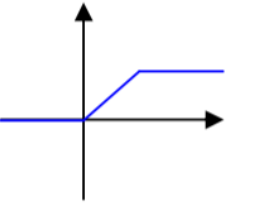
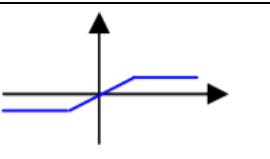
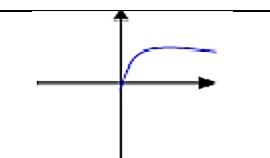
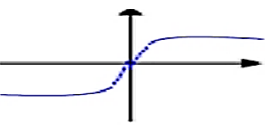
Nom de la fonction	Type	Equation	Allure
Seuil	Binaire (fonction de Heaviside)	$f(x) = 1 \text{ si } x > 0$ $f(x) = 0 \text{ si } x \leq 0$	
	Signe	$f(x) = 1 \text{ si } x > 0$ $f(x) = -1 \text{ si } x \leq 0$	
Linéaire	Identité	$f(x) = x$	
	Saturé positif	$f(x, k) = 0 \text{ si } x < 0$ $f(x, k) = 1 \text{ si } x \geq 1/k$ $f(x, k) = kx \text{ sinon}$	
	Saturé symétrique	$f(x, k) = -1 \text{ si } x < -1/k$ $f(x, k) = 1 \text{ si } x \geq 1/k$ $f(x, k) = kx \text{ sinon}$	
Sigmoide	Positive (type logistique)	$f(x, k) = \frac{1}{1+e^{-kx}}$	
	Symétrique (type tanh)	$f(x, k) = \frac{2}{1+e^{-kx}} - 1$	

Tableau 3.1 : Fonctions d'activation [7]

3.8) Architecture des réseaux de neurones :

Un réseau de neurones est constitué d'un ensemble de neurones organisés en couches successives, appelées couches (ou plans) de traitement, reliées entre elles par des connexions nommées poids synaptiques. Ce sont précisément ces poids qui confèrent au réseau sa capacité à apprendre et à résoudre des problèmes complexes [7].

On distingue deux types d'architectures :

Les réseaux statiques (non récurrents) et les réseaux dynamiques (récurrents) [7].

3.8.1) Les réseaux statiques :

Un réseau statique se définit par le principe que la sortie de chaque neurone est uniquement déterminée par les sorties des neurones des couches antérieures. Dans cette configuration, chaque neurone est uniquement relié aux neurones de la couche suivante, garantissant ainsi une transmission de l'information de la couche d'entrée à la couche de sortie sans possibilité de « feedback ».

Le réseau accomplit une ou plusieurs fonctions algébriques sur ses entrées, obtenues par la composition des fonctions mises en œuvre par chacun des neurones. Parmi les architectures de ce type on trouve le réseau MLP [7].

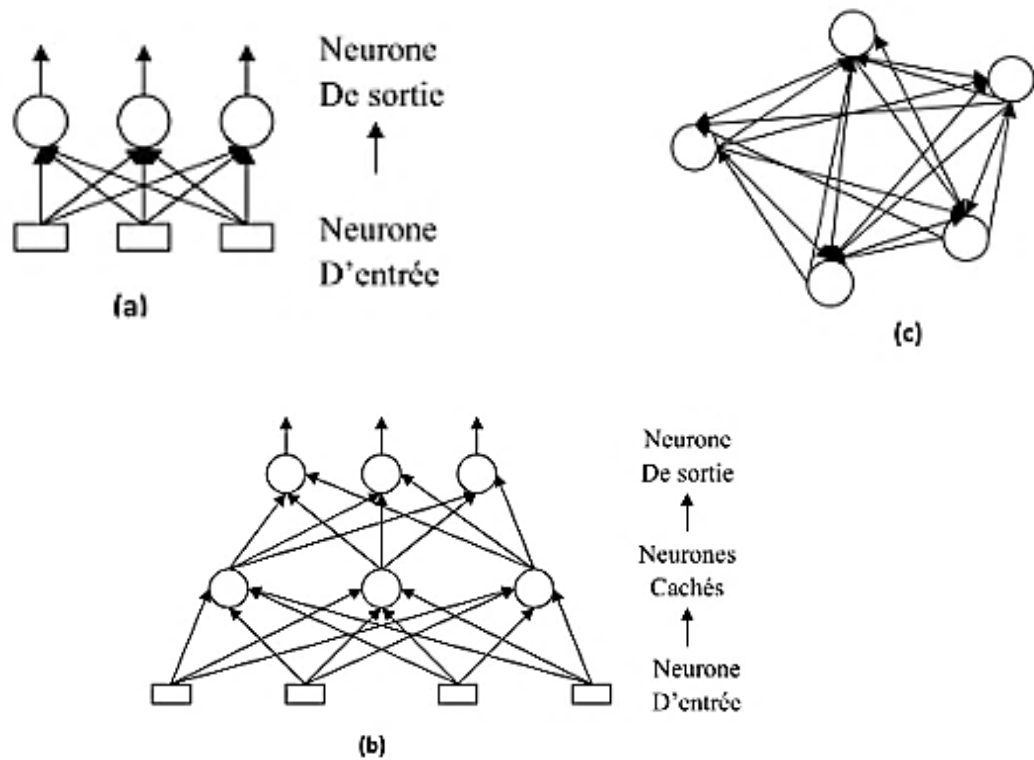


Figure 3.12 : (a) : Architecture simple, (b) : architecture d'un RN statique multicouches,
(c) : architecture d'un RN dynamique de Hop Field [7]

3.8.2) Réseaux dynamiques :

Contrairement aux réseaux statiques, les réseaux dynamiques présentent une topologie de connexions plus souple, voire arbitraire. Bien qu'ils soient également organisés en couches, la circulation de l'information y est bidirectionnelle, l'entrée d'un neurone peut dépendre non seulement des sorties des couches précédentes, mais également de sa propre sortie ou de celle de neurones appartenant à des couches ultérieures.

Chaque neurone peut ainsi recevoir en entrée des valeurs passées issues d'autres neurones, qu'ils appartiennent à la même couche, à une couche antérieure, voire à une couche postérieure.

Cette capacité d'interconnexion récurrente confère aux réseaux dynamiques un avantage majeur dans le traitement de systèmes gouvernés par des équations dynamiques, notamment pour des applications en identification de systèmes et en commande adaptative [7].

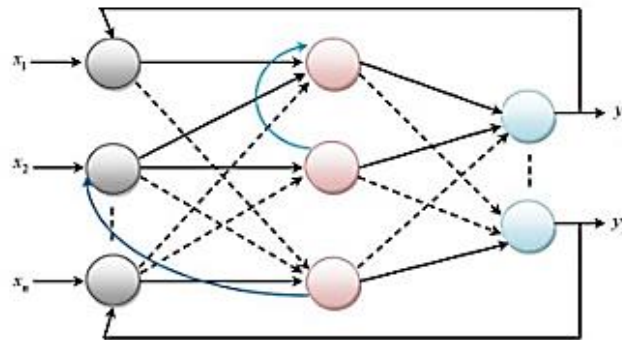


Figure 3.13 : Réseau de neurones dynamique [7]

3.9) Les caractéristiques des réseaux de neurones :

3.9.1) Le parallélisme :

Cela découle de l'architecture des réseaux de neurones, perçus comme des conglomerats d'entités élémentaires œuvrant en simultanéité. À l'opposé des approches séquentielles, le parallélisme offre une vitesse de calcul accrue, mais nécessite une formulation différente des problèmes à traiter [7].

3.9.2) La capacité de généralisation :

En plus des propriétés précédemment évoquées, les réseaux de neurones confèrent aux systèmes la capacité de généraliser à partir des ensembles d'exemples à apprendre, présentes au réseau [7].

3.9.3) L'apprentissage :

L'apprentissage dans un réseau de neurones artificiels (RNA) consiste à ajuster progressivement les poids des connexions au sein du réseau, de manière à permettre au réseau d'accomplir correctement la tâche souhaitée.

Il s'agit de la propriété essentielle des RNA, pouvant être mis en œuvre selon plusieurs approches et règles d'adaptation, en fonction de la nature du problème à traiter [7].

3.10) Les Types D'apprentissage :

3.10.1) Le mode supervisé :

Dans ce type d'apprentissage, le réseau neuronal s'adapte en comparant la sortie qu'il a calculée à partir des entrées fournies avec la sortie attendue. Ainsi, le réseau se modifie progressivement jusqu'à ce qu'il produise la sortie correcte correspondant à l'entrée donnée [7].

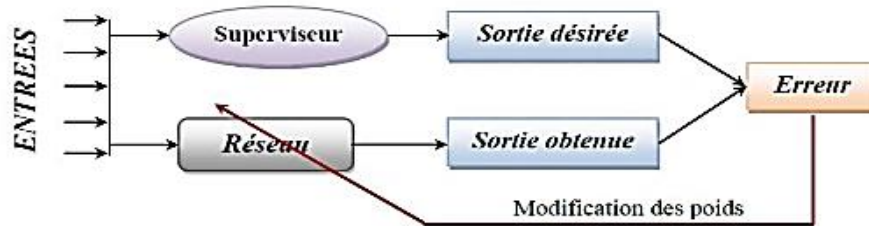


Figure 3.14 : Apprentissage supervisé [7]

3.10.2) Le renforcement :

L'apprentissage par renforcement peut être considéré comme une forme particulière d'apprentissage supervisé, et certains auteurs le classent d'ailleurs parmi les approches supervisées. Dans ce cadre, le réseau apprend à établir une relation entre les entrées et les sorties en s'appuyant sur une estimation de l'erreur, autrement dit sur l'évaluation de la réussite ou de l'échec de ses réponses. L'objectif du réseau est alors de maximiser un indice de performance appelé signal de renforcement, qui lui sert de guide. Contrairement à l'apprentissage supervisé classique, le système ne dispose pas de la réponse correcte à l'avance, mais il est en mesure de juger si la réponse qu'il a produite est appropriée ou non. [7].

3.10.3) Le mode non supervisé (ou auto-organisationnel) :

Dans ce type d'apprentissage, le processus repose sur des principes probabilistes. Le réseau adapte sa structure en fonction des régularités statistiques observées dans les données d'entrée,

en créant des catégories et en affinant progressivement une mesure de qualité associée à chacune d'elles [7].

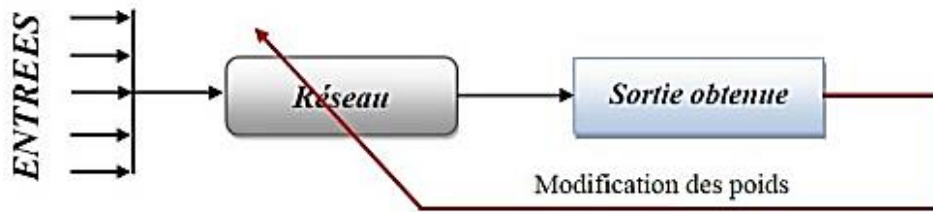


Figure 3.15 : Apprentissage non supervisé [7]

3.10.4) Le mode hybride :

Le mode hybride combine les deux approches précédentes, en ce sens qu'une partie des poids est ajustée à l'aide d'un apprentissage supervisé, tandis que l'autre partie est affinée par un apprentissage non supervisé [7].

3.11) Application des Réseaux de Neurones :

Les réseaux de neurones sont utilisés pour une variété d'applications dans différents secteurs. Par exemple, nous avons conçu un pilotage automatique pour avions, ainsi qu'un dispositif de navigation pour voitures. Nous avons également élaboré des systèmes automatisés pour la lecture de chèques et d'adresses postales. De plus, nous produisons des systèmes de traitement du signal destinés à diverses applications militaires. Nous avons développé un système de synthèse vocale et utilisons des réseaux pour construire des systèmes d'analyse d'images informatiques, faire des prévisions sur les marchés financiers, évaluer le risque financier ou d'assurance, optimiser divers processus manufacturiers, réaliser des diagnostics médicaux, explorer les ressources pétrolières et gazières, travailler en robotique, en télécommunication et bien plus encore...

3.12) Principe général de la commande adaptative :

Le contrôle adaptatif désigne une approche de régulation où le régulateur est capable de s'ajuster automatiquement aux modifications du processus en cours. Son objectif principal est de permettre une adaptation en temps réel des paramètres du régulateur dans les boucles de commande, afin de garantir ou de maintenir un niveau de performance constant, même lorsque les caractéristiques du système évoluent dans le temps, notamment en visant à réduire l'écart entre la consigne et la sortie [8].

Ce type de système peut être représenté par une architecture à double boucle : une boucle principale classique qui traite les variations des signaux d'entrée et de sortie, et une boucle secondaire chargée de réagir aux changements des paramètres internes du procédé. C'est cette seconde boucle qui confère au système son caractère adaptatif.

Les différentes stratégies de contrôle adaptatif se distinguent par la manière dont elles structurent la mise à jour continue des paramètres du régulateur, en réponse aux fluctuations observées dans le comportement du processus à réguler.

Principe général :

Le contrôle adaptatif repose sur l'élaboration d'une loi de commande ainsi que sur l'estimation en temps réel des paramètres, notamment lorsque ces derniers sont inconnus, variables au cours du temps ou présentent un certain degré d'incertitude. Toutefois, cette approche ne nécessite pas de connaissances préalables sur les bornes ou les limites exactes de ces paramètres [8].

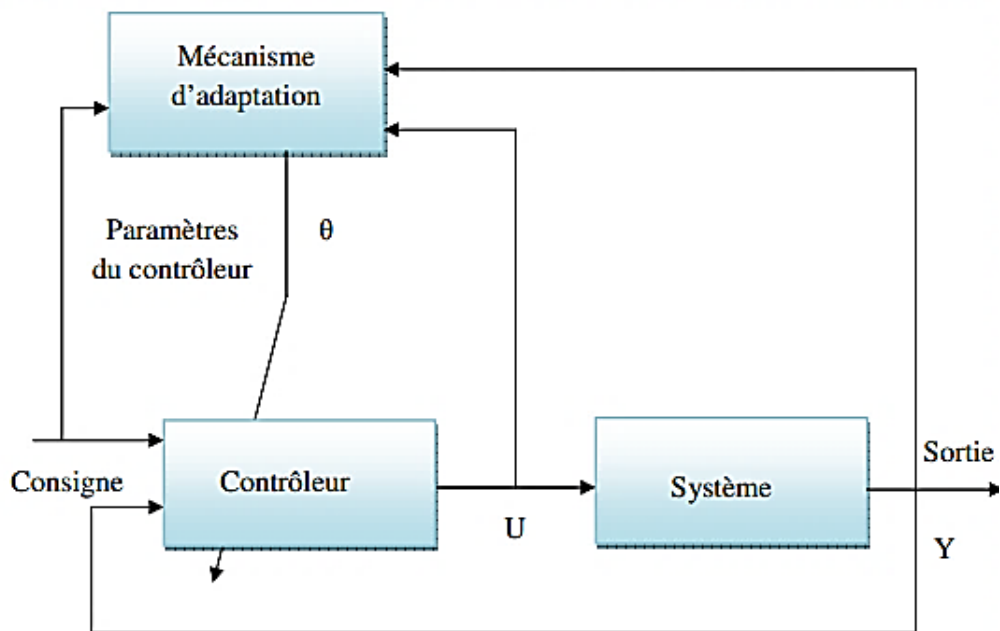


Figure 3.16 : Principe de la commande adaptative [8]

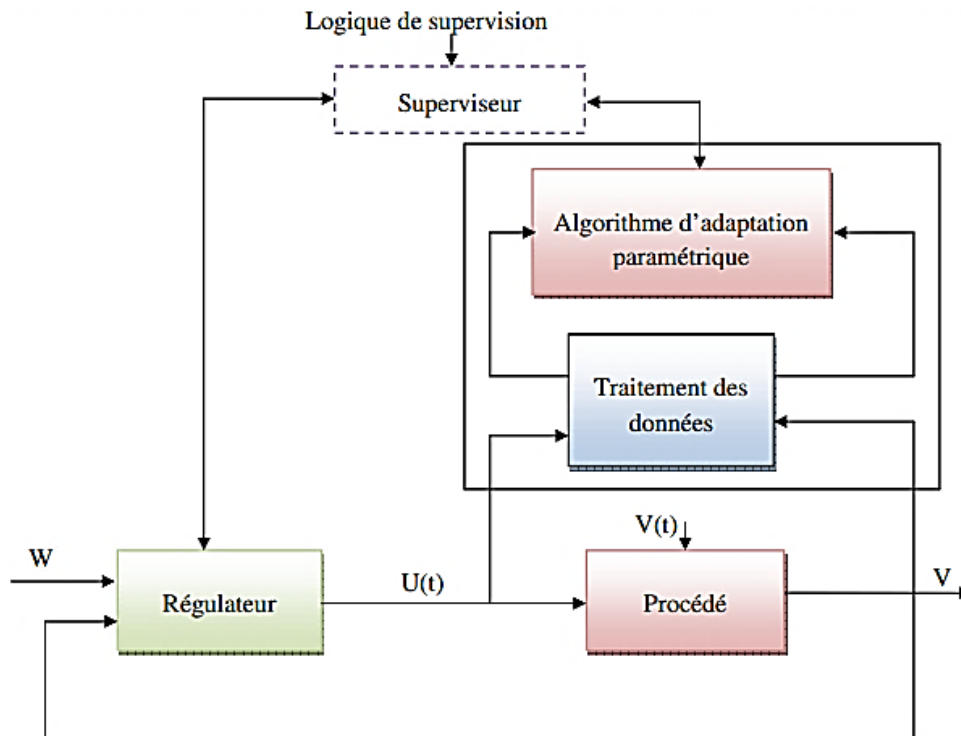


Figure 3.17 : Structure de la commande adaptative directe [8].

3.13) Les approches de la commande adaptative :

La théorie du contrôle adaptatif regroupe aujourd'hui un large éventail d'approches et de méthodes, dont plusieurs ont déjà trouvé des applications concrètes dans le domaine industriel. De manière générale, les algorithmes de commande adaptative peuvent être répartis en deux classes [13] :

3.13.1) Commande adaptative directe :

La commande adaptative directe basée sur un modèle de référence (MRAC), également connue sous le nom d'adaptation en ligne, a été introduite pour la première fois en 1961. Cette méthode se caractérise par le fait qu'elle ne nécessite pas l'identification explicite du processus à contrôler. Les paramètres du régulateur sont ajustés directement en fonction d'une structure prédéfinie par le concepteur. La Figure (3.17) présente une illustration schématique de ce type de commande [13].

3.13.2) Commande adaptative indirect :

La commande adaptative indirecte avec identification du modèle (MIAC), aussi connue sous l'appellation de commande auto-ajustable ou d'adaptation hors ligne, a été mise en place par Kalman dès 1958. Cette approche est basée sur l'évaluation en direct des paramètres du

processus à contrôler, pour faciliter la détermination des paramètres du régulateur. L'illustration du schéma conceptuel de ce genre de contrôle est présentée dans la Figure (3.18) [13].

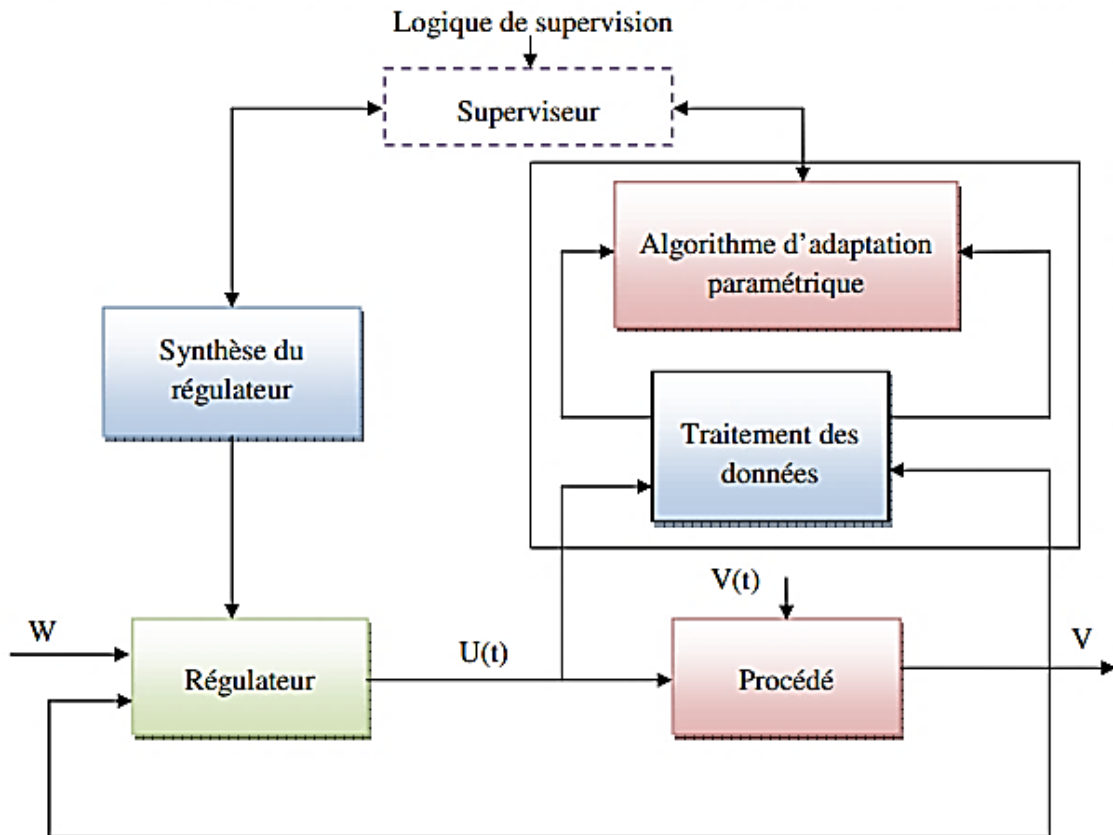


Figure 3.18 : Structure de la commande adaptative indirecte [8].

3.14) Types de Commande adaptative :

On distingue généralement trois formes principales approches de commande adaptative [8] :

3.14.1) Commande adaptative a Modèle De Référence (MRAC) :

Il s'agit de l'une des approches les plus couramment adoptées en matière de commande adaptative, dans laquelle les performances souhaitées sont définies à travers la sélection d'un modèle de référence. Cette méthode a été développée initialement par Whitaker et ses collaborateurs en 1958. Le système adaptatif à modèle de référence (SAMR) constitue un moyen efficace de formuler des exigences précises pour le système de commande. La Figure (3.19) illustre le schéma bloc de principe correspondant à cette approche [8].

Le modèle de référence sert à indiquer le comportement attendu de la sortie du système en réponse à un signal de commande donné. Le système comprend une première boucle de

rétroaction classique, composée du processus et du régulateur, ainsi qu'une seconde boucle de rétroaction dédiée à l'ajustement dynamique des paramètres du régulateur.

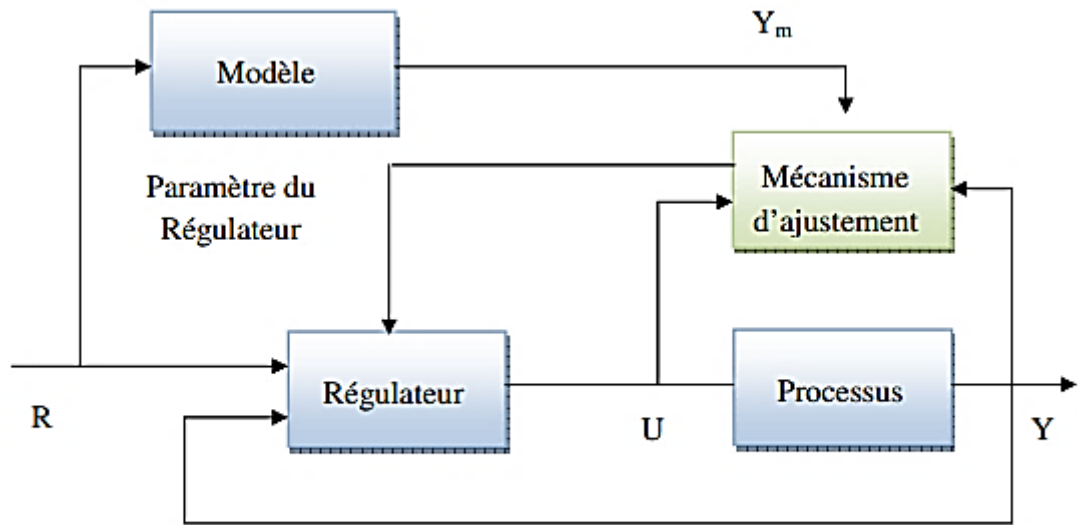


Figure 3.19 : Schéma-bloc d'un Système Adaptatif à Modèle de Référence (SAMR) [8]

i. Mise en œuvre du régulateur SAMR :

Nous allons décrire un système adaptatif basé sur un modèle de référence (SAMR) conçu pour l'ajustement des paramètres du régulateur. Le cas considéré est celui d'un processus SISO (mono variable), en supposant que l'ensemble des dynamiques impliquées sont linéaires.

L'idée fondamentale repose sur la possibilité de formuler le régulateur de manière à ce que l'erreur soit exprimable de façon linéaire par rapport à ses paramètres. La conception d'un tel régulateur peut être résumée en trois étapes principales [8] :

- *Identifier une configuration de régulateur qui assure un suivi impeccable de la sortie.
- *Évaluer l'erreur du modèle.
- * Utiliser la loi d'ajustement des paramètres ou la loi normalisée.

ii. Diverses configurations des systèmes de la MRAC :

En raison des relations étroites entre la prédiction, l'estimation et le contrôle, il est possible de distinguer trois principales architectures de systèmes adaptatifs [8].

1) Structure parallèle :

Il s'agit de la structure la plus répandue, généralement désignée sous le nom de méthode de l'erreur sur la sortie dans le contexte de l'identification, comme illustré à la figure (3.20).

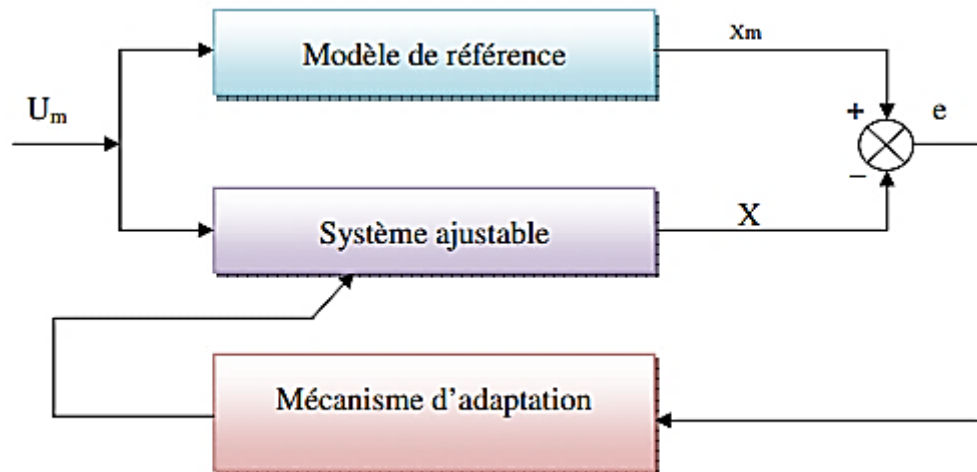


Figure 3.20 : Structure parallèle [8]

2) Structure série :

Dans cette configuration, le modèle de référence est placé en série avec le système ajustable, comme illustré à la figure (3.21). Cette structure est couramment désignée sous le nom de méthode de l'erreur sur l'entrée.

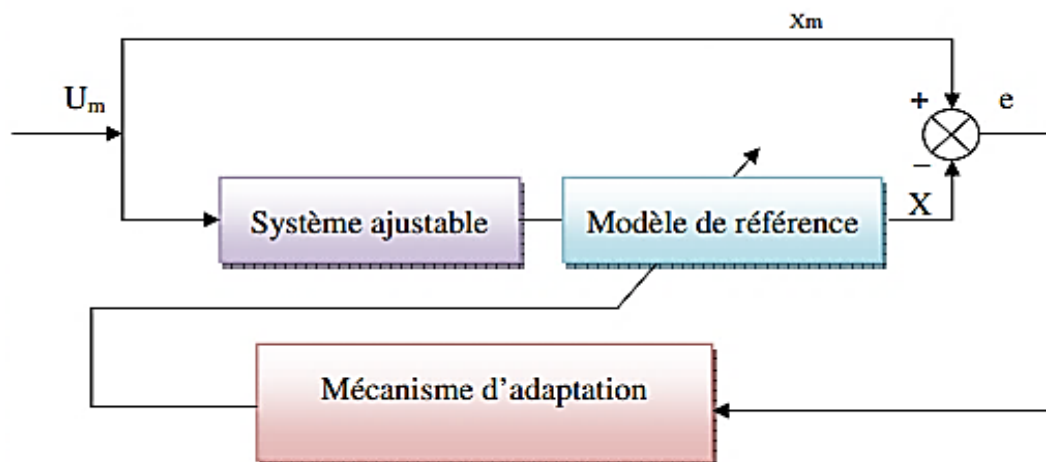


Figure 3.21 : Structure série [8]

3) Structures série-parallèle :

Dans cette structure, deux configurations sont généralement distinguées :

Le système ajustable est placé à la fois en série avec le modèle de référence, et simultanément en parallèle avec celui-ci, comme représenté dans la figure (3.22).

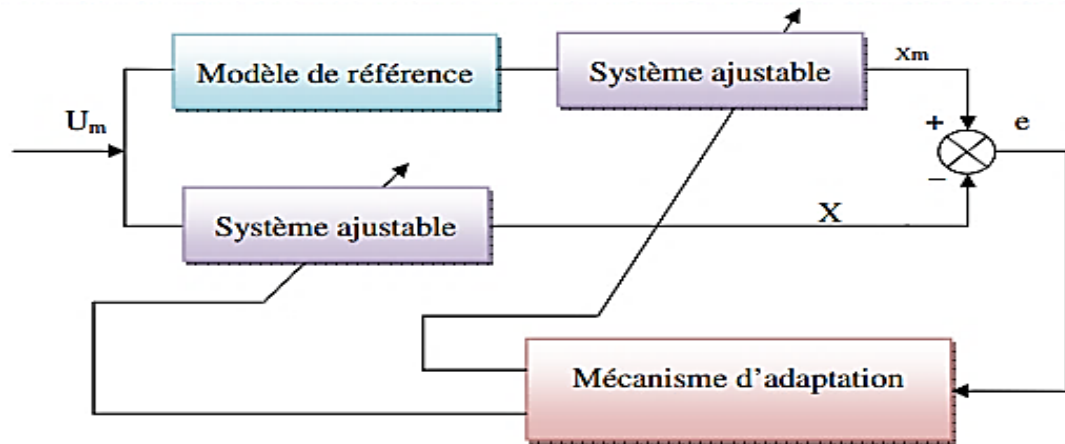


Figure 3.22 : Structure série-parallèle [8]

3.14.2) Commande adaptative à Gain Programmé :

La commande à grand gain constitue une méthode bien établie et largement utilisée pour assurer la stabilisation robuste des systèmes de contrôle, sous réserve que certaines hypothèses relatives au procédé soient respectées. Pour déterminer la valeur adéquate du paramètre de grand gain, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques du système à réguler, telles que l'ordre du système, le signe du gain à haute fréquence, ainsi que l'amplitude de l'incertitude. La figure (3.23) présente un schéma bloc illustrant le principe de cette approche.

Cette méthode a été initialement développée par Morse en 1983, ainsi que par Mareels, Willems et Byrnes, et Mårtensson pour les systèmes linéaires invariants dans le temps [8].

Le contrôle s'appuie sur deux boucles principales [8] :

- Il peut être interprété comme une transformation de l'espace des paramètres du système vers celui des paramètres du contrôleur.
- Il peut également être implémenté sous forme de table de consultation (lookup table).

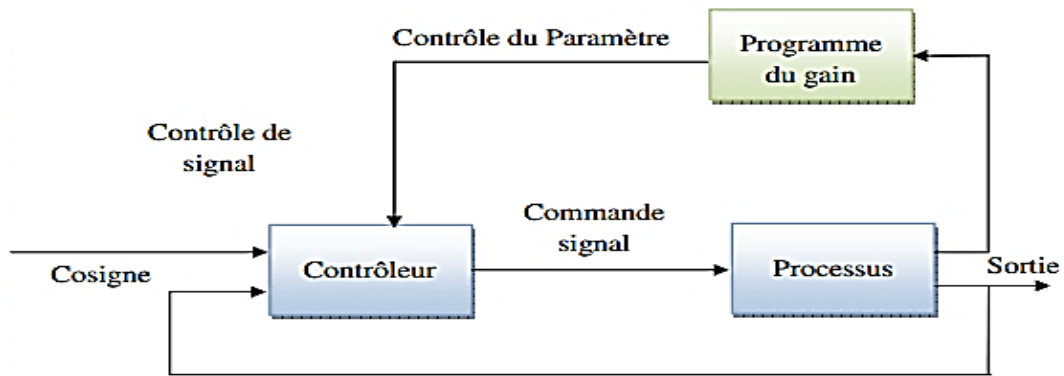


Figure 3.23 : Schéma-bloc d'un système adaptatif à Gain programmé [8]

3.14.3) Commande Auto-Ajustable (STR) :

Cette approche s'inscrit dans les commandes adaptatives indirectes, employées pour déterminer les paramètres du contrôleur. À l'origine, la commande à modèle de référence avait pour objectif de résoudre des problèmes d'asservissement, tandis que le contrôleur auto-ajustable était destiné à la régulation. La figure (3.24) présente un schéma bloc illustrant le principe de cette approche.

L'architecture de commande se compose de deux boucles [8] :

- une boucle principale, qui correspond à la boucle de réglage classique.
- une boucle superposée à la première, comprenant un module d'identification du processus et un module de calcul des paramètres du régulateur.

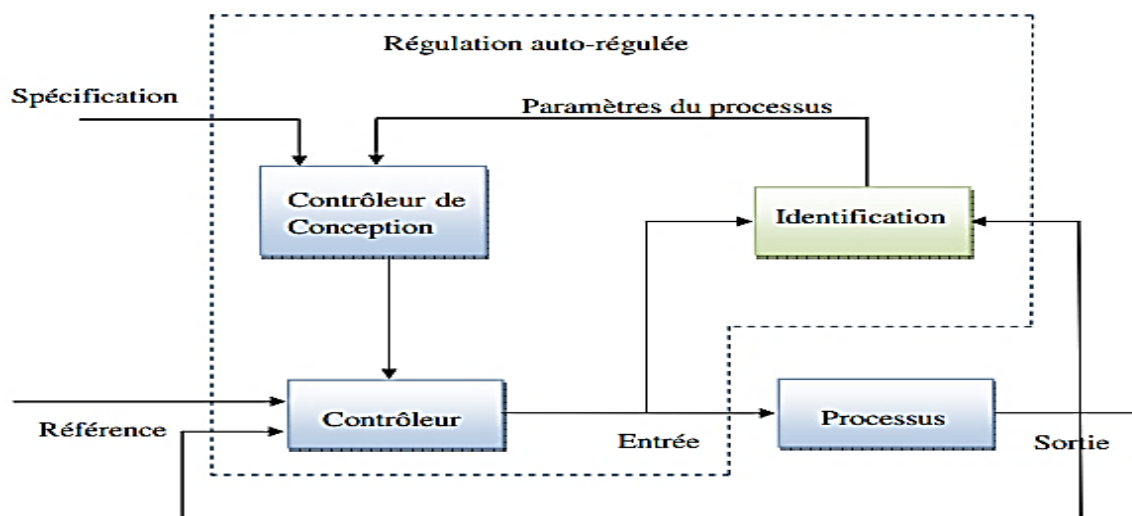


Figure 3.24 : Schéma-bloc d'un Système Adaptatif Auto-Ajustable (STR) [8]

3.15) Identification des systèmes :

Principe :

L'identification d'un système ou d'une méthode implique de déterminer les propriétés dynamiques de celui-ci à partir des relevés effectués. Il s'agit ainsi d'une méthode empirique permettant de construire un modèle dynamique du système, en se basant sur des mesures plutôt que sur des équations différentielles purement théoriques, souvent longues à établir et complexes à manipuler.

Le processus d'identification se déroule généralement en quatre étapes principales [8] :

- Acquisition des signaux d'entrée et de sortie selon un protocole expérimental défini.
- Sélection de la configuration du modèle.
- Détermination des paramètres correspondant au modèle sélectionné.
- Validation complète du modèle, incluant la structure fonctionnelle et la justesse des paramètres.

Avantage :

L'identification d'un système présente plusieurs avantages significatifs, notamment [8] :

- La possibilité d'estimer le modèle en temps réel, au fur et à mesure de l'évolution du procédé.
- Une réduction considérable du volume des données grâce à la modélisation.
- Demande moins de capacité de traitement et de mémoire.
- Une implémentation aisée sur des microprocesseurs.
- La capacité d'effectuer l'identification en temps réel, si nécessaire.
- La faculté de suivre les variations temporelles des paramètres du système.

3.16) Algorithme d'identification :

3.16.1) Modèle de processus :

Considérant un modèle mono variable (SISO), invariant discret décrit par [8] :

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-d) + v(k-d) \quad (3.3)$$

Où : $A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}$$

Avec $d=n-m$

u : entrée de processus.

d : retard pur en nombre de période d'échantillonnage.

y : sortie de processus et v est une perturbation.

3.16.2) Moindre carrée récursif :

Le principe consiste à minimiser une fonction mathématique quadratique qui représente la somme des carrés des différences entre la sortie réelle du système étudié et la sortie prédite par le modèle, évaluée à chaque instant où l'on effectue une mesure [8].

3.17) Régulateur RST :

La synthèse d'un régulateur de type RST repose sur une méthode algébrique de placement des pôles, permettant une solution unique à partir du modèle discret du système. Contrairement aux approches basées sur le diagramme de Bode ou l'utilisation d'un modèle fréquentiel du système à commander, la méthode RST exploite un modèle paramétrique du procédé.

La figure ci-dessous illustre la structure d'un régulateur RST, où R , S et T représentent des polynômes en z^{-1} . La fonction de transfert $H_m(z^{-1})$ d'un modèle à suivre (modèle de référence) est exprimée par, [8] :

$$H_m(z^{-1}) = z^{-d} * \frac{B_m(z^{-1})}{A_m(z^{-1})} \quad (3.4)$$

Où : A_m : est un polynôme Monique ($A_m(0)=1$).

d : est un retard pur du procédé.

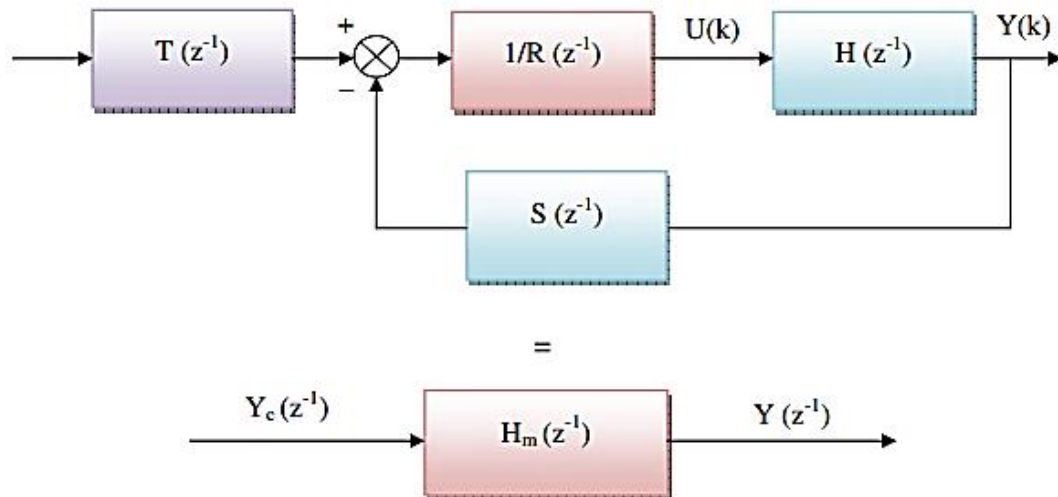


Figure 3.25 : Principe de la synthèse du régulateur RST [8]

3.17.1) Calcul des polynômes R, S et T :

Le calcul des polynômes R, S et T repose sur l'identification de la fonction de transfert du modèle de référence ainsi que de celle du système en boucle corrigée [8].

On distingue par ailleurs deux grandes catégories de commandes auto-ajustables :

3.17.1.1) Commande Auto-Ajustable indirecte :

Une fois les paramètres du procédé identifiés, ceux-ci sont transmis au module chargé du calcul des paramètres du régulateur.

Ce module, en tenant compte des données reçues ainsi que des exigences du cahier des charges (telles que la rapidité, l'amortissement, etc.), procède à la mise à jour automatique des nouveaux paramètres du régulateur, qu'il lui communique ensuite.

Ce mécanisme assure une actualisation continue du régulateur, et le cycle décrit se répète tout au long du fonctionnement de la boucle de régulation [8].

3.17.1.2) Commande Auto-Ajustable directe :

L'un des principaux avantages des régulateurs auto-ajustables utilisant des algorithmes directs réside dans leur simplicité de mise en œuvre par rapport aux approches indirectes.

En effet, les algorithmes indirects exigent souvent davantage de calculs et peuvent être sensibles à certaines conditions ou valeurs de paramètres, ce qui complique leur application.

À l'inverse, les régulateurs directs permettent de réduire voire supprimer les calculs de conception, en reformulant le modèle à l'aide des équations de conception exprimées directement en fonction des paramètres du régulateur.

Cette reparamétrisation est aussi une clé pour la compréhension de la relation entre les SAMR et les régulateurs auto-ajustables [8].

3.18) L'objectif de la commande adaptative :

- S'adapter aux variations inconnues ou changeantes des paramètres du système.
- Garantir la stabilité du système malgré l'incertitude du modèle ou les perturbations extérieures.
- Améliorer les performances dynamiques du système dans différentes conditions de fonctionnement.

Voici les défis rencontrés lors de la mise en œuvre de la commande adaptative :

- Le temps de calcul requis peut être important, ce qui complique l'implémentation en temps réel.
- Il est essentiel de garantir la stabilité du système ainsi que la convergence vers la consigne souhaitée.

3.19) Conclusion :

Ce chapitre a permis de découvrir un ensemble de techniques modernes de commande, développées pour faire face aux limitations des approches classiques, notamment dans les systèmes non linéaires, complexes ou évolutifs. Les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones artificiels, ainsi que la commande adaptative, représentent des alternatives puissantes capables d'offrir des performances accrues, une meilleure robustesse, et une capacité d'adaptation aux variations du système.

Chacune de ces approches repose sur des principes distincts issus de domaines variés tels que la biologie, les neurosciences ou l'apprentissage automatique. Leur intégration dans les systèmes de régulation constitue aujourd'hui un champ de recherche actif et prometteur, avec des résultats concrets dans de nombreuses applications industrielles.

Chapitre 04 :

Application des méthodes classiques de réglage PID

4.1) Introduction :

Ce chapitre a pour objectif de traduire dans la pratique les méthodes classiques de réglage des régulateurs PID, présentées théoriquement dans les chapitres précédents. Pour garantir une comparaison homogène et pertinente entre les différentes approches, toutes les méthodes ont été appliquées à un même système de référence présentant un comportement typique des procédés industriels : un système du premier ordre avec retard.

L'étude s'est focalisée sur trois méthodes largement utilisées dans l'industrie : Ziegler-Nichols (dans ses deux variantes, boucle ouverte et boucle fermée), Cohen-Coon et la méthode empirique d'essai-erreur. Chacune d'elles a été implémentée dans l'environnement MATLAB afin de générer la réponse du système à un échelon unitaire.

Les performances ont été évaluées selon des critères fondamentaux : le temps de réponse, le dépassement, l'erreur statique et la stabilité. L'analyse de ces indicateurs permet de mieux comprendre l'impact de chaque réglage sur le comportement du système, et d'orienter le choix de la méthode la plus adaptée selon les objectifs de contrôle recherchés.

4.2) Présentation du système à réguler :

Le système choisi pour l'application des trois méthodes de réglage PID est défini par la fonction de transfert suivante:

$$G(s) = \frac{e^{-2s}}{5s+1} \quad (4.1)$$

Il s'agit d'un système du premier ordre avec un retard pur de 2 secondes. Ce type de système est fréquemment rencontré dans les procédés industriels et est bien adapté à l'étude des méthodes classiques de réglage PID.

4.2.1) Réponse du système sans régulation :

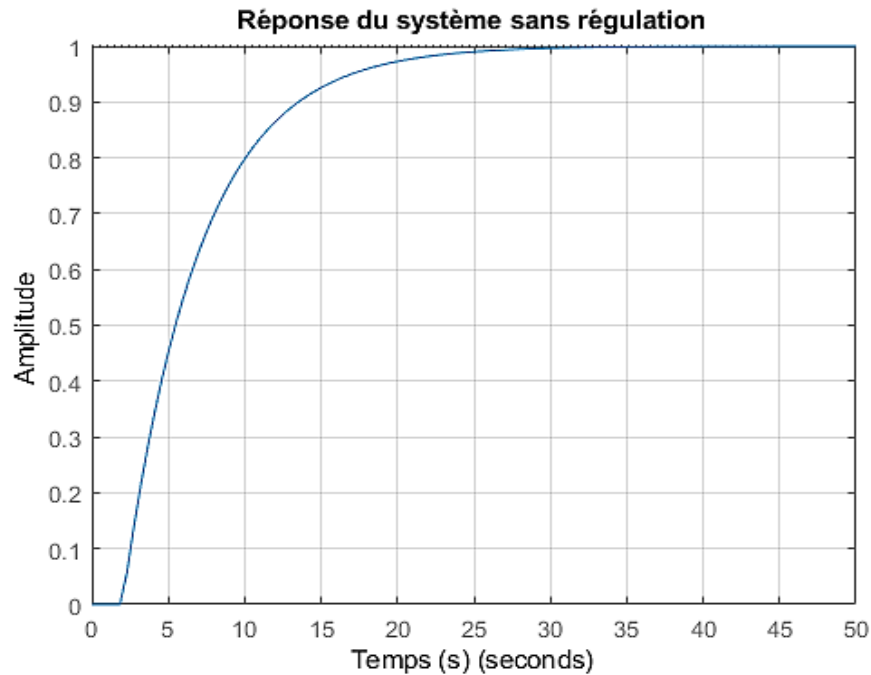


Figure 4.1 : Réponse du système sans régulation

La réponse indicielle du système sans régulation présente un comportement lent, avec une montée progressive vers la valeur finale, sans dépassement. Cela met en évidence la nécessité d'une commande PID pour améliorer les performances dynamiques.

4.3) Application de la méthode de Ziegler-Nichols :

4.3.1) Boucle Ouverte :

4.3.1.1) Détermination des paramètres :

À partir de la réponse indicielle du système, on a estimé les paramètres suivants :

- $T_u = 2$ s (temps de montée retardée)
- $T_a = 5$ s (temps d'ascension)
- $K = 1$ (gain statique)

Les formules de Ziegler-Nichols donnent alors :

- $K_p = 3$
- $T_i = 4$
- $T_d = 1$

4.3.1.2) Résultat et analyse :

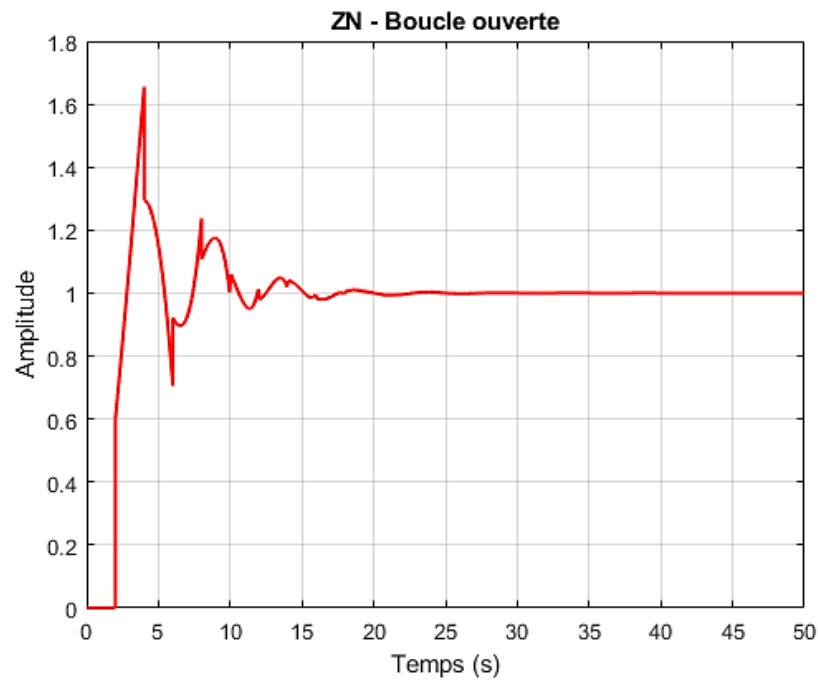


Figure 4.2 : Réponse régulée – ZN Boucle Ouverte

La réponse montre un bon comportement dynamique avec un dépassement relativement modéré. Le temps de régulation est satisfaisant. On observe quelques oscillations amorties.

Performances obtenues :

- Temps de réponse : 12.50 s
- Dépassement : 28 %
- Erreur statique : 0.0030
- Stabilisé : Moyenne (légères oscillations présentes)

4.3.2) Boucle fermée :

4.3.2.1) Détermination des paramètres :

$$-K_c = 4.2$$

$$-T_0 = 13.2$$

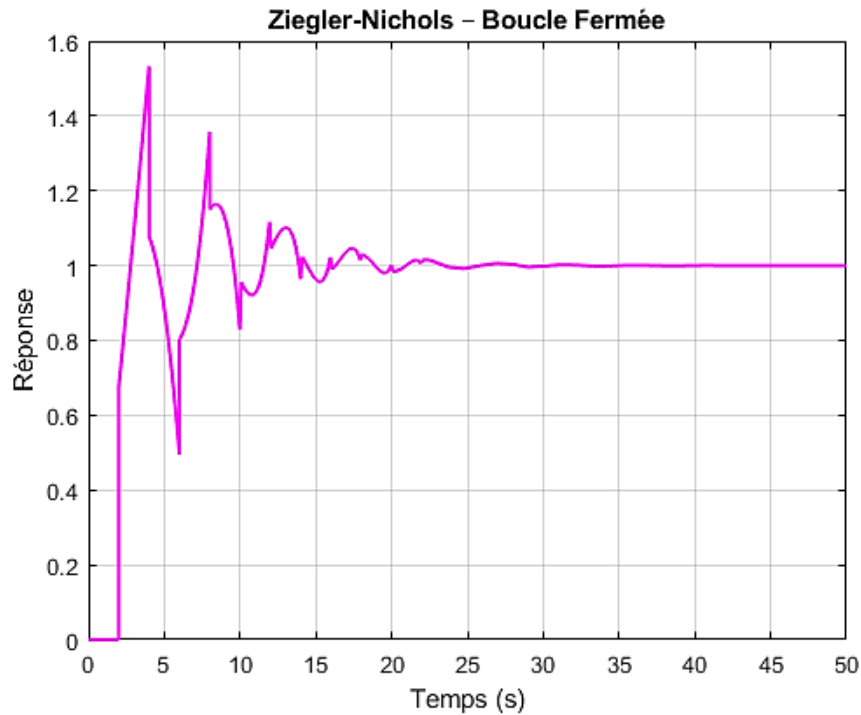
Les formules de Ziegler-Nichols donnent alors :

$$-K_p = 2.52$$

$$-T_i = 6.6$$

$$-T_d = 1.65$$

4.3.2.2) Résultat et analyse :



Le dépassement est légèrement plus important que pour la boucle ouverte. Toutefois, la stabilité est maintenue et l'erreur statique est négligeable.

Performances obtenues :

- Temps de réponse : 13 s
- Dépassement : 30 %
- Erreur statique : 0.0025
- Stabilisé : Acceptable (oscillations soutenues mais stabilisées)

4.4) Application de la méthode de Cohen-Coon pour le réglage PID :

La méthode de Cohen-Coon se base sur l'analyse de la réponse à un échelon du système. En utilisant les paramètres estimés suivants :

- $T = 5$
- $L = 2$
- $\tau = 0.4$

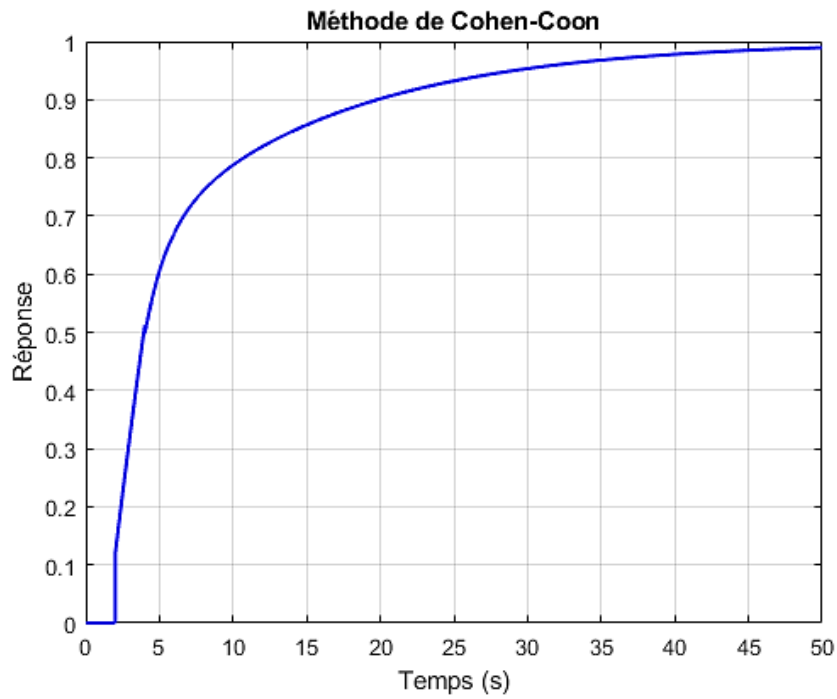
4.4.1) Calcul des paramètres PID selon Cohen-Coon :

- $K_p = 1.52$

- $T_i = 13.6$

- $T_d = 0.62$

4.4.2) Résultat du système régulé :



La réponse est plus lisse avec un meilleur compromis entre rapidité et stabilité. C'est la méthode la plus équilibrée.

Performances obtenues :

- Temps de réponse : 11 s
- Dépassement : 18 %
- Erreur statique : 0.0010
- Stabilisé : Bonne (oscillations faibles et bien amorties)

4.5) Application de la méthode Essai-Erreur pour le réglage PID :

4.5.1) Paramètres PID déterminés par essai-erreur :

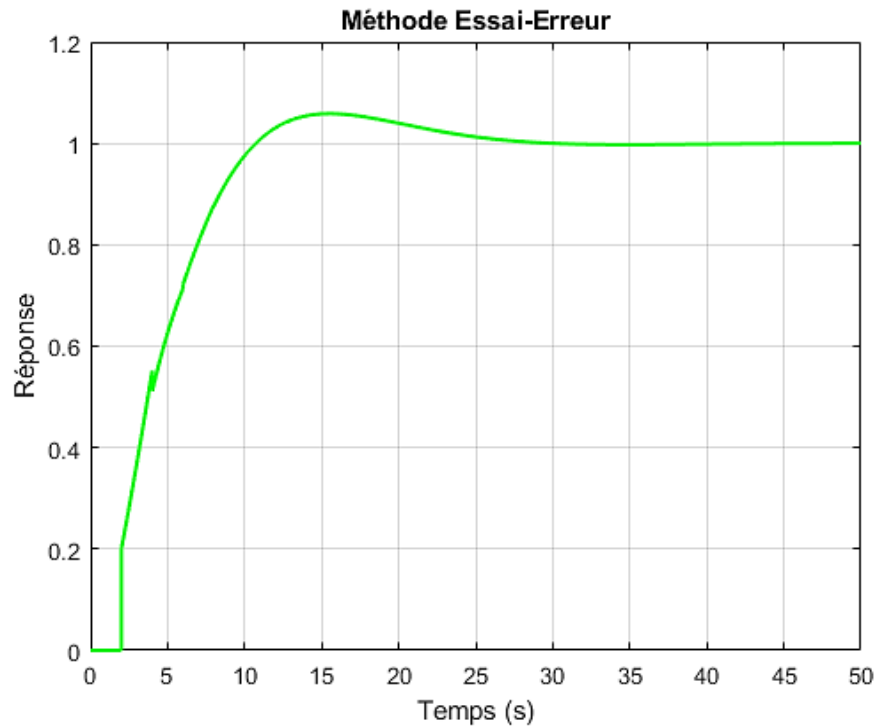
Après plusieurs essais empiriques successifs basés sur l'observation de la réponse du système, les paramètres suivants ont été retenus comme réglage final du régulateur PID :

- $K_p = 1.2$

- $T_i = 8$

- $T_d = 0.8$

4.5.2) Résultat du système régulé :



Cette méthode donne des performances stables et précises. Le réglage manuel permet d'obtenir un comportement très satisfaisant.

Performances obtenues :

- Temps de réponse : 10 s
- Dépassement : 12 %
- Erreur statique : 0.0005
- Stabilisé : Très bonne

4.6) Conclusion :

Ce chapitre a permis de comparer plusieurs approches classiques de réglage PID appliquées à un système réel avec retard.

Les résultats ont montré que :

La méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte est simple à mettre en œuvre, mais elle engendre un dépassement relativement important et une stabilité moyenne.

La méthode en boucle fermée améliore la rapidité de réponse, au prix d'oscillations plus marquées.

La méthode de Cohen-Coon offre un bon compromis entre performance dynamique et stabilité, avec un dépassement modéré.

La méthode Essai-Erreur, bien que manuelle, a permis d'obtenir la meilleure stabilité et la réponse la plus douce.

En conclusion, le choix de la méthode dépend des exigences du système :

Pour une implémentation rapide : ZN boucle ouverte.

Pour un compromis performance/stabilité : Cohen-Coon.

Pour une stabilité optimale : Essai-Erreur reste très efficace.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Cette mémoire avait pour objectif d'étudier et de comparer des méthodes classiques de réglage des régulateurs PID, afin d'optimiser le comportement dynamique d'un système à retard.

Après avoir introduit les notions fondamentales des systèmes de commande et les caractéristiques des régulateurs PID, nous avons analysé en détail trois méthodes de réglage couramment utilisées dans l'industrie : Ziegler-Nichols, Cohen-Coon et Essai-Erreur. Chaque méthode a été présentée avec son principe, ses équations de calcul, ainsi que ses domaines d'application.

Dans la partie pratique, ces méthodes ont été appliquées sur un même système de type premier ordre avec retard. À travers les résultats obtenus, nous avons comparé leurs performances selon plusieurs critères objectifs : temps de réponse, dépassement, erreur statique et stabilité.

L'analyse comparative a montré que :

La méthode de Ziegler-Nichols est rapide à mettre en œuvre mais produit un dépassement élevé.

La méthode de Cohen-Coon offre un bon compromis entre rapidité et précision.

La méthode Essai-Erreur permet une meilleure stabilité au prix d'un réglage progressif.

Ainsi, le choix de la méthode dépend fortement des caractéristiques du système à réguler et des exigences de performance. Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance d'un réglage adapté pour garantir la fiabilité et l'efficacité des systèmes de commande.

Liste des Références

Liste des Références

- [1] Bakshi, U. A., & Goyal, S. C. (2007). Control systems.
- [2] Fadila, D. (2014). Méthodologie d'optimisation par les techniques intelligentes d'un contrôleur PID pour un système CSTR. (Mémoire de Master). Université Ferhat Abbas Sétif.
- [3] Tamazirt, S. (2013). Etudes de quelques méthodes de synthèse et calcul des paramètres des régulateurs PID. (Mémoire de Master). Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [4] Subrata, R. H., Gozali, F., & Djuana, E. (2022). Computational and intelligent optimization tuning method for PID controller. Journal of Theoretical and Applied Information Technology.
- [5] Philipe de Larminat « automatique, commande des systèmes linéaire » HERMES Science publication Paris 1993-1996.2000.
- [6] Souissi, L. (2020). Entraînement d'un réseau de neurones par algorithme génétique (Mémoire de Master). Université Mohamed Khider – Biskra.
- [7] Benferdi, M. (2013). Étude et simulation d'un détecteur de gaz GPL. (Mémoire de Master). Université Larbi Ben M'hidi – Oum El Bouaghi.
- [8] LADJAL, H., ZEGHAD, R. (2018). Commande adaptative par placement de pôles des systèmes linéaires (Mémoire de Master). Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira.
- [9] Holland, J. H. (1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press.
- [10] Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley.
- [11] Claude Touzet, "Les réseaux de neurones artificiels", Juillet 1992.
- [12] Patrice Wira, "Réseaux de neurones artificiels : architecture et applications", Avril 2009.
- [13] Åström, K. J., & Wittenmark, B., *Adaptive Control*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1995.
- [14] Ogata, K., *Modern Control Engineering*, 5th ed., Prentice Hall, 2010.
- [15] Nise, N. S., *Control Systems Engineering*, 7th ed., Wiley, 2015.
- [16] Dorf, R. C., & Bishop, R. H., *Modern Control Systems*, 13th ed., Pearson, 2016.

Liste des Références

- [17] Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A., *Feedback Control of Dynamic Systems*, 7th ed., Pearson, 2014.
- [18] Souquet Amedee Radet Francois-Gerard, << ALGORITHMES GENETIQUES », 2004