



# Mémoire de Master

## Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

## Réalisé par :

Noura MOUHOUCHE

Et

Wissam AYACHE

# Thème

## Réalisation d'un banc d'essai expérimental d'un contrôleur PID pour la commande de vitesse de moteur à courant continu

Soutenu le: .../.../2023

Devant le Jury composé de :

Mr :	.....	Prof.	Univ. Bouira	Président
	Mohamed KHARCHI	Prof	Univ. Bouira	Encadrant
	.....	Prof	Univ. Bouira	Examineur
	.....	Prof	Univ. Bouira	Examineur

---

# *Remerciements*

---

*Tout d'abord, nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience nécessaires à mener ce travail à son terme.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements au membre de jury .veuillez accepter dans ce travail notre sincère respect et notre profonde reconnaissance .nous tenons également à remercier infiniment Mr. Kharchi pour nous avoir les offert les conditions nécessaires et nous avoir guidé dans l'élaboration de ce travail .nous profitons aussi cette occasion pour exprimer nos plus vifs remerciements envers tous les enseignants de département génie électrique de la faculté des sciences et sciences appliquées d'Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira qui nous ont apportés du soutien durant nos études*

*Que ce travail soit pour vous le gage de notre profond amour à tous nos amis à tous ceux qui nous ont aidés .À tous ceux que nous aimons*

*« Merci »*

## *Dédicaces*

*Tout D'abord je tiens à remercier le bon dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect et la reconnaissance, c'est tout simplement je dédie ce mémoire à :*

*A mon encadrant Mr .kharchi .*

*A mes deux raisons de vivre ma mère et mon père qui m'ont mené là où j'en suis Aujourd'hui*

*A ma grand-mère à qui je souhaite une longue vie*

*A ma sœur Amel et mon frère Oussama*

*A la lumière de ma vie khaled*

*A toutes mes amis Afaf, Samira, Lydia, Nada, Wissem avec lesquelles j'ai partagé mes meilleures moments , qui mon soutenues aidé et tous ceux qui nous ont encouragés pour réaliser ce travail*

*A tout ma famille*

*Noura*

*Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers  
Dieu, le tout puissant et miséricordieux, pour nous  
avoir accordé la volonté et la force nécessaires pour*

*accomplir ce projet*

*Je dédie ce mémoire à :*

*.Mr.kharchi pour leurs conseils et remarques  
précieux concernant la rédaction de ce mémoire et la*

*réalisation de notre projet*

*mes chers parents*

*mes sœurs et mes frères*

*tous mes amis, camarades et toute personne qui nous*

*ont soutenus moralement*

*Tout particulièrement au cours de cette année*

*éprouvante .aucun hommage ne saurait*

*véritablement rendre justice à leurs sacrifices.*

*Wissam*

## Résumé :

Ce mémoire se concentre sur la mise en œuvre d'un banc d'essai expérimental pour évaluer un contrôleur PID dans le contexte de la commande de la vitesse d'un moteur à courant continu. Il est divisé en trois chapitres majeurs.

Le premier chapitre explore l'état actuel de la recherche en matière de régulation PID analogique, il passe en revue les différentes approches et techniques utilisées dans ce domaine, mettant en évidence les avancées et les défis rencontrés. Le deuxième chapitre fournit une vue d'ensemble détaillée de l'instrumentation utilisée dans le banc d'essai, il aborde les composants matériels essentiels nécessaires à la réalisation du système expérimental, en insistant sur leur rôle et leur fonction dans le processus de régulation de la vitesse du moteur. Le troisième chapitre se penche sur les expérimentations réelles effectuées sur le banc d'essai, il présente en détail les tests de régulation proportionnelle(p), régulation proportionnelle-intégrale (PI), et proportionnelle –intégrale –dérivée (PID) appliqués au moteur à courant continu. Les résultats, les performances et les caractéristiques spécifiques de chaque méthode de régulation sont analysés.

En somme, ce mémoire offre une compréhension complète du processus de mise en place d'un banc d'essai expérimental pour évaluer les contrôleurs PID dans la commande de la vitesse d'un moteur à courant continu, il couvre les fondements théoriques, l'instrumentation requise, ainsi que les résultats concrets des essais de régulation P,PI,PID, fournissant ainsi une base solide pour l'évaluation et la comparaison de ces méthodes.

## المخلص

تركز هذه الأطروحة على تنفيذ منصة اختبار تجريبية لتقييم جهاز التحكم في سياق التحكم في سرعة محرك التيار المستمر و ينقسم الى ثلاثة فصول رئيسية يستكشف الفصل الأول الحالة الحالية للأبحاث في التحكم التناظري و يستعرض الأساليب و التقنيات المختلفة المستخدمة في هذا المجال ويسلط الضوء على التطورات و التحديات التي تمت مواجهتها يقدم الفصل الثاني نظرة عامة مفصلة عن الأجهزة المستخدمة في منصة الاختبار و يناقش مكونات الأجهزة الأساسية اللازمة لتحقيق النظام التجريبي مع التركيز على دورها ووظيفتها في عملية تنظيم سرعة المحرك يتناول الفصل الثالث التجارب الحقيقية التي تم إجراؤها على منصة الاختبار ويعرض بالتفصيل اختبارات التنظيم التناظري و التناسبي التكاملي و التناسبي التكاملي المشتق المطبقة على محرك التيار المستمر, يتم تحليل النتائج و الأداء و الخصائص المحددة لكل طريقة تنظيم

باختصار توفر هذه الأطروحة فهما شاملا لعملية اعداد منصة اختبار تجريبية لتقييم وحدات التحكم التناظري التكاملي المشتق في التحكم في سرعة محرك التيار المستمر و يغطي الأسس النظرية و الأجهزة المطلوبة فضلا عن النتائج الملموسة لاختبارات التحكم التناظري و التناسبي التكاملي و التناسبي التكاملي المشتق و بالتالي توفير أساس متين لتقييم و مقارنة هذه الأساليب

## Abstract :

This dissertation focuses on the implementation test bench to evaluate a PID controller in the context of controlling the speed of a DC motor. it is divided into three major chapters

The first chapter explores the current state of research in analog PID control. it reviews the different approaches and techniques used in this field, highlighting the advances and challenges encountered.

The second chapter provides a detailed overview of the instrumentation used in the test bench. it discusses the essential hardware and software components necessary to realise the experimental system, emphasizing their role and function in the motor speed regulation process

The third chapter looks at the real experiments carried out on the test bench. it presents in detail the proportional (P), proportional-integral (PI), proportional –integral –derivative (PID) regulation tests applied on the DC motor. the results, performances and specific characteristics of each regulation method are analysed.

In summary, this dissertation provides a comprehensive understanding of the process of setting up an experimental testbed to evaluate PID controllers in controlling the speed of a DC motor. it covers the theoretical foundations, the required instrumentation, as well as the concrete results of P,PI, and PID control tests, thus providing a solid basis for the evaluation and comparison of these methods.

# *Sommaire*

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : Etat de l'art sur les différentes méthodes de la régulation PID analogique</b>	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Définition d'un asservissement .....	2
I.3 Définition de la régulation.....	2
I.3.1 Objectifs de la régulation .....	3
I.3.2 Principe général de la régulation.....	3
I.3.3 Réglage en boucle ouverte .....	4
I.3.4 Réglage en boucle fermée .....	5
I.3.5 Qualité d'un asservissement en performance d'un système .....	5
I.4 Etude de la régulation analogique.....	6
I.4.1 La régulation Analogique.....	6
I.4.2 La correction des systèmes asservis.....	6
I.4.3 Types de correcteurs (régulation) .....	7
I.4.3.1 Correcteur proportionnel P.....	7
I.4.3.2 Correcteur proportionnel intégral PI .....	8
I.4.3.3 Correcteur proportionnel dérivé PD .....	9
I.4.3.4 Correcteur proportionnel intégral dérivé PID .....	10
I.5 Méthode de réglage PID .....	11
I.5.1 Réglage par approche successive .....	11
I.5.1.1 Réglage de l'action proportionnelle .....	11
I.5.1.2 Réglage de l'action dérivée.....	11
I.5.1.3 Réglage de l'action intégrale.....	12
I.5.2 Réglage à partir de l'identification du procédé.....	12
I.5.2.1 Cas d'un procédé stable .....	12
I.5.2.2 Cas d'un procédé instable .....	13
I.5.3 Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols .....	14
I.5.3.1 Cas d'un procédé stable en boucle ouverte .....	14

I.5.3.2	Cas d'un procédé stable en boucle fermée .....	14
I.6	Conclusion .....	15

## **CHAPITRE II : Généralités sur l'instrumentation utilisée**

II.1	Introduction .....	17
II.2	Notions sur le moteur à courant continu.....	17
II.2.1	Définition d'un moteur à courant continu .....	17
II.2.2	Constitution du moteur à courant continu .....	17
II.2.2.1	Rotor .....	18
II.2.2.2	Stator.....	18
II.2.2.3	Collecteur et balais .....	19
II.2.3	Principe de fonctionnement du moteur à courant continu .....	21
II.3	Capteurs .....	21
II.3.1	Définition.....	21
II.3.2	Codeur optique .....	22
II.4	Amplificateurs .....	22
II.4.1	Amplificateurs opérationnels .....	22
II.4.1.1	Montage des amplificateurs opérationnels .....	23
II.4.1.2	Caractéristiques des amplificateurs opérationnels.....	27
II.5	Plaque d'essai .....	27
II.6	Conclusion .....	27

## **CHAPITRE III : résultats obtenus de la régulation p,pi, pid sur un MCC dans un banc d'essai**

III.1	Introduction .....	28
III.2	Etapes du projet.....	28
III.3	Entrée au logiciel Proteus .....	28
III.3.1	Présentation du logiciel utilisé dans ce projet .....	28
III.4	Explication du schéma utilisé dans ce projet.....	29
III.4.1	Convertisseur simple de fréquences en tension .....	29
III.4.1.1	Définition .....	29

III.4.1.2	Application de convertisseur simple de fréquence en tension .....	29
III.4.2	Schéma de retour (FeedBack) .....	30
III.4.3	Schéma de référence de vitesse (Speed) .....	31
III.4.4	Schéma de soustraction .....	31
III.4.5	Schéma PID analogique .....	32
III.4.6	Schéma de sommateur.....	33
III.4.7	Schéma de driver du moteur.....	33
III.5	Test et résultats.....	34
III.6	Analyse et discussion des résultats .....	36
III.7	Conclusion.....	36
<b>Conclusion générale</b> .....		<b>37</b>

## **Références bibliographiques**



## *Liste des figures*

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>CHAPITRE I :</b>		
<b>I.1</b>	Procédé asservi : réponse à un échelon de consigne	<b>2</b>
<b>I.2</b>	Procédé régulé : réponse à un échelon de perturbation	<b>3</b>
<b>I.3</b>	Schéma de principe d'une régulation en boucle fermée	<b>4</b>
<b>I.4</b>	Système en boucle ouverte	<b>4</b>
<b>I.5</b>	Système en boucle fermée	<b>5</b>
<b>I.6</b>	Insertion d'un correcteur dans la boucle de commande	<b>6</b>
<b>I.7</b>	Schéma d'un correcteur proportionnel	<b>7</b>
<b>I.8</b>	Schéma de principe d'un correcteur PI	<b>8</b>
<b>I.9</b>	Schéma de principe d'un correcteur PD	<b>10</b>
<b>I.10</b>	Schéma d'un PID	<b>10</b>
<b>CHAPITRE II :</b>		
<b>II.1</b>	Schéma général d'un moteur à courant continu	<b>17</b>
<b>II.2</b>	Constitution d'un moteur à courant continu	<b>18</b>
<b>II.3</b>	Rotor	<b>18</b>
<b>II.4</b>	Stator	<b>19</b>
<b>II.5</b>	Schéma du collecteur	<b>19</b>
<b>II.6</b>	Les balais.	<b>20</b>
<b>II.7</b>	figure représentative de la règle de la main droite	<b>20</b>
<b>II.8</b>	figure montrant le fonctionnement d'un moteur à courant continu	<b>21</b>
<b>II.9</b>	Schéma général de capteur EE-sx672A	<b>21</b>
<b>II.10</b>	Codeur optique	<b>22</b>
<b>II.11</b>	Circuit intégré d'un amplificateur opérationnel.	<b>23</b>
<b>II.12</b>	Schéma électrique d'un amplificateur sommateur	<b>23</b>
<b>II.13</b>	Schéma électrique d'un amplificateur non-inverseur	<b>24</b>
<b>II.14</b>	Schéma électrique d'un amplificateur inverseur	<b>24</b>
<b>II.15</b>	Schéma électrique d'un amplificateur dérivateur	<b>25</b>
<b>II.16</b>	Schéma électrique d'un amplificateur intégrateur	<b>25</b>
<b>II.17</b>	Schéma électrique d'un amplificateur soustracteur	<b>26</b>
<b>CHAPITRE III :</b>		
<b>III.1</b>	Fenêtre principale de travail sur proteus	<b>28</b>
<b>III.2</b>	Convertisseur fréquence-tension sous proteus	<b>30</b>
<b>III.3</b>	Schéma de retour sous proteus	<b>30</b>
<b>III.4</b>	Schéma de la référence de vitesse (speed)	<b>31</b>
<b>III.5</b>	Schéma de la soustraction	<b>31</b>
<b>III.6</b>	Schéma du correcteur proportionnel sous proteus	<b>32</b>
<b>III.7</b>	Schéma de l'intégration	<b>32</b>
<b>III.8</b>	Schéma de dérivation	<b>32</b>
<b>III.9</b>	Sommateur sous proteus	<b>33</b>

<b>III.10</b>	Driver du moteur sous proteus	<b>33</b>
<b>III.11</b>	Connexion de capteur avec le convertisseur LM331	<b>34</b>
<b>III.12</b>	Connexion de schéma du contrôleur PID	<b>35</b>
<b>III.13</b>	Connexion de système complet	<b>35</b>
<b>III.14</b>	représentation des signaux à une valeur de $T_i=60\%$	<b>36</b>
<b>III.15</b>	représentation des signaux à des grands valeurs de $K_P=80\%$ , $T_d=70\%$	<b>36</b>
<b>III.16</b>	Représentation des signaux à une valeur de $K_p=80$	<b>37</b>

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>CHAPITRE I :</b>		
<b>I.1</b>	Calcul des différents paramètres du correcteur par la méthode d'identification du procédé dans le cas d'un procédé stable	<b>13</b>
<b>I.2</b>	Calcul des différents paramètres du correcteur par la méthode d'identification du procédé dans le cas d'un procédé instable	<b>14</b>
<b>I.3</b>	Calcul des différents paramètres du correcteur par la méthode de Zeigler Nichols dans le cas d'un procédé stable en boucle ouverte	<b>14</b>
<b>I.4</b>	Calcul des différents paramètres du correcteur par la méthode de Zeigler Nichols dans le cas d'un procédé stable en boucle fermée	<b>15</b>

## *Liste des abréviations*

Abréviation	Signification
<b>P</b>	Correcteur proportionnel
<b>PI</b>	Correcteur proportionnel intégrateur
<b>PID</b>	Correcteur proportionnel intégrateur dérivé
<b>K<sub>p</sub></b>	Gain de correcteur proportionnel
<b><math>\varepsilon(t)</math></b>	L'erreur statique
<b>T<sub>i</sub></b>	Gain de correcteur intégrateur
<b>PD</b>	Correcteur proportionnel dérivateur
<b>T<sub>d</sub></b>	Gain de correcteur dérivateur
<b>K<sub><math>\tau</math></sub></b>	Coefficient du temps intégral
<b>K<sub>o</sub></b>	Gain de régulateur critique
<b>Mcc</b>	Moteur à courant continu

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

La technologie a favorisé l'avancement des sciences, notamment dans le domaine de l'automatique. Ce domaine englobe la modélisation, le contrôle, la rétroaction et la régulation des systèmes pour automatiser diverses opérations au sein des machines et des lignes de production industrielles. Des exemples concrets incluent une chaîne de fabrication en usine, un générateur électrique dans une centrale électrique, ainsi que des avions et des navires, où la conduite est assistée par des systèmes de pilotage automatique.

L'automatique a pour objectif de réduire au maximum l'intervention humaine notamment pour éliminer les tâches fastidieuses, répétitives ou potentiellement dangereuses. La régulation joue un rôle crucial dans l'automatisation des procédés industriels, car elle permet de superviser et de contrôler efficacement ces systèmes pour en améliorer les performances. En conséquence, l'automatisation est devenue indispensable en industrie.

La commande PID (proportionnelle -intégrale-dérivée) est la méthode de régulation la plus couramment utilisée en industrie pour contrôler les systèmes industriels. En utilisant les trois actions de cette commande, qui peuvent être appliquées individuellement ou de manière combinée, on parvient à optimiser les performances du système selon les spécifications requises, telles que la stabilité, la réactivité et la précision, conformément au cahier des charges.

L'objectif de notre travail consiste à examiner l'impact de la régulation PID, qui englobe la régulation proportionnelle, la régulation proportionnelle intégrale, et la régulation proportionnelle intégrale dérivée, sur la vitesse d'un moteur à courant continu d'un banc d'essai expérimental spécifique. Le but de ce banc d'essai est de maintenir la vitesse du moteur à courant continu (MCC) en conformité avec la valeur de consigne appliquée en minimisant le temps de réponse, tout en cherchant à trouver le meilleur compromis entre les différentes actions de commande pour optimiser le comportement du moteur. Le premier chapitre abordera des notions générales sur les systèmes asservis, en présentant également les techniques de correction P, PI, et PID.

Le deuxième chapitre se focalisera sur les moteurs à courant continu ainsi que sur les composants essentiels de notre banc d'essai, à savoir les capteurs, les codeurs optiques et les amplificateurs.

Le troisième chapitre servira de synthèse à notre étude. Il englobera les divers essais de régulation PID appliqués à la vitesse du moteur à courant continu, ainsi que les résultats obtenus à la suite de ces expérimentations. Enfin, nous clôturerons ce chapitre par une conclusion.

**CHAPITRE 1 :**

**ETAT DE L'ART SUR LES**

**DIFFÉRENTES MÉTHODES DE LA**

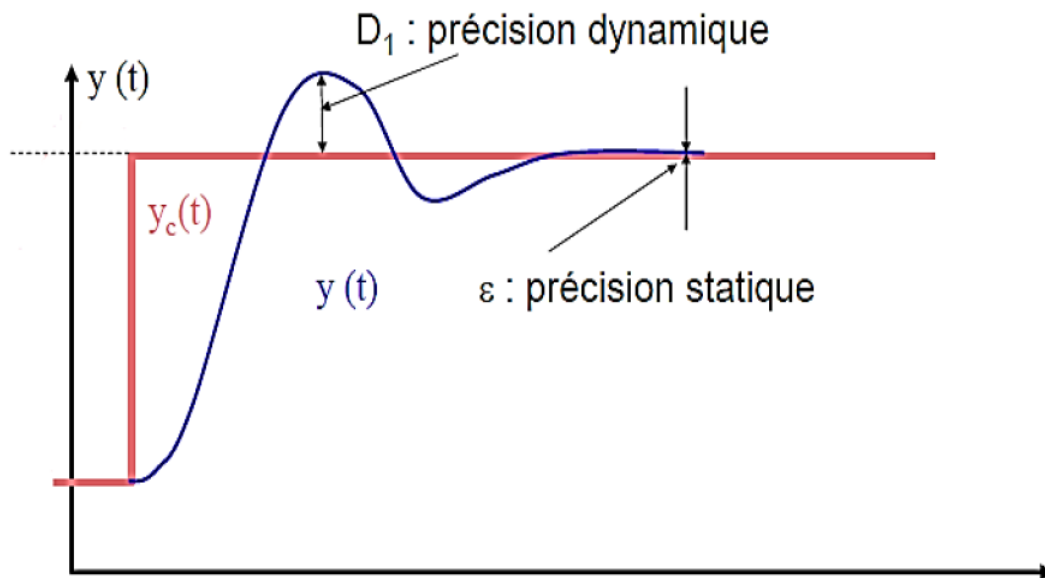
**RÉGULATION PID ANALOGIQUE**

## 1. Introduction

Dans le contexte de l'automatique, le concept de "système" fait référence à un processus de diverses natures, soumis à l'influence de son entrée  $U$  (input en anglais) et caractérisé par l'évolution qu'il manifeste par le biais de sa sortie  $Y$  (output en anglais). Ce chapitre présentera des informations générales relatives aux systèmes asservis, en plus d'aborder les méthodes de correction P, PI et PID.

## 2. Définition d'un asservissement

Un système asservi est un mécanisme qui a pour objectif de surveiller attentivement les fluctuations d'une instruction en constante évolution,  $y(t)$ . Son opération consiste à constamment évaluer la disparité entre la mesure actuelle (connue sous le nom de grandeur de sortie  $y(t)$ ), présentée en couleur bleue sur le schéma (I.1), et l'instruction, tout en introduisant des ajustements afin d'atteindre cette dernière, même en présence de perturbations externes. La réaction d'un système asservi face à un changement d'instruction est illustrée dans la figure ci-dessous.

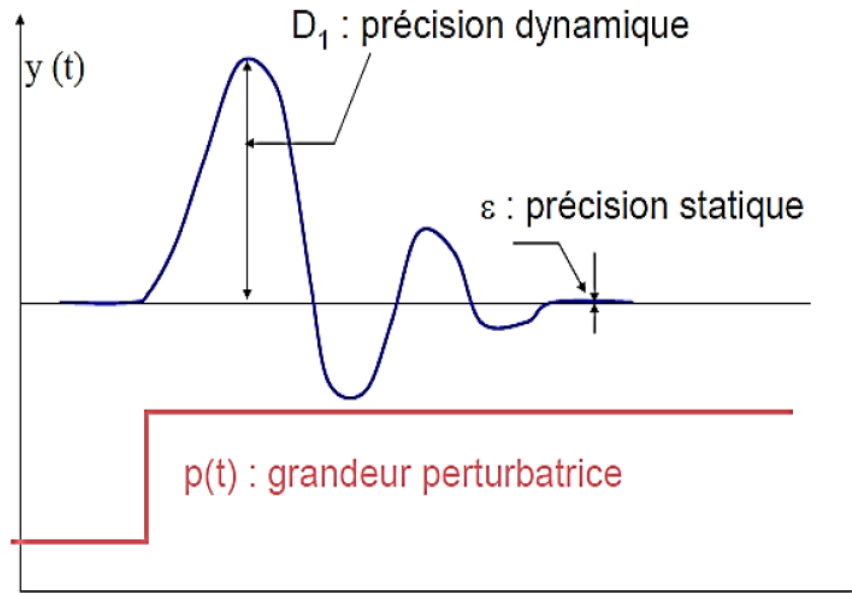


**Figure I.1 :** Procédé asservi : réponse à un échelon de consigne.

## 3. Définition de la régulation

La régulation automatique est un domaine technique affilié à l'automatique, dont l'objectif est de surveiller et de gérer une grandeur physique sans nécessiter d'intervention humaine, afin de maintenir cette grandeur à une valeur souhaitée, appelée consigne (constante), en dépit des influences extérieures perturbatrices. La réaction d'un système régulé à un changement soudain dans la perturbation  $p(t)$  est représentée dans la figure ci-dessous.





**Figure I.2 :** Procédé régulé : réponse à un échelon de perturbation.

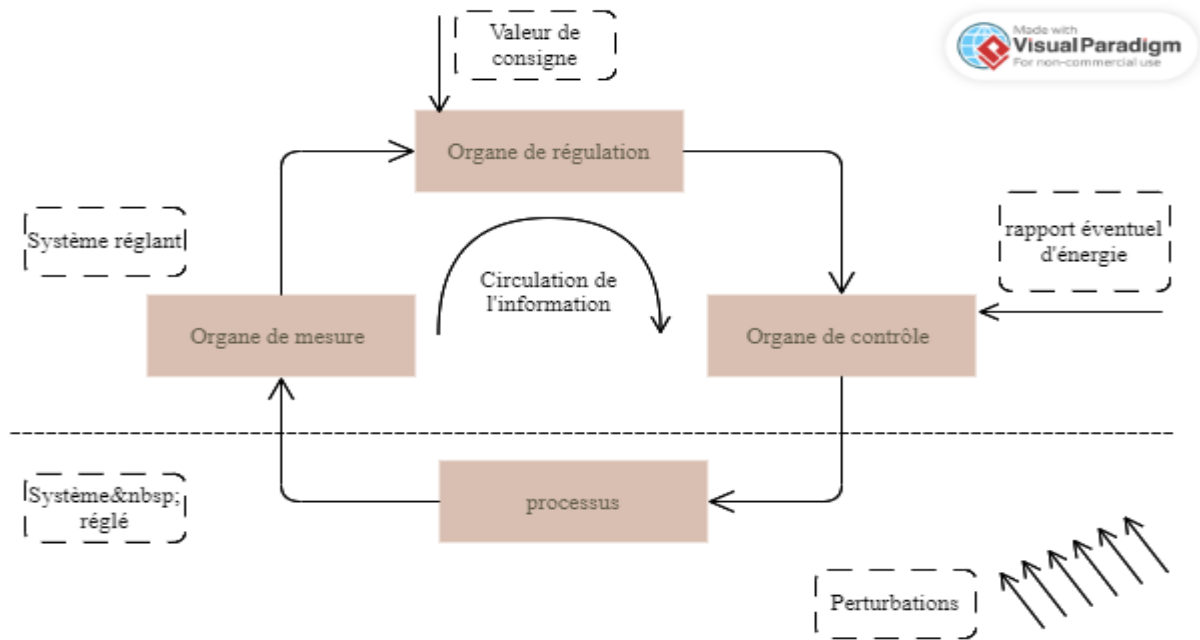
### 3.1. Objectifs de la régulation

Le processus de régulation d'une grandeur implique d'induire un comportement précis à cette grandeur au sein d'un environnement susceptible de subir des fluctuations. Les systèmes automatiques assument généralement deux fonctions distinctes :

- La régulation consiste à maintenir la grandeur commandée, ou grandeur réglée, à une valeur de référence, en dépit des changements des conditions extérieures [1].
- L'asservissement correspond à la capacité de répondre à des changements d'objectif ou de poursuivre une cible en dépit des objectifs variables [1].

### 3.2. Principe général de la régulation

Au sein des environnements industriels et domestiques, il s'avère essentiel de maintenir des grandeurs physiques à des valeurs spécifiques, indépendamment des fluctuations internes ou externes. Pour accomplir cette tâche, l'utilisation d'un système de régulation en boucle fermée est nécessaire, où la valeur mesurée de la grandeur réglée est constamment comparée à la valeur souhaitée, et des ajustements sont apportés en conséquence à la grandeur d'action. La mise en place de cette boucle de régulation implique l'utilisation d'un ensemble de dispositifs de mesure, de traitement de signal, d'amplification, et de commande d'actionneur. Toutefois, il est essentiel de comprendre le concept d'asservissement, même si la régulation est souvent la fonction prédominante, afin d'évaluer les performances et la qualité d'une boucle de régulation.



**Figure I.3 :** Schéma de principe d'une régulation en boucle fermée.

### 3.3. Régulation en boucle ouverte

Un système en boucle ouverte est un système qui ne possède pas de mécanisme de rétroaction reliant la sortie à l'entrée. Dans ce type de régulation, la commande est conçue sans prendre en compte les valeurs de sortie du système. La représentation schématique d'un système en boucle ouverte est illustrée dans la figure ci-dessous. [2]



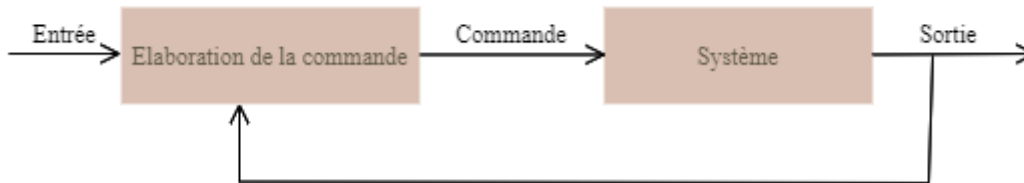
**Figure I.4 :** Système en boucle ouverte.

La régulation en boucle ouverte offre divers avantages, notamment la capacité à anticiper les événements et à atteindre des temps de réponse extrêmement rapides. Elle permet également d'éviter les problèmes liés au "pompage". De plus, la régulation en boucle ouverte constitue souvent la seule option viable lorsque le contrôle final n'est pas réalisable. [1] [3]

Effectivement, la régulation en boucle ouverte comporte également certains inconvénients. Elle requiert une connaissance approfondie de la loi régissant le processus, ce qui peut être complexe dans certaines situations. De plus, elle ne dispose pas des mécanismes pour surveiller, détecter, et corriger les éventuelles erreurs, dérives ou incidents qui peuvent se produire à l'intérieur de la boucle de régulation. Ces limitations peuvent rendre la régulation en boucle ouverte moins adaptée à des processus où la stabilité et la précision sont essentielles. [1] [3]

### 3.4. Régulation en boucle fermée

La boucle fermée est un système qui intègre une boucle de rétroaction entre la sortie et l'entrée. Elle a la capacité de stabiliser un système qui serait instable en boucle ouverte. Le schéma bloc d'un système en boucle fermée est représenté dans la figure ci-dessous.[2][3]



**Figure I.5 :** Système en boucle fermée.

Effectivement, la boucle fermée présente plusieurs avantages importants. Elle permet de compenser efficacement de nombreux facteurs perturbateurs grâce à la rétroaction (feedback). De plus, un autre avantage significatif de la boucle fermée est qu'elle ne nécessite pas une connaissance précise des lois et du comportement individuel des composants de la boucle. Elle est capable de réguler le système de manière autonome en ajustant continuellement la commande en fonction de la rétroaction de la sortie, ce qui la rend particulièrement robuste et adaptative. [2] [1]

Cependant, ce type de régulation nécessite des mesures précises des valeurs et de la consigne. De plus, le choix inapproprié de certains composants peut entraîner le phénomène de "pompage". De plus, la régulation en boucle fermée peut parfois souffrir du manque d'anticipation. [2] [1] [3]

### 3.5. Qualité d'un asservissement et performances d'un système

Il existe trois principales qualités d'un asservissement : la stabilité, la précision et la rapidité.

#### a. Stabilité

Un système est considéré comme stable si et seulement si une entrée bornée  $e(t)$  entraîne une sortie bornée  $s(t)$ . Cette définition permet d'évaluer la stabilité des systèmes face aux influences extérieures, en garantissant que les réponses du système demeurent limitées et contrôlées, ce qui est un critère essentiel pour assurer leur fonctionnement prévisible et fiable.

#### b. Rapidité

L'objectif recherché est d'atteindre la valeur de consigne de la sortie dans les délais les plus brefs possibles, en minimisant le temps de réponse. Le temps de réponse à 5% d'un système est quant à lui défini comme la durée nécessaire pour que la sortie parvienne et reste à l'intérieur de la

plage [95% ; 105%] de la valeur finale stabilisée. Cette mesure permet d'évaluer la rapidité et l'efficacité de la réponse du système à un changement de consigne.

### **c. Précision**

Il est tout à fait naturel d'évaluer la précision d'un système régulé en comparant son résultat obtenu à l'exigence spécifiée. Cette précision se mesure en évaluant la différence entre la valeur de consigne demandée et la mesure obtenue lorsque le système est en régime permanent, ce qui est désigné comme la précision statique. Cette évaluation peut être réalisée en modifiant rapidement la consigne et en observant la variation d'amplitude dans la réponse du système. En règle générale, la conception d'un système de régulation nécessite de trouver un compromis entre différents objectifs, notamment la stabilité, la précision et la rapidité. Il est souvent nécessaire de trouver un équilibre entre ces facteurs pour obtenir un système qui fonctionne de manière fiable tout en répondant efficacement aux exigences spécifiques de la tâche à accomplir.

## **4. Etude de la régulation analogique**

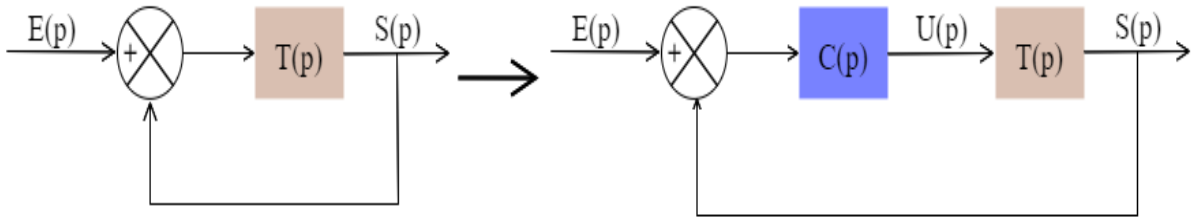
### **4.1. Régulation analogique**

La régulation analogique est un processus qui se base sur l'utilisation de signaux continus, typiquement sous forme de tensions, pour mettre en œuvre des régulateurs analogiques. Les valeurs des grandeurs physiques contenues dans ces signaux analogiques sont exprimées sous forme de valeurs numériques. Cela signifie que les informations relatives aux grandeurs physiques sont transmises et traitées sous forme de valeurs continues, contrairement aux signaux numériques qui sont représentés par des nombres discrets. [1]

### **4.2. Correction des systèmes asservis**

Il peut arriver que dans un système asservi, des problèmes tels qu'une précision insuffisante, une instabilité ou un temps de réaction excessif se manifestent. Pour résoudre ces problèmes, il est nécessaire d'introduire un correcteur dans la boucle de contrôle. Ce correcteur est conçu pour améliorer ces paramètres spécifiques sans compromettre les autres aspects du système. En ajustant de manière appropriée les actions de contrôle, le correcteur peut contribuer à optimiser les performances globales du système et à répondre aux exigences de la tâche.

Un correcteur représente l'élément essentiel d'une régulation ou d'un asservissement, permettant d'atteindre la consigne visée. [4]



**Figure I.6 :** Insertion d'un correcteur dans la boucle de commande.

L'introduction d'un correcteur implique plusieurs étapes à suivre : [4]

- Sélection du type de correcteur.
- Calcul des éléments constitutifs du correcteur (calcul de  $C(p)$ ).
- Vérification des performances par simulation.
- Réalisation et intégration réelle du correcteur dans la chaîne de commande.

### 4.3. Types de correcteurs (régulation)

#### 4.3.1. Correcteur Proportionnel P [5]

Le correcteur proportionnel P est un correcteur dont le signal de commande  $U(t)$  est proportionnel à l'écart  $\varepsilon(t)$ .

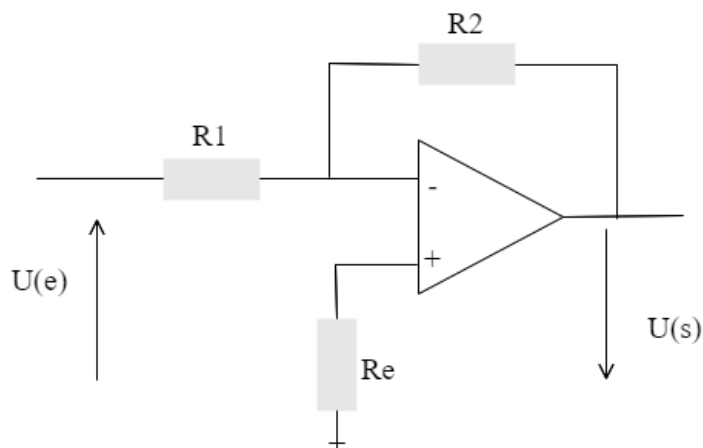
$$U(t) = K_c \varepsilon(t) \Rightarrow C(s) = K_p$$

L'erreur  $\varepsilon(t)$  est amplifiée virtuellement par un certain gain constant qui doit être déterminé en fonction du système.

Sa fonction de transfert est donnée par :

$$C(s) = K_p$$

La figure (I. 7) illustre le schéma de principe d'un correcteur proportionnel.



**Figure I.7 :** Schéma d'un correcteur proportionnel

Selon le schéma et la relation générale au nœud (-), la fonction de transfert d'un correcteur P est exprimée comme suit :

$$G_R(s) = \frac{U_s(s)}{U_e(s)} = \frac{R_2}{R_1}$$

Dans ce type de correcteur, l'écart statique est réduit en augmentant le gain  $K_p$ , mais sans l'éliminer complètement. De plus, la diminution de la marge de phase entraîne une augmentation de la rapidité. Cependant, une augmentation excessive du gain peut entraîner des oscillations et conduire à l'instabilité du système. Ce correcteur est utilisé lorsque la précision du réglage d'un paramètre n'est pas critique.

#### 4.3.2. Correcteur Proportionnel Intégral PI [5]

##### a- Action Intégrale I

Un correcteur est qualifié d'action intégrale lorsque le signal de commande  $U(t)$  est la résultante de l'intégration de l'écart  $\varepsilon(t)$ .

$$U(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \Rightarrow C(s) = \frac{1}{T_i \cdot s}$$

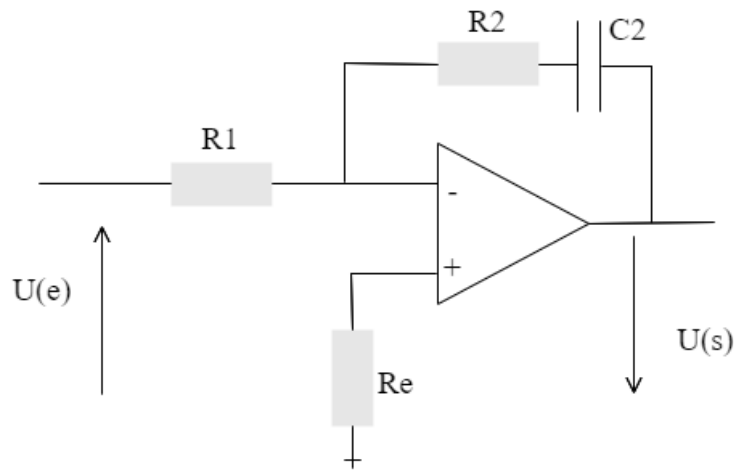
$T_i$  est la constante d'intégration (en secondes).

L'action intégrale a pour fonction de réduire progressivement la différence entre la consigne et la mesure, contribuant ainsi à atténuer les variations brusques et à éviter les pics de puissance.

##### b- Correcteur PI

Le correcteur PI est une combinaison d'un correcteur proportionnel (P) auquel on ajoute l'action intégrale (I). Son principal avantage réside dans le fait qu'il intègre un composant d'intégration dans la boucle de commande, ce qui permet d'éliminer l'erreur statique en réponse à une entrée en échelon.

Son schéma de principe est le suivant :



**Figure I.8 :** Schéma de principe d'un correcteur PI

Sa fonction de transfert est donnée par :

$$G_R(S) = \frac{U_s(S)}{U_e(S)} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1 + sR_2C_2}{sR_2C_2}$$

On pose :  $K_p = \frac{R_2}{R_1}$  et  $T_i = R_2C_2$

En remplaçant on trouve l'équation suivante :

$$G_R(S) = K_p \frac{1 + s.T_i}{s.T_i}$$

Le correcteur Proportionnel Intégral (PI) présente plusieurs avantages significatifs. Il est efficace pour éliminer les écarts statiques en introduisant une action intégrale, ce qui signifie qu'il peut amener la sortie du système à atteindre précisément la valeur de consigne en régime permanent. De plus, le correcteur PI permet de compenser les effets des perturbations, ce qui améliore la robustesse du système. Il augmente également la classe du système en introduisant un pôle à l'origine (pôle intégral) et un zéro. Cependant, il convient de noter que le correcteur PI présente quelques inconvénients. Il introduit un déphasage de  $(-\pi/2)$  dans le système, ce qui peut affecter la stabilité du système en diminuant la marge de phase. Une marge de phase réduite peut rendre le système plus susceptible aux oscillations et à l'instabilité si elle n'est pas gérée avec précaution. Par conséquent, lors de la conception d'un système de contrôle avec un correcteur PI, il est essentiel de prendre en compte ces compromis entre précision, robustesse et stabilité.

### 4.3.3. Correcteur Proportionnel Dérivé PD [5]

Le correcteur Proportionnel Dérivé (PD) est composé d'une action dérivée ajoutée à une action proportionnelle.

#### a. Action dérivée D

Le correcteur à action dérivée est défini de telle manière que le signal de commande  $U(t)$  est proportionnel à la dérivée de l'écart  $\varepsilon(t)$ . Voici l'équation du correcteur à action dérivée :

$$U(t) = T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \Rightarrow C(s) = T_d \cdot s$$

Dans cette équation,  $T_d$  représente le gain du correcteur dérivé et  $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$  est la dérivée de l'écart  $\varepsilon(t)$ , qui mesure la vitesse à laquelle l'écart évolue dans le temps. Le signal de commande  $U(t)$  produit par le correcteur dérivé est utilisé pour ajuster et réguler le système afin de réduire l'écart entre la consigne et la valeur mesurée.

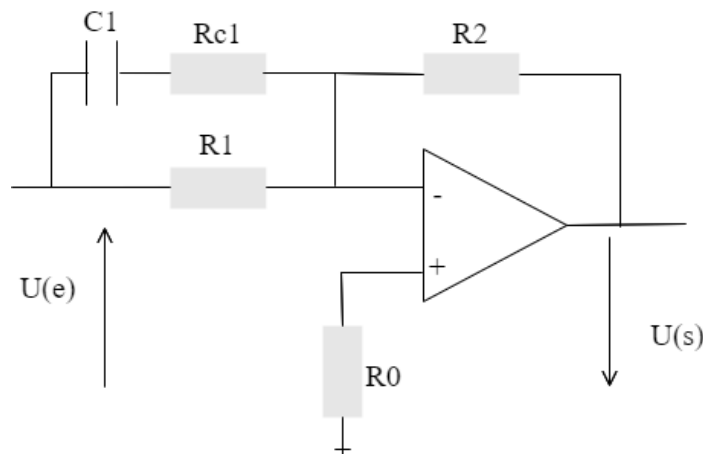
#### b. Correcteur PD

L'incorporation de l'action dérivée dans un système de contrôle vise principalement à obtenir une réponse rapide en anticipant sur l'erreur. Son rôle consiste à améliorer la rapidité de la réponse, à renforcer la stabilité du système et à compenser le temps mort éventuel du système. Cependant, l'action dérivée peut entraîner certains inconvénients, notamment : Saturation d'actionneurs, dépassement de la consigne, oscillations à la sortie lors de la variation de la consigne.

Sa fonction de transfert est :

$$G_R(s) = K_p (1 + T_d \cdot s)$$

Son schéma de principe est le suivant :



**Figure I. 9 :** Schéma de principe d'un correcteur PD.



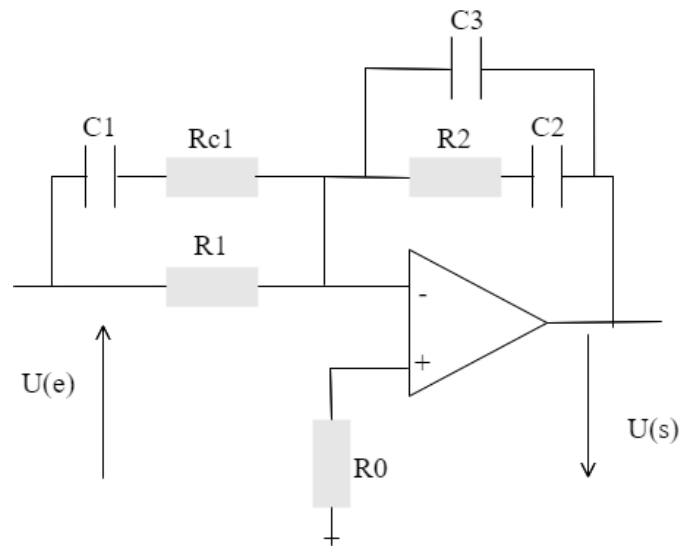
#### 4.3.4. Correcteur Proportionnel Intégral Dérivé PID [5]

Le correcteur Proportionnel Intégral Dérivé (PID) est un régulateur qui combine les avantages des trois types de correcteurs précédents, à savoir le correcteur Proportionnel (P), le correcteur Intégral (I), et le correcteur Dérivé (D).

Sa fonction de transfert est :

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

Le schéma électronique d'un correcteur PID est le suivant :



**Figure I.10 :** Schéma d'un PID.

Il convient de noter que les équations et les schémas correspondants aux différents types de correcteurs sont donnés dans les références citées. [5]

Le correcteur PID permet d'améliorer la précision, la stabilité et la rapidité d'un système en ajustant ses paramètres. Cependant, il présente des limitations. Il peut être inefficace pour les systèmes contenant du bruit ou présentant des non-linéarités, car l'asservissement PID est linéaire et peut entraîner des instabilités dans de tels cas. De plus, il est possible d'optimiser la réponse d'un système en utilisant plusieurs asservissements PID, comme le double asservissement PID.

## 5. Méthodes de réglages des PID

Il existe différentes méthodes de réglage des PID. Le choix de la méthode dépend du type de procédé et des contraintes de fabrication.

### 5.1. Réglage par approche successive [5]

La méthode de réglage par approche successive consiste à modifier les actions du régulateur et observer les effets sur la mesure jusqu'à obtenir une réponse optimale. Cette méthode se déroule dans l'ordre suivant :

#### 5.1.1. Réglage de l'action proportionnelle

- Stabiliser la mesure au point de fonctionnement.
- Configurer le régulateur en mode proportionnel seul ( $T_i = \text{maximum}$  ou coefficient du filtre  $N = 0$  et  $T_d = 0$ ).
- Utiliser un faible gain  $G_r$  ( $G_r < 1$ ).
- Égaliser la consigne à la mesure et activer le régulateur en mode automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10%.
- Observer l'évolution du signal de mesure et ajuster le gain  $G_r$  en fonction :
- Augmenter  $G_r$  si la réponse est sur-amortie (apériodique).
- Diminuer  $G_r$  si la réponse présente plus de deux oscillations.
- Trouver un compromis entre rapidité et stabilité en tenant compte des observations.

#### 5.1.2. Réglage de l'action dérivée

- L'action dérivée est justifiée si la mesure présente un retard.
- Conserver la valeur de l'action proportionnelle déterminée précédemment et minimiser l'intégrale.
- Utiliser une action dérivée faible ( $T_d$  égal à quelques secondes, par exemple  $t_r/3$ ).
- Égaliser la consigne à la mesure et activer le régulateur en mode automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10%.
- Augmenter  $T_d$  si la réponse n'est pas suffisamment amortie.
- Diminuer  $T_d$  si la réponse est oscillante ou plus lente.

#### 5.1.3. Réglage de l'action intégrale

- Conserver les valeurs de l'action proportionnelle et dérivée déterminées précédemment.
- Utiliser une action intégrale faible.
- Pour un premier essai, utiliser  $T_i$ .

- Égaliser la consigne à la mesure et activer le régulateur en mode automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10%.
- Diminuer  $T_i$  si la réponse est sur-amortie ou trop lente.
- Augmenter  $T_i$  si la réponse présente un dépassement trop important.

Ces étapes permettent d'ajuster progressivement les actions du régulateur PID pour obtenir une réponse optimale du système.

## 5.2. Réglage à partir de l'identification du procédé [5]

Le réglage à partir de l'identification du procédé est une étape cruciale dans la conception d'un système de contrôle. Son objectif est d'obtenir les paramètres caractéristiques nécessaires pour calculer les actions de commande à appliquer sur le régulateur.

### 5.2.1. Cas d'un procédé stable

Dans le cas d'un procédé stable, après avoir identifié le procédé en utilisant un modèle de premier ordre retardé, on peut utiliser le tableau suivant pour calculer les actions à appliquer sur un régulateur en fonction de sa structure.

La fonction de transfert du procédé à contrôler est donnée par :

$$Hr(s) = \frac{G_s e^{-\tau s}}{1 + \theta s}$$

Le choix du mode de régulation dépend de la réglabilité du système, qui est déterminée par le rapport  $\theta/\tau$ . Voici les correspondances entre le rapport  $\theta/\tau$  et le mode de régulation :

- Si  $\theta/\tau$  est compris entre 10 et 20 : régulation P
- Si  $\theta/\tau$  est compris entre 5 et 10 : régulation PI
- Si  $\theta/\tau$  est compris entre 2 et 5 : régulation PID
- Si  $\theta/\tau$  est supérieur à 20 : régulation tout ou rien
- Si  $\theta/\tau$  est inférieur à 2 : régulation multi-boucles, régulation numérique

Le calcul des différentes actions du correcteur peut être effectué en se référant au tableau fourni.

Régulations	P	P.I série	P.I parallèle	P.I.D série	P.I.D parallèle	P.I.D mixte (1)	P.I.D mixte (2)
Gr	$\frac{0.8\theta}{Gs. \tau}$	$\frac{0.8\theta}{Gs. \tau}$	$\frac{0.8\theta}{Gs. \tau}$	$\frac{0.85. \theta}{Gs. \tau}$	$\frac{\frac{\theta}{\tau} + 0.4}{Gs. 1,2}$	$\frac{\frac{\theta}{\tau} + 0.4}{Gs. 1,2}$	$\frac{\frac{\theta}{\tau} + 0.4}{Gs. 1,2}$
Ti	Max	$\theta$	$\frac{Gs. \tau}{0.8}$	$\theta$	$\frac{Gs. \tau}{0.75}$	$\theta + 0,4. \tau$	$\theta + 0,4. \tau$
Td	0	0	0	$0,4. \tau$	$\frac{0,35. \theta}{Gs}$	$\frac{\theta. \tau}{\tau + 2,5. \theta}$	$\frac{0,35. \theta}{Gs}$

**Tableau I.1 :** Calcul des différents paramètres du correcteur par la méthode d'identification du procédé dans le cas d'un procédé stable.

### 5.2.2. Cas d'un procédé instable

Dans le cas d'un procédé instable, après avoir identifié le procédé en utilisant un modèle d'intégrateur pur retardé, on peut utiliser le tableau suivant pour calculer les actions à appliquer sur un régulateur en fonction de sa structure.

La fonction de transfert du procédé à contrôler est donnée par :

$$Hr(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{s}$$

Le choix du mode de régulation est lié à la réglabilité du système, qui est déterminée par le produit  $K\tau$ . Voici les correspondances entre le produit  $K\tau$  et le mode de régulation :

- Si  $K\tau$  est compris entre 0.05 et 0.1 : régulation P
- Si  $K\tau$  est compris entre 0.1 et 0.2 : régulation PI
- Si  $K\tau$  est compris entre 0.2 et 0.5 : régulation PID
- Si  $K\tau$  est inférieur à 0.05 : régulation tout ou rien
- Si  $K\tau$  est supérieur à 0.5 : régulation multi-boucles, régulation numérique

Le calcul des différentes actions du correcteur peut être effectué en se référant au tableau fourni.

Régulations	P	P.I série	P.I parallèle	P.I.D série	P.I.D parallèle	P.I.D mixte (1)	P.I.D mixte (2)
Gr	$\frac{0.8}{k \cdot \tau}$	$\frac{0.8}{k \cdot \tau}$	$\frac{0.8}{k \cdot \tau}$	$\frac{0.85}{k \cdot \tau}$	$\frac{0.9}{k \cdot \tau}$	$\frac{0.9}{k \cdot \tau}$	$\frac{0.9}{k \cdot \tau}$
Ti	Max	$5 \cdot \tau$	$\frac{k \cdot \tau^2}{0.15}$	$4.8 \cdot \tau$	$\frac{k \cdot \tau^2}{0.15}$	$5.2 \cdot \tau$	$5.2 \cdot \tau$
Td	0	0	0	$0.4 \cdot \tau$	$\frac{0.35}{k}$	$0.4 \cdot \tau$	$\frac{0.35}{k}$

**Tableau I.2 :** Calcul des différents paramètres du correcteur par la méthode d'identification du procédé dans le cas d'un procédé instable

### 5.3. Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols [4] [5]

La méthode de Ziegler-Nichols est une méthode couramment utilisée pour le réglage de régulateurs PID (Proportionnel Intégral Dérivé). Elle a été développée par John G. Ziegler et Nathaniel B. Nichols en 1942 et repose sur des approches semi-empiriques basées sur des essais expérimentaux. Cette méthode est particulièrement utile pour obtenir une première estimation des paramètres du PID, ce qui peut ensuite être affiné si nécessaire. La méthode de Ziegler-Nichols permet de calculer les paramètres du régulateur PID en se basant sur l'observation de la réponse du système et la connaissance de sa structure, sans avoir besoin de déterminer les paramètres du processus.

#### 5.3.1. Cas d'un procédé stable en boucle ouverte [4] [5]

Dans le cas d'un procédé stable en boucle ouverte, cette méthode s'applique aux systèmes dont la réponse indicielle est apériodique et comporte un retard, comme les systèmes thermiques. La fonction de transfert de ces systèmes est généralement exprimée par :

$$G(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{1 + \theta s}$$

Les valeurs recommandées par Ziegler-Nichols pour les paramètres du régulateur PID sont fournies dans le tableau I.3 de référence.

Type de correcteur	P	PI	PID
Kp	$\frac{\theta}{K\tau}$	$0.9 \frac{\theta}{K\tau}$	$0.9 \frac{\theta}{K\tau}$
Ti	-----	$3.3\tau$	$2\tau$
Td	0	0	$0.5\tau$

**Tableau I. 3 :** Calcul des différents paramètres du correcteur par la méthode de Zeigler Nichols dans le cas d'un procédé stable en boucle ouverte.

### 5.3.2. Cas d'un procédé stable en boucle fermée [4] [5]

Dans le cas d'un système en boucle fermée stable, la méthode de Ziegler-Nichols est applicable lorsque le système est instable en boucle ouverte. La méthode implique de délibérément induire des oscillations contrôlées dans la boucle de régulation. En mesurant la période des oscillations ( $T_{osc}$ ) et le gain du régulateur critique ( $K_0$ ) nécessaires pour maintenir ces oscillations, on peut calculer les paramètres du régulateur. Le calcul spécifique dépend de la structure du régulateur utilisé (P, PI, PID) ainsi que du mode de régulation sélectionné.

Les valeurs recommandées par Ziegler-Nichols pour les paramètres du régulateur PID dans ce cas sont fournies dans le tableau (I. 4) de référence.

Type de correcteur	P	PI	PID
$K_p$	$0.5K_0$	$0.45K_0$	$0.6K_0$
$T_i$	-----	$0.83T_{osc}$	$0.5T_{osc}$
$T_d$	0	0	$0.125T_{osc}$

**Tableau I. 4 :** Calcul des différents paramètres du correcteur par la méthode de Zeigler Nichols dans le cas d'un procédé stable en boucle fermée.

## 6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une exploration approfondie des principes fondamentaux des systèmes asservis. Nous avons examiné en détail les concepts essentiels, notamment les différences entre les systèmes en boucle fermée et en boucle ouverte, la fonction des régulateurs, les aspects de la stabilité, de la précision et de la rapidité, qui sont tous des éléments cruciaux dans le domaine de la régulation. De plus, nous avons abordé plusieurs problèmes potentiels pouvant survenir dans ces systèmes. L'importance des correcteurs, tels que les correcteurs proportionnels (P), intégraux (I) et dérivés (D), ainsi que la combinaison de ces trois actions dans les régulateurs PID, a été mise en évidence. Nous avons également présenté différentes méthodes pour ajuster les paramètres de ces régulateurs, comme la méthode de Ziegler-Nichols.

Le prochain chapitre est dédié à l'instrumentation utilisée dans le banc d'essai.

**CHAPITRE 2 :**

**GÉNÉRALITÉS SUR**

**L'INSTRUMENTATION UTILISÉE**

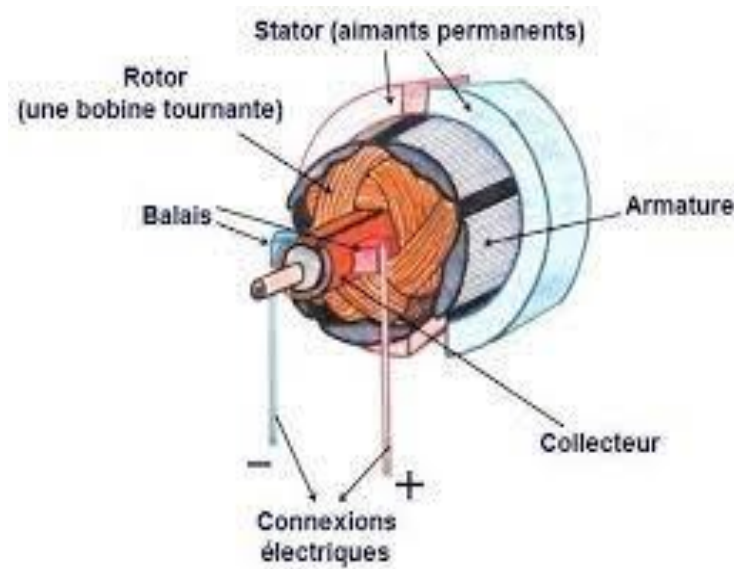
## II.1 Introduction

Ce chapitre sera dédié à l'étude du moteur à courant continu, des capteurs, du codeur optique et des amplificateurs. Nous commencerons par les introduire en fournissant leur définition respective, puis nous examinerons en détail leur mode de fonctionnement.

## II. 2 Notions sur le moteur à courant continu

### II.2.1 Définition d'un moteur à courant continu

Une machine à courant continu (CC) est un convertisseur électromécanique qui présente la particularité d'être réversible. Cela signifie qu'elle peut fonctionner dans deux modes principaux : mode moteur et mode génératrice .[6][7]



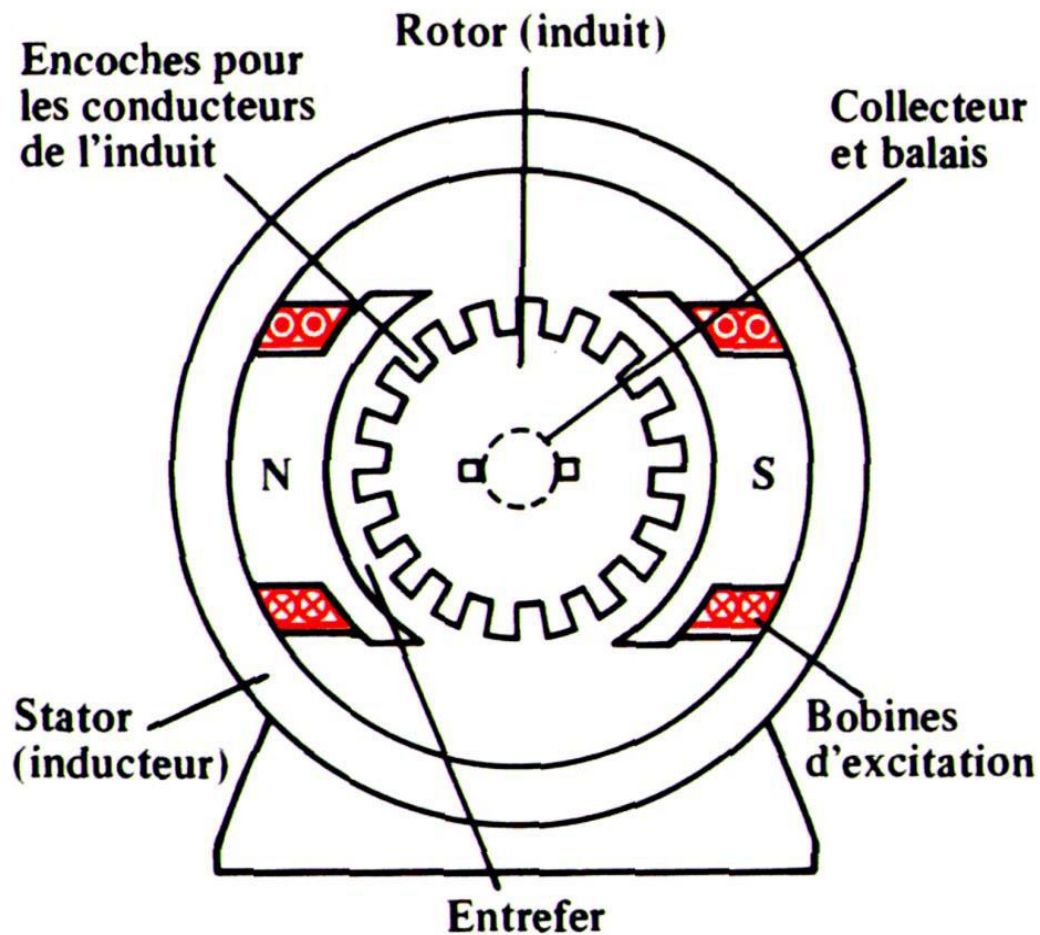
**Figure II.1** : Schéma général d'un moteur à courant continu.

### II.2.2 Constitution du moteur à courant continu

Les machines à courant continu sont constituées comme toutes les machines de deux parties Essentielles :

- Partie fixe appelée stator que l'on appelle aussi inducteur.
- Partie mobile appelée rotor que l'on appelle aussi induit





**Figure II.2 :** Constitution d'un moteur à courant continu.

### II.2.2.1 Rotor

Le rotor d'un moteur CC est généralement constitué d'un cylindre (ou d'une autre forme) qui présente des encoches ou des emplacements où sont logés les conducteurs. Ces conducteurs sont généralement sous la forme de bobines de fil conducteur, et ils sont disposés de manière à être sensiblement parallèles à l'axe de rotation du rotor. [8].



**Figure II.3 :** Rotor.

### II.2.2.2 Stator

Le stator est une composante essentielle du moteur CC, et son rôle principal est de créer un champ magnétique stable et dirigé vers l'axe du rotor (la partie tournante) du moteur. [9].



**Figure II.4 :** Stator.

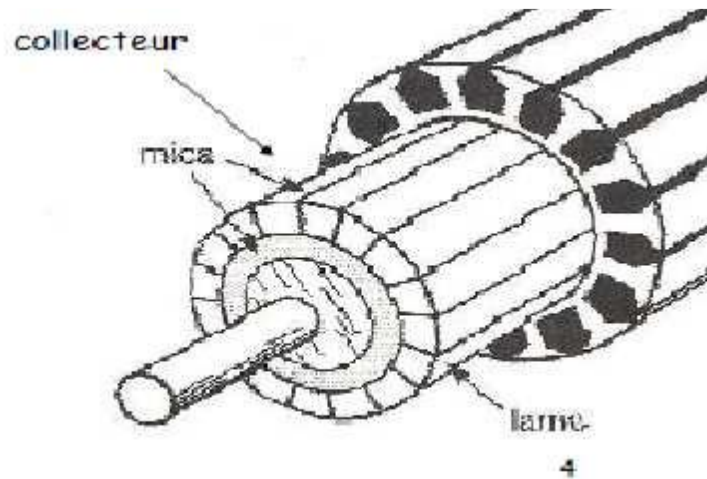
### II.2.2.3 Collecteurs et balais

#### **Balais :**

Les balais sont des morceaux de carbone (ou parfois d'autres matériaux appropriés) qui sont généralement de forme prismatique. Ils sont en contact direct avec le collecteur et assurent la liaison électrique entre les fils d'alimentation de l'induit (le rotor) du moteur. Les balais sont montés de manière à exercer une pression légère et constante contre le collecteur pour établir un contact électrique par frottement. Ils permettent ainsi de transférer le courant électrique du stator (partie fixe) vers le rotor (partie mobile). [9]

#### **Collecteur :**

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre ou de matériaux conducteurs similaires. Ces lames sont généralement montées sur l'arbre du rotor et sont reliées aux extrémités du bobinage de l'induit (les enroulements du rotor). Le collecteur sert de connexion électrique tournante pour le courant qui est transmis au rotor. Il est en contact constant avec les balais. [9]



**Figure II.5 :** Schéma du collecteur.



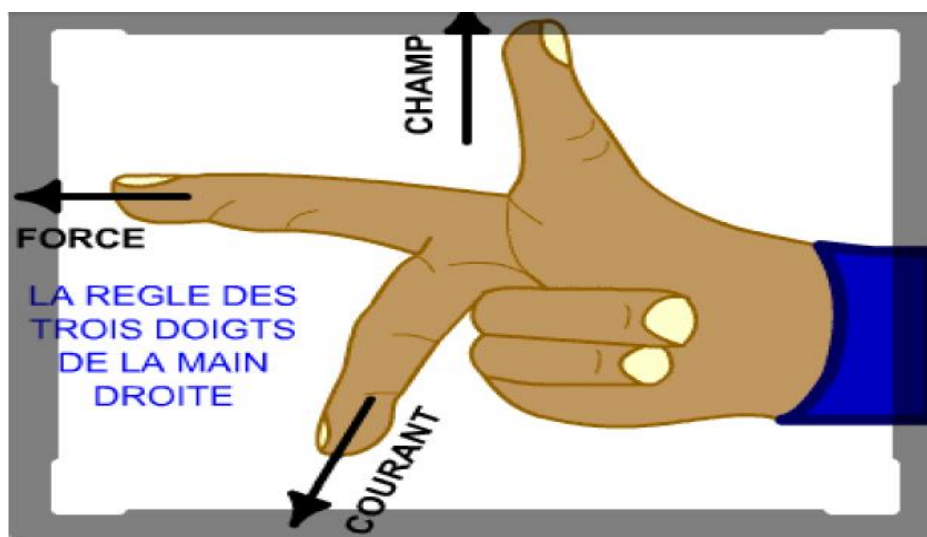
**Figure II.6 :** Les balais.

### II.2.3 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

Lorsque le bobinage de l'inducteur d'un moteur est alimenté par un courant continu, similaire à un moteur à aimant permanent (comme illustré dans la figure), il produit un champ magnétique d'excitation s'étendant du pôle Nord au pôle Sud.

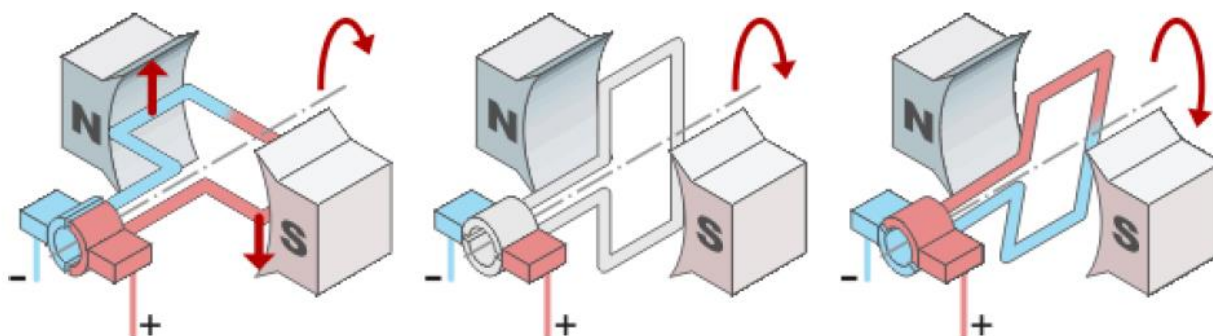
À l'intérieur de ce champ magnétique, une boucle conductrice conçue pour effectuer une rotation est positionnée. Les deux conducteurs formant cette boucle sont connectés à deux parties distinctes du collecteur et sont alimentés en courant continu via deux balais frotteurs.

Conformément à la loi de Laplace, tout conducteur parcouru par un courant perpendiculaire au champ magnétique dans lequel il se trouve est soumis à une force (comme indiqué dans la figure). La direction de cette force est déterminée en appliquant la règle de la main droite, en utilisant les trois doigts.



**Figure II-7 :** Figure représentative de la règle de la main droite

La spire est soumise à deux forces de sens opposé, ce qui provoque sa rotation. Lorsqu'elle a tourné de 90 degrés, les deux demi-collecteurs perdent le contact avec les balais, ce qui laisserait supposer que la spire cesserait de tourner. Cependant, en raison de l'inertie rotationnelle, la spire continue de tourner légèrement, rétablissant ainsi le contact. Ce processus se répète en continu pour assurer la rotation continue du moteur. [2]



**Figure II.8 :** Figure montrant le fonctionnement d'un moteur à courant continu

## II.3 Capteurs

### II.3.1 Définition

Les capteurs jouent en effet un rôle essentiel dans les systèmes automatiques en mesurant diverses grandeurs physiques et en fournissant des informations précieuses pour le contrôle et la régulation. Le capteur EE-sx672A est un exemple spécifique de capteur qui peut être utilisé dans de nombreuses applications. Le capteur EE-sx672A est probablement un capteur de type optoélectronique. Ce type de capteur utilise la lumière pour détecter des changements dans l'environnement ou des mouvements d'objets. [10]

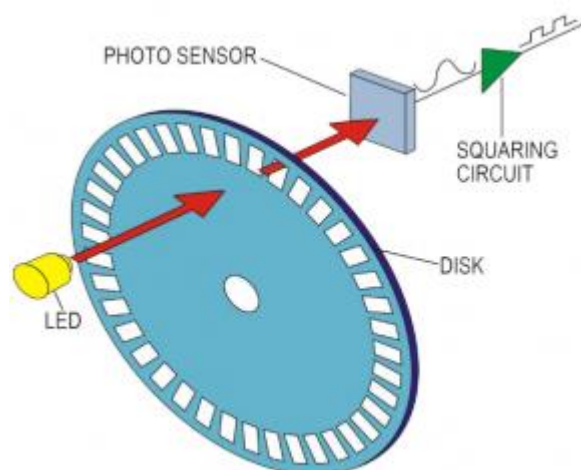


**Figure II.9** : Schéma général de capteur EE-sx672A.

Il existe plusieurs variantes de capteurs. Dans ce chapitre, nous allons aborder un Type en particulier : codeurs optiques.

### II.3.2 Codeur optique

Un codeur optique représente un capteur angulaire conçu pour transmettre des données numériques, permettant ainsi la détermination de la position, de la vitesse et du sens de rotation d'un élément mécanique qui le fait tourner. Il se compose d'un disque rotatif comportant alternativement des parties opaques et transparentes, d'une source de lumière émettrice, souvent des diodes électroluminescentes (LED) ou des diodes laser, ainsi que d'un récepteur de lumière, généralement un phototransistor ou une photodiode. L'axe du capteur provoque la rotation du disque, et ce dernier est traversé par la lumière émise par la diode à travers ses zones transparentes. Cette lumière est ensuite captée par le photorécepteur, qui la convertit en un signal électrique ressemblant à une onde sinusoïdale, lequel est ultérieurement transformé en un signal logique.



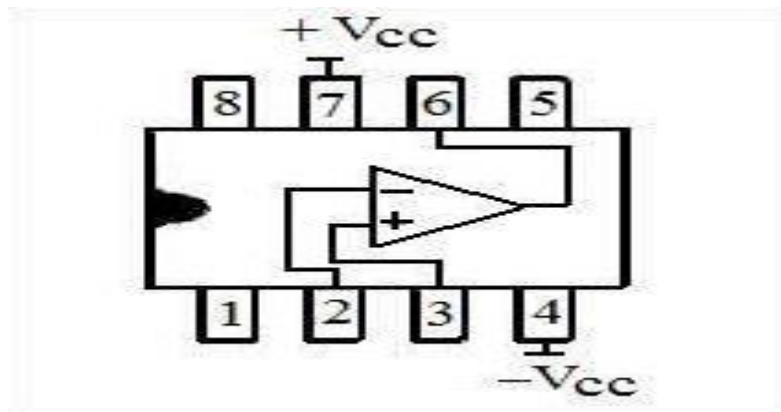
**Figure II.10** : Codeur optique

## II.4 Amplificateurs

Nous allons voir dans cette partie de chapitre le rôle et fonctionnement des amplificateurs en général.

### II.4.1 Amplificateurs opérationnels

Un amplificateur opérationnel est un composant électronique actif constitué d'un arrangement de transistors et de résistances. Il est encapsulé dans un boîtier de circuit intégré généralement doté de huit broches. Il dispose de deux entrées principales : l'entrée inverseuse ( $V_-$ ) et l'entrée non inverseuse ( $V_+$ ). Il offre une unique sortie ( $V_s$ ) dont la tension de sortie est généralement proportionnelle à la différence de potentiel entre les entrées, selon la relation  $V_s = A(V_+ - V_-)$ , où  $A$  représente le gain de l'amplificateur. Un amplificateur opérationnel nécessite deux broches d'alimentation :  $+V_{cc}$  (tension positive) et  $-V_{cc}$  (tension négative). Ces tensions d'alimentation fournissent la puissance nécessaire au fonctionnement de l'ampli-op. Sont capables d'exécuter diverses opérations mathématiques sur les signaux en fonction de leur configuration. Ces opérations comprennent l'addition, la soustraction, l'intégration, la différenciation, l'amplification, etc. Ils sont souvent utilisés pour réaliser des circuits électroniques complexes. [11]



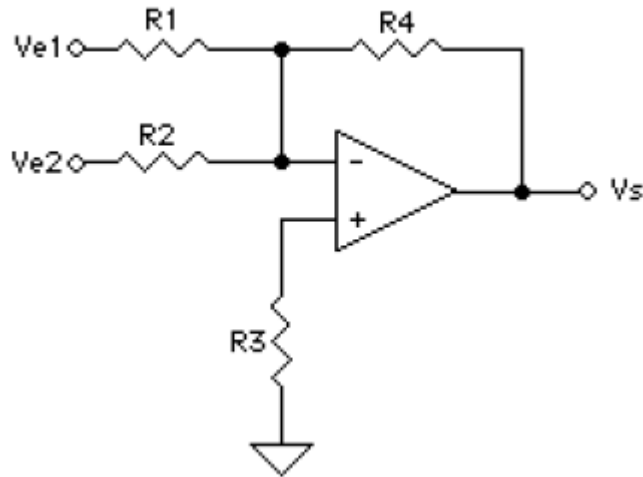
**Figure II.11 :** Circuit intégré d'un amplificateur opérationnel.

#### II.4.1.1 Montage des amplificateurs opérationnels

Voici quelques montages de bases d'un amplificateur opérationnel

##### a. Sommateur

Il permet de sommer deux signaux comme illustre le schéma suivant



**Figure II.12 :** Schéma électrique d'un amplificateur sommateur.

La tension de sortie  $V_s$  donné comme ceci

$$V_s = -R_2/R_1 (V_1 + V_2)$$

### b. comparateur

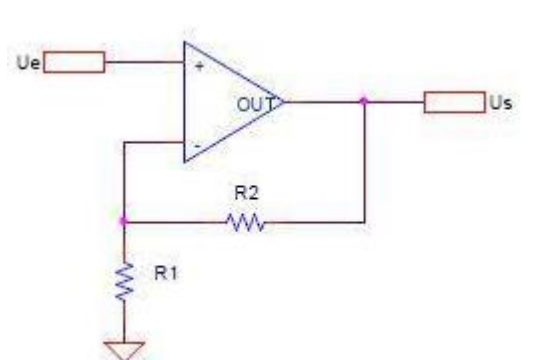
L'amplificateur comparateur est utilisé pour comparer deux signaux d'entrée et ajuster le niveau de sa sortie en conséquence. Dans ce scénario, la différence de tension entre les deux signaux d'entrée est amplifiée par le gain de l'amplificateur opérationnel pour produire une sortie qui représente cette différence de manière amplifiée.

La formule de sa tension de sortie comme suit :

$$V_s = A(v_+ - v_-)$$

### c. Non-inverseur

Permet d'amplifier le signal d'entrée sans l'inverser. Le signal appliqué à l'entrée non-inverseuse est amplifié et présent à la sortie dans le même sens que le signal d'entrée initial, sans être inversé en phase.



**Figure II.13 :** Schéma électrique d'un amplificateur non-inverseur.

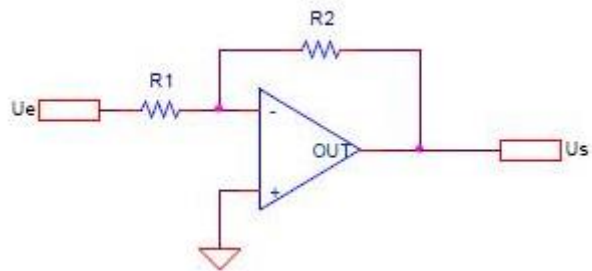


Sa tension de sortie est comme suit :

$$V_s = (1+R_2/R_1) V_e$$

#### d. Inverseur

L'amplificateur opérationnel Inverseur amplifie le signal d'entrée tout en inversant sa phase. En d'autres termes, le signal de sortie est une version amplifiée du signal d'entrée, mais avec une polarité opposée. Ce mode est couramment utilisé pour inverser ou amplifier des signaux à des fins de traitement ou de contrôle.

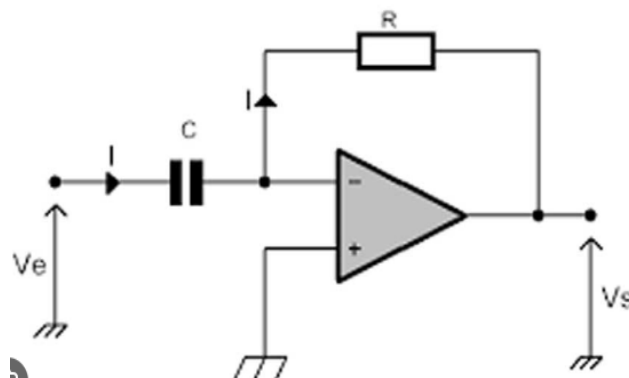


**Figure II.14 :** Schéma électrique d'un amplificateur inverseur.

Sa tension de sortie :  $V_s = (-R_2/R_1) V_e$

#### e. Dérivateur

Le signal de sortie d'un circuit dérivateur (ou d'un opérateur de dérivation) est en effet la dérivée du signal d'entrée par rapport au temps.



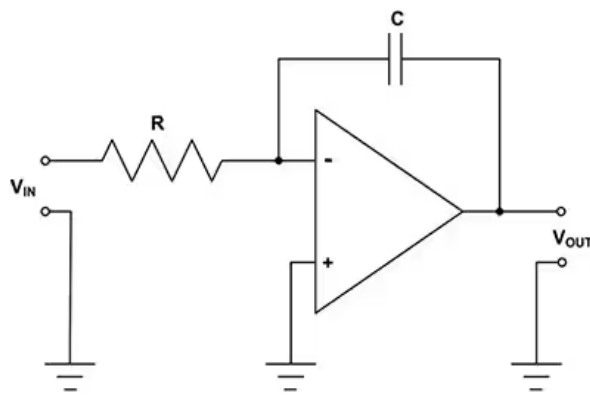
**Figure II.15 :** Schéma électrique d'un amplificateur dérivateur.

Sa tension de sortie :  $V_s = -RC (dV_e(t)/dt)$

#### f. Intégrateur

Le signal de sortie d'un circuit intégrateur est en effet l'intégrale du signal d'entrée par rapport au temps.





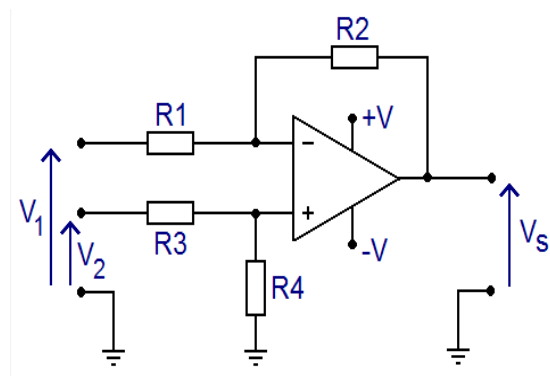
**Figure II.16 :** Schéma électrique d'un amplificateur intégrateur.

Sa tension de sortie :

$$V_s = -1/R_c \int V_e \cdot dt$$

#### g. Soustracteur

Permet de réaliser la soustraction de deux tensions



**Figure II.17 :** Schéma électrique d'un amplificateur soustracteur.

Sa tension de sortie :

$$V_s = (R1 + R2 / R1) (R4 / R3 + R4 * V2) - R2 / R1 * V1$$

#### II.4.1.2 Caractéristiques d'un amplificateur opérationnel

**Tension de décalage :** La tension de décalage (offset voltage) est la tension différentielle requise entre les deux entrées d'un amplificateur opérationnel pour obtenir une tension de sortie nulle. Elle permet de compenser la tension d'erreur générée par un éventuel décalage de tension à l'une des entrées. Une faible tension de décalage est souhaitable pour minimiser les erreurs de mesure. [10].

**Gain :** Le gain d'un amplificateur opérationnel est le coefficient d'amplification qu'il applique au signal d'entrée pour produire le signal de sortie.

**Impédance d'entrée et de sortie :** Dans un amplificateur opérationnel idéal, l'impédance d'entrée est considérée comme infinie, ce qui signifie qu'il ne charge pas la source d'entrée. L'impédance de sortie est idéalement nulle, ce qui signifie qu'il peut fournir un courant de sortie illimité sans perte de tension. Cependant, dans la réalité, ces valeurs ne sont pas parfaites, mais elles sont généralement très élevées pour l'impédance d'entrée et très faibles pour l'impédance de sortie.

**Le Slew-Rate :** Le slew-rate est la vitesse maximale à laquelle la tension de sortie de l'ampli-op peut changer. Il est mesuré en volts par microseconde (V/ $\mu$ s). Un slew-rate élevé permet à l'ampli-op de suivre rapidement les variations du signal d'entrée, ce qui est important pour la reproduction fidèle des signaux à haute fréquence.

### **Conclusion**

Dans ce deuxième chapitre, nous avons examiné en détail le matériel qui constitue la base de notre projet, à savoir les moteurs à courant continu, les capteurs, les codeurs optiques, ainsi que les amplificateurs. Ces éléments sont essentiels pour la création du banc d'essai sur lequel nous effectuerons des tests de régulation de la vitesse du moteur à courant continu, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE 03 :**

**RÉSULTATS OBTENUS DE LA  
RÉGULATION P,PI, PID SUR UN MCC DANS  
UN BANC D'ESSAI**

### III.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'analyser la régulation PID d'un moteur à courant continu, tout en examinant l'impact de chaque composant sur son comportement. Notre objectif est de identifier la combinaison optimale de coefficients permettent d'éliminer l'erreur statique, d'atteindre rapidement la consigne, de minimiser le dépassement, et d'assurer la précision et la stabilité du système même en présence de perturbations.

### III.2 Etapes de l'expérience

Notre travail est basé sur 03 étapes principales :

- Le schéma sur proteus 8 professionnel
- La réalisation de schéma sur une plaque d'essai
- Le test pratique de schéma sur la vitesse du moteur et les résultats

Tout d'abord on va commencer par les schémas sur logiciel proteus 8 professionnel

### III.3 Entrée à logiciel proteus

#### III.3.1 Présentation du logiciel utilisé

PROTEUS est une suite logicielle développée par Labcenter Electronics qui facilite la conception assistée par ordinateur en électronique. Cette suite comprend principalement deux logiciels : ISIS, qui permet, entre autres, la création de schémas et la simulation électrique, et ARES, destiné à la conception de circuits imprimés. Une caractéristique fondamentale de PROTEUS réside dans la capacité d'ISIS à simuler le comportement de microcontrôleurs, tels que les PIC, Atmel, 8051, ARM, HC11, etc., tout en modélisant leur interaction avec les composants qui les entourent. C'est précisément cette fonctionnalité qui a motivé notre choix de PROTEUS pour la conception de notre projet. [12]

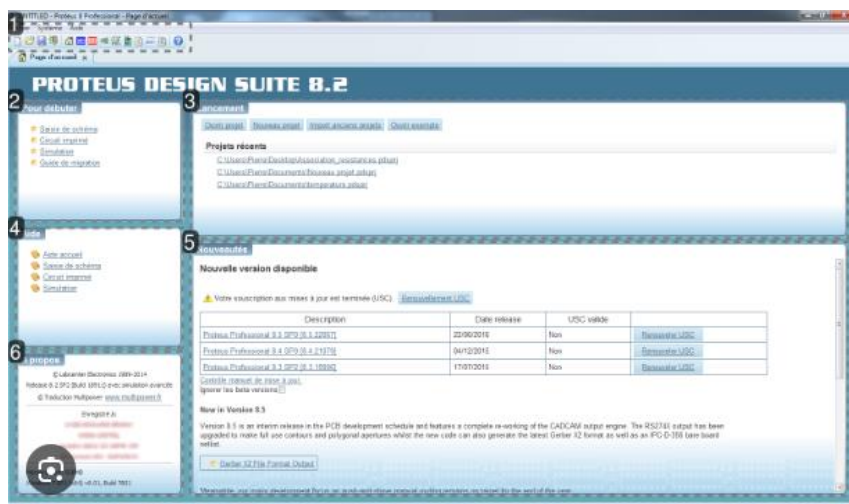


Figure III.1 : Fenêtre principale de travail sur proteus

### **III.4 Explication de schéma utilisée dans ce projet**

Notre schéma d'un contrôleur PID choisi pour tester la commande de vitesse du moteur à courant continu est assez gros, donc nous l'avons divisé par des parties et explique chacun d'eux :

On commence en premier par la partie responsable de convertir la fréquence (vitesse) sortant de moteur à la tension parce que notre banc d'essai expérimental d'un contrôleur PID basé juste sur la lecture de tension.

#### **III.4.1 Convertisseur simple de fréquence en tension**

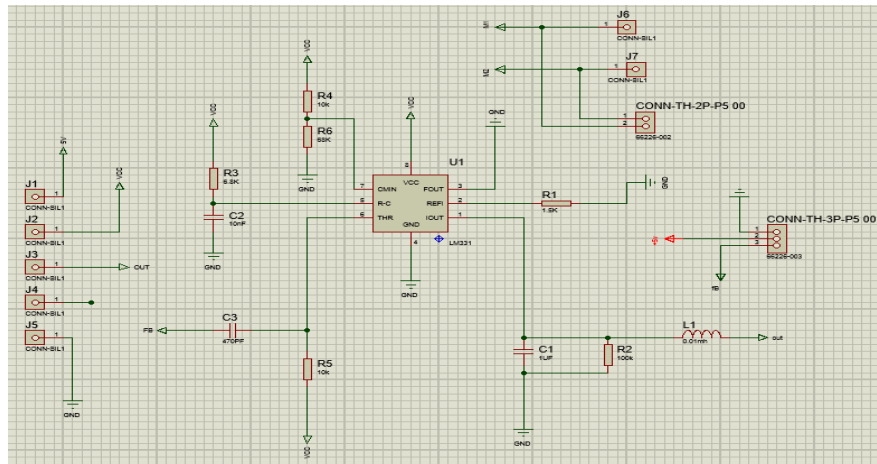
##### **III.4.1.1 Définition**

Le LM331 est un convertisseur fréquence-tension (V/F) qui prend en entrée un signal de fréquence Variable, généralement dans la gamme des hertz (Hz) à kilohertz (kHz), et produit en sortie une tension continue proportionnelle à la fréquence de l'entrée .plus précisément, le LM331 convertit la fréquence en une tension de sortie dont la relation est linéaire, souvent exprimée en volts par hertz (V/Hz).

Ce composant électronique est largement utilisé dans diverses applications, notamment la mesure de fréquence, la génération de tensions de contrôle, la conversion de signaux de capteurs à fréquence variable en une forme plus utilisables, etc.il est apprécié pour sa simplicité d'utilisation et sa précision dans de nombreuses applications.

##### **III.4.1.2 Applications de convertisseur simple de fréquence en tension**

- . Générateur de fréquence variable
- . Convertisseur tension-fréquence
- . Générateur de signaux de synchronisation
- . Capteurs de débit
- . Systèmes de régulation de vitesse
- . Conversion analogique-numérique

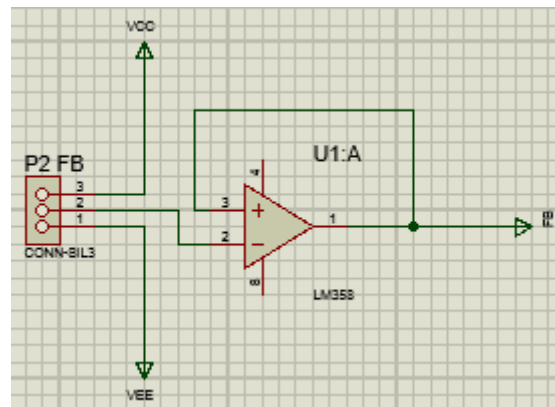


**Figure III.2 :** Convertisseur fréquence-tension sous proteus

Après nous allons expliquer notre banc d'essai expérimental d'un contrôleur PID

#### III.4.2 Schéma de retour (feed-back)

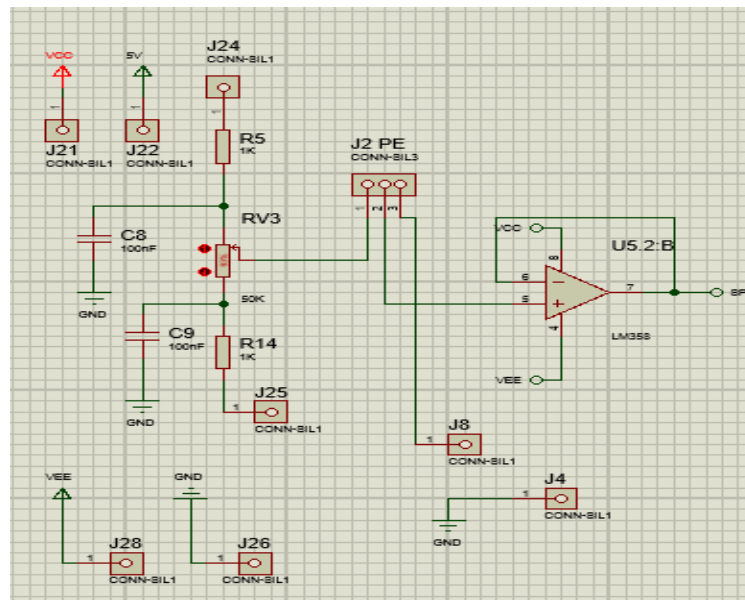
Cette section est chargée de fournir la tension transformée par la LM331N, comme nous l'avons mentionné précédemment ,à l'amplificateur soustracteur.



**Figure III.3 :** Schéma de retour sous proteus

#### III.4.3 Schéma de référence de vitesse (Speed)

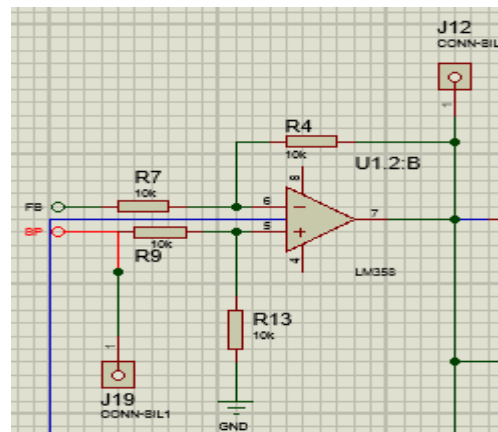
Cette section permet de définir , à l'aide d'un potentiomètre , la valeur souhaitée pour le régime du moteur ,comme illustré dans la figure ci-dessous :



**Figure III.4 : Schéma de la référence de vitesse (speed)**

### III.4.4 Schéma de soustraction

Elle permet de soustraire la valeur mesurée de la consigne ,puis de fournir l'erreur qui est ensuite envoyée au circuit du contrôleur PID.

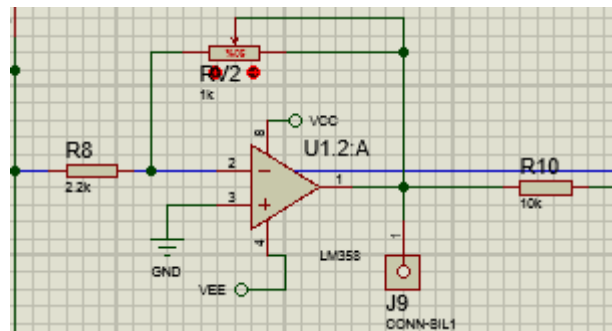


**Figure III.5 : Schéma de la soustraction**

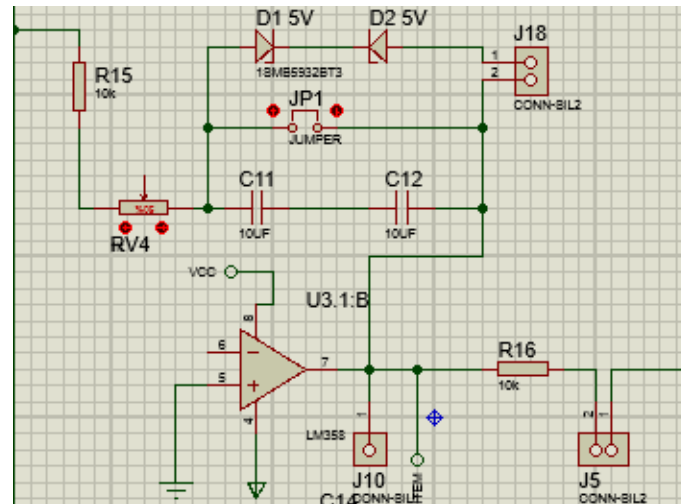
### III.4.5 Schéma de PID analogique

Le PID analogique (Proportionnel, Intégral, Dérivé) est un circuit électronique utilisé pour mettre en œuvre un régulateur PID dans le domaine analogique. Le PID est un algorithme de contrôle couramment utilisé pour réguler un processus en fonction d'une rétroaction, en ajustant de manière proportionnelle, intégrale et dérivée la sortie du système.

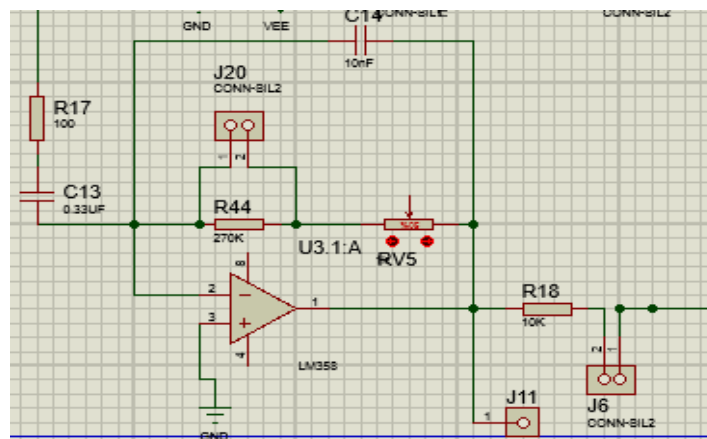
Il est généralement constitué d'un ensemble d'un amplificateur, résistances, potentiomètres.



**Figure III.6 : Schéma du correcteur proportionnel sous proteus**



**Figure III.7 : Schéma de l'intégration**



**Figure III.8 : Schéma de dérivation**

### III.4.6 Schéma de sommateur

il regroupe les composants P,I et D ,puis transmet le signal au driver du moteur



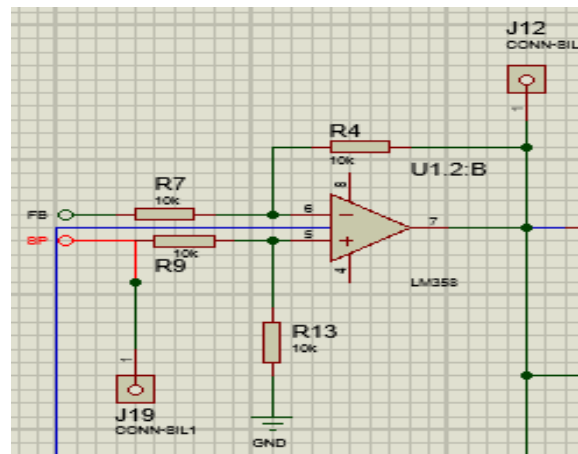


Figure III.9 : Sommateur sous proteus

### III.4.7 Schéma de driver du moteur

Il contient principalement deux transistors, dont la mission est de prendre le signal du PID et de l'adapter à un courant proportionnel pour le moteur, car celui-ci peut nécessiter un courant supérieur à celui fourni par le PID.

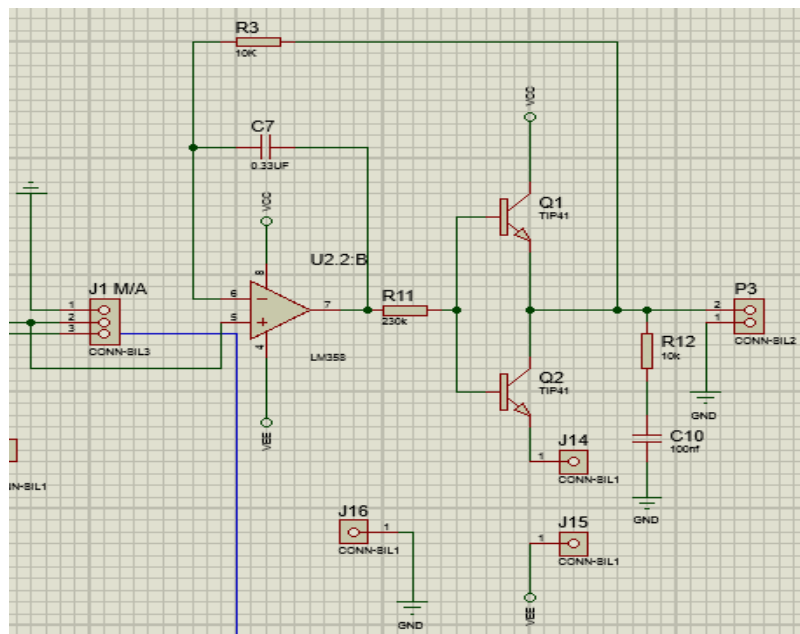
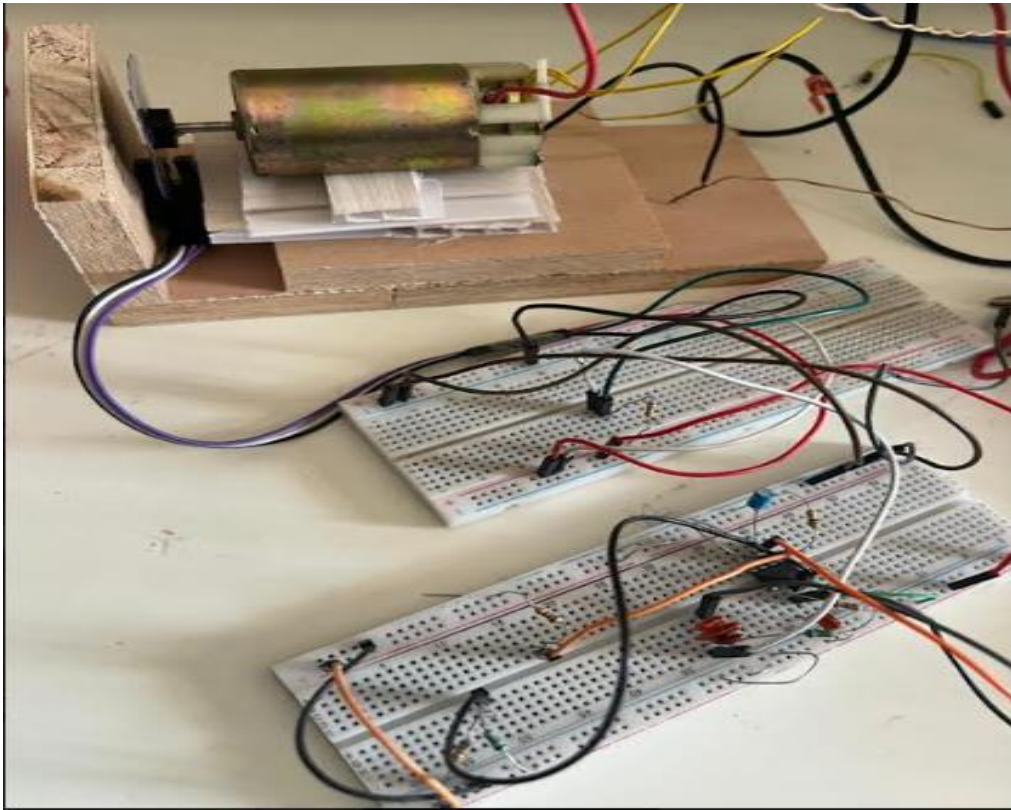


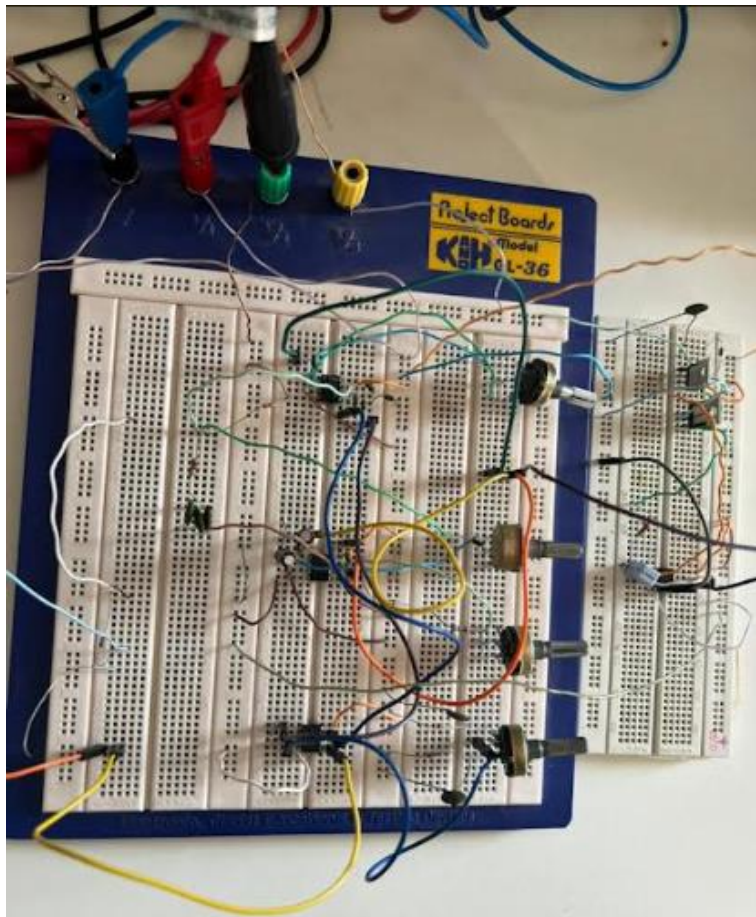
Figure III.10 : Driver du moteur sous proteus

### III.5 Test et résultats

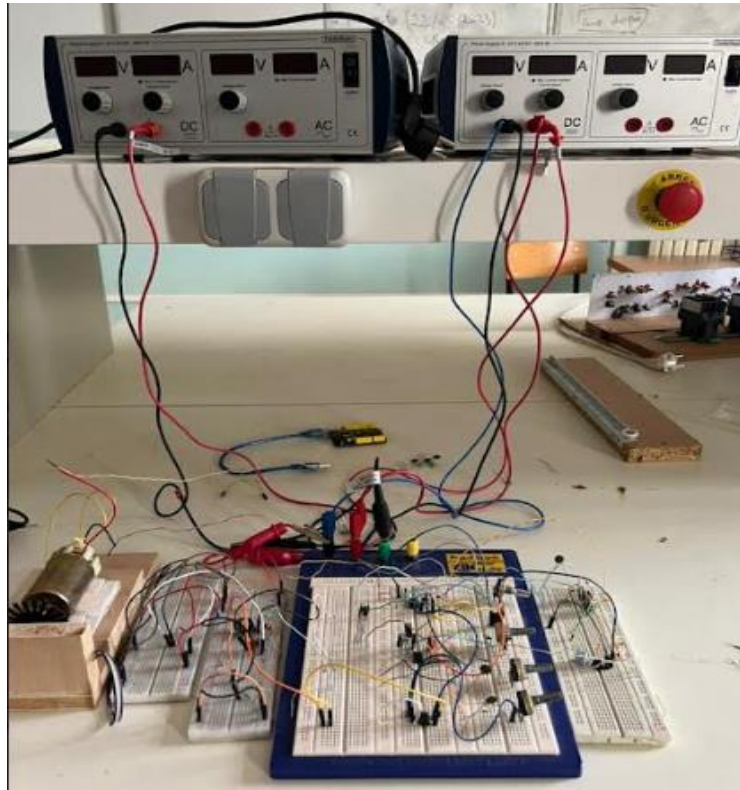
Après avoir examiné les différents composants, nous allons procéder à la création des schémas sur la plaque d'essai. Ensuite, nous passerons à l'installation de ces composants sur notre banc, comme illustré dans les figures suivantes :



**Figure III.11 :** Connexion de capteur avec le convertisseur LM331



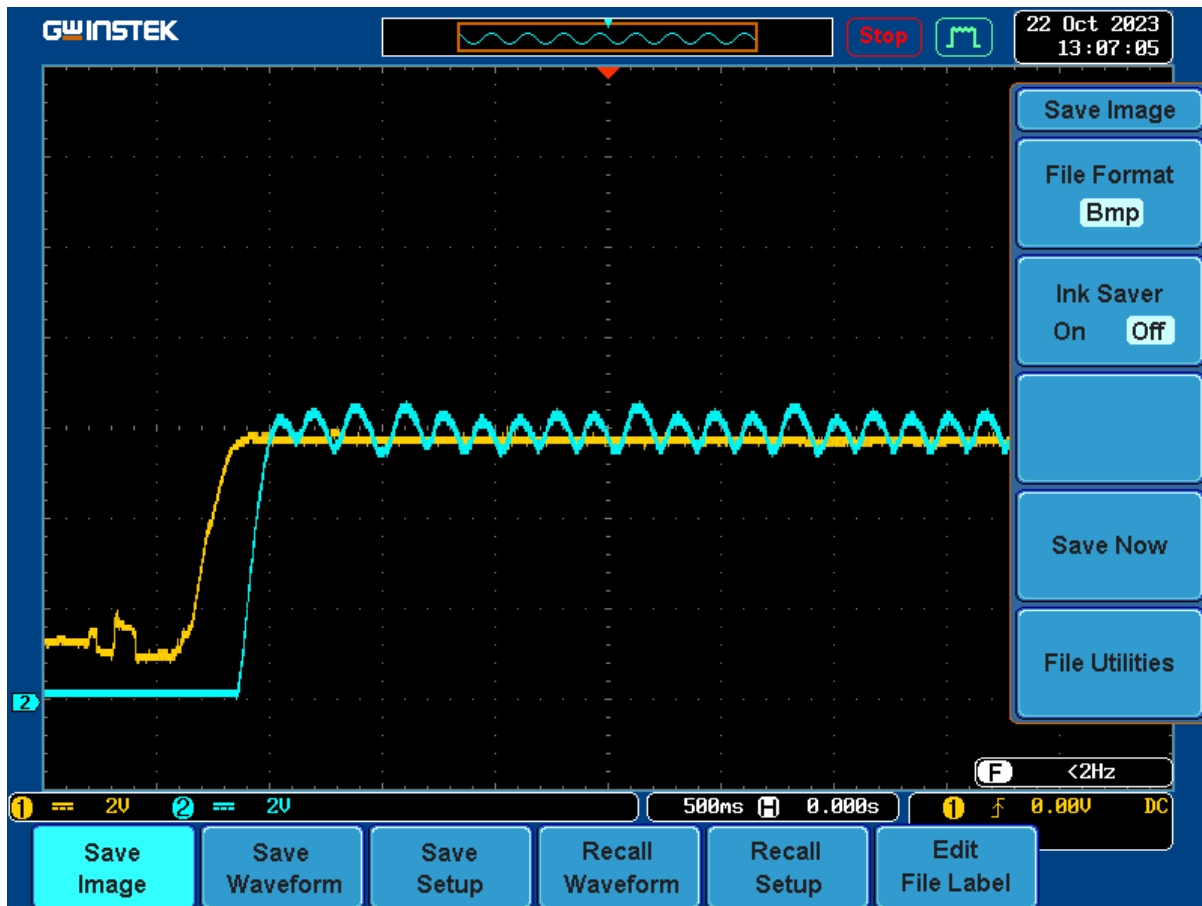
**Figure III.12 :** Connexion de schéma du contrôleur PID



**Figure III.13 :** Connexion de système complet

### **III.5.1 régulation proportionnelle :**

Pour commencer ,nous affecterons de grandes valeurs de coefficient  $K_P$ , tout en gardant les coefficients  $T_i$  ,  $T_d$  nuls . les signaux obtenus sont illustrés par la figure ci-dessous :



**Figure III.14 : Représentation des signaux à une valeur de  $K_p=80\%$**

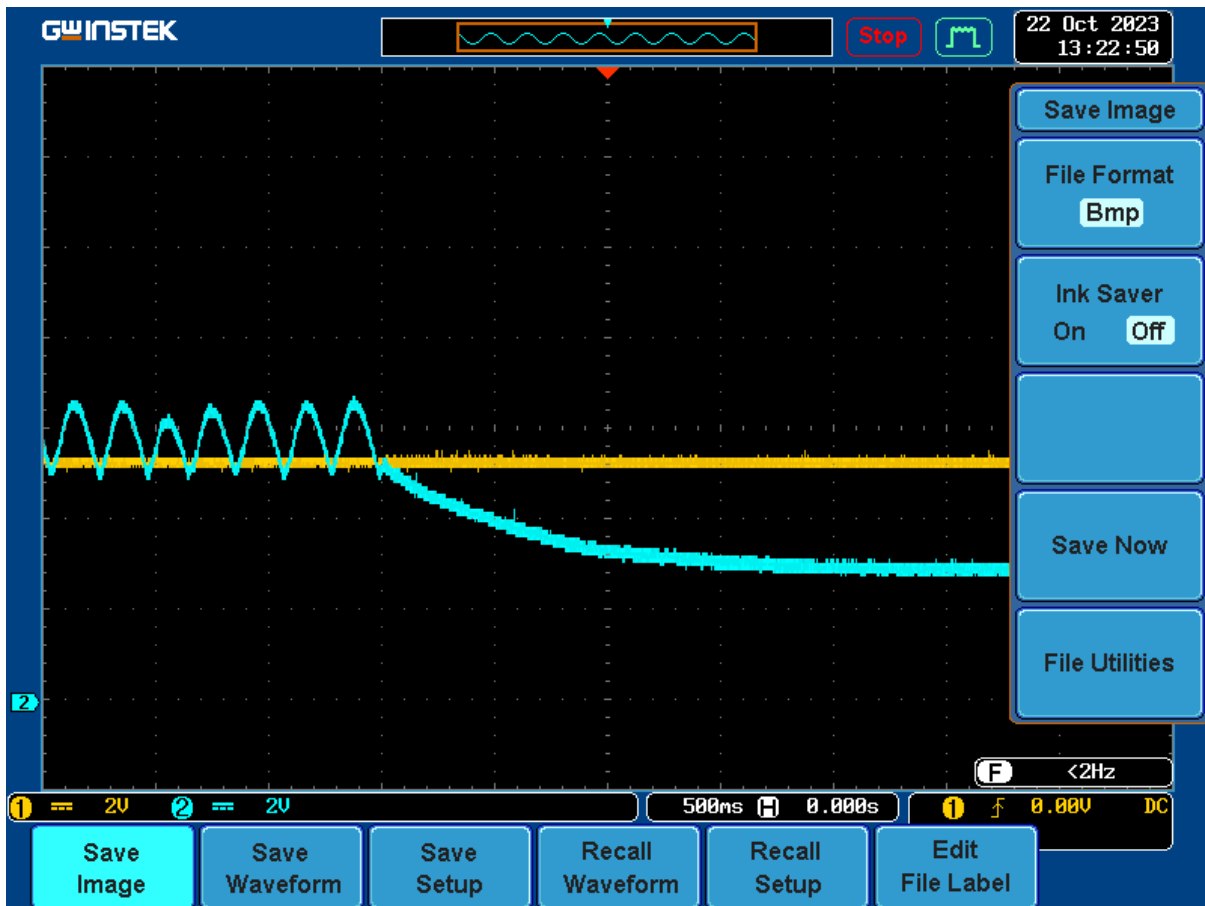
#### **Interprétation des résultats :**

Nous remarquons que le signal de sortie ( en bleu ) c'est-à-dire la vitesse du moteur , offre une réponse rapide à la variation de la charge , mais elle présente un dépassement significatif , nous remarquons aussi l'apparition d'oscillations sur les signal de sortie (bleu)

Ce qui veut dire que notre moteur est bruité

#### **III.5.2 régulation proportionnelle dérivée :**

On garde la même valeur de  $K_p$  , et nous varions le coefficient  $T_d$  , la figure suivante illustre les signaux obtenus :



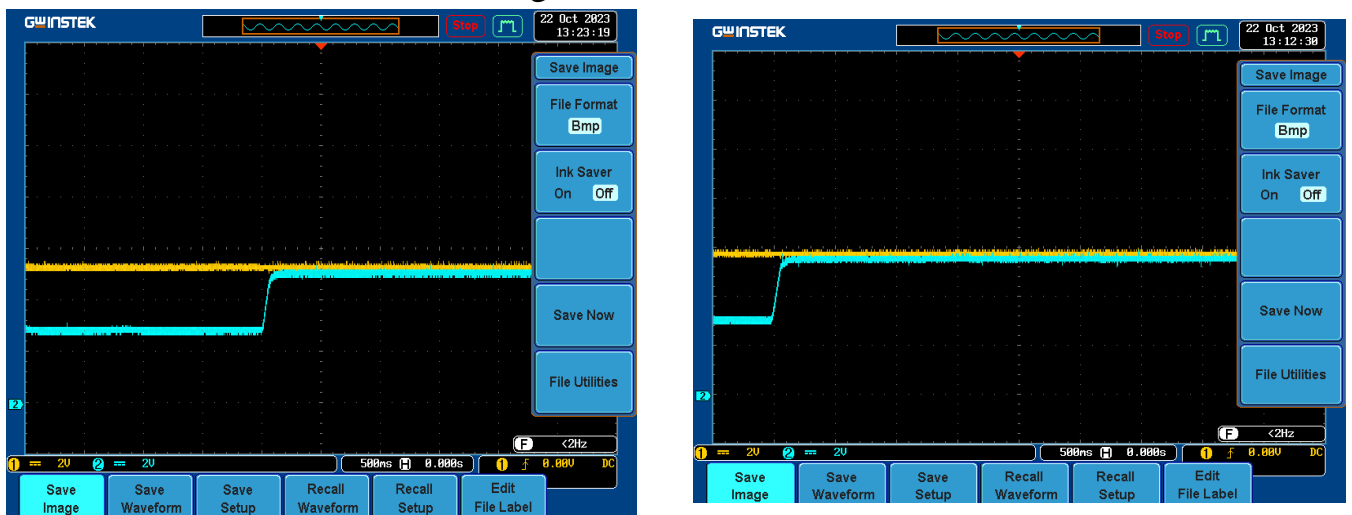
**Figure III.15 : représentation des signaux à des grands valeurs de  $K_P=80\%$ ,  $T_d=70\%$**

Interprétation des résultats :

Nous remarquons que le dépassement est annulé , et ce dernier s'accroît avec l'augmentation de  $T_d$  , et le signal de sortie ( vitesse de moteur ) devenir stable Mais il présente un erreur , c'est la que ça entre en jeu le controleur intégrateur

### III.5.3 régulation proportionnelle intégrale dérivée :

On garde les mêmes valeurs de  $K_p$  ,  $T_d$  , et nous varions le coefficient  $T_i$  , les résultats obtenus illustrés dans la figure suivante :



**Figure III.16 : représentation des signaux à une valeur de  $T_i=60\%$**

**Interprétation des résultats :**

Nous remarquons que le signal de sortie arrive à atteindre la limite de la consigne , et aussi le correcteur arrive à corriger l'écart statique

**III.6 Analyse et discussion des résultats**

Après avoir branché les schémas et alimenter le moteur à courant continu, on a constaté que le contrôleur P offre une réponse rapide à la variation de la charge, mais peut présenter un dépassement significatif. Le contrôleur PI améliore la stabilité en éliminant le dépassement mais peut entraîner un temps de régulation plus long. En fin, le contrôleur PID combine des avantages des deux précédents en réduisant le dépassement et en minimisant le temps de régulation, ce qui en fait une option polyvalente pour la régulation des moteurs à courant continu.

**III.7 conclusion**

En conclusion, ce chapitre nous a permis de mieux appréhender les régulateurs P, PI, PID dans le contexte de la régulation d'un moteur à courant continu. Ces connaissances seront précieuses pour concevoir des systèmes de contrôle efficaces et adaptés aux besoins de diverses applications industrielles.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

En conclusion, la régulation de la vitesse des moteurs électriques à courant continu joue un rôle crucial dans diverses applications industrielles. Par conséquent, le choix de la méthode de régulation appropriée revêt une grande importance pour assurer des performances optimales du système. Il existe plusieurs approches de régulation, mais il n'y a pas de méthode universelle, car l'amélioration des critères de performance tels que la précision, la stabilité et la réactivité peut parfois entraîner des compromis entre ces différents aspects. Il est donc essentiel de sélectionner la stratégie de régulation qui convient le mieux aux besoins spécifiques de chaque application.

Notre objectif principal était de parvenir à un compromis optimal pour les paramètres du correcteur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) afin d'éliminer l'erreur statique et d'assurer une réponse rapide du moteur pour atteindre la consigne de vitesse. Grâce à l'utilisation du banc d'essai, nous avons pu déterminer les valeurs appropriées de  $K_p$ ,  $T_i$  et  $T_d$  qui ont permis d'optimiser les performances du moteur, notamment en termes de précision, de réactivité et de suppression des perturbations.

En outre, cette expérience nous a offert une opportunité enrichissante d'explorer le domaine de la régulation de vitesse, de nous familiariser avec le banc d'essai, et de mettre en pratique Les connaissances théoriques que nous avons acquises au cours de notre formation universitaire.



RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : H.Bouiche et M.Brahimi, « Commande PID d'un moteur à courant continu », mini projet en électronique, département d'électronique, Université Abderrahmane Mira, Béjaia, 2010.
- [2] : T.Hans et P.Guyenot, « régulation et asservissement : cours, applications, expérimentations et prototypage », édition Levoisier, Paris, France, 2014.
- [3] : H.Touchrift et K.Taouint, « Etude d'une régulation P, PI, PID de débit d'un banc didactique de type 38-001 », mémoire de master en électronique industrielle, département d'électronique, UMMTO, Tizi Ouzou, 2017.
- [4] : W.Aous et G.Seddaoui, « Conception et réalisation d'un régulateur PID numérique à base d'un microcontrôleur PIC 16f877a », mémoire de master en électronique industrielle, département d'électronique, UMMTO, Tizi Ouzou, 2014.
- [5] : P.Prouvost, « instrumentation et régulation en 30 fiches », édition Dunod, Paris, France, 2010.
- [6] : H.Hamiche, « Commande des procédés », cours de master en électronique industrielle, département d'électronique, UMMTO, Tizi Ouzou, 2017.
- [7] : P.Mayé, « Moteurs électriques industriels », édition Dunod, Paris, France, 2005.
- [8] : B. BALAYA « Moteur à courant continu » ; cours, édition 2010.
- [9] : F.MILAZ DIT MELAL, F OUIKENE, « étude d'une régulation de la machine à courant continu », Mémoire DEUA en électrotechnique, UMMTO, 2007.
- [10] : A.Pelat, « Pratique de l'amplificateur opérationnel », édition Masson, Paris, France, 1997.
- [11] : [www.ummto.dz/dspace](http://www.ummto.dz/dspace)
- [12] : M.L.SADEG, F.YAHIAATENE « Etude et réalisation de la commande par retour d'état adaptative d'un moteur à courant continu », Mémoire de Master électromécanique, Université DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES, 2015 -2016.
- [13] : K.RAFIL, M.MEZIANI « Etude de la commande et de la régulation d'un moteur à courant continu », Mémoire d'ingénieur d'état en Machines électriques, UMMTO, 2006.
- [14] : [www.store.arduino.cc](http://www.store.arduino.cc) , 05/09/2019 10 :45.

[15] : KERCHOUCHE Lamia, « Régulation analogique P, PI et PID de la vitesse d'un moteur à courant continu d'un banc didactique 33-033. » Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2018/2019.