

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DETIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

Département Electronique

Mémoire de Fin d'Etudes
MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique Industrielle

Thème

***Régulation analogique P, PI et PID de la
vitesse d'un moteur à courant continu
d'un banc didactique 33-033.***

Encadré par:

Mr HAMICHE Hamid

Présenté par:

M^{elle} KERCHOUCHE Lamia

M^{elle} NAIT ALI Sarah

Promotion : 2018/2019

Remerciements

Nous tenons à exprimer, en premier lieu, notre profonde gratitude et reconnaissante à notre promoteur Mr HAMICHE Hamid d'avoir partagé ses connaissances, ses conseils très utiles, pour son orientation et sa disponibilité qui ont contribué à la réalisation de cet humble mémoire.

Nous remercions les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous exprimons sincèrement, nos remerciements, à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire.

Dédicaces

A la lumière de ma vie, Moumen.

Lamia

Je dédie ce travail d'abord à mes deux raisons de vivre ma mère et mon père qui m'ont menés là où j'en suis aujourd'hui.

Puis à ma sœur et moitié Nesrine ainsi qu'à mon petit protégé Yani.

Je le dédie aussi aux personnes qui me sont très chères et qui m'ont toujours soutenus et m'ont accompagnés dans toutes mes épreuves : Karim, Souad, Sarah, Sara et Djamila.

Sarah

Sommaire

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Introduction générale..... | 1 |
|-----------------------------------|----------|

Chapitre I : Etat de l'art sur les différentes méthodes de la régulation PID analogique

| | |
|---|----|
| I.1 Introduction..... | 3 |
| I.2 Généralités sur l'asservissement et la régulation | 3 |
| I.2.1 Définition d'un asservissement | 3 |
| I.2.2 Définition d'une régulation | 4 |
| I.2.2.1 Objectifs de la régulation | 4 |
| I.2.2.2 Principe général de la régulation..... | 5 |
| I.2.2.3 Régulation en boucle ouverte..... | 6 |
| I.2.2.4 Régulation en boucle fermée..... | 6 |
| I.2.2.5 Performances d'un système asservi | 7 |
| I.3 Etude de la régulation analogique..... | 9 |
| I.3.1 Régulation analogique | 9 |
| I.3.2 Correction des systèmes asservis..... | 9 |
| I.3.3 Types de correcteurs (régulation) | 10 |
| I.3.3.1 Correcteur Proportionnel P | 10 |
| I.3.3.2 Correcteur Proportionnel Intégral PI..... | 11 |
| I.3.3.3 Correcteur Proportionnel Dérivé PD..... | 13 |
| I.3.3.4 Correcteur Proportionnel Intégral Dérivé | 14 |
| I.4 Méthodes de réglages des PID | 15 |
| I.4.1 Réglage par approche successive | 15 |
| I.4.1.1 Réglage de l'action proportionnelle | 15 |
| I.4.1.2 Réglage de l'action dérivée..... | 16 |

| | |
|---|----|
| I.4.1.3 Réglage de l'action intégrale..... | 17 |
| I.4.2 Réglage à partir de l'identification du procédé | 18 |
| I.4.2.1 Cas d'un procédé stable | 18 |
| I.4.2.2 Cas d'un procédé instable | 19 |
| I.4.3 Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols..... | 20 |
| I.4.3.1 Cas d'un procédé stable en boucle ouverte | 20 |
| I.4.3.2 Cas d'un procédé stable en boucle fermée..... | 21 |
| I.5 Conclusion | 21 |

Chapitre II : Généralités sur l'instrumentation utilisée

| | |
|--|----|
| II.1 Introduction | 22 |
| II.2 Notions sur les moteurs à courant continu..... | 22 |
| II.2.1 Définition d'un moteur à courant continu | 22 |
| II.2.2 Constitution du moteur à courant continu | 22 |
| II.2.2.1 Stator (Inducteur)..... | 22 |
| II.2.2.2 Rotor (Induit) | 23 |
| II.2.2.3 Les balais (charbons) et les collecteurs | 23 |
| II.3 Modélisation et fonction de transfert d'un moteur à courant continu | 24 |
| II.3.1 Modélisation d'un moteur à courant continu | 24 |
| II.3.2 Fonction de transfert d'un moteur à courant continu | 25 |
| II.4 Principe de fonctionnement | 26 |
| II.5 Types de moteurs | 27 |
| II.5.1 Moteur à aimants permanents | 27 |
| II.5.2 Moteur à excitations | 28 |
| II.6 Capteurs | 29 |
| II.6.1 Définition | 29 |

| | |
|---|----|
| II.6.2 Les tachymètres..... | 30 |
| II.6.2.1 Définition..... | 30 |
| II.6.2.2 Les différents types de tachymètres..... | 30 |
| II.6.3 Codeur Optique | 31 |
| II.6.3.1 Définition et fonctionnement..... | 31 |
| II.6.3.2 Types de codeurs optiques..... | 32 |
| II.7 Amplificateurs | 36 |
| II.7.1 Amplificateurs Opérationnels | 36 |
| II.7.1.1 Montages amplificateur opérationnel | 37 |
| II.7.1.2 Caractéristiques d'un amplificateur opérationnel..... | 41 |
| II.7.2 Amplificateur de puissance | 42 |
| II.7.2.1 Définition..... | 42 |
| II.7.2.2 Classes de fonctionnement d'un amplificateur de puissance..... | 42 |
| II.8 Conclusion | 43 |

Chapitre III : Etude du banc didactique de type 33-033

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction | 44 |
| III.2 Description du banc didactique de type 33-033 | 44 |
| III.3 Etude des différents blocs du banc 33-033..... | 45 |
| III.3.1 Unité mécanique (33-100) | 45 |
| III.3.2 Unité électronique (33-125)..... | 49 |
| III.3.3 L'alimentation (01-100)..... | 51 |
| III.4 Logiciel Feedback- Espial..... | 54 |
| III.5 Conclusion..... | 59 |

Chapitre IV : Régulation analogique P, PI, PID de vitesse du banc didactique 33-033

| | |
|--|-----------|
| IV.1 Introduction | 60 |
| IV.2 Régulation analogique PID du banc didactique 33-033..... | 60 |
| IV.2.1 Régulation Proportionnelle..... | 62 |
| IV.2.2 Régulation Proportionnelle Intégrale..... | 65 |
| IV.2.3 Régulation Proportionnelle intégrale dérivée | 71 |
| IV.3 Régulation analogique du banc didactique 33-033 avec perturbation | 73 |
| IV.4 Conclusion | 77 |
| | |
| Conclusion générale | 79 |

Bibliographie.

Annexes.

Liste des figures

| | |
|---|-----------|
| <i>Figure I. 1 : Procédé asservi : Réponse à un échelon de consigne</i> | <i>3</i> |
| <i>Figure I. 2 : Procédé régulé : Réponse à un échelon de perturbation.....</i> | <i>4</i> |
| <i>Figure I. 3 : Schéma de principe d'une régulation en boucle fermée</i> | <i>5</i> |
| <i>Figure I. 4 : Système en boucle ouverte</i> | <i>6</i> |
| <i>Figure I. 5 : Système en boucle fermée</i> | <i>6</i> |
| <i>Figure I. 6 : Représentation d'un signal précis et d'un signal pas précis</i> | <i>7</i> |
| <i>Figure I. 7 : Représentation d'un signal rapide et d'un signal lent.....</i> | <i>8</i> |
| <i>Figure I. 8 : Représentation d'un signal stable et d'un signal instable.....</i> | <i>9</i> |
| <i>Figure I. 9 : Insertion d'un correcteur dans la boucle de commande</i> | <i>10</i> |
| <i>Figure I. 10 Schéma d'un correcteur proportionnel.....</i> | <i>11</i> |
| <i>Figure I. 11 : Schéma de principe d'un correcteur PI.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Figure I. 12 : Schéma de principe d'un correcteur PD</i> | <i>14</i> |
| <i>Figure I. 13: Schéma d'un PID.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Figure I. 14 : Réglage de l'action proportionnelle.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figure I. 15 : Réglage de l'action dérivée</i> | <i>17</i> |
| <i>Figure I. 16 : Réglage de l'action intégrale.....</i> | <i>18</i> |
| | |
| <i>Figure II. 1 : Schématisation d'un moteur à courant continu</i> | <i>22</i> |
| <i>Figure II. 2 : Constitution du moteur à courant continu</i> | <i>23</i> |
| <i>Figure II. 3 : Schéma équivalent d'un moteur à courant continu.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figure II. 4 : Figure représentative de la règle de la main droite.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Figure II. 5 : Schéma montrant le fonctionnement d'un moteur à courant continu</i> | <i>27</i> |
| <i>Figure II. 6 : Représentation du stator d'un moteur à aimants permanents</i> | <i>27</i> |
| <i>Figure II. 7 : Schéma équivalent à un moteur à excitation séparée</i> | <i>28</i> |
| <i>Figure II. 8 : Schéma équivalent d'un moteur à excitation série.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Figure II. 9 : Schéma équivalent d'un moteur à excitation parallèle</i> | <i>29</i> |
| <i>Figure II. 10 : Schéma montrant le rôle d'un capteur</i> | <i>30</i> |
| <i>Figure II. 11 : Photo d'un codeur optique</i> | <i>32</i> |
| <i>Figure II. 12 : Figure qui montre comment déterminer le sens de rotation du disque.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Figure II. 13 : Représentation des deux sens de rotation du disque du codeur.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Figure II. 14 : Représentation des signaux délivrés par les trois pistes du disque</i> | <i>34</i> |

| | |
|---|----|
| <i>Figure II. 15 : Photo d'un codeur incrémental</i> | 34 |
| <i>Figure II. 16 : Photo d'un codeur absolu</i> | 35 |
| <i>Figure II. 17 : Codeur absolu à code binaire naturel</i> | 36 |
| <i>Figure II. 18 : Codeur absolu à code binaire Gray</i> | 36 |
| <i>Figure II. 19 : Schéma du circuit intégré d'un amplificateur opérationnel</i> | 37 |
| <i>Figure II. 20 : Schéma montrant les entrées et sorties d'un amplificateur opérationnel</i> | 37 |
| <i>Figure II. 21 : Schéma électrique d'un amplificateur non-inverseur</i> | 38 |
| <i>Figure II. 22 : Schéma électrique d'un amplificateur inverseur</i> | 39 |
| <i>Figure II. 23 : Schéma électrique d'un amplificateur sommateur</i> | 40 |
| <i>Figure II. 24 : Schéma électrique d'un amplificateur dérivateur</i> | 40 |
| <i>Figure II. 25 : Schéma électrique d'un intégrateur</i> | 41 |
| <i>Figure II. 26 : Droite de charge d'un transistor</i> | 43 |
| | |
| <i>Figure III. 1 : Photo du banc didactique 33-033</i> | 45 |
| <i>Figure III. 2 : Photo du moteur à courant continu du banc 33-033</i> | 45 |
| <i>Figure III. 3 : Photo illustrant les 2 potentiomètres du banc</i> | 46 |
| <i>Figure III. 4 : Photo du tachymètre</i> | 46 |
| <i>Figure III. 5 : Photo du codeur incrémental</i> | 47 |
| <i>Figure III. 6 : Photo du codeur Gray</i> | 47 |
| <i>Figure III. 7 : Photo du réducteur</i> | 48 |
| <i>Figure III. 8 : Photo du frein du moteur</i> | 48 |
| <i>Figure III. 9 : Photo de l'unité mécanique (33-100)</i> | 49 |
| <i>Figure III. 10 : Photo des différentes parties constituant l'unité électronique</i> | 51 |
| <i>Figure III. 11: Photo de l'alimentation du banc</i> | 52 |
| <i>Figure III. 12 : Photo montrant le câble à fiches Jack</i> | 52 |
| <i>Figure III. 13 : Photo correspondant aux entrées de l'unité mécanique</i> | 53 |
| <i>Figure III. 14 : Câble rubon</i> | 53 |
| <i>Figure III. 15 : Photo du câble USB reliant l'unité électronique à l'ordinateur</i> | 54 |
| <i>Figure III. 16 : Capture d'écran de la fenêtre d'affectations</i> | 55 |
| <i>Figure III. 17 : Capture d'écran des 24 TP sur le logiciel</i> | 54 |
| <i>Figure III. 18 : Capture d'écran de l'interface du logiciel après sélection du TP</i> | 57 |
| <i>Figure III. 19 : Capture d'écran correspondant à la page affichée en cliquant sur les icônes concept</i> | 57 |
| <i>Figure III. 20 : Capture d'écran désignant la fenêtre affichée après le choix du TP</i> | 58 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Figure III. 21 : Capture d'écran du Data Logger</i> | <i>58</i> |
| <i>Figure III. 22 : Capture d'écran du Bar Display.....</i> | <i>59</i> |
| | |
| <i>Figure IV. 1 : Photo illustrative du branchement effectué.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Figure IV. 2 : Représentation des signaux affichés</i> | <i>61</i> |
| <i>Figure IV. 3 : Représentation des signaux à une valeur de $K_p=40\%$</i> | <i>62</i> |
| <i>Figure IV. 4 : Représentation des signaux à une valeur de $K_p=50\%$</i> | <i>63</i> |
| <i>Figure IV. 5 : Représentation des signaux à une valeur de $K_p=75\%$</i> | <i>64</i> |
| <i>Figure IV. 6 : Représentation des signaux à une valeur maximale de gain K_p.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Figure IV. 7 : Représentation des signaux à des valeurs $K_p=50\%$ et $T_i=40\%$.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Figure IV. 8 : Représentation des signaux à des valeurs $K_p=50\%$ et $T_i=50\%$.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figure IV. 9 : Représentation des signaux à des valeurs $K_p=50\%$ et $T_i=75\%$.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Figure IV. 10 : Représentation des signaux à des valeurs $K_p=50\%$ et $T_i=80\%$.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Figure IV. 11 : Représentation des signaux à des valeurs $K_p<50\%$ et $T_i=60\%$.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Figure IV. 12 : Représentation des signaux à des valeurs $K_p=60\%$ et $T_i=80\%$.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Figure IV. 13 : Représentation des signaux pour les valeurs $K_p=60\%$, $T_i= 80\%$ et $T_d=60\%$</i> | <i>72</i> |
| <i>Figure IV. 14 : Représentation des signaux pour les valeurs $K_p=50\%$, $T_i= 80\%$ et $T_d=50\%$</i> | <i>73</i> |
| <i>Figure IV. 15 : Représentation des signaux avec un $K_p=50\%$ entrée échelon</i> | <i>74</i> |
| <i>Figure IV. 16 : Représentation des signaux pour les valeurs $K_p=50\%$, $T_i=80\%$ entrée échelon</i> | <i>75</i> |
| <i>Figure IV. 17 : Représentation des signaux pour les valeurs $K_p=50\%$, $T_i=80\%$, $frein= 4div$...</i> | <i>76</i> |
| <i>Figure IV. 18 : Représentation des signaux pour les valeurs $K_p=50\%$, $T_i=80\%$, $frein= 5div$...</i> | <i>77</i> |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----------|
| <i>Tableau I.1 : Calcul des différents paramètres du correcteur par la méthode d'identification du procédé dans le cas d'un procédé stable</i> | <i>19</i> |
| <i>Tableau I. 2 : Calcul des différents paramètres du correcteur par la méthode d'identification du procédé dans le cas d'un procédé instable</i> | <i>20</i> |
| <i>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.....</i> | <i>21</i> |
| <i>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.....</i> | <i>21</i> |

Introduction générale

Introduction générale

La technologie a permis le développement des sciences, parmi elles on compte l'automatique. Cette dernière consiste à traiter la modélisation, la commande, l'asservissement et la régulation d'un système afin d'automatiser les différentes tâches de fonctionnement des machines et des chaînes industrielles. On peut citer comme exemples une chaîne de fabrication dans une usine, un alternateur dans une centrale de production d'électricité, un avion ou un navire (dont la conduite est facilitée par les « pilotes automatiques ») [1] [2].

L'automatique vise à minimiser l'intervention humaine pour éviter toutes sortes de tâches fastidieuses, répétitives ou dangereuses pour l'homme. On peut alors parler de régulation qui occupe une grande partie de l'automatisation d'un procédé industriel. Ceci rend cette dernière indispensable en industrie puisqu'elle permet de commander le procédé (système) afin d'améliorer ses performances [1].

Pour commander un système industriel, on utilise la commande PID (Proportionnelle-Intégrale-Dérivée) qui est la méthode de régulation la plus répandue en industrie. Grâce aux trois actions qui composent cette commande, qui peuvent être utilisées soit combinées soit indépendamment les unes des autres, on obtient un système qui satisfait au mieux le cahier des charges (stabilité, rapidité, précision ...etc.) [3].

L'objectif de notre travail est d'étudier l'impact de la régulation PID à savoir la régulation proportionnelle, la régulation proportionnelle intégrale ainsi que la régulation proportionnelle intégrale et dérivée sur la vitesse d'un moteur à courant continu d'un banc didactique de type 33-033. Le but de ce dernier est de réguler la vitesse du moteur pour atteindre la valeur de consigne appliquée à l'entrée avec un temps de réponse plus petit et trouver le meilleur compromis entre les différentes actions de la commande pour un meilleur comportement du moteur du banc.

Introduction générale

Notre mémoire de fin d'études se compose de quatre chapitres :

Le premier chapitre comporte des généralités sur la régulation et l'asservissement où nous allons donner les notions de base ainsi que l'objectif de chacun. On va aussi présenter le correcteur PID, ses avantages et ses inconvénients.

Le deuxième chapitre sera consacré au moteur à courant continu, tachymètre, codeurs optique et amplificateurs qui sont les éléments contenus dans le banc d'essai 33-033. Dans cette partie, nous allons définir chacun de ses composants et leur fonctionnement en général.

Le troisième chapitre sera dédié entièrement au banc didactique 33-033. Afin de nous familiariser avec ce dernier, nous allons nous intéresser à ses différents blocs, aux caractéristiques de ses différents composants ainsi qu'à son interface.

Le dernier chapitre sera la synthèse de notre travail, il comportera les différents tests de régulation PID effectués ainsi que les résultats obtenus.

Enfin, nous terminerons par une conclusion.

Chapitre I

*Etat de l'art sur les
différentes méthodes de la
régulation analogique*

I.1 Introduction

En Automatique, on désigne par système un procédé de nature quelconque qui évolue sous l'action de son entrée u (en anglais input) et dont l'évolution est caractérisée par sa sortie y (output en anglais). Dans ce chapitre seront présentées les généralités sur les systèmes asservis, les méthodes de correction P, PI et PID.

I.2 Généralités sur l'asservissement et la régulation

Dans cette partie du chapitre, nous rappellerons les notions de base de la régulation et l'asservissement

I.2.1 Définition d'un asservissement

C'est un processus qui a pour objectif de suivre au plus près les variations de la consigne $y(t)$ qui change. Il consiste à mesurer en permanence l'écart entre la valeur lue (appelée aussi grandeur de sortie $y(t)$ représentée en bleu sur la figure (I. 1) et la consigne en apportant des corrections pour atteindre cette dernière quelque soient les perturbations externes. La figure ci-dessous illustre la réponse d'un procédé asservi à un échelon de consigne [1] [2].

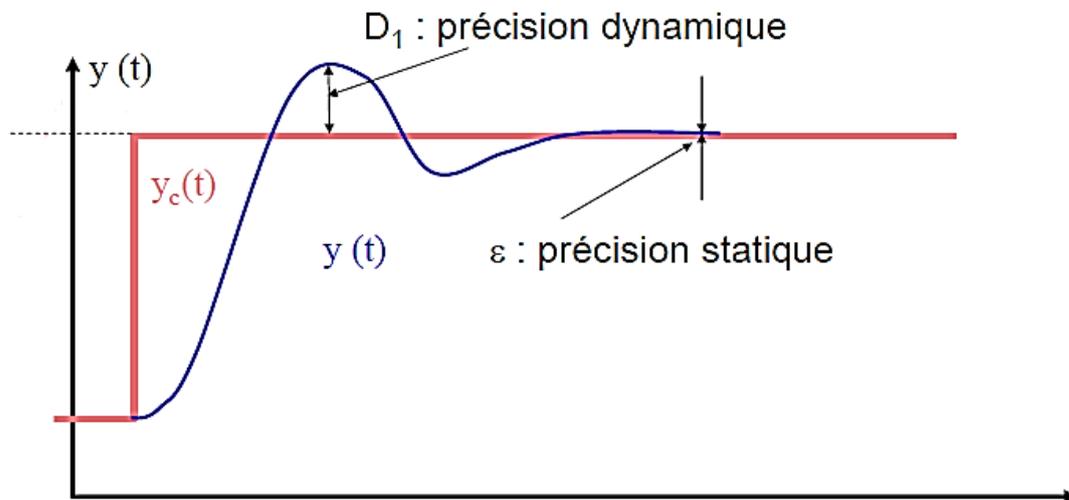


Figure I. 1 : Procédé asservi : Réponse à un échelon de consigne

Exemples :

- Asservissement de la position angulaire d'une antenne satellite.
- Reproduction des gestes d'un chirurgien par un robot distant.

I.2.2 Définition d'une régulation

C'est une discipline technique qui se rattache à l'automatique visant à contrôler une grandeur physique, sans intervention humaine, de telle sorte que celle-ci soit maintenue ou reste proche de la valeur donnée (désirée) appelée consigne (constante) et ce quelles que soient les perturbations externes. La figure ci-dessous illustre la réponse d'un procédé régulé à un échelon de perturbation $p(t)$ [3].

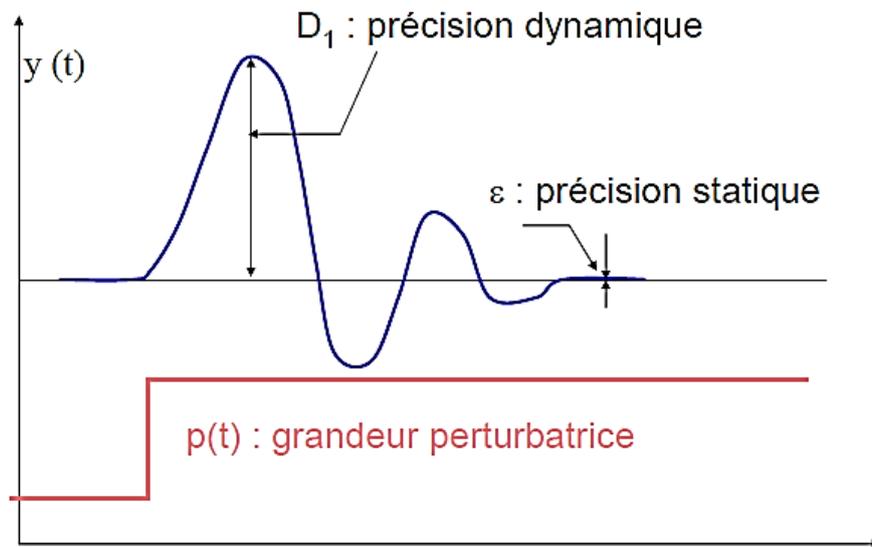


Figure I. 2 : Procédé régulé : Réponse à un échelon de perturbation

Exemples :

- Régulation de la vitesse du chariot de golf.
- Régulation de la température d'un immeuble.

I.2.2.1 Objectifs de la régulation

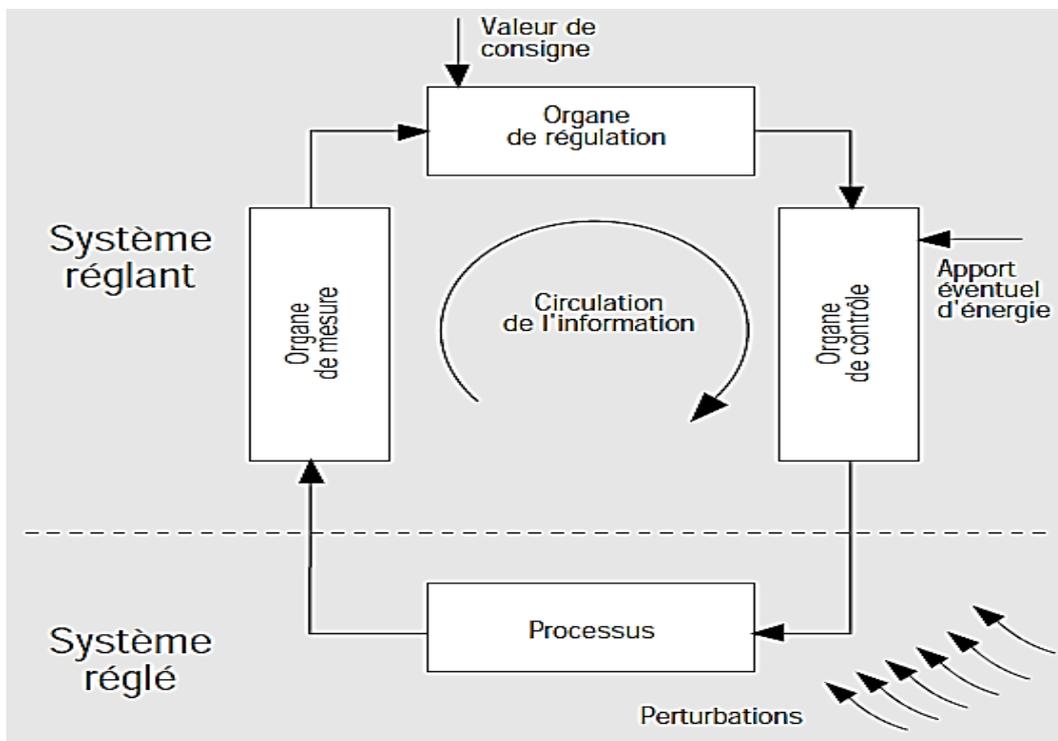
Réguler une grandeur, c'est obtenir d'elle un comportement donné, dans un environnement susceptible de présenter des variations.

Les systèmes automatiques assurent en fait 2 types de fonctions :

- Maintenir la grandeur commandée, ou grandeur réglée, à une valeur de référence malgré les variations de conditions extérieures ; on parle de la régulation [3].
- Répondre à des changements d'objectif, ou à un objectif variable tel que la poursuite de cible, on parle d'une fonction d'asservissement [3].

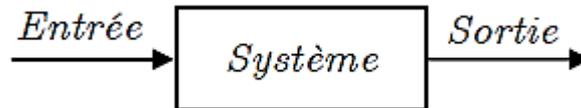
I.2.2.2 Principe général de la régulation

Dans la plupart des appareils dans des installations industrielles et domestiques, il est nécessaire de maintenir des grandeurs physiques à des valeurs déterminées, en dépit des variations externes ou internes influant sur ces grandeurs. Par exemple, le niveau d'eau dans un réservoir, la température d'une étuve, la vitesse et la position des moteurs, étant par nature variables, doivent donc être réglés par des actions convenables sur le processus considéré. Si les perturbations influant sur la grandeur à contrôler sont lentes ou négligeables, un simple réglage dit en boucle ouverte, permet d'obtenir et de maintenir la valeur demandée (par exemple : action sur un robinet d'eau) et dans la majorité des cas, cependant, ce type de réglage n'est pas suffisant. Il faut alors comparer, en permanence, la valeur mesurée de la grandeur réglée à celle que l'on souhaite obtenir et agir en conséquence sur la grandeur d'action, dite grandeur réglante. On a, dans ce cas, constitué une boucle de régulation et plus généralement une boucle d'asservissement. Cette boucle nécessite la mise en œuvre d'un ensemble de moyens de mesure, de traitement de signal ou de calcul, d'amplification et de commande d'actionneur, constituant une chaîne de régulation ou d'asservissement. La consigne est maintenue constante et il se produit sur le procédé une modification d'une des entrées perturbatrices. L'aspect régulation est considéré comme le plus important dans le milieu industriel, car les valeurs des consignes sont souvent fixes. Néanmoins, pour tester les performances et la qualité d'une boucle de régulation, on s'intéresse à l'aspect asservissement [1] [4].

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

I.2.2.3 Régulation en boucle ouverte

Un système en boucle ouverte est un système qui ne comporte pas de chaîne de retour (feedback) entre la sortie et l'entrée. La commande de ce type de régulation est élaborée sans connaître les grandeurs de sortie. Le schéma bloc de système en boucle ouverte est donné par la figure ci-dessous [1].

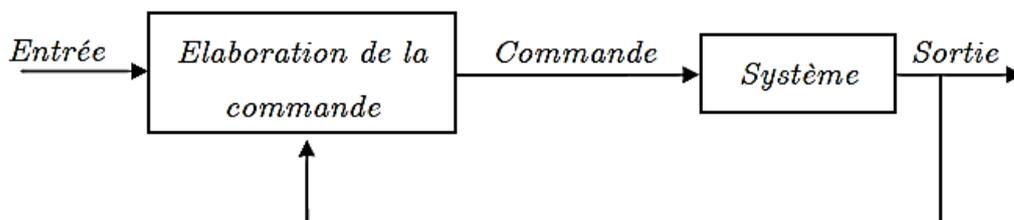
**Figure I. 4 :** Système en boucle ouverte

Une régulation en boucle ouverte a pour avantages d'anticiper les phénomènes et d'obtenir des temps de réponse très courts, d'éliminer les risques de pompage mais aussi elle est la seule solution envisageable lorsqu'il n'y a pas de contrôle final possible [3] [4].

Parmi ses inconvénients, on cite la nécessité de connaître la loi régissant le fonctionnement du processus. Aussi, l'absence de moyens de contrôler et de compenser d'éventuels erreurs, dérives et accidents qui peuvent se produire à l'intérieur de la boucle [3] [4].

I.2.2.4 Régulation en boucle fermée

La boucle fermée est un système qui comporte une chaîne de retour (feedback) entre la sortie et l'entrée. Elle est capable de stabiliser un système instable en boucle ouverte. Le schéma bloc d'un système en boucle fermée est donné par la figure ci-dessous [1] [4].

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

La boucle fermée permet la compensation d'une bonne partie des facteurs perturbateurs par la contre-réaction (feedback). Autre avantage de la boucle fermée, la connaissance avec précision des lois et du comportement des différents composants de la boucle n'est pas nécessaire [1] [3].

Par contre, ce type de régulation nécessite la précision des valeurs mesurées et de la consigne. Plus important encore, le mauvais choix de certains composants peut générer le phénomène du pompage. S'ajoute à cela, la non anticipation de la régulation en boucle fermée ce qui peut se montrer parfois gênant [1] [3] [4].

I.2.2.5 Performances d'un système asservi

Un bon système asservi doit disposer de 3 caractéristiques essentielles :

a- La précision

C'est la capacité du système à se rapprocher le plus possible de la valeur de la consigne. Autrement dit la sortie doit suivre l'entrée en toute circonstance [2] [5].

La figure I. 6 représente deux signaux tel que :

Le signal $s(t)$ est précis

Le signal $s'(t)$ n'est pas précis

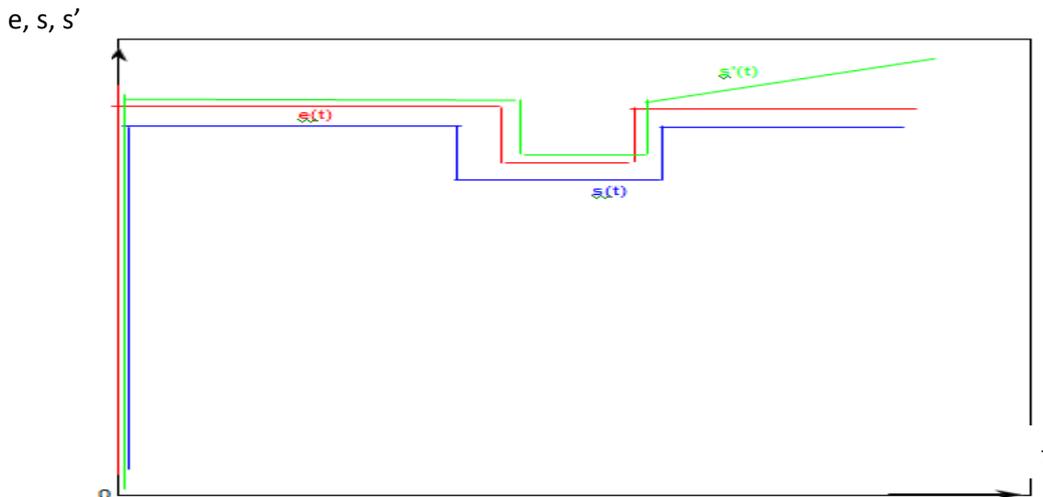


Figure I. 6 : Représentation d'un signal précis et d'un signal non précis

b- La rapidité

La rapidité traduit la durée du régime transitoire ou la durée pour atteindre le régime stable. On appelle temps de réponse, le temps mis par la sortie ($y(t)$ sur la figure (I. 7)) du système pour atteindre 95% de la valeur finale V_f [5].

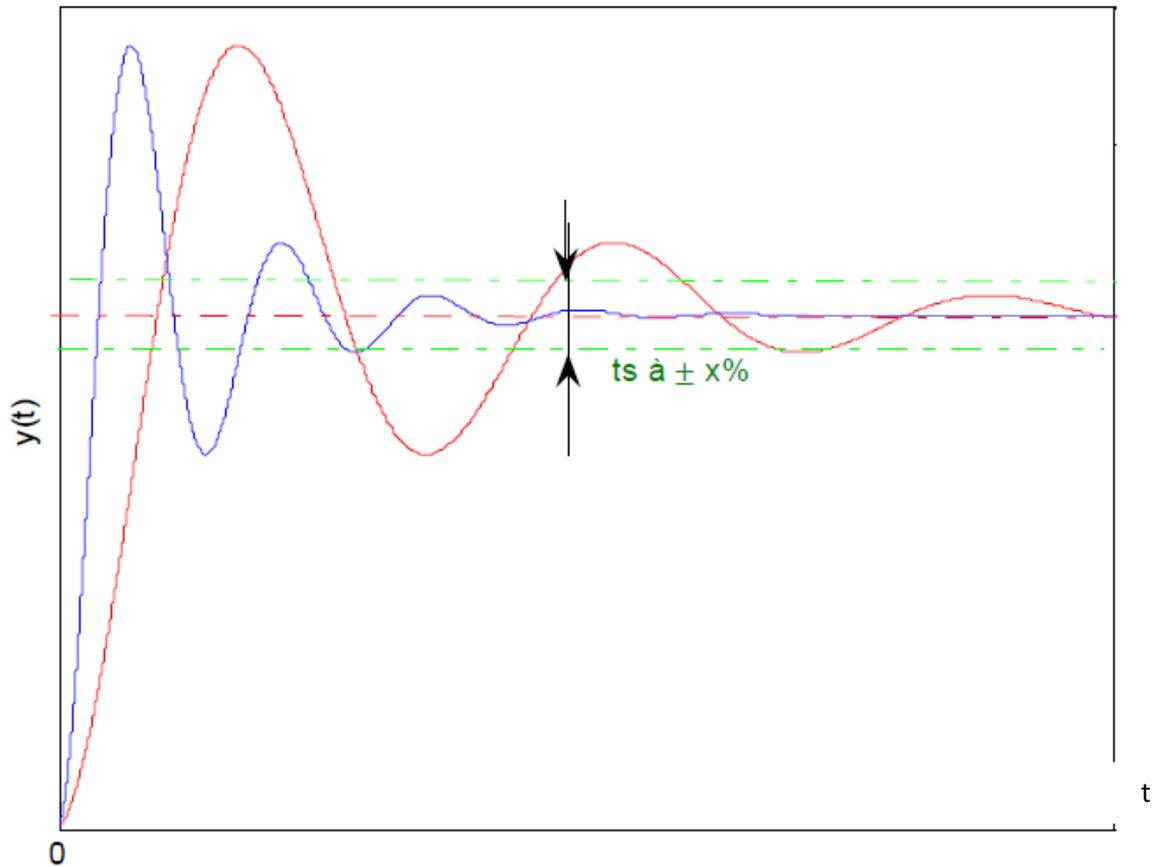


Figure I. 7 : Représentation d'un signal rapide et d'un signal lent

Le signal $s(t)$ (de couleur bleue) est plus rapide que le signal $s'(t)$ (représenté en rouge).

c- La stabilité

Pour une consigne constante, la sortie doit tendre vers une sortie constante [2].

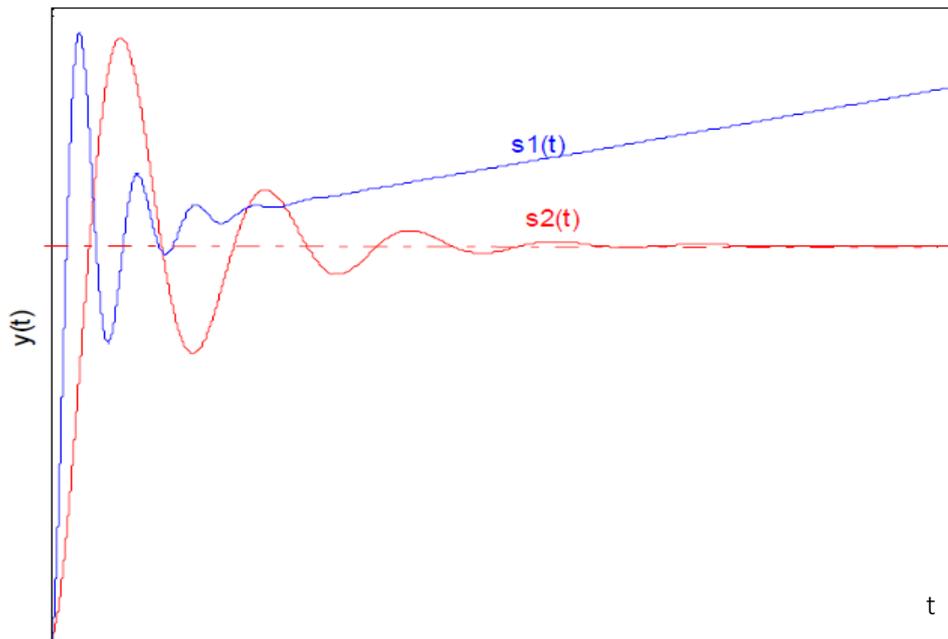


Figure I. 8 : Représentation d'un signal stable et d'un signal instable

La figure ci-dessus représente deux signaux dont le signal $s_1(t)$ est stable et le signal $s_2(t)$ est instable.

I.3 Etude de la régulation analogique

Nous allons commencer par la définition de la régulation analogique puis présenter les méthodes de corrections.

I.3.1 Régulation analogique

C'est un processus qui fonctionne à partir d'un signal continu spécifique sous forme de tension nécessaire à la réalisation des régulateurs analogiques. Les valeurs des grandeurs physiques constituant les signaux analogiques doivent être représentées par des nombres [3].

I.3.2 Correction des systèmes asservis

Un système asservi peut parfois présenter des défauts (précision insuffisante, instabilité, un temps de réaction trop long). Afin de remédier à ça, on doit intégrer dans la boucle de

commande un correcteur qui permettra d'améliorer ces paramètres sans le faire au détriment des autres.

Un correcteur est l'élément d'une régulation ou d'un asservissement qui permet d'atteindre la consigne [5].

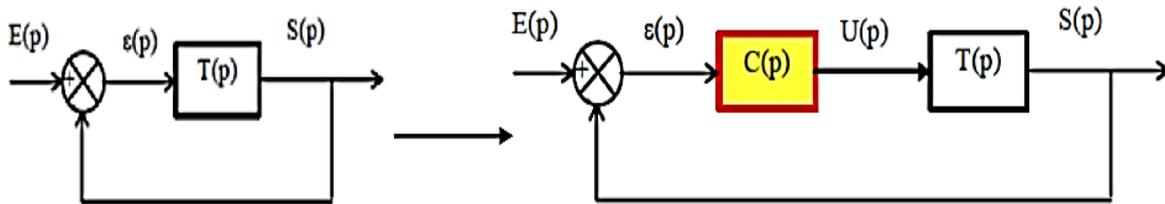


Figure I. 9 : Insertion d'un correcteur dans la boucle de commande

L'insertion d'un correcteur nécessite le passage par plusieurs étapes [5] :

- Choix du type de correcteur.
- Calcul des éléments constituant le correcteur (calcul de $C(p)$)
- Vérification (par simulation) des performances.
- Réalisation et insertion réelles du correcteur dans la chaîne d'asservissement.

I.3.3 Types de correcteurs (régulation)

Il existe plusieurs types de correcteurs. Dans cette partie nous présentons les 4 types de correcteurs les plus évoqués et utilisés dans les processus de régulation.

I.3.3.1 Correcteur Proportionnel P [6]

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

$$U(t) = K_c \varepsilon(t) \Rightarrow C(s) = K_p \quad (\text{I.1})$$

L'erreur $\varepsilon(t)$ est virtuellement amplifiée d'un certain gain constant qu'il conviendra de déterminer en fonction du système.

Sa fonction de transfert est donnée sous la forme suivante :

$$C(s)=K_p \tag{I.2}$$

La figure (I. 10) présente le schéma de principe d'un correcteur proportionnel.

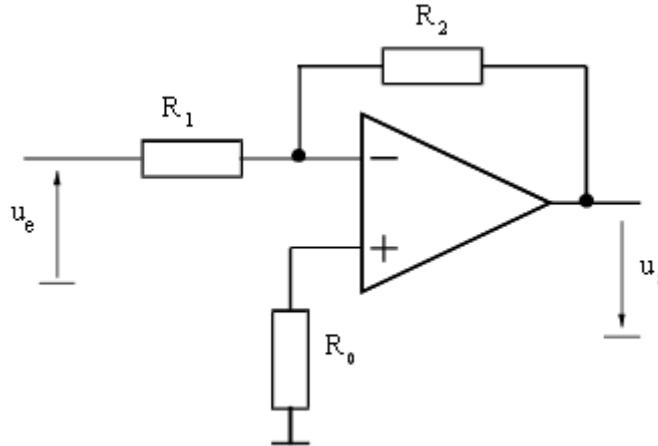


Figure I. 10 Schéma d'un correcteur proportionnel

D'après le schéma et la relation générale au nœud (-), on trouve que la fonction de transfert d'un correcteur P est présentée comme ceci (I.3) :

$$G_p(s) = \frac{U_s(s)}{U_e(s)} = \frac{R_2}{R_1} \tag{I.3}$$

Ce type de correcteur génère la réduction de l'écart statique par augmentation du gain K_p sans l'annuler pour autant. S'ajoute à cela, l'augmentation de la rapidité due à la diminution de la marge des phases. Cependant, l'augmentation excessive du gain peut mener à l'apparition d'oscillations qui peuvent conduire à l'instabilité du système. Ce correcteur est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante

I.3.3.2 Correcteur Proportionnel Intégral PI [6]

Nous commencerons par définir l'action intégrale pour ensuite définir et présenter l'intérêt du correcteur PI.

a-Action Intégrale I

Le correcteur est à **action intégrale** si le signal de commande $U(t)$ est l'intégrale de l'écart $\varepsilon(t)$.

$$U(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \Rightarrow C(s) = \frac{1}{T_i s} \quad (\text{I.4})$$

T_i est la constante d'intégration (secondes).

L'action intégrale permet d'éliminer l'écart entre la consigne et la mesure progressivement mais aussi d'éviter les à-coups et les pics de puissance.

b-Correcteur PI

C'est un correcteur Proportionnel auquel on ajoute l'action Intégrale. L'intérêt principal de ce correcteur est d'ajouter dans la chaîne de commande une intégration qui annule l'erreur statique pour une entrée échelon.

On donne son schéma de principe comme suit :

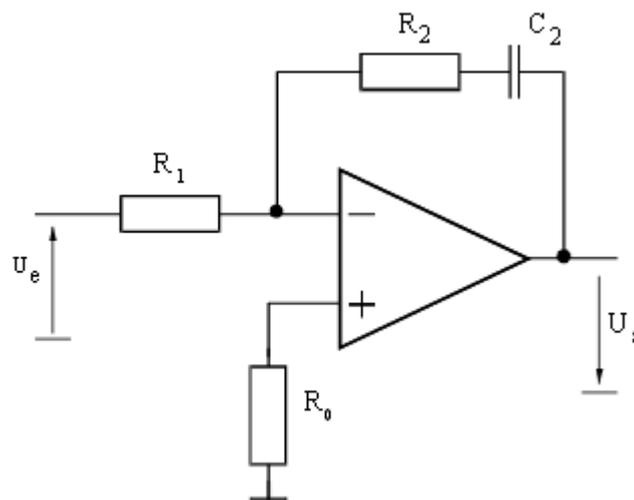


Figure I. 11 : Schéma de principe d'un correcteur PI

Sa fonction de transfert est (I.5) :

$$G_R(s) = \frac{U_s(s)}{U_e(s)} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1 + sR_2C_2}{sR_2C_2} \quad (\text{I.5})$$

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

En remplaçant on trouve l'équation **(I.6)** suivante:

$$G_R(s) = K_p \frac{1 + s \cdot T_i}{s \cdot T_i} \quad \text{(I.6)}$$

L'intérêt principal du correcteur Proportionnel Intégral est d'annuler les écarts statiques par l'introduction de l'action intégrale. Aussi, il permet d'annuler les effets de perturbations. En plus, il augmente la classe du système en introduisant un pôle à l'origine et un zéro.

Malheureusement, il introduit un déphasage $(-\pi/2)$ et risque de rendre le système instable (diminution de la marge de phase).

I.3.3.3 Correcteur Proportionnel Dérivé PD [6]

Le correcteur Proportionnel Dérivé est constitué d'une action dérivée ajoutée à une action proportionnelle. Tout d'abord nous définissons l'action dérivée D puis le correcteur PD.

a-Action Dérivée D

Le correcteur est à **action dérivée** si le signal de commande $U(t)$ est la dérivée de l'écart $\varepsilon(t)$. Voici son équation **(I.7)** :

$$U(t) = T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \Rightarrow C(s) = T_d \cdot s \quad \text{(I.7)}$$

T_d est la constante de dérivation (secondes).

b-Correcteur PD

Il s'agit d'un correcteur Proportionnel auquel on ajoute l'action dérivée. L'intérêt principal de ce correcteur est d'ajouter dans la chaîne de commande une dérivation qui permet d'avoir une réponse rapide du système puisqu'elle permet une anticipation sur l'erreur.

Sa fonction de transfert est la suivante **(I.8)** :

$$G_R(s) = K_p (1 + T_d \cdot s) \quad \text{(I.8)}$$

La représentation pratique du correcteur est la suivante :

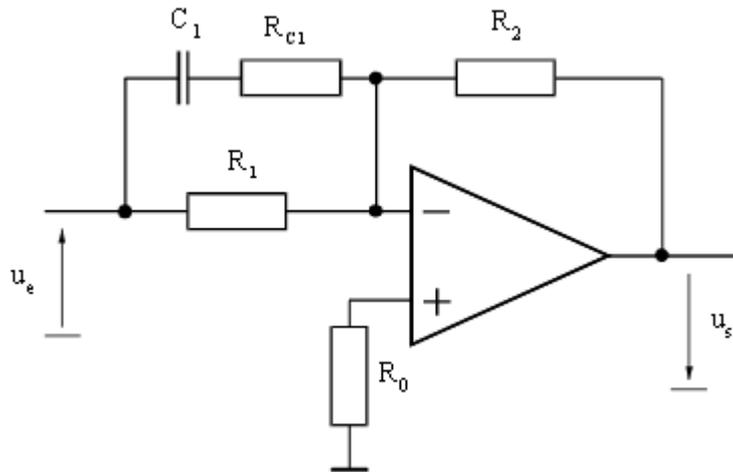


Figure I. 12 : Schéma de principe d'un correcteur PD

Le rôle de ce type de correcteurs est d'améliorer la rapidité et la stabilité du système commandé ainsi que la compensation du temps mort. Il est utilisé pour augmenter la marge de phase. Par contre, ce correcteur présente un inconvénient majeur lors de la variation de la consigne car il peut provoquer la saturation des actionneurs, un dépassement de la consigne ou encore des oscillations à la sortie.

I.3.3.4 Correcteur Proportionnel Intégral Dérivé PID [6]

L'intérêt du correcteur PID est d'intégrer les effets positifs des trois correcteurs précédents soit l'amélioration de la stabilité due à l'effet dérivateur (Action Dérivée), l'amélioration de la précision statique issue de l'effet intégrateur (Action Intégrale) et l'amélioration de la dynamique obtenue par l'effet proportionnel (Action Proportionnelle).

Sa fonction de transfert est la suivante **(I.9)** :

$$G_R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad \text{(I.9)}$$

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

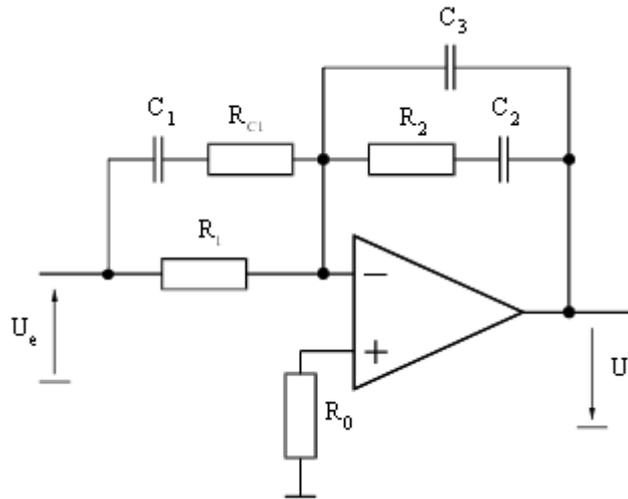


Figure I. 13 : Schéma d'un PID

Le correcteur PID permet d'améliorer, par la détermination des paramètres, à la fois : la précision, la stabilité et la rapidité. Cependant, il est important de noter que ce type d'asservissement est limité par un certain nombre de contraintes. Tout d'abord, il peut s'avérer inefficace pour certains systèmes qui contiennent du bruit ou qui ne sont pas linéaires (l'asservissement PID étant linéaire, la non-linéarité d'un système entraîne des instabilités).

Enfin, il est possible d'optimiser la réponse d'un système en multipliant les asservissements (comme par exemple le double asservissement PID).

I.4 Méthodes de réglages des PID

Le réglage des PID compte plusieurs méthodes. Le choix de ces dernières se fait suivant le type de procédé et les contraintes de fabrication.

I.4.1 Réglage par approche successive [6]

Le rôle de ce réglage est de modifier les actions du régulateur et d'observer les effets sur la mesure lue jusqu'à obtention d'une réponse optimale. Ce type de réglage doit toujours se faire dans l'ordre suivant :

I.4.1.1 Réglage de l'action proportionnelle

Le réglage de cette action se fait selon la procédure suivante :

- Stabiliser la mesure au point de fonctionnement.

- Mettre le régulateur en P seul, ($T_i = \max.$ ou coefficient du filtre $N = 0$ et $T_d = 0$).
- Afficher un gain Gr faible ($Gr < 1$).
- Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10%.
- Observer l'enregistrement de l'évolution du signal de mesure :

Si elle est sur amortie (apériodique), augmenter le gain Gr (ou diminuer BP %).

Si elle présente plus de deux oscillations, diminuer le gain Gr (ou augmenter BP %).

Au cours des réglages, les observations suivantes peuvent être faites :

- La mesure ne rejoint pas la consigne
- L'écart diminue avec le gain mais la stabilité se dégrade
- La réponse s'accélère en augmentant le gain
- Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité.

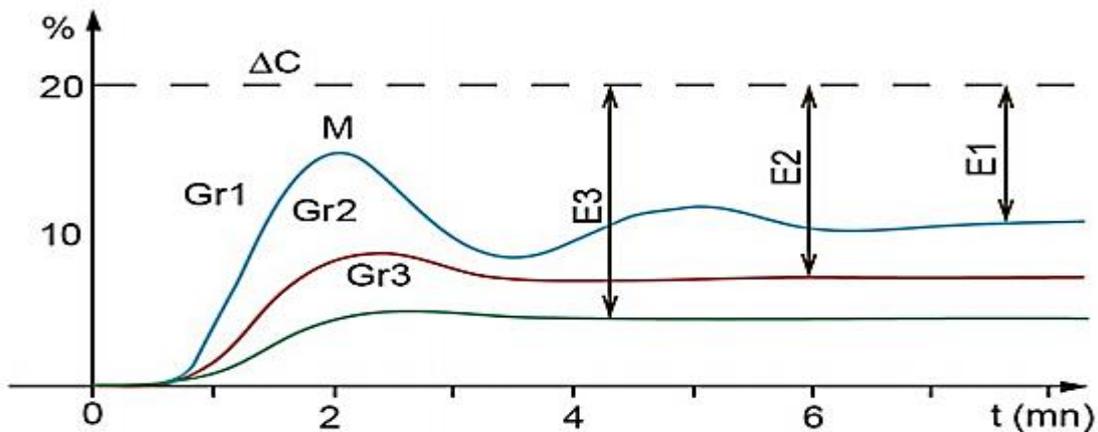


Figure I. 14 : Réglage de l'action proportionnelle

Tels que :

ΔC représente la consigne.

M représente la valeur mesurée.

I.4.1.2 Réglage de l'action dérivée

Le réglage de cette action se fait selon la procédure suivante :

- L'action dérivée ne se justifie que si la mesure a un certain retard.

- Conserver la valeur de l'action proportionnelle déterminée précédemment et l'intégrale minimale.
- Afficher une action dérivée faible (T_d égal à quelques secondes ($tr/3$)).
- Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
- Si la réponse ne s'amortie pas, augmenter T_d .
- Si la réponse est oscillante ou si elle est plus lente, diminuer T_d .

Tels que :

ΔC représente la consigne.

M représente la valeur mesurée.

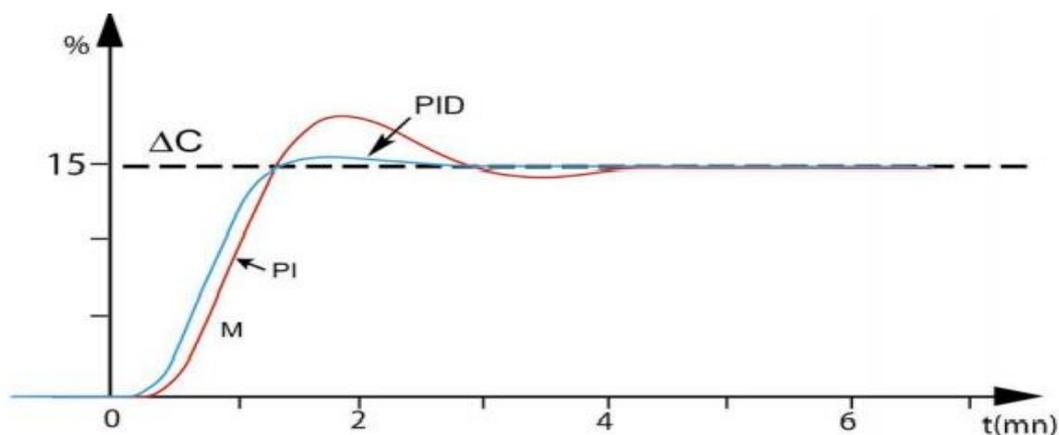


Figure I. 15 : Réglage de l'action dérivée

I.4.1.3 Réglage de l'action intégrale

Le réglage de cette action se fait selon la procédure suivante :

- Conserver les valeurs des actions proportionnelle et dérivée déterminées précédemment.
- Afficher une action intégrale faible.
- Pour un premier essai, afficher T_i .
- Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.

- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
- Si la réponse est sur amortie ou trop lente, diminuer T_i .
- Si la réponse présente un dépassement trop important, on augmente T_i .

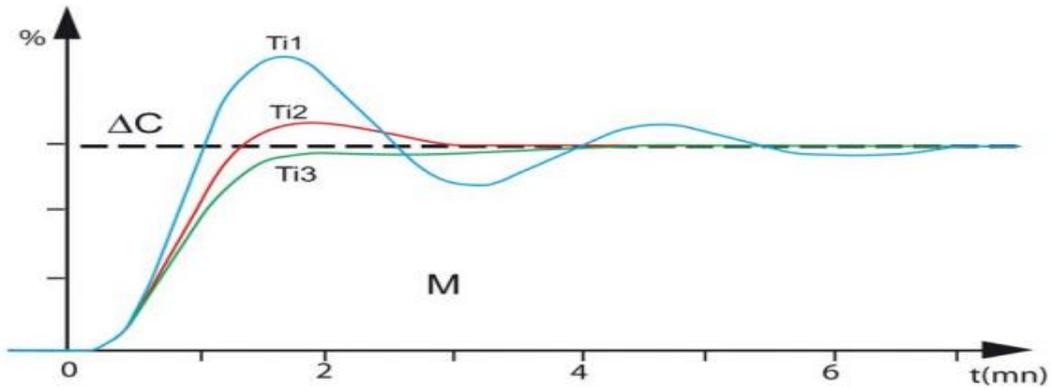


Figure I. 16 : Réglage de l'action intégrale

I.4.2 Réglage à partir de l'identification du procédé [6]

C'est un procédé qui a pour but d'obtenir les paramètres caractéristiques. Ces derniers permettent de calculer les actions à afficher sur le régulateur. Ce calcul dépend :

- Du modèle choisi pour l'identification ;
- De la structure du régulateur utilisé (série, parallèle, etc.).
- Du mode de régulation choisi (P, PI, PID, etc.).

I.4.2.1 Cas d'un procédé stable

Après avoir identifié le procédé suivant le modèle d'un premier ordre retardé, on utilise le tableau suivant (I. 1) pour calculer les actions à afficher sur un régulateur compte tenu de sa structure.

La fonction de transfert du procédé à commander est donnée comme suit :

$$Hr(s) = \frac{Gs e^{-\tau s}}{1+\theta s} \quad (\text{I.10})$$

Le choix du mode de régulation est lié à la réglabilité du système déterminé par le rapport

$$\frac{\theta}{\tau}$$

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

Le calcul des différentes actions du correcteur est illustré par le tableau suivant :

| REGUL. ACTIONS | 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 | $\frac{0,8 \cdot \theta}{G_s \cdot \tau}$ | $\frac{0,8 \cdot \theta}{G_s \cdot \tau}$ | $\frac{0,8 \cdot \theta}{G_s \cdot \tau}$ | $\frac{0,85 \cdot \theta}{G_s \cdot \tau}$ | $\frac{(\theta/\tau) + 0,4}{1,2 \cdot G_s}$ | $\frac{(\theta/\tau) + 0,4}{1,2 \cdot G_s}$ | $\frac{(\theta/\tau) + 0,4}{1,2 \cdot G_s}$ |
| Ti | Maxi | θ | $\frac{G_s \cdot \tau}{0,8}$ | θ | $\frac{G_s \cdot \tau}{0,75}$ | $\theta + 0,4 \cdot \tau$ | $\theta + 0,4 \cdot \tau$ |
| Td | 0 | 0 | 0 | $0,4 \cdot \tau$ | $\frac{0,35 \cdot \theta}{G_s}$ | $\frac{\theta \cdot \tau}{\tau + 2,5 \cdot \theta}$ | $\frac{0,35 \cdot \theta}{G_s}$ |

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

I.4.2.2 Cas d'un procédé instable

Après avoir identifié le procédé suivant le modèle d'un intégrateur pur retardé, on utilise le tableau (I. 2) pour calculer les actions à afficher sur un régulateur compte tenu de sa structure.

La fonction de transfert du procédé à commander est donnée comme suit :

$$Hr(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{s} \tag{I.11}$$

Le choix du mode de régulation est lié à la réglabilité du système déterminé par le produit $K\tau$

- 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 est illustré par le tableau suivant :

| REGUL. ACTIONS | 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 | Maxi | $5 \cdot \tau$ | $\frac{k \cdot \tau^2}{0,15}$ | $4,8 \cdot \tau$ | $\frac{k \cdot \tau^2}{0,15}$ | $5,2 \cdot \tau$ | $5,2 \cdot \tau$ |
| Td | 0 | 0 | 0 | $0,4 \cdot \tau$ | $\frac{0,35}{k}$ | $0,4 \cdot \tau$ | $\frac{0,35}{k}$ |

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

I.4.3 Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols [5] [6]

La méthode de Ziegler–Nichols est une méthode de réglage d'un régulateur PID. Elle a été développée par John G. Ziegler et Nathaniel B. Nichols en 1942. Ce type de réglage se fait par deux méthodes semi empiriques basées sur les résultats de tests expérimentaux. La première repose sur les résultats d'une courbe de réponse en boucle ouverte, la deuxième utilise le pompage ultime à boucle fermée.

Cette méthode nécessite l'observation de la réponse du processus et la connaissance de la structure du régulateur. Elle permet de calculer les actions PID, sans la détermination des paramètres du processus.

I.4.3.1 Cas d'un procédé stable en boucle ouverte [5] [6]

Cette méthode s'applique à des systèmes dont la réponse indicielle est de type apériodique possédant un retard. C'est le cas des systèmes thermiques. La fonction de transfert de ces systèmes s'écrit :

$$G(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{1+\theta s} \tag{I.12}$$

Avec τ : retard, θ : constante de temps et K : gain statique.

Les valeurs suggérées par Zeigler-Nichols sont données par le tableau (I. 3) :

| Type de correcteur | P | PI | PID |
|--------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|
| K_p | $\frac{\theta}{K\tau}$ | $0.9 \frac{\theta}{K\tau}$ | $1.2 \frac{\theta}{K\tau}$ |
| T_i | ----- | 3.3τ | 2τ |
| T_d | 0 | 0 | 0.5τ |

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.

I.4.3.2 Cas d'un procédé stable en boucle fermée [5] [6]

Cette méthode s'applique dans le cas où le système est instable en boucle ouverte. La solution consiste à mettre la boucle de régulation en oscillations entretenues. La période des oscillations T_{osc} et le gain du régulateur critique K_0 qui occasionne ces oscillations, permettent de calculer les actions à afficher sur le régulateur. Ce calcul dépend de la structure du régulateur utilisé et du mode de régulation choisi (P, PI, PID).

Les valeurs suggérées par Zeigler-Nichols sont données par le tableau (I. 4) :

| 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.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait un détail d'étude des généralités sur les systèmes asservis, à savoir : systèmes asservis en boucle fermée, en boucle ouverte, les régulateurs, la stabilité, la précision, la rapidité qui sont les éléments principaux d'un processus de régulation. Nous avons aussi vu quelques problèmes qui peuvent être rencontrés dans ce dernier. De ce fait, nous avons constaté la nécessité de l'utilisation des correcteurs (P, PI, PID) en présentant les différentes méthodes de réglages de leurs paramètres.

Chapitre II

Généralités sur l'instrumentation utilisée

II.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré au moteur à courant continu, au tachymètre, aux codeurs optiques ainsi que les amplificateurs. Nous allons d'abord les présenter, en donnant leurs définitions, en mettant le point sur chacun des composants les constituants. Ensuite nous expliquerons leurs fonctionnements.

II.2 Notions sur les moteurs à courant continu

Dans cette partie, nous allons présenter quelques généralités sur les moteurs à courant continu.

II.2.1 Définition d'un moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est une machine électrique à courant continu qui convertit une énergie électrique d'entrée en une énergie mécanique. Ceci est illustré par la figure (II.1).

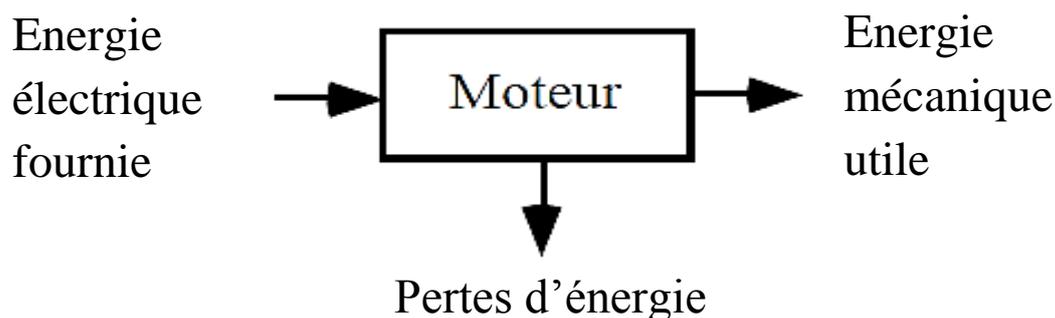


Figure II. 1 : Schématisation d'un moteur à courant continu

II.2.2 Constitution du moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est constitué de quatre éléments : stator, rotor, collecteur et les balais que nous allons définir dans ce qui suit :

II.2.2.1 Stator (Inducteur)

C'est la partie fixe du moteur, parcouru par un courant et une tension constante. Il est composé soit d'un électro-aimant soit d'enroulements bobinés qui créent un champ magnétique, dit statorique, dirigé vers l'axe du rotor [7].

II.2.2.2 Rotor (Induit)

C'est la partie tournante du moteur. Il est composé de tôles isolées entre elles et munies d'encoches dans lesquelles sont réparties les conducteurs. Le passage du courant dans cet induit crée un champ magnétique appelé courant rotorique qui a pour effet d'engendrer la tournure du moteur [7].

II.2.2.3 Les balais (charbons) et les collecteurs

Ce sont des morceaux de carbone (prismatiques) qui assurent la liaison électrique entre les fils d'alimentation de l'induit sous forme d'un contact par frottements. Le collecteur quant à lui est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit [7].

Le point de contact entre les balais et le collecteur est l'endroit où se fait l'inversion du sens du courant.

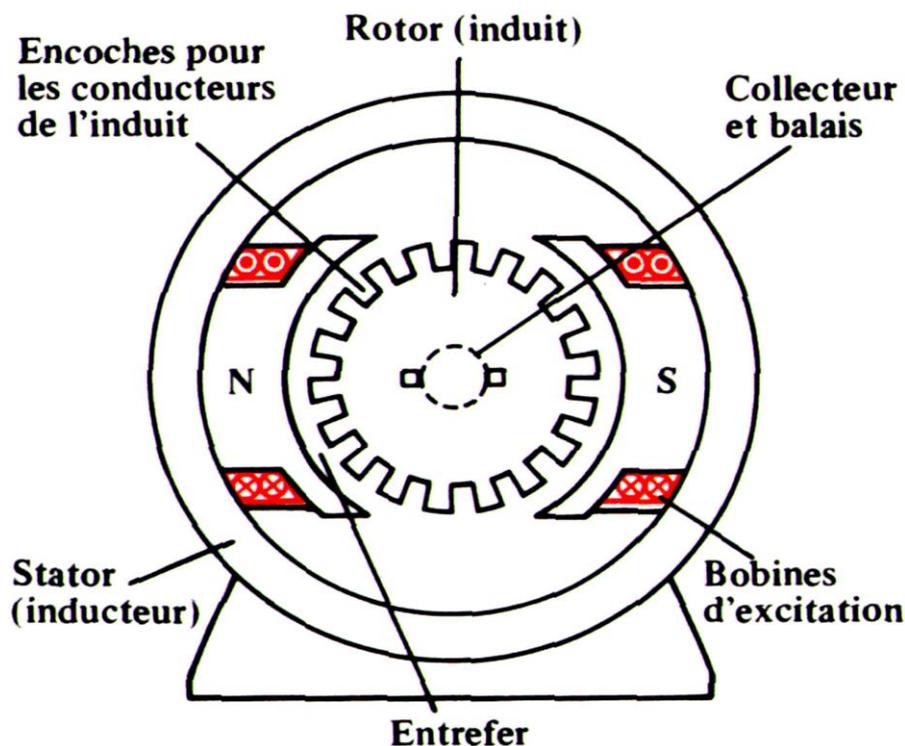


Figure II. 2 : Constitution du moteur à courant continu

II.3 Modélisation et fonction de transfert d'un moteur à courant continu

Dans ce qui suit, nous développerons un peu plus en détails le modèle ainsi que la fonction de transfert du moteur à courant continu.

II.3.1 Modélisation d'un moteur à courant continu [1], [7]

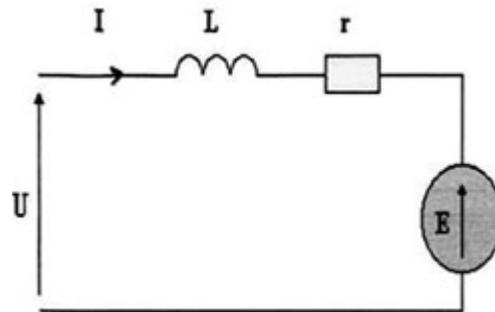


Figure II. 3 : Schéma équivalent d'un moteur à courant continu

U : tension aux bornes de l'induit.

E : force contre-électromotrice.

L : inductance des enroulements du moteur.

Un moteur électrique à courant continu est régi par les équations physiques découlant de ses caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques.

D'après la loi de Newton, combinée à la loi de Kirchhoff, on peut écrire les équations différentielles de premier ordre suivantes :

$$U(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{II.1})$$

$$e(t) = K_e \cdot \Omega(t) \quad (\text{II.2})$$

D'après le principe de la dynamique, on a :

$$T_i - T_r = j \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.3})$$

$$T_i = K_t i(t) - T_p$$

$$T_r = f \Omega(t)$$

u(t) : Tension appliquée au moteur.

i(t) : Intensité du courant traversant le moteur.

T_i : Couple moteur généré.

f : Coefficient de frottement visqueux.

$e(t)$: force contre électromotrice.

$\Omega(t)$: Vitesse de rotation du moteur.

T_r : Couple résistant.

J : moment d'inertie de l'axe du moteur.

T_p : couple de pertes.

K_e : est la constante de force électromotrice.

K_c : constante de couple.

II.3.2 Fonction de transfert d'un moteur à courant continu

En appliquant la transformation de Laplace à l'équation (II.1).

$$U(p) = R.I(p) + L.pI(p) + E(p) \quad (\text{II.4})$$

$$E(p) = K_e.\Omega(p) \quad (\text{II.5})$$

$$T_i - T_r = J.p.\Omega(p) \quad (\text{II.6})$$

En combinant (II.4) et (II.5) on obtient :

$$U(p) = (R.I + L.p)I(p) + K_e.\Omega(p) \quad (\text{II.7})$$

En modifiant (II.6) on a :

$$K_c.I(p) - T_p - f\Omega(p) = J.p.\Omega(p) \quad (\text{II.8})$$

On en déduit l'expression de $\Omega(p)$:

$$\Omega(p) = \frac{K_c.I(p) - T_p}{f + J.p} \quad (\text{II.9})$$

On l'injecte à présent dans (II.4) :

$$U(p) = \Omega(p) \left(\frac{(R+L.p).(f+J.p)}{K_c} + K_e \right) + \frac{R+L.p}{f+J.p} T_p \quad (\text{II.10})$$

On suppose que le moment du couple de pertes (qui est vu comme une perturbation) est négligeable.

$$U(p) = \Omega(p) \frac{(R+L.p).(f+J.p)}{K_c} + K_e \quad (\text{II.11})$$

La fonction de transfert cherchée $H(p)$ est entre la tension entrante dans le moteur $U(p)$ et la vitesse de sortie $\Omega(p)$:

$$H(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K_c}{(R+L.p).(f+J.p)+K_e K_c} \quad (\text{II.12})$$

II.4 Principe de fonctionnement [1] [7]

Lorsque le bobinage d'un inducteur de moteur est alimenté par un courant continu, sur le même principe qu'un moteur à aimant permanent (comme sur la figure (II. 5)), il crée un champ magnétique (flux d'excitation) de direction Nord-Sud.

Une spire capable d'effectuer un mouvement de rotation est placée dans le champ magnétique. Les deux conducteurs formant la spire sont chacun lié à un demi collecteur et alimentés en courant continu via deux balais frotteurs.

D'après la loi de Laplace, tout conducteur parcouru par un courant perpendiculaire au champ magnétique, dans lequel il est placé, est soumis à une force comme le montre la figure (II. 4). La direction de cette dernière est déterminée par la règle des trois doigts de la main droite.

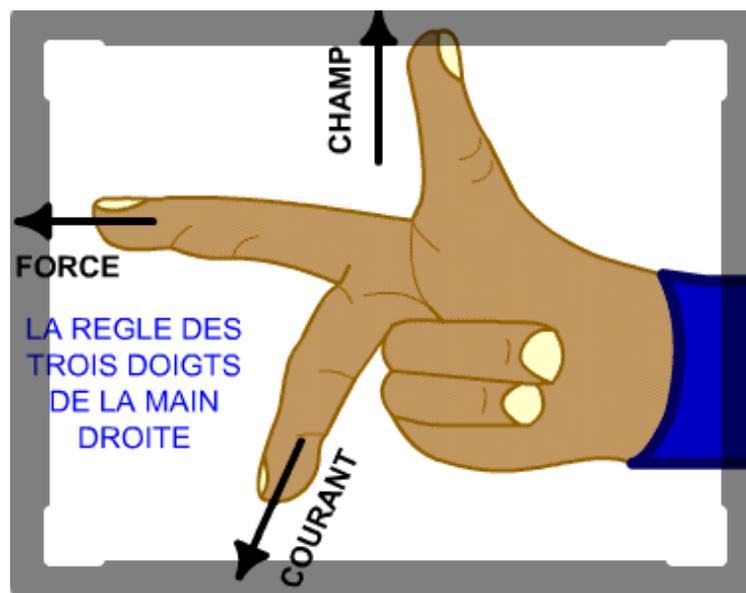


Figure II. 4 : Figure représentative de la règle de la main droite

La spire est alors soumise à deux forces de sens opposés entraînant sa rotation.

Après une rotation de 90° de la spire, les deux demi-collecteurs perdent contact avec les balais, cela implique que la spire ne devrait plus tourner. Mais grâce à l'inertie rotationnelle, cette dernière continue de tourner un peu plus de sorte que le contact est à nouveau rétabli. Ce processus est répété continuellement pour obtenir la rotation du moteur.

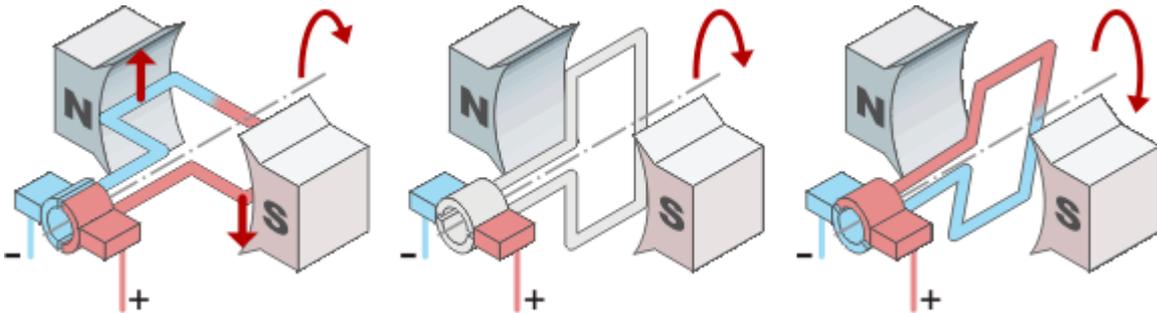


Figure II. 5 : Schéma montrant le fonctionnement d'un moteur à courant continu

II.5 Types de moteurs [8]

Il existe plusieurs types de moteurs à courant continu qui sont très utilisés en pratique. Ils sont résumés ci-dessous :

II.5.1 Moteur à aimants permanents

Dans le moteur à aimants permanents, le rotor ainsi que le stator sont constitués d'aimants dont les pôles identiques sont mis face à face afin de permettre le mouvement du moteur grâce au champ magnétique créé. Les pôles identiques se repoussent ce qui met le moteur en mouvement [8].

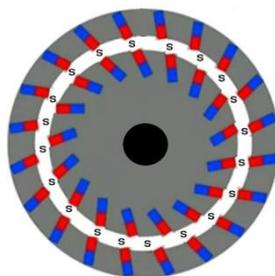


Figure II. 6 : Représentation du stator d'un moteur à aimants permanents

II.5.2 Moteur à excitations [8]

Les moteurs à excitations sont les moteurs qui ont pour inducteur une bobine. On distingue 4 types d'excitations :

a. Moteur à excitation séparée (indépendante)

On parle d'excitation indépendante lorsque chacun de l'induit et de l'inducteur est alimenté indépendamment de l'autre et où chacun d'eux a une alimentation propre à lui. On veut dire par là que l'induit est alimenté par une tension E et un courant I pendant que l'inducteur lui est alimenté par une tension U_e d'excitation et un courant I_e d'excitation.

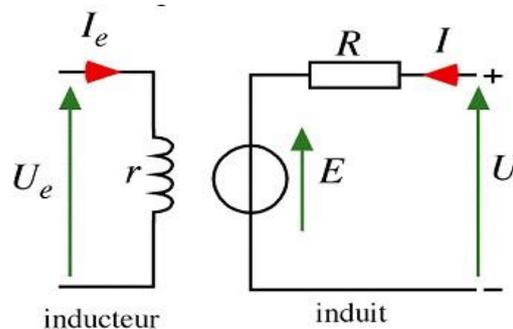


Figure II. 7 : Schéma équivalent à un moteur à excitation séparée

b. Moteur à excitation série

C'est un moteur dont l'inducteur est placé en série avec l'induit. Tous deux ont la même alimentation E et sont donc traversés par le même courant d'excitation I .

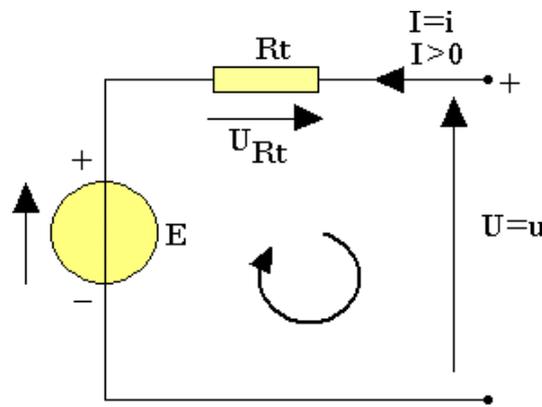


Figure II. 8 : Schéma équivalent d'un moteur à excitation série

c. Moteur à excitation shunt (parallèle)

C'est un moteur dont l'inducteur est placé en parallèle avec l'induit. Tous deux ont la même alimentation U mais ne sont pas parcourus par le même courant.

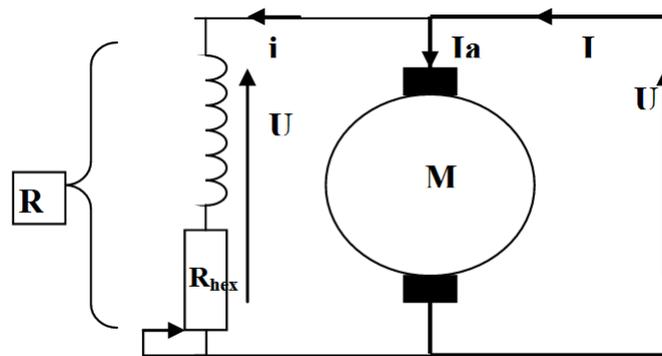


Figure II. 9 : Schéma équivalent d'un moteur à excitation parallèle

d. Moteur à excitation composée (compound)

Egalement appelé moteur à excitation mixte. C'est un type de moteur dont le bobinage de l'inducteur est composé de deux parties, l'une d'entre elles est placée en série avec l'induit, l'autre en parallèle avec ce dernier.

Dans ce qui suit, nous allons donner quelques généralités sur les capteurs. Ensuite, nous présentons quelques rappels sur les capteurs de vitesse ainsi que les codeurs optiques.

II.6 Capteurs

Nous nous intéresserons à des différents types de capteurs mais d'abord voici sa définition générale :

II.6.1 Définition

Un capteur est un organe capable de prélever des informations à partir d'une grandeur physique et les transformer en une autre grandeur de nature différente souvent électrique.

Avec le temps, le capteur a pu évoluer ce qui lui a permis d'élargir son domaine d'applications car en plus de sa capacité à acquérir des informations, les transformer en des

données compréhensibles par l'homme, il est aussi capables de détecter, enregistrer, traiter et de communiquer des mesures vers d'autres dispositifs [9].

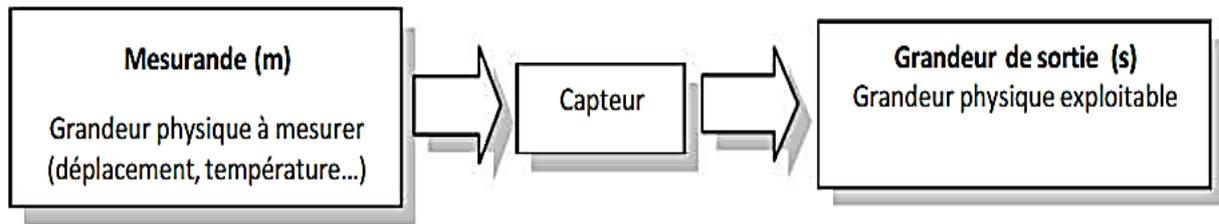


Figure II. 10 : Schéma montrant le rôle d'un capteur

Il existe plusieurs variantes de capteurs. Dans ce chapitre, nous allons aborder deux types en particulier : tachymètres et codeurs optiques.

II.6.2 Les tachymètres [9] [10]

Nous allons parler de ce type de capteurs et nous nous intéresserons à ses différents types.

II.6.2.1 Définition

C'est un instrument de mesure qui permet de déterminer continuellement la vitesse angulaire d'une machine tournante par l'intermédiaire de mesures de vitesse angulaire ou de fréquences de vibration en utilisant des capteurs mécaniques optiques ou électriques. Il peut être analogique (génère une tension, un courant ou une fréquence) ou numérique (génère un code numérique, ou une impulsion de largeur ou de fréquence variable). On le trouve couramment dans l'industrie et les transports où il permet un contrôle et une surveillance des machines rotatives [10].

II.6.2.2 Les différents types de tachymètres

On distingue plusieurs types de tachymètres :

a. Tachymètre électromagnétique

Ce type de capteurs comporte un noyau magnétique (aimant permanent) mobile dans une bobine fixe. L'aimant, entraîné par l'objet à mesurer, induit dans la bobine une tension proportionnelle à la vitesse de celle-ci. Il peut être à courant continu ou à courant alternatif [9] [10].

a.1 Tachymètre à courant continu

C'est une machine à courant continu dont l'inducteur est souvent à aimant permanent et l'induit bobiné. Son principe de fonctionnement est le même que celui d'une génératrice à courant continu qui consiste à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le rotor est entraîné par la prise de mouvement et délivre une force électromotrice (f.e.m.) E proportionnelle à la vitesse N à mesurer. Son expression est donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{2p \cdot n \cdot N \cdot \Phi}{2a} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

- $2p$: représente le nombre de pôles de la machines
- $2a$: représente le nombre de voies d'enroulement de l'induit.
- n : le nombre de conducteurs actifs à la périphérie de l'induit.
- Φ : le flux issu d'un pôle.

a.2 Tachymètre à courant alternatif

Un tachymètre à courant alternatif est constitué d'un enroulement fixe (bobinage) et des aimants permanents tournants. Ces derniers génèrent une tension et une fréquence proportionnelles à la vitesse de rotation. Il a pour particularité de ne pas avoir de balais et de collecteurs ce qui améliore sa durée de vie [10].

Il existe 2 types de tachymètres à courant alternatif : génératrice synchrone et génératrice asynchrone (voir annexe A) [10].

II.6.3 Codeur Optique [9]

Dans ce qui suit, nous présenterons les capteurs optiques et ses variantes.

II.6.3.1 Définition et fonctionnement

Un codeur optique est un capteur angulaire qui transmet des informations numériques. Il permet de définir la position, vitesse et le sens de rotation. Il est lié mécaniquement à un arbre qui l'entraîne en rotation. Il est constitué d'un disque tournant qui comporte une

succession de parties opaques et transparentes, d'un émetteur de lumière, souvent des diodes électroluminescentes (LED) ou diode laser ainsi qu'un photorécepteur, généralement un phototransistor ou une photodiode.

L'axe du capteur fait tourner le disque et ce dernier est traversé par la lumière émise par la diode à travers ses fenêtres transparentes, captée par le photorécepteur qui ensuite la délivre sous forme d'un signal électrique proche de la sinusoïde qui est ensuite converti en un signal logique.

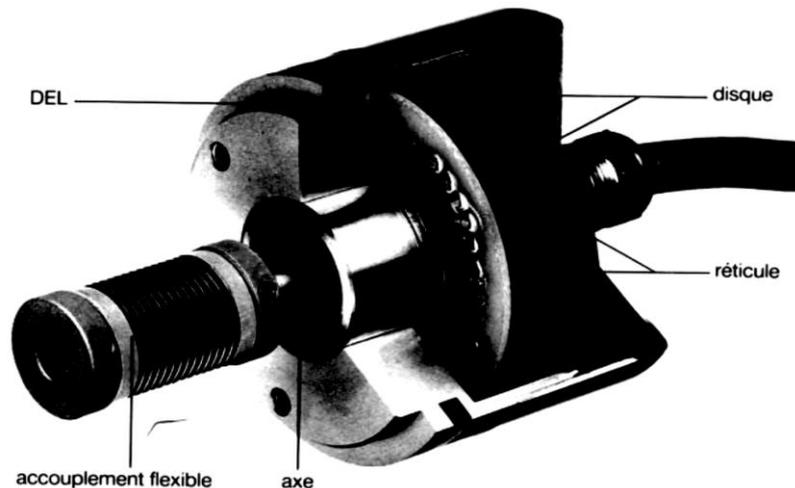


Figure II. 11 : Photo d'un codeur optique

II.6.3.2 Types de codeurs optiques

Il existe deux types de codeurs optiques :

a. Codeur incrémental (relatif)

Il est destiné à des applications de mesure de déplacement, qui délivre les informations sous forme de train d'impulsions. Le disque est divisé en « n » intervalles égaux. Il comporte trois pistes : deux pistes extérieures A et B déphasées de 90° permettant de déterminer le sens de rotation du disque en détectant quelle piste change d'état en premier comme le montre la figure ci-dessous [9].

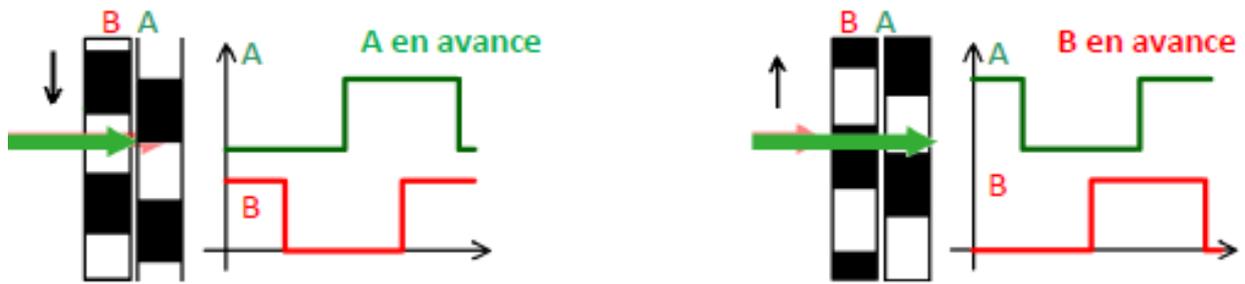


Figure II. 12 : Figure qui montre comment déterminer le sens de rotation du disque

Le disque tourne au sens horaire si A est en avance par rapport à B, c'est-à-dire que le faisceau lumineux passe par une fenêtre de la piste A en premier. En revanche si B est en avance sur A, le disque tourne au sens antihoraire comme le montre bien cette figure.

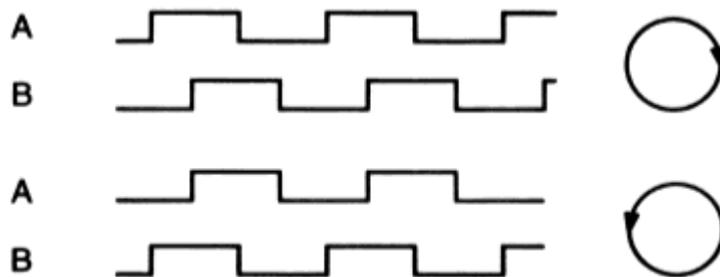


Figure II. 13 : Représentation des deux sens de rotation du disque du codeur

La troisième piste du disque, est une piste intérieure Z appelée « point zéro » qui ne comporte qu'une seule fenêtre transparente, qui sert à déterminer la position de référence et qui permet la réinitialisation et le comptage des tours.

Derrière les pistes extérieures sont installés deux photorécepteurs décalés pour capter les deux signaux A et B.

Ce type de codeurs permet par comptage d'impulsions de donner la position angulaire d'un mobile. Les deux pistes A et B vont donc, pour un tour, délivrer « n » impulsions consécutives qu'il suffira de compter. Plus le nombre « n » est grand plus on gagne de précision [9].

La figure (II. 14) représente les signaux délivrés par les 3 pistes du codeur incrémental.

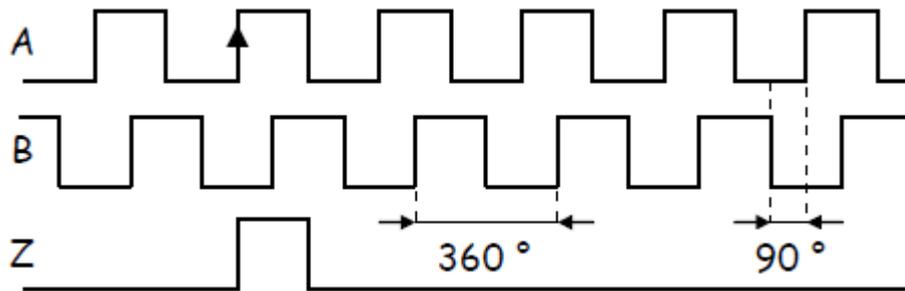


Figure II. 14 : Représentation des signaux délivrés par les trois pistes du disque

Voici une photo représentative d'un codeur incrémental.

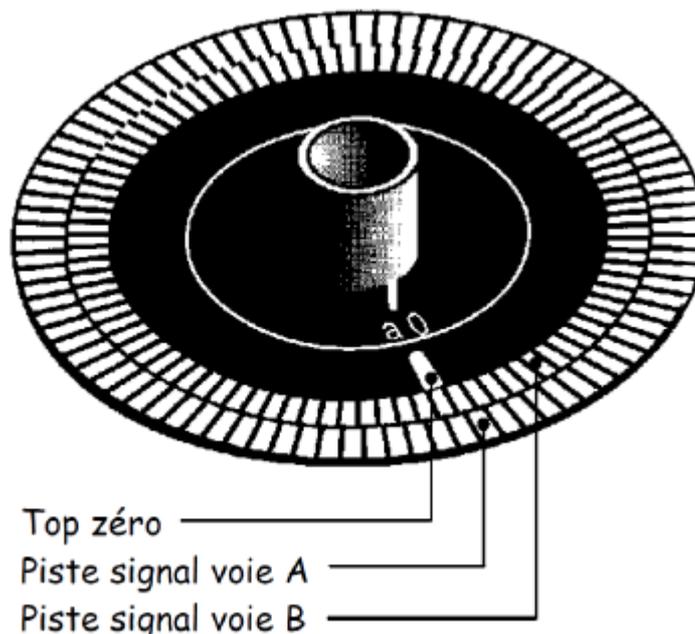


Figure II. 15 : Photo d'un codeur incrémental

b. Codeur absolu (numérique)

Il est utilisé pour le contrôle de positionnement d'un mobile sans traitement par la partie commande en délivrant un code qui est l'image réelle de la position de l'objet à contrôler. Il se distingue du codeur incrémental par sa nature du disque. Le codeur absolu comporte n pistes :

la première qui est au centre est divisée en deux parties, moitié opaque et moitié transparente, qui permet de déterminer à un 1/2 tour près où se positionne l'objet. Cette piste est appelée MSB en anglais Most Significant Bit qui veut dire 'bit de poids le plus fort'.

La piste suivante, en allant vers l'extérieur, est divisée en 4 parties, alternativement transparentes et opaques, ce qui va permettre de déterminer dans quel 1/4 de tour se situe l'objet. La piste d'après, nous permettra de savoir dans quel 1/8 de tour, la prochaine dans quel 1/16 et ainsi de suite. On comprend que chaque piste, du centre vers l'extérieur, comporte deux fois le nombre de parties opaques et transparentes que la précédente jusqu'à la dernière.

La piste extérieure correspond au bit de poids le plus faible ou en anglais LSB : Least Significant Bit.

La figure (II. 16) illustre un codeur absolu.

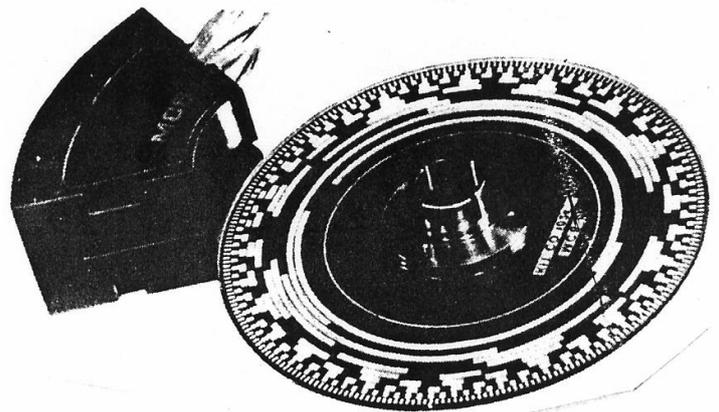


Figure II. 16 : Photo d'un codeur absolu

La lecture simultanée de toutes les pistes donne un code binaire, image de la position angulaire de l'objet.

Ce code comporte autant de bits que le codeur a de pistes : n bits et nécessite aussi 'n' couples émetteur/récepteur. Il peut être soit un code binaire naturel (pur) ou bien un code binaire réfléchi aussi appelé Gray.

Le code binaire naturel a l'avantage de pouvoir être directement utilisé par l'unité de traitement. Ce code permet d'effectuer les quatre opérations arithmétiques sur des nombres exprimés dans le code. En revanche, il peut y avoir un changement simultané de plusieurs bits d'une position à la suivante. Dans ce cas, il sera difficile de déterminer le changement de positions et il y'aura apparition d'un message erroné. Pour pallier à cet inconvénient, on utilise

le code Gray dont un seul bit change par déplacement, donc il ne peut y avoir de messages erronés. Malgré ça, l'utilisation de ce type de code nécessite un transcodage binaire réfléchi / binaire naturel pour pouvoir l'exploiter [9].

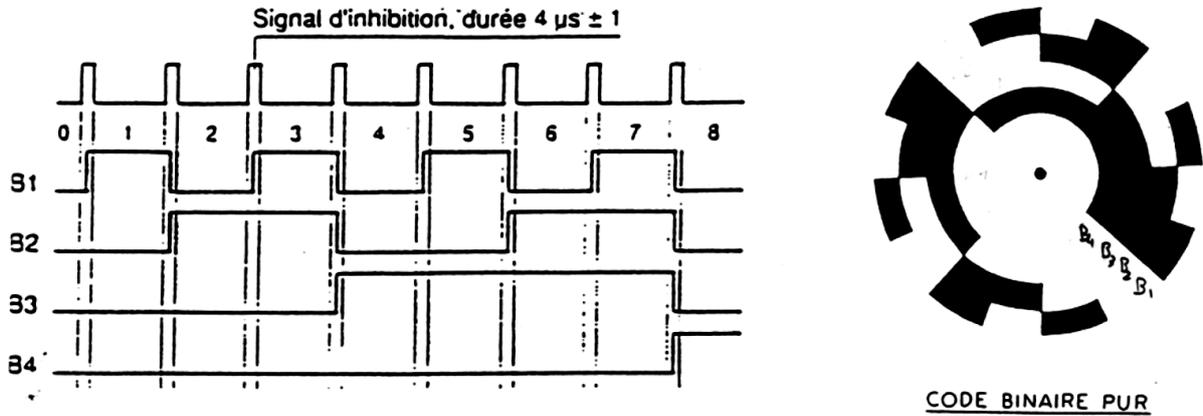


Figure II. 17 : Codeur absolu à code binaire naturel

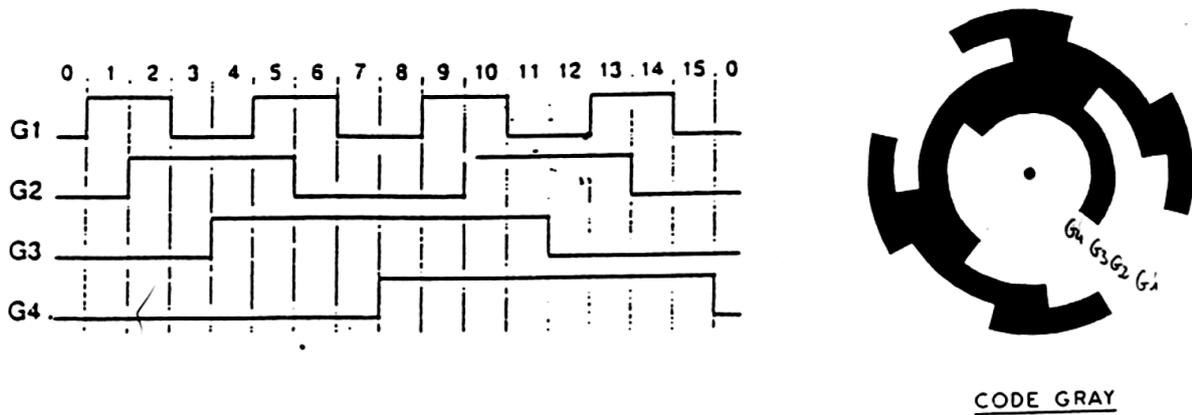


Figure II. 18 : Codeur absolu à code binaire Gray

II.7 Amplificateurs [11]

Dans cette dernière partie du chapitre, nous allons voir le rôle et fonctionnement des amplificateurs en général.

II.7.1 Amplificateurs Opérationnels

Un amplificateur opérationnel est un composant électronique actif. Il est constitué d'un agencement de plusieurs transistors et résistances. Il est contenu dans un boîtier de circuit intégré (figure II.19) de huit broches : deux broches d'entrée appelées respectivement entrée

inverseuse V^- et entrée non inverseuse V^+ . Une seule sortie $V_s = A(V^+ - V^-)$, A étant le gain de l'ampli. Et enfin, deux broches d'alimentation égales, une $+V_{cc}$ et une négative $-V_{cc}$.

Le but d'un amplificateur opérationnel est d'amplifier la différence de potentiel entre les deux entrées, celle-ci est notée \mathcal{E} ou $e = V^+ - V^-$. Il permet aussi de réaliser plusieurs fonctions mathématiques sur les signaux, telles que l'addition, la soustraction, l'intégration etc...

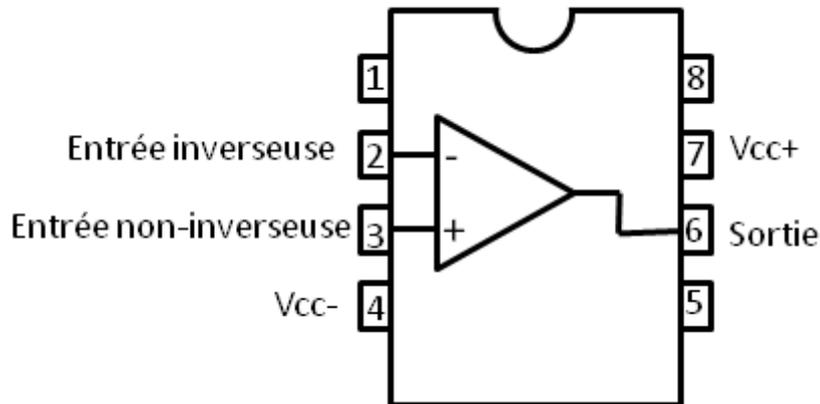


Figure II. 19 : Schéma du circuit intégré d'un amplificateur opérationnel

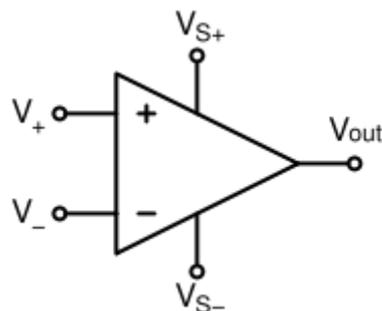


Figure II. 20 : Schéma montrant les entrées et sorties d'un amplificateur opérationnel

II.7.1.1 Montages amplificateur opérationnel

Voici quelques montages de bases d'un amplificateur opérationnel : [11]

a. Comparateur

L'utilisation la plus simple d'un amplificateur opérationnel est de l'utiliser comme comparateur. Comme l'amplificateur opérationnel dispose de deux entrées, on peut les utiliser pour les comparer entre elles afin d'ajuster le niveau de sa sortie. Dans ce cas, la différence de tension observée entre les deux entrées sera multipliée par le gain de l'amplificateur opérationnel.

Le gain d'un comparateur est tellement élevé qu'on le considère étant infini. On note ainsi la formule de sa tension de sortie comme suit :

$$V_s = A(V^+ - V^-) \quad (\text{II.14})$$

b. Non-inverseur

Le montage non-inverseur, comme son nom l'indique, permet d'amplifier un signal sans l'inverser. En effet, comme le signal entre par l'entrée non inverseuse (positive) de l'ampli-op, celui-ci n'inversera pas le signal.

Sa tension de sortie est donnée par la formule suivante :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_e \quad (\text{II.15})$$

La figure (II. 21) montre le schéma d'un amplificateur non-inverseur :

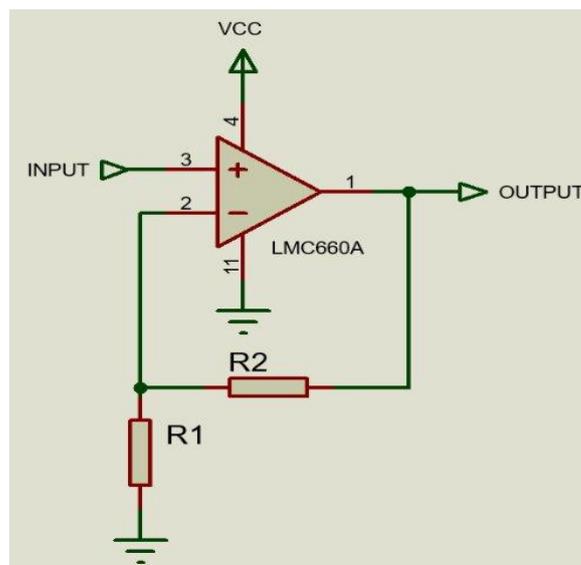


Figure II. 21 : Schéma électrique d'un amplificateur non-inverseur

c. Inverseur

Le montage inverseur, très semblable au montage non-inverseur, permet d'amplifier un signal, mais celui-ci va inverser le signal d'entrée. Comme le signal entre par l'entrée inverseuse (négative) de l'amplificateur opérationnel, le signal de sortie est inversé par rapport au signal d'entrée. La figure ci-dessous (II. 22) illustre le schéma d'un inverseur.

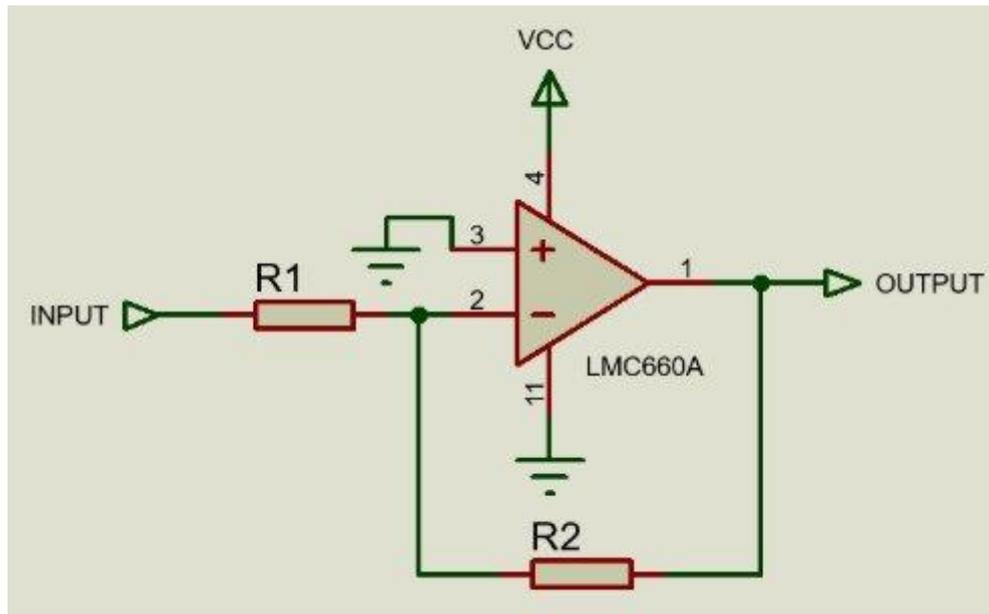


Figure II. 22 : Schéma électrique d'un amplificateur inverseur

La formule de la tension de sortie est la suivante :

$$V_s = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) V_e \quad (\text{II.16})$$

d. Sommateur

Il permet de sommer deux signaux. La figure (II. 23) illustre le schéma électrique d'un amplificateur sommateur :

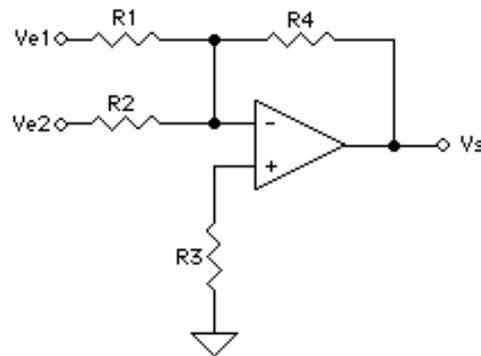


Figure II. 23 : Schéma électrique d'un amplificateur sommateur

La tension V_s peut être donnée comme ceci :

$$V_s = - \frac{R_2}{R_1} (V_2 + V_1) \quad (\text{II.17})$$

e. Dérivateur

Le signal de sortie du dérivateur est la dérivée du signal d'entrée.

Son schéma est représenté comme ceci :

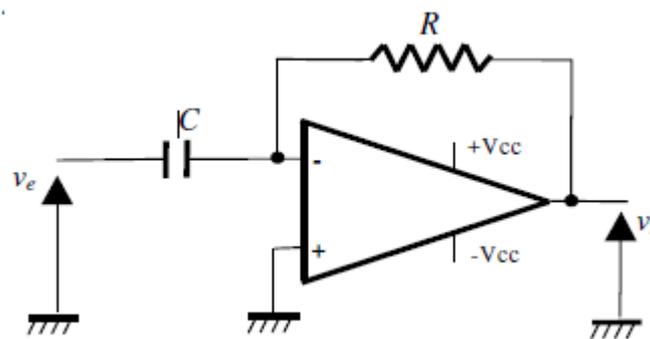


Figure II. 24 : Schéma électrique d'un amplificateur dérivateur

L'expression de V_s est la suivante :

$$V_s = -RC \cdot \frac{dV_e(t)}{dt} \quad (\text{II.18})$$

f. Intégrateur

Ce montage permet d'avoir une sortie qui est l'intégrale de l'entrée. La figure (II. 25) représente son schéma électrique.

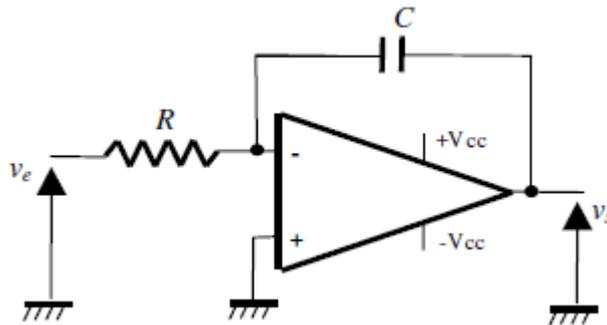


Figure II. 25 : Schéma électrique d'un intégrateur

La formule de la sortie est donnée comme suit :

$$V_s = -1/RC \cdot \int V_e dt \quad (\text{II.19})$$

Les amplificateurs, dérivateur et intégrateur, peuvent aussi être utilisés en tant que filtres.

II.7.1.2 Caractéristiques d'un amplificateur opérationnel [11]

On va citer quelques-unes des caractéristiques d'un amplificateur opérationnel :

Tension de décalage (offset) : C'est la tension différentielle qu'il faut appliquer entre les deux entrées d'un amplificateur opérationnel pour que la tension de sortie au repos soit nulle. Elle agit comme générateur de tension d'erreur placé en série avec l'une des entrées de l'amplificateur opérationnel.

Gain : C'est le coefficient d'amplification noté A.

Impédance d'entrée et de sortie : Dans le cas d'un ampli op idéal, on considère que l'impédance d'entrée est infinie. L'impédance de sortie est nulle.

Le Slew-Rate : (SL) est la vitesse de croissance maximale de la tension de sortie. Il s'exprime en Volts par micro seconde.

II.7.2 Amplificateur de puissance [12]

L'amplificateur de puissance est un amplificateur avec des caractéristiques différentes. Nous commencerons par le définir.

II.7.2.1 Définition

Un amplificateur de puissance amplifie la puissance. Il permet de fournir une puissance en sortie, beaucoup plus grande que celle fournie par le signal de commande à l'entrée, tout en gardant la même forme du signal. Il est utilisé dans la commande des actionneurs (haut-parleur, moteur ...).

Les amplificateurs de puissance sont caractérisés par des classes de fonctionnement.

II.7.2.2 Classes de fonctionnement d'un amplificateur de puissance

Soit un transistor et sa droite de charge illustrés sur la figure (II. 26). Selon la position du point de repos, on définit des classes de fonctionnement différentes :

- a. **Classe A :** Il n'y a ni saturation ni blocage lors du fonctionnement. Le point de repos idéal est le point A situé au milieu de la droite de charge.
- b. **Classe B :** le transistor est conducteur pendant exactement une demi-période. Le point de repos idéal est le point B avec $I_c=0$, $V_c=E$.
- c. **Classe AB :** Il est difficile, en pratique, d'avoir un fonctionnement en classe B c.à.d avec un courant I_c nul. Il est donc plus simple de polariser le transistor en maintenant un léger courant I_c (point AB).
- d. **Classe C :** le transistor est conducteur pendant moins d'une demi-période.

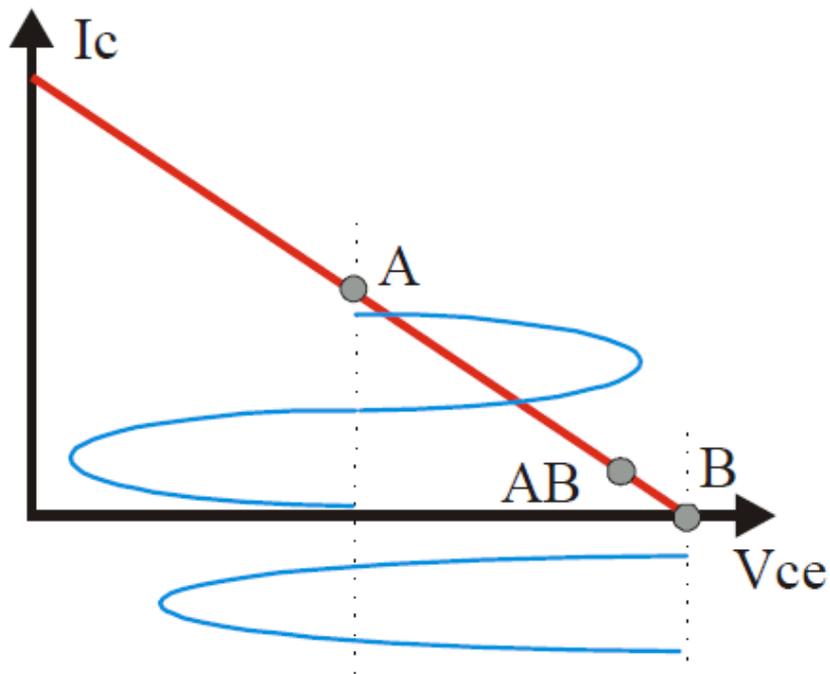


Figure II. 26 : Droite de charge d'un transistor

II.8 Conclusion

Nous nous sommes intéressées dans ce deuxième chapitre aux moteurs à courant continu, aux tachymètres, codeurs optiques incrémentaux et absolus ainsi qu'aux amplificateurs, qui sont les principaux éléments constituant le banc didactique 33-033 que nous allons étudier dans le chapitre suivant.

Chapitre III

*Etude du banc didactique de
type 33-033*

III.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'étude du banc didactique 33-033, mais avant d'y procéder, commençons d'abord par définir un banc didactique en général. Qu'est-ce qu'un banc didactique ? Un banc didactique par définition est un ensemble d'équipements destiné à l'enseignement de diverses technologies. Les bancs didactiques présentent un intérêt pédagogique puisqu'ils permettent aux étudiants de visualiser très clairement le fonctionnement de systèmes ou de sous-systèmes, améliorant ainsi leur compréhension sur les phénomènes mis en jeu. Par conséquent, cela leur donne la possibilité de développer leurs compétences en matière d'analyse, d'évaluation ainsi que l'interprétation des résultats pour facilement résoudre les problématiques qu'ils peuvent rencontrer dans le domaine professionnel. Notre travail consiste à l'étude du banc didactique de type 33-033. Ce dernier est utilisé pour l'asservissement analogique et numérique de position ainsi que la régulation analogique et numérique de vitesse d'un moteur à courant continu.

III.2 Description du banc didactique de type 33-033

Le banc didactique 33-033 est un système qui a été conçu dans un but pédagogique afin d'étudier les principes de la régulation PID (P : proportionnelle, I : intégrale et D : dérivée) analogique et numérique ainsi que le rôle de chacune de ces actions (P, I, D) dans la variation de vitesse d'un moteur à courant continu et cela en jumelant la théorie et la pratique.

Ce système utilise un mécanisme d'asservissement comprenant : un moteur à courant continu, un ensemble de capteurs, de transducteurs et des correcteurs analogiques et numériques ainsi qu'une interface adéquate pour nous faciliter la manipulation, l'exploitation et l'analyse des résultats visualisés. Il comporte 24 TP répartis de manière progressive, allant du plus basique au plus complexe. On peut citer : Encodeurs incrémentaux et absolus, contrôleurs analogiques (PID), analyse de la fonction de transfert etc... La figure (III. 1) représente le banc didactique 33-033.



Figure III. 1 : Photo du banc didactique 33-033

III.3 Etude des différents blocs du banc 33-033

Le banc didactique 33-033 est constitué de trois blocs :

- Une unité mécanique (33-100).
- Une unité électronique (33-125).
- Une alimentation (01-100)

III.3.1 Unité mécanique (33-100)

C'est la partie comportant les éléments mécaniques du banc, qui est constituée de :

Moteur 24V/3000 RPM: c'est un moteur à courant continu et à aimant permanent tournant dans les 2 sens (à deux phases) comme l'illustre la photo suivante [13].

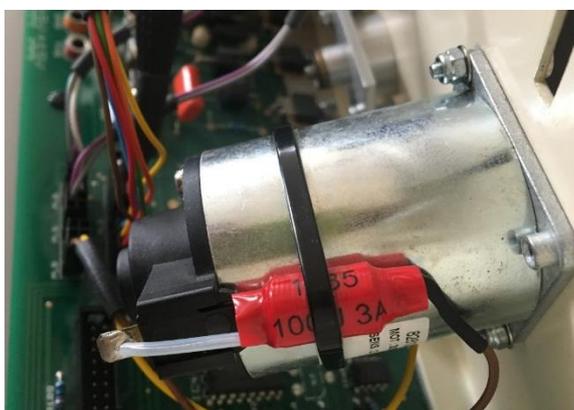


Figure III. 2 : Photo du moteur à courant continu du banc 33-033

Chapitre III : Etude du banc didactique de type 33-033

Potentiomètre 360° : Il joue le rôle d'un transducteur puisqu'il convertit la tension générée par la rotation du moteur en un degré de rotation c'est-à-dire le potentiomètre permet la mesure de la position du moteur [13].

L'unité contient deux potentiomètres, le premier est un potentiomètre de sortie qui donne un signal θ_o de $\pm 10V$. Le deuxième potentiomètre est un potentiomètre d'entrée de signal θ_i de $\pm 1V$. La photo ci-dessous correspond aux potentiomètres.

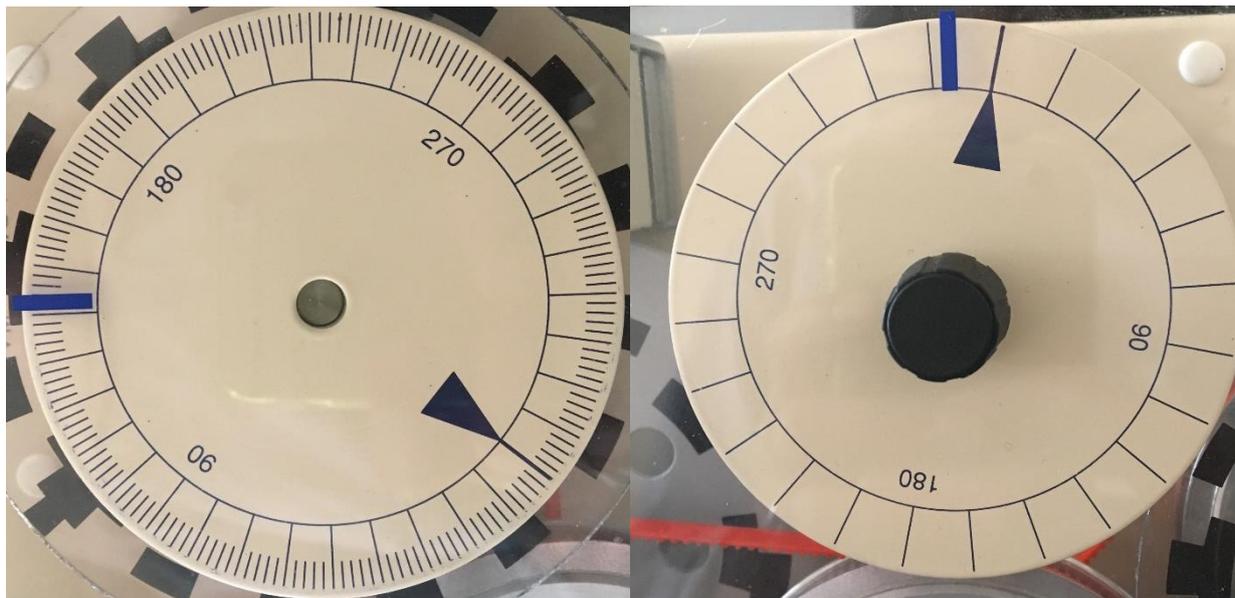


Figure III. 3 : Photo illustrant les 2 potentiomètres du banc

Tachymètre (générateur tachymétrique) 12V/1000 RPM: Il est monté sur l'axe du moteur. Son fonctionnement consiste à convertir l'énergie mécanique fournie par le moteur (vitesse de rotation) en une tension proportionnelle à cette dernière. La figure suivante est une illustration du tachymètre [13].



Figure III. 4 : Photo du tachymètre

Chapitre III : Etude du banc didactique de type 33-033

Codeur incrémental : Il est utilisé dans la régulation numérique dans le but de mesurer la vitesse et la position du moteur en délivrant des impulsions lorsque ce dernier tourne. Il contient 2 pistes de huit zones transparentes et opaques chacune [14]. Celui-ci est représenté par la figure III.5.

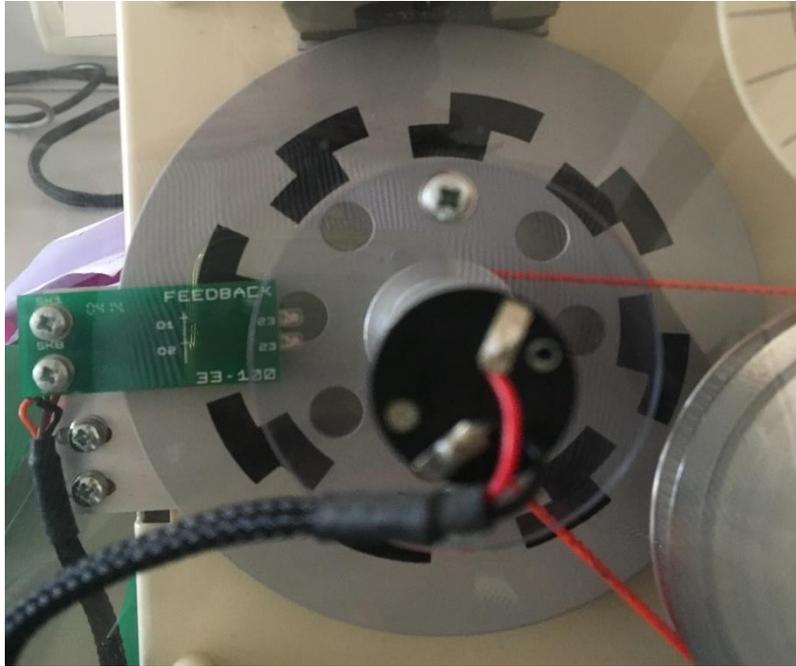


Figure III. 5 : Photo du codeur incrémental

Codeur absolu : Egalement utilisé dans la régulation numérique pour la mesure de vitesse et la position du moteur. Ce codeur utilise un code Gray à 6 bits. La figure (III. 6) ci-dessous montre le disque du codeur [14].

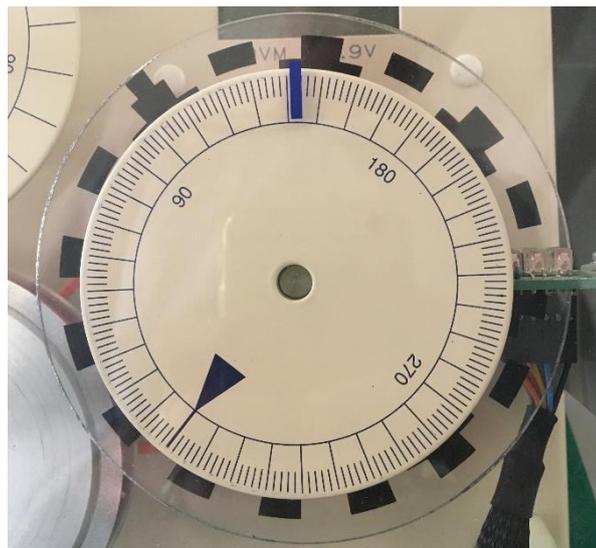


Figure III. 6 : Photo du codeur Gray

Réducteur de vitesse 32 :1 : Il s'agit d'une poulie reliée d'un côté au codeur incrémental et de l'autre au codeur Gray (absolu) via des courroies de sorte à ce que quand le codeur incrémental qui est relié à l'axe du moteur fait 32 tours, le codeur Gray lui ne fait qu'un seul tour. Une photo du réducteur est donnée ci-dessous :

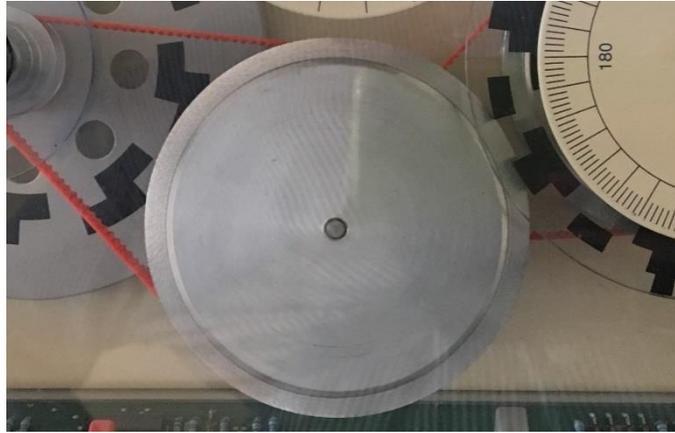


Figure III. 7 : Photo du réducteur

Afficheur LCD : Il sert à fournir une lecture directe de la vitesse de rotation du tachymètre en tour/min dans un intervalle de 00,0 – 99,9 tr/min. Il est positionné au-dessus du codeur absolu.

Le frein magnétique (Brake Magnet) : consiste en un aimant permanent qui peut être basculé sur un disque en aluminium. Lors de la rotation du disque, des courants de Foucault circulent dans la zone du disque dans l'espace magnétique. Ces courants réagissent avec le champ magnétique pour produire un couple opposé à la rotation. Cet élément apparaît clairement dans la photo suivante [15].

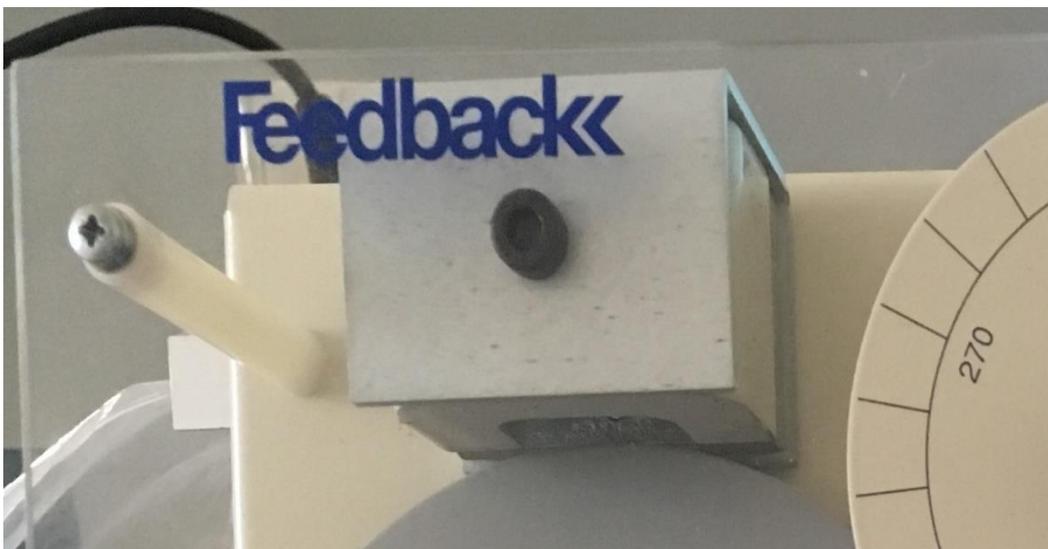


Figure III. 8 : Photo du frein du moteur

La photo ci-dessous correspond à l'unité mécanique du banc.

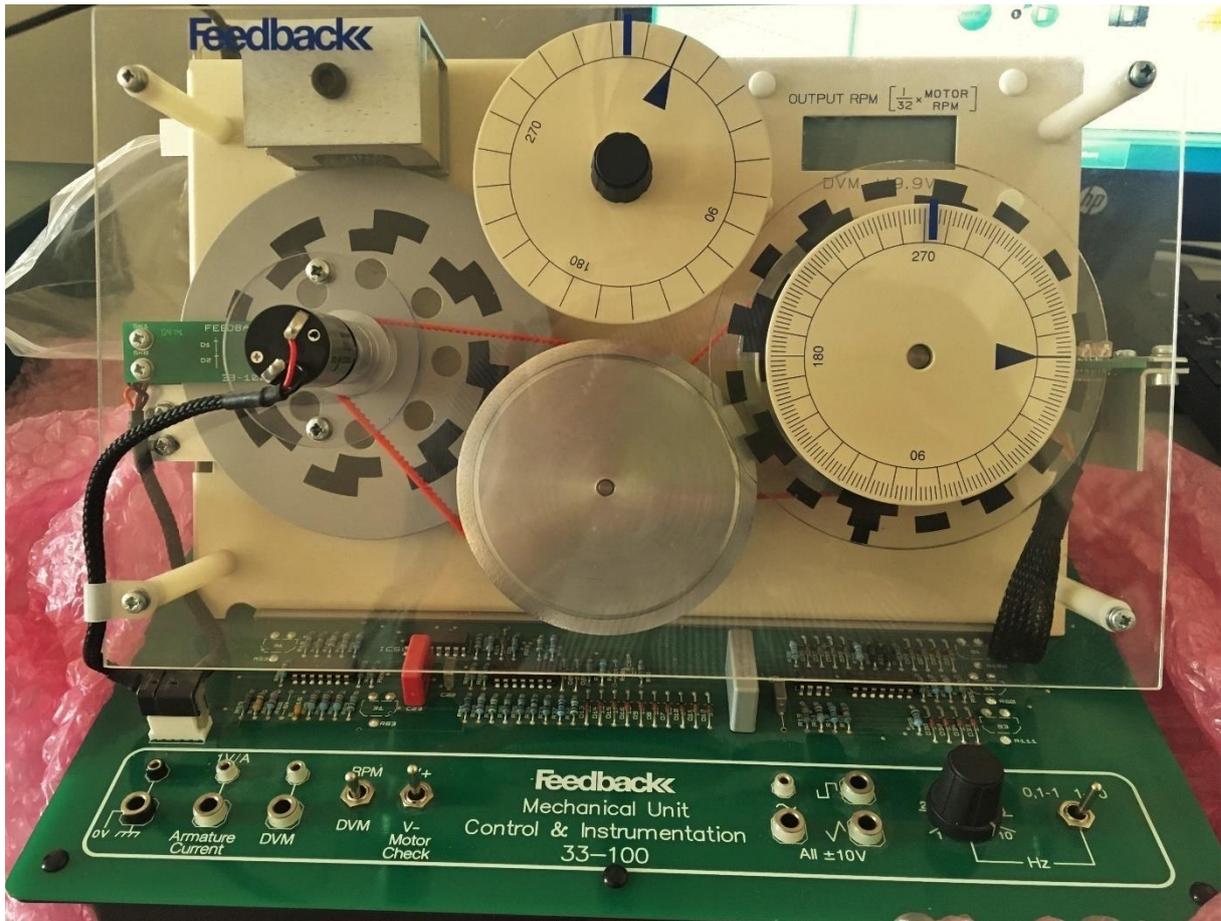


Figure III. 9 : Photo de l'unité mécanique (33-100)

III.3.2 Unité électronique (33-125)

C'est l'unité de contrôle et de commande du banc, il s'agit d'un ensemble de composants électroniques (condensateurs, résistances, circuits intégrés, processeur...) rassemblés dans un boîtier. Elle se compose de différents blocs disposés comme suit :

A : Amplificateur de puissance : C'est un amplificateur dont la sortie est généralement définie comme une puissance plutôt que simplement comme une tension ou un courant. Il est utilisé lorsqu'un signal est nécessaire pour travailler sur un appareil nécessitant de l'énergie pour le faire fonctionner. Son objectif dans notre unité est de faire tourner le moteur. Il a trois entrées, une entrée (+), une entrée (-) qui font tourner le moteur dans deux sens opposés et une entrée PWM. L'amplificateur est muni d'un potentiomètre dit zéro offset qui permet au moteur de tourner dans les deux sens en l'absence d'une tension d'entrée, c'est pour cela qu'il faut toujours l'ajuster à zéro. Il est aussi relié à un bloc noté **B** qui est un schéma représentatif de l'unité

mécanique. Celui-ci permet la supervision et la visualisation du comportement des différents éléments à travers un ordinateur auquel il est connecté grâce à un câble USB (représenté par la lettre C de la figure III. 10) [13].

D : Générateur de signaux : (Sweep Function Generator) qu'on peut injecter à l'entrée de l'amplificateur de puissance (moteur). Il compte trois potentiomètres, dont deux pour régler respectivement la fréquence maximale et la fréquence minimale, un troisième pour le réglage de l'amplitude du signal à injecter. Il contient trois bornes dont chacune se voit associée un type de signal, le premier est un signal sinusoïdal, le deuxième est un signal carré et enfin un troisième signal triangulaire.

E : PID analogique numérique : Le dernier bloc à présenter est dédié au correcteur PID. Cette partie est divisée en deux : à gauche le PID analogique, à droite le PID numérique.

Le PID analogique est un circuit comportant principalement un ensemble d'amplificateurs et de résistances propres à chacune des actions du PID à savoir l'action P, l'action I, et l'action D, plus des potentiomètres pour régler les gains K_i et K_d de l'action I et D respectivement. Le gain K_p a la valeur 1 par défaut mais peut être réglé avec un potentiomètre qui se trouve à l'extérieur de ce bloc sous le nom de « attenuator » indiqué sur la figure III. 10 en bleu.

Il contient aussi des condensateurs placés en parallèle avec l'ampli op du gain K_i , sous forme d'un switch ou commutateur, qui est initialement à sa position droite et cela pour éviter de court-circuiter les condensateurs.

Le PID numérique a un circuit réduit et simplifié, il ne comporte qu'un processeur à quatre entrées : la première est relié aux deux encodeurs incrémental et Gray, la deuxième et troisième sont des canaux convertisseurs analogique/numérique pour convertir les signaux injectés en une valeur numérique qui peut être lue et traitée par le processeur, la dernière entrée est sampling clock. Il a également deux sorties une première qui est un convertisseur cette fois numérique/analogique qui permet la visualisation des signaux après le passage par le PID, la deuxième sortie est une sortie PWM.

Les gains K_p , K_i et K_d du PID numérique sont réglables depuis l'ordinateur.

F : Amplificateur : à la fois sommateur et inverseur (Summing and error amplifier en anglais) connecté à une série de résistances et un condensateur. Il est utilisé dans plusieurs applications dont la régulation PID analogique.

Cette unité comporte aussi 8 bornes qui servent à la visualisation des signaux d'entrées et de sorties.

Les LEDs de 1 à 6 sont spécifiques à l'encodeur gray (absolus) dont chaque LED correspond à un bit du code Grey qui est à six bits. Quant aux trois autres A, B et I sont propres à l'encodeur incrémental d'où chaque LED représente une piste [16].

La figure suivante montre les différentes parties citées ci-dessus.

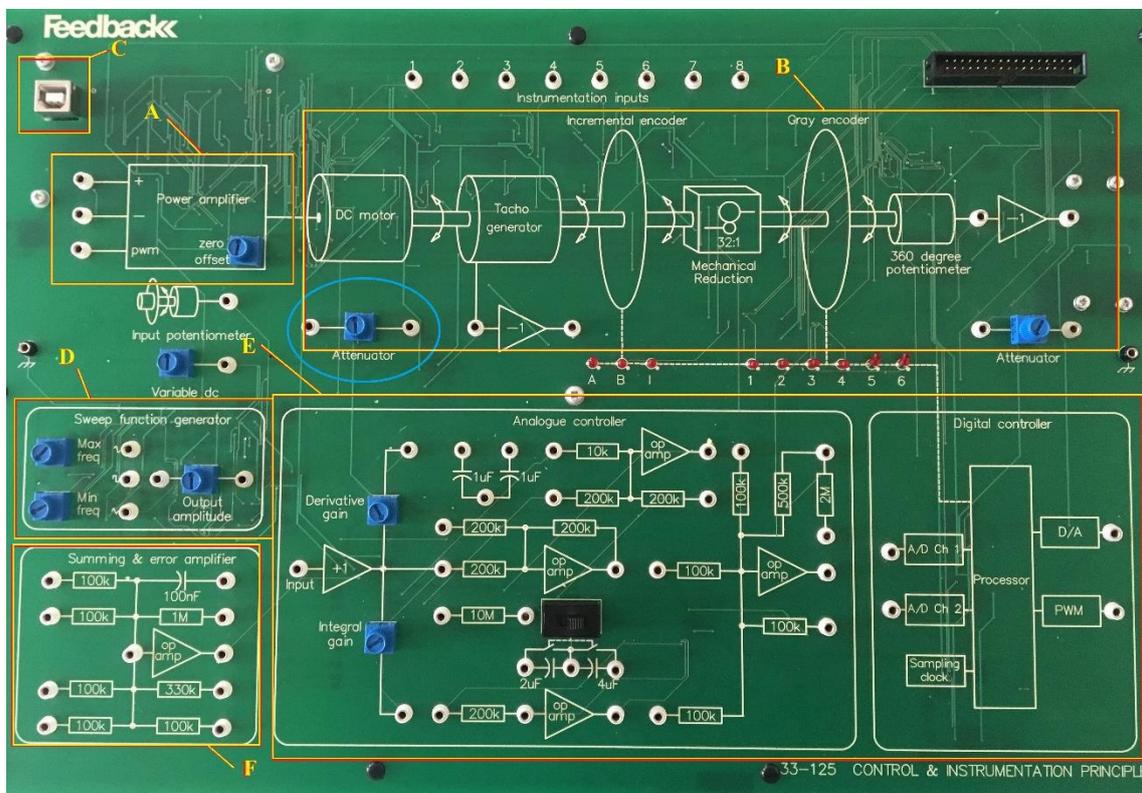


Figure III. 10 : Photo des différentes parties constituant l'unité électronique

III.3.3 L'alimentation (01-100)

Il s'agit d'un boîtier avec quatre sources de tension en jaune +5V/1.0A, en rouge +15V/1.5A, en noir 0V, en bleu -15V/1A et une mise à terre GND en vert. Tel qu'il est montré dans la figure ci-dessous.



Figure III. 11: Photo de l'alimentation du banc

Les unités sont reliées entre elles de la manière suivante :

L'alimentation est connectée à l'unité mécanique avec un câble à 4 fiches Jack (figure III. 12) dont chaque couleur correspond à une entrée de cette dernière comme indiqué sur la figure (III. 13).

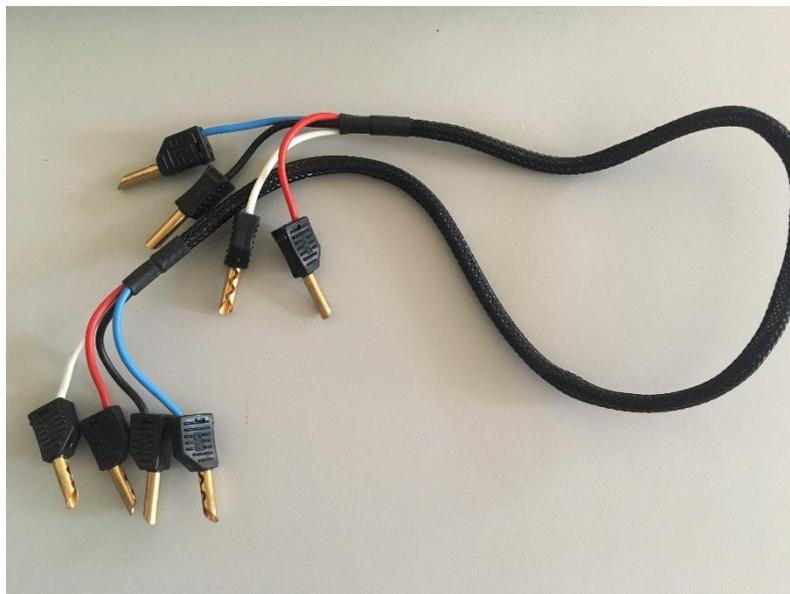


Figure III. 12 : Photo montrant le câble à fiches Jack

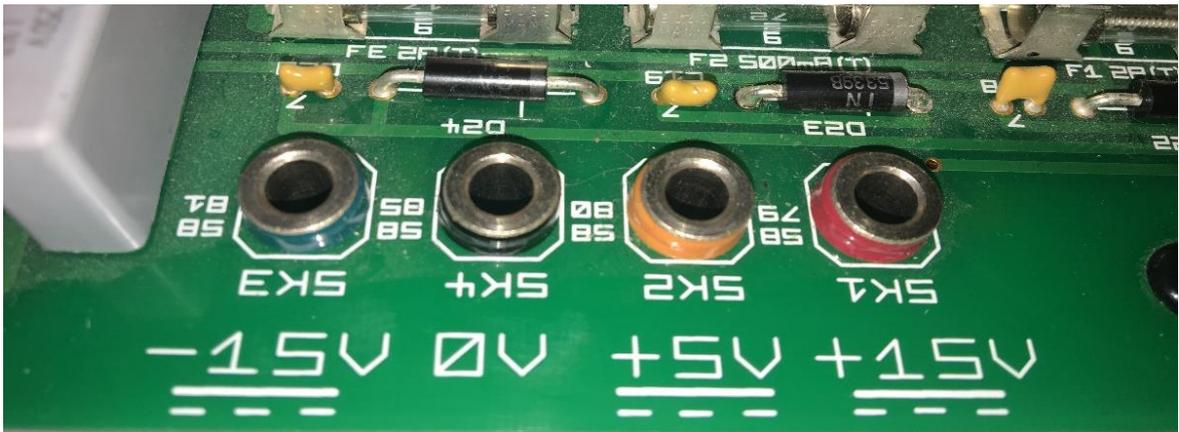


Figure III. 13 : Photo correspondant aux entrées de l'unité mécanique

Les unités mécanique et électronique sont reliées par un câble ruban (voir figure III.14).



Figure III. 14 : Câble ruban

Enfin l'unité électronique est reliée à l'ordinateur par un câble USB (voire figure III.15).



Figure III. 15 : Photo du câble USB reliant l'unité électronique à l'ordinateur

III.4 Logiciel Feedback- Espial

Espial est un logiciel créé par l'entreprise du même nom en collaboration avec l'entreprise Feedback. Espial est chargée de fournir les logiciels adéquats pour assurer le fonctionnement et l'exploitation des bancs didactiques créés par Feedback.

Au lancement du logiciel Espial, une fenêtre s'affiche nous offrant le choix du banc avec lequel on veut travailler, à savoir :

- 33-033 Control & Instrumentation Principles.
- 38-003 Procon Level and Flow with Temperature.
- 38-004 Procon Pressure Process.

La figure (III. 16) nous montre la fenêtre d'affectations :

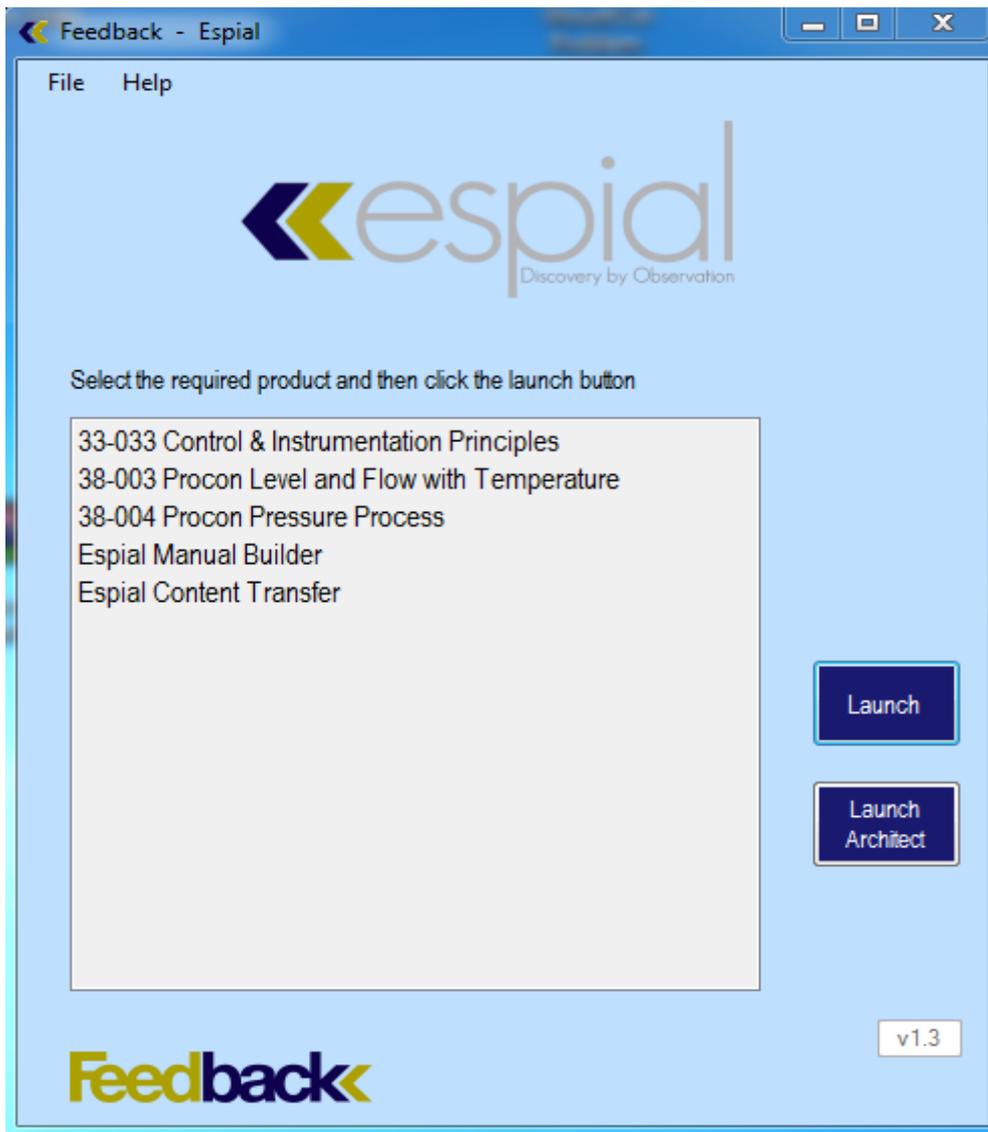


Figure III. 16 : Capture d'écran de la fenêtre d'affectations

Chapitre III : Etude du banc didactique de type 33-033

Le banc avec lequel on va travailler va être le 33-033 Control & Instrumentation Principles. En cliquant dessus et sur Launch qui veut dire lancer, on est affecté à une deuxième fenêtre contenant les 24 TP (applications) cités comme dans la figure (III.17)



Figure III. 17 : Capture d'écran des 24 TP sur le logiciel

Le logiciel porte une large variété de TPs, dont le 1^{er} est entièrement dédié à la familiarisation avec le logiciel et le matériel. Les autres, nous permettent de faire plusieurs applications portant sur les différents éléments du banc. La figure représente la liste des TP.

Une fois le TP désiré est sélectionné, on est redirigé vers une page comme dans la figure (III. 18).

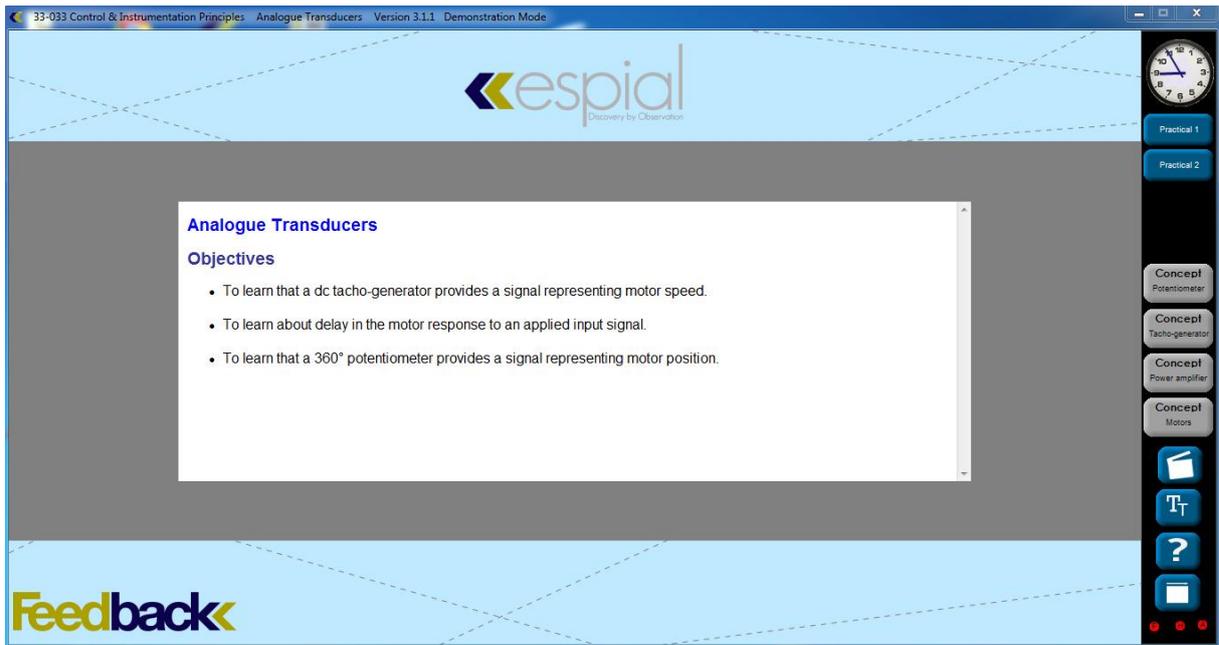


Figure III. 18 : Capture d'écran de l'interface du logiciel après sélection du TP

Cette page ou fenêtre est divisée en deux, le centre de cette dernière où le nom du TP (application) sélectionné avec les objectifs sont affichés et la barre du côté qui contient les travaux pratiques (Practical 1, Practical 2...) reliés à l'application choisie. La documentation sur les éléments importants utilisés dans le TP est donnée dans les icônes portant comme titre « concepts » (figure III.19). Ainsi que quatre autres icônes, une pour voir une vidéo du branchement à effectuer, une seconde qui s'agit d'un dictionnaire technique, une autre est une icône d'aide et enfin une dernière pour repositionner les fenêtres par défaut.

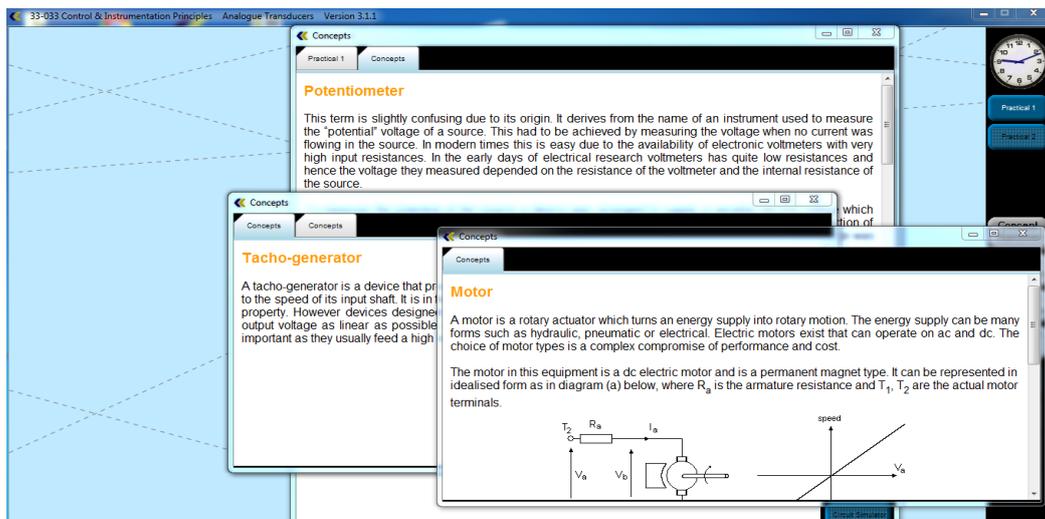


Figure III. 19 : Capture d'écran correspondant à la page affichée en cliquant sur les icônes concept

Chapitre III : Etude du banc didactique de type 33-033

En désignant le TP (Practical 1 ou 2), on se retrouve dans un nouvel espace avec la même interface que la précédente, à savoir le centre qui porte l'énoncé du TP avec les étapes à suivre ainsi que son schéma bloc. Sur le côté, nous retrouvons plusieurs icônes. D'abord, l'objectif du TP, puis les connections nécessaires une par une. Les icônes restantes sont spécifiques à la visualisation des signaux (figure III.20). Nous citons dans ce qui suit les plus utilisés :

Data Logger : c'est un oscilloscope virtuel, il peut afficher quatre signaux à la fois (voire figure III.21).

Bar Display : affiche les signaux sous forme de polygone (voire figure III.22).

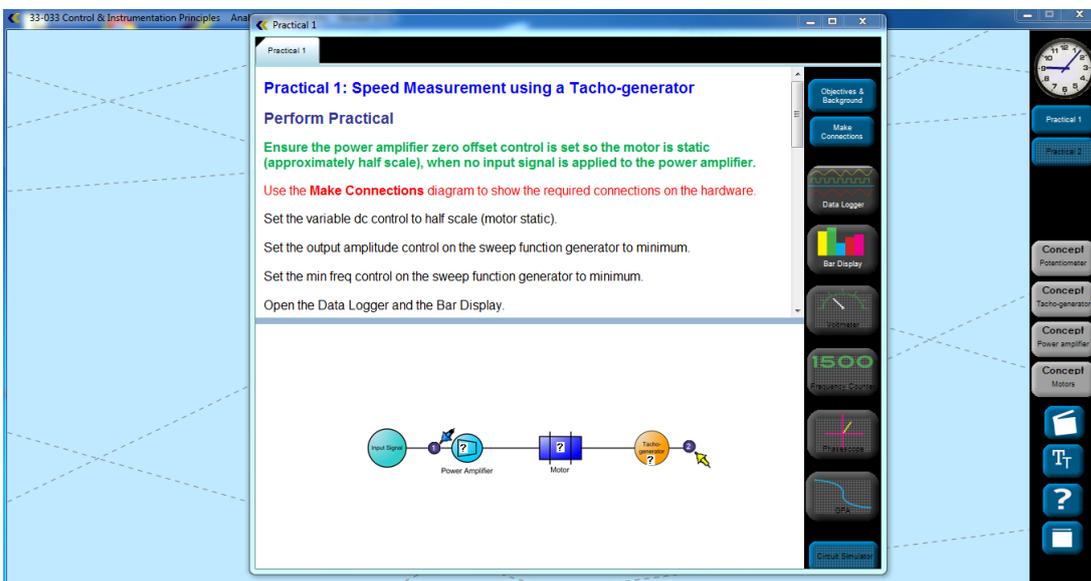


Figure III. 20 : Capture d'écran désignant la fenêtre affichée après le choix du TP

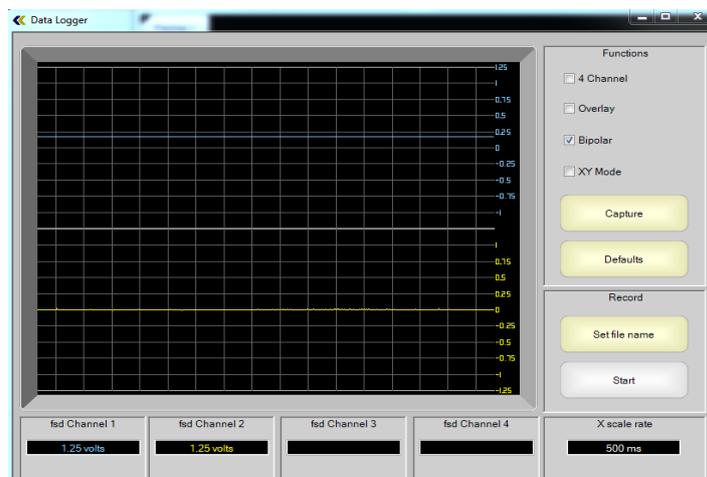


Figure III. 21 : Capture d'écran du Data Logger

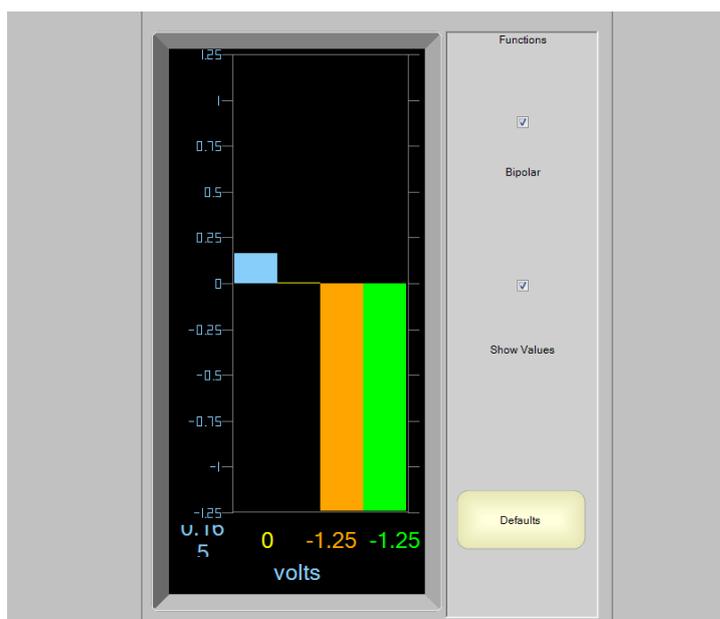


Figure III. 22 : Capture d'écran du Bar Display

Grâce à la fluidité de son interface et la simplicité de son utilisation, le logiciel Espial nous permet l'exploitation de tous les éléments du banc, de mieux les connaître ainsi que leurs rôles. Ça nous aide aussi à visualiser les résultats obtenus, les analyser pour mieux comprendre les combinaisons des différents éléments.

III.5 Conclusion

L'étude du banc didactique 33-033 nous a permis de constater que ce dernier est très intéressant pour apprendre davantage dans le domaine de l'asservissement analogique et numérique de position ainsi que la régulation analogique et numérique de vitesse d'un moteur à courant continu.

Grâce aux multiples applications qu'il propose notamment sur la régulation PID, cela va nous aider à étudier l'influence du correcteur PID analogique sur la variation de vitesse d'un moteur à courant continu qui fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre IV

Régulation analogique P, PI,

PID de vitesse du banc

didactique 33-033

IV.1 Introduction

Ce chapitre a pour but d'étudier la régulation PID d'un moteur à courant continu ainsi que l'influence de chaque action sur ce dernier. Nous allons tenter de trouver la meilleure combinaison de valeurs des coefficients pour annuler l'écart statique, atteindre la consigne en un temps réduit, éliminer le dépassement pour avoir un système précis et stable quelques soient les perturbations appliquées.

IV.2 Régulation analogique PID du banc didactique 33-033

Dans cette partie du chapitre, nous allons assigner à chacun des coefficients K_p , T_i , T_d du régulateur PID des valeurs différentes afin de déterminer les effets engendrés sur le système.

Après avoir fait les branchements nécessaires, nous avons d'abord ajusté la fréquence de manière à obtenir une période de 6s, ensuite, l'amplitude du signal d'entrée à 0.6V.

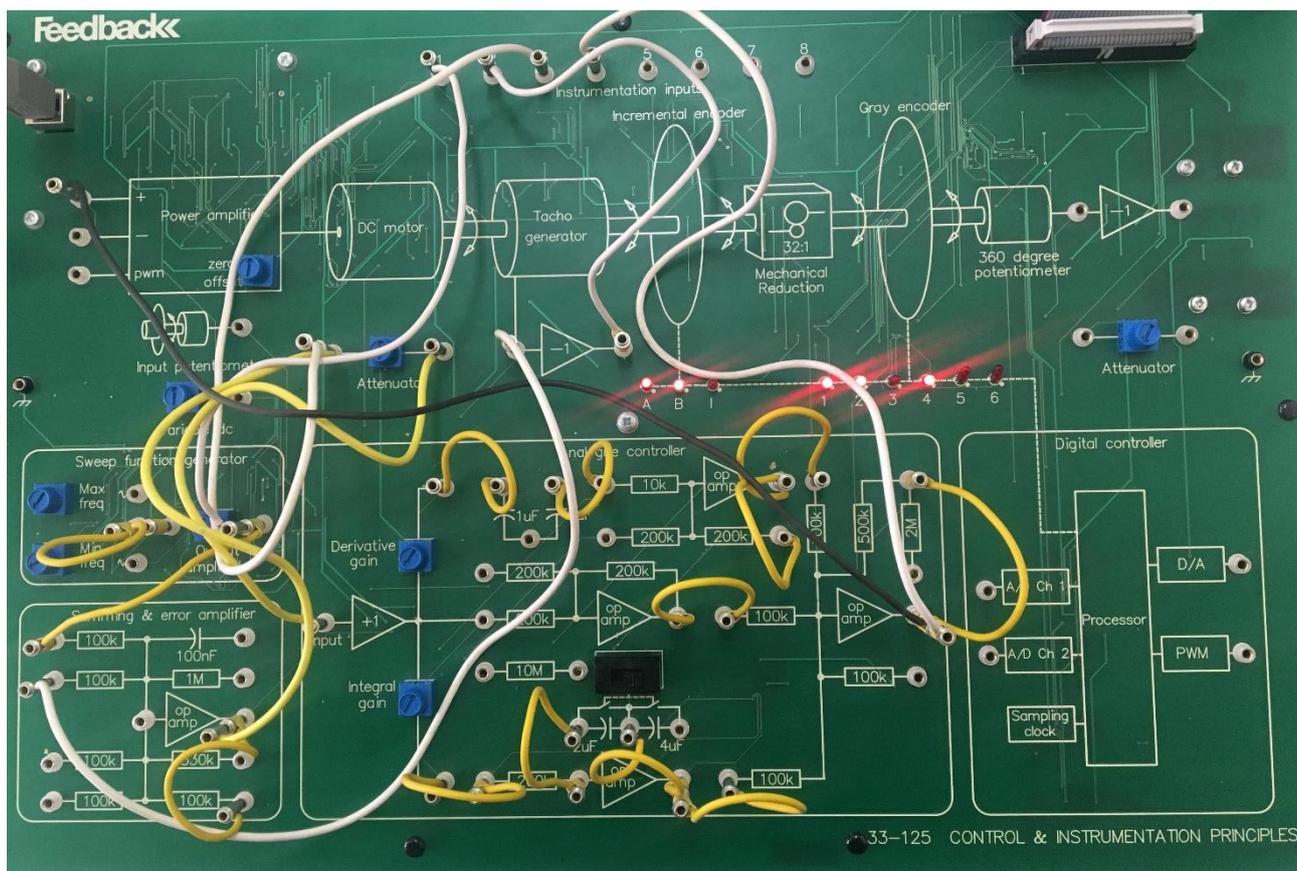


Figure IV. 1 : Photo illustrative du branchement effectué

La figure ci-dessous illustre les signaux visualisés, tel que : Nous avons, en bleu le premier signal qui est le signal d'entrée (consigne), le deuxième en jaune représente la sortie du tachymètre (vitesse du moteur), le troisième en orange est l'erreur (écart statique) qui est la différence entre l'entrée (consigne) et la sortie du capteur, c'est-à-dire, la différence entre le signal en bleu et le signal en jaune. Enfin, le signal vert qui est le signal de commande (la sortie du correcteur).

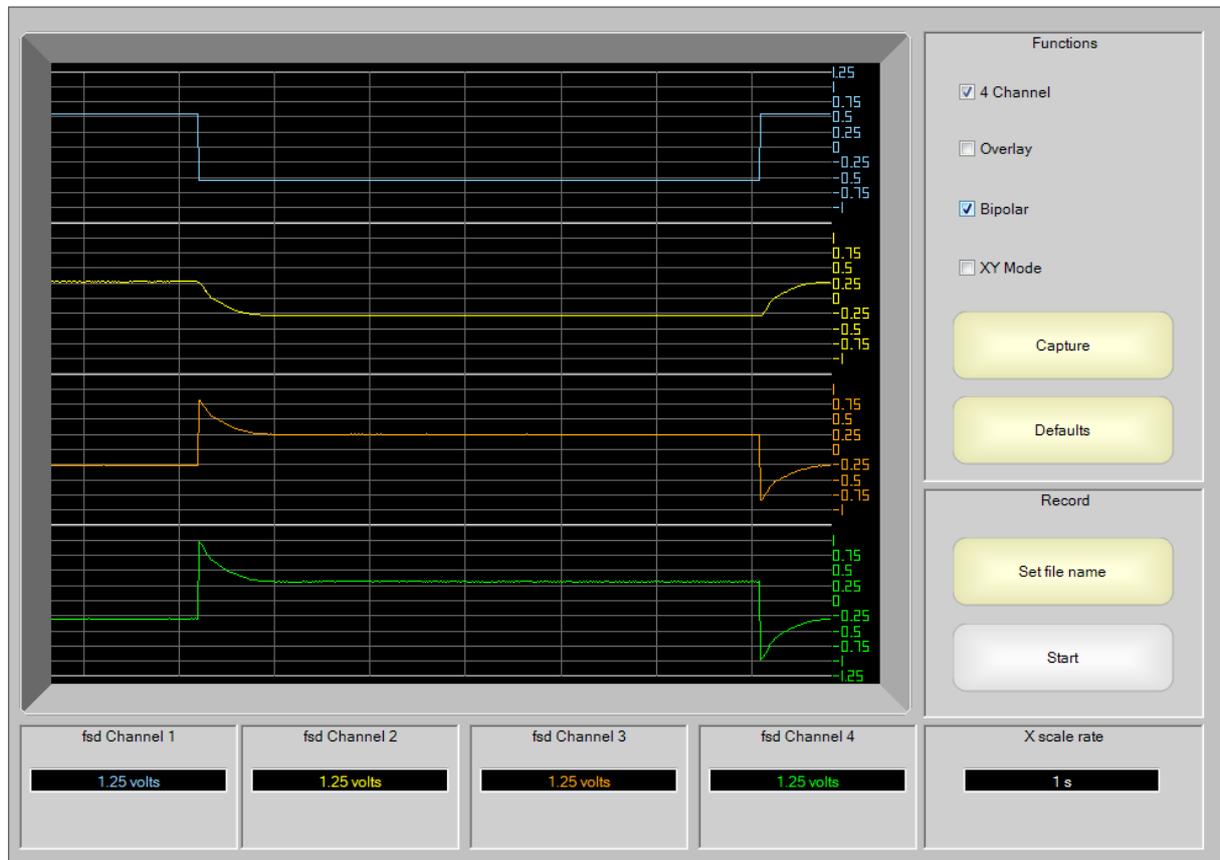


Figure IV. 2 : Représentation des signaux affichés

IV.2.1 Régulation Proportionnelle

Pour commencer, nous affecterons une valeur de 40% au coefficient K_p . Tout en gardant les coefficients T_i et T_d nuls. Les signaux obtenus sont illustrés par la figure ci-dessous.

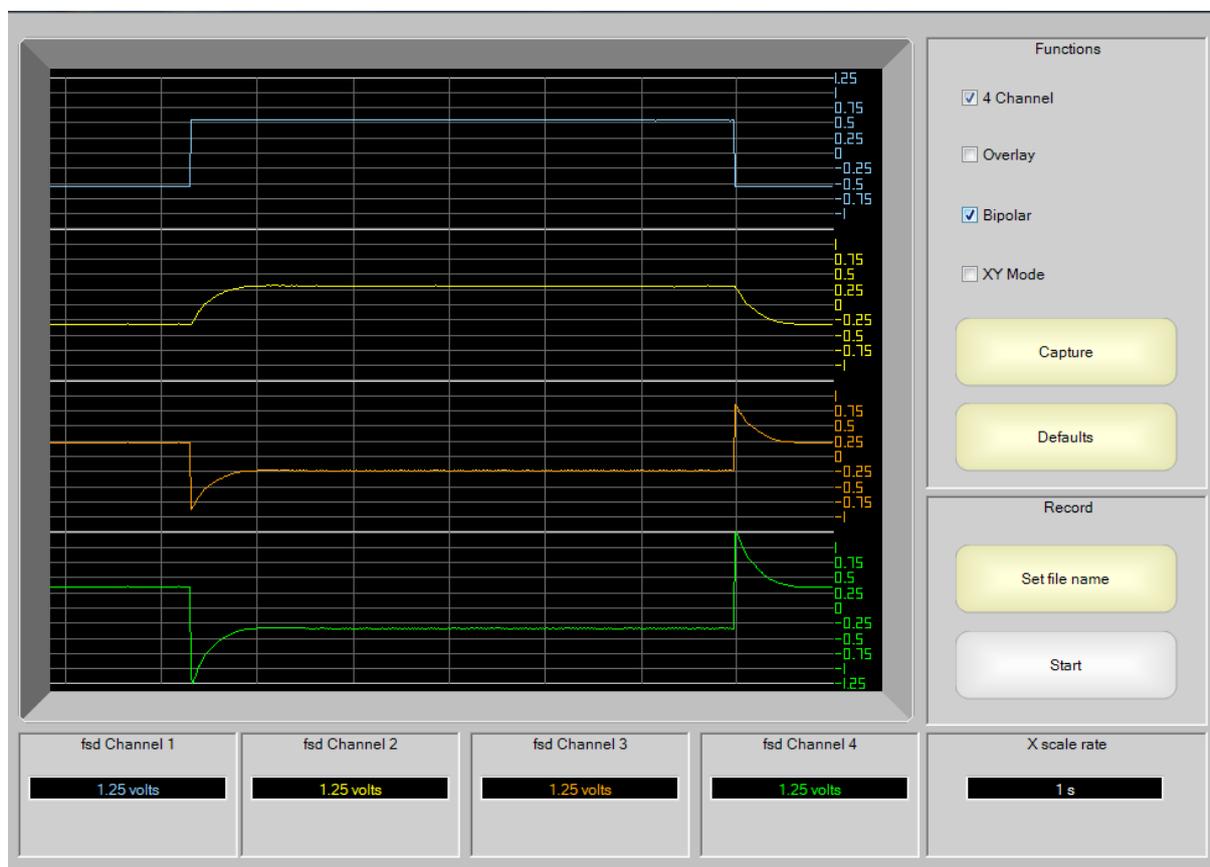


Figure IV. 3 : Représentation des signaux à une valeur de $K_p=40\%$

Interprétation des résultats :

Nous remarquons que, le signal de sortie du tachymètre (jaune) c'est-à-dire la vitesse du moteur, bien qu'il suive la consigne, n'arrive pas à l'atteindre. Comme nous pouvons le constater, le signal de la consigne (bleu) est d'amplitude 0.6V tandis que le signal de la mesurande (vitesse, jaune) est d'amplitude 0.35V. Par contre, ce dernier est proportionnel et inverse au signal d'erreur (orange) qui est d'amplitude de 0.25V. L'inversement du signal d'erreur est dû à l'amplificateur inverseur du correcteur.

Quant au sens de rotation du moteur, celui-ci dépend du signal d'erreur. Le moteur tourne dans le sens des aiguilles d'une montre lorsque le signal d'erreur (orange) est positif et du sens inverse lorsque celui-ci est négatif.

Nous déduisons qu'à cette valeur du coefficient, le système n'est pas précis puisqu'il ne réduit pas l'erreur ce qui empêche le moteur d'atteindre la vitesse désirée (consigne). Cette même valeur n'améliore pas pour autant la rapidité du système, nous avons un temps de montée de valeur $t_m^1 = 0.4s$. Ce qui nous pousse à augmenter la valeur du K_p à 50%.

Interprétation des résultats pour $K_p = 50\%$:

L'augmentation du gain K_p à 50% a fait apparaître un léger dépassement² $D\% = 5\%$ sur la sortie, par contre nous avons gagné un peu de rapidité vu la diminution du temps de montée $t_m = 0.3s$. S'ajoute à cela le signal de sortie du tachymètre se rapproche de la valeur de la consigne. Il atteint une amplitude de 0.4V ce qui augmente la vitesse du moteur.

Le signal d'erreur quant à lui diminue à un signal d'amplitude de 0.2V ce qui donne un système plus précis comme nous le montre la figure (IV. 4).

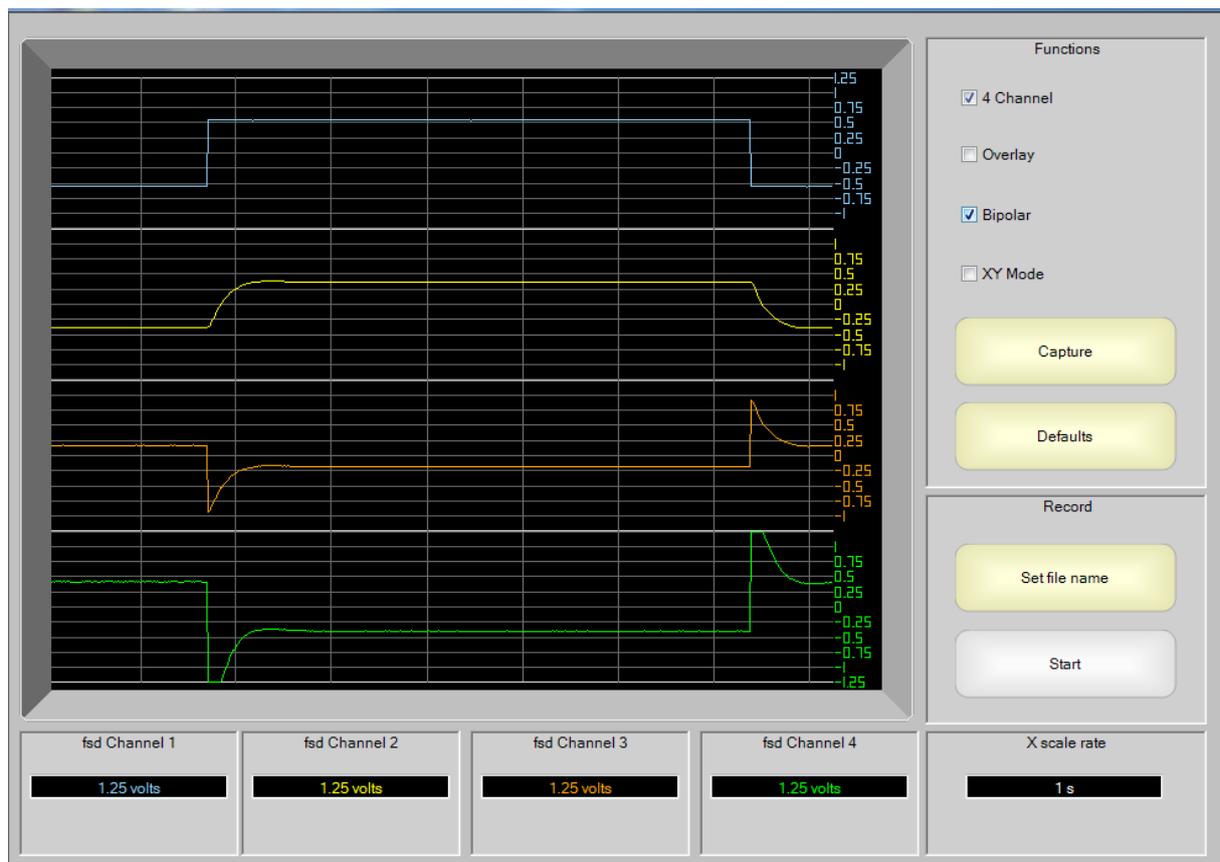


Figure IV. 4 : Représentation des signaux à une valeur de $K_p=50\%$

¹ T_m : Temps de montée c'est le temps que met un système pour atteindre sa valeur finale V_f .

² $D\%$: dépassement $\frac{D_{max} - D_{\infty}}{D_{max}}$

Interprétation des résultats pour $K_p = 75\%$:

En augmentant le gain K_p à une valeur de 75% à peu près, nous remarquons sur la figure (IV. 5) que l'amplitude du signal d'erreur a diminué de moitié soit d'une valeur de 0.2V à 0.1V, ceci implique le rapprochement du signal de sortie du tachymètre (jaune) de la consigne (bleu) ce qui fait que la vitesse du moteur augmente davantage, de ce fait le système gagne en précision. Il gagne aussi en rapidité, puisque le temps de montée cette fois ci passe à une valeur de $t_m = 0.2s$. Sauf que ceci inclut l'accroissement du dépassement déjà aperçu à un gain de valeur de 50%.

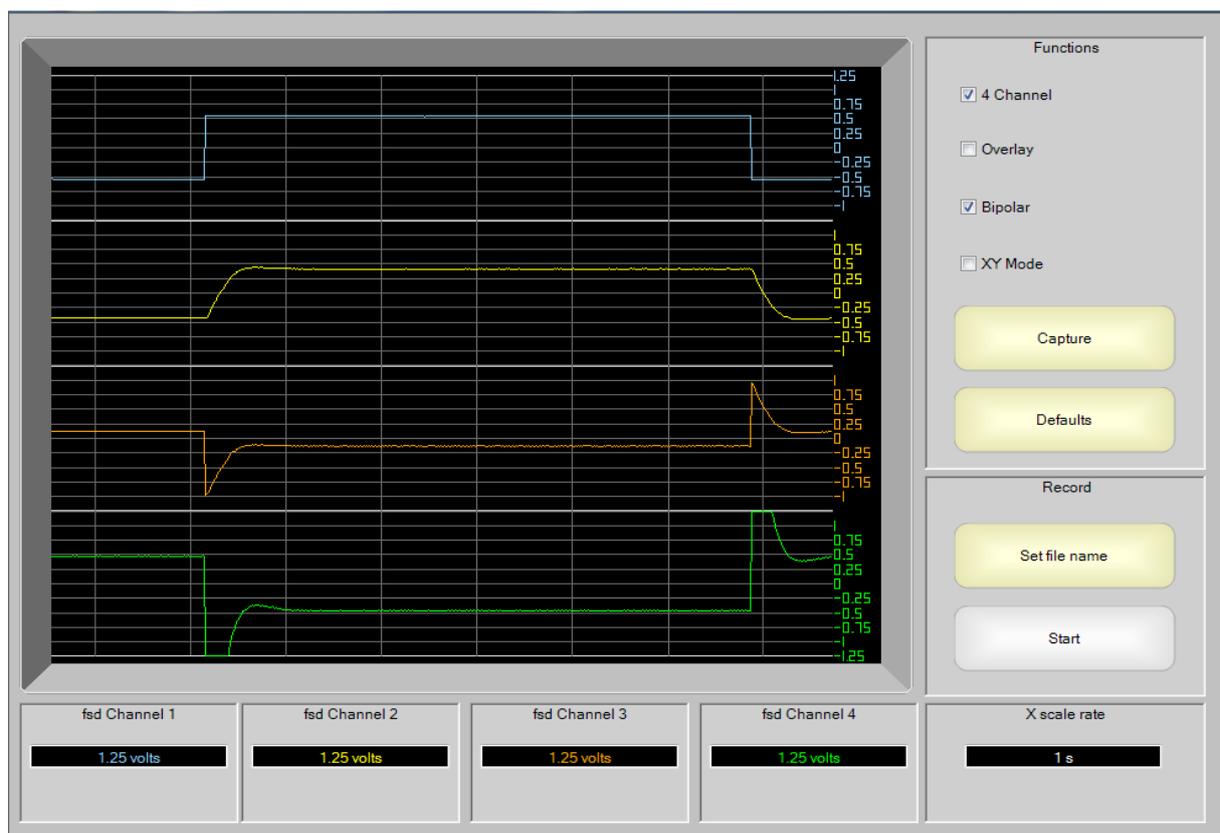


Figure IV. 5 : Représentation des signaux à une valeur de $K_p=75\%$

Le dépassement devient de plus en plus considérable avec l'augmentation du gain ceci jusqu'à sa valeur max où il atteint la valeur de $D\% = 23\%$. Les figures ci-dessous illustrent les signaux visualisés.

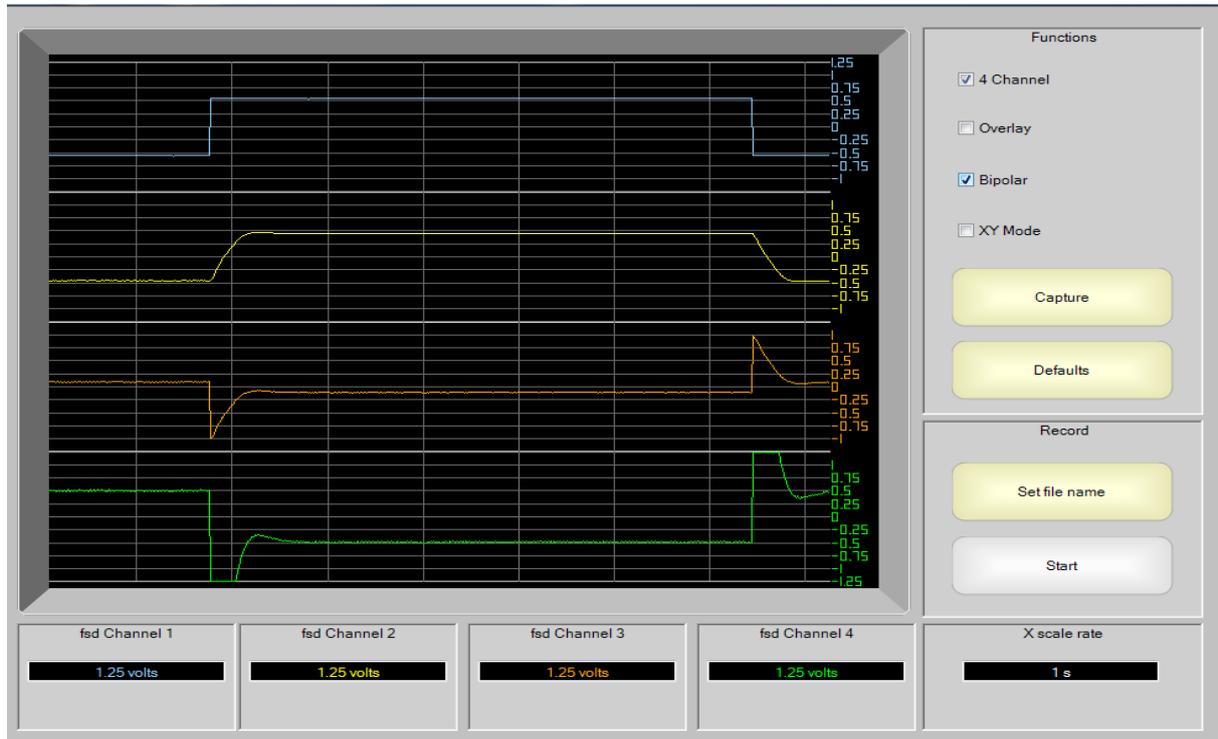


Figure IV. 6 : Représentation des signaux à une valeur maximale de gain K_p

Suite aux différents tests effectués, nous constatons que l'action proportionnelle permet au système de gagner en précision et en rapidité au détriment de la stabilité et du dépassement.

Afin de remédier à cela, on va faire appel à l'action intégrale.

IV.2.2 Régulation Proportionnelle Intégrale

Pour activer l'action intégrale, il suffit de mettre le commutateur du condensateur à gauche.

Dans un premier temps nous fixons le K_p à une valeur de 50%, et nous varierons le coefficient T_i .

Interprétation des résultats pour $T_i=40\%$:

Nous remarquons que le système arrive à atteindre la limite de la consigne, ceci est dû à l'erreur qui tend vers zéro progressivement. Nous constatons aussi que, malgré que le dépassement soit éliminé le système devient très lent puisque ce dernier a un temps de montée $t_m= 2.9s$ et un temps de réponse $tr_{5\%}^3 = 3.2s$. La vitesse du moteur dans ce cas augmente proportionnellement à l'erreur. Pour éviter de surmener le moteur, on augmente encore le coefficient T_i . La figure (IV. 7) illustre les signaux obtenus.

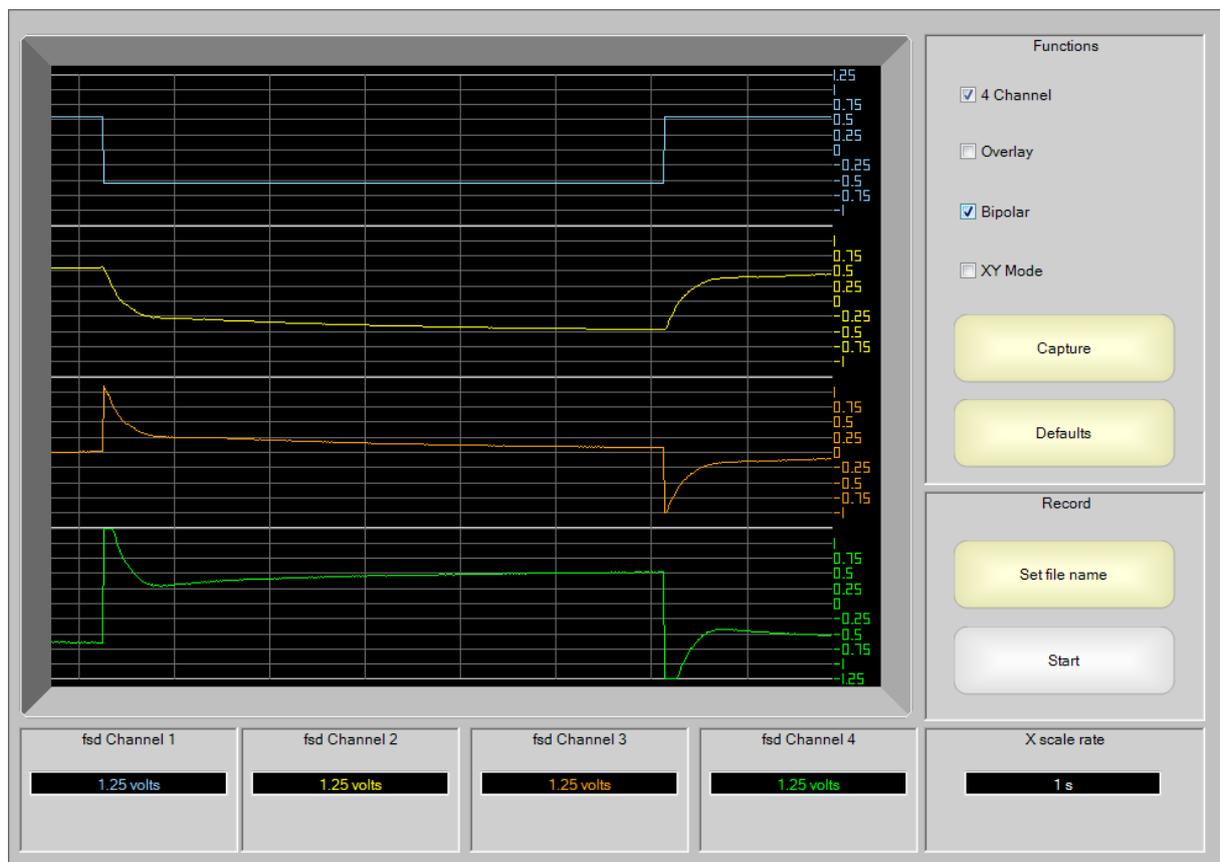


Figure IV. 7 : Représentation des signaux à des valeurs $K_p=50\%$ et $T_i=40\%$

³ Temps de réponse $T_{r5\%}$: C'est le temps mis par la mesure pour atteindre sa valeur définitive à $\pm 5\%$

Interprétation des résultats pour $T_i = 50\%$:

Pour cette valeur du coefficient, le correcteur arrive à corriger l'erreur puisque celle-ci s'annule ce qui mène la vitesse du moteur à atteindre la consigne. Malgré un temps de montée $t_m = 2.9s$ et un temps de réponse $t_{5\%} = 3.2s$ qui sont visiblement réduits par rapport à la première valeur du T_i , le système reste toujours lent. La figure (IV. 8) présente les courbes des signaux obtenus et affichés pour les valeurs du $K_p = 50\%$ et $T_i = 50\%$.

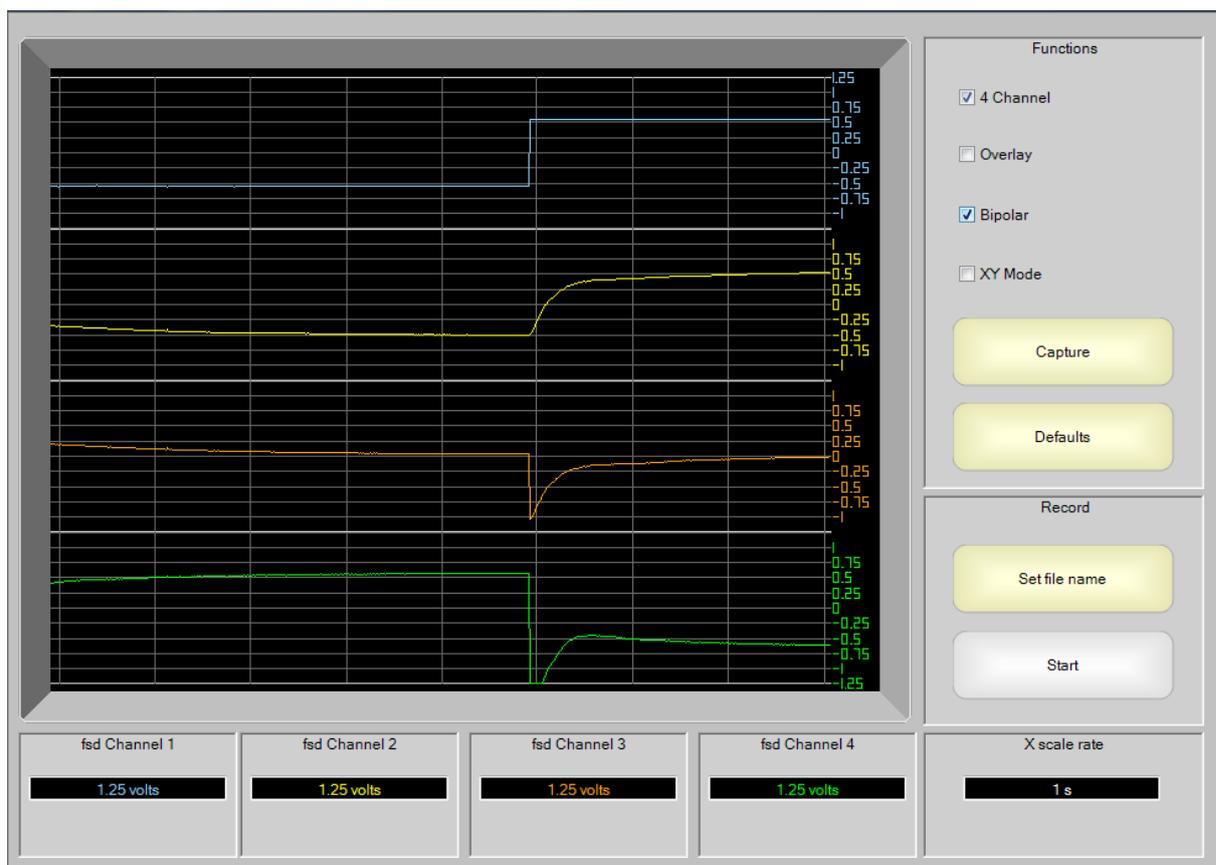


Figure IV. 8 : Représentation des signaux à des valeurs $K_p = 50\%$ et $T_i = 50\%$

Pour cela nous allons encore une fois augmenter la valeur de T_i à 75% .

Interprétation des résultats pour $T_i = 75\%$:

Dans ce cas, nous remarquons directement que le moteur réagit mieux. En effet, le temps de réponse et le temps de montée sont considérablement réduits : $t_m = 0.3s$, $t_{r5\%} = 0.5s$, ce qui fait que la vitesse atteint la consigne plus rapidement. Nous comprenons à partir de là que l'erreur est éliminée. Ainsi on gagne en rapidité et en précision. La figure (IV. 9) présente les courbes des signaux obtenus et affichés pour les valeurs du $K_p = 50\%$ et $T_i = 75\%$.

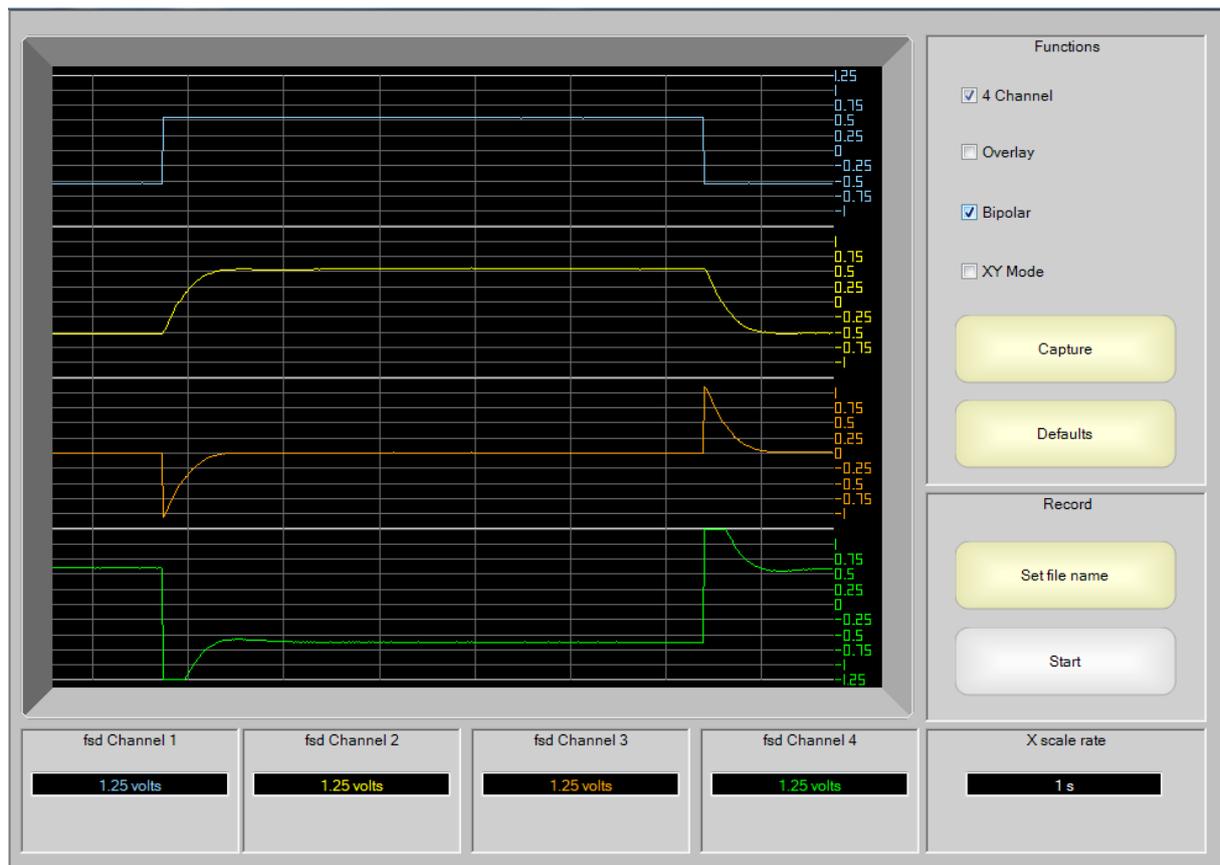


Figure IV. 9 : Représentation des signaux à des valeurs $K_p = 50\%$ et $T_i = 75\%$

Nous allons encore augmenter le coefficient T_i à une valeur de 80% pour voir les effets qui peuvent être engendrés.

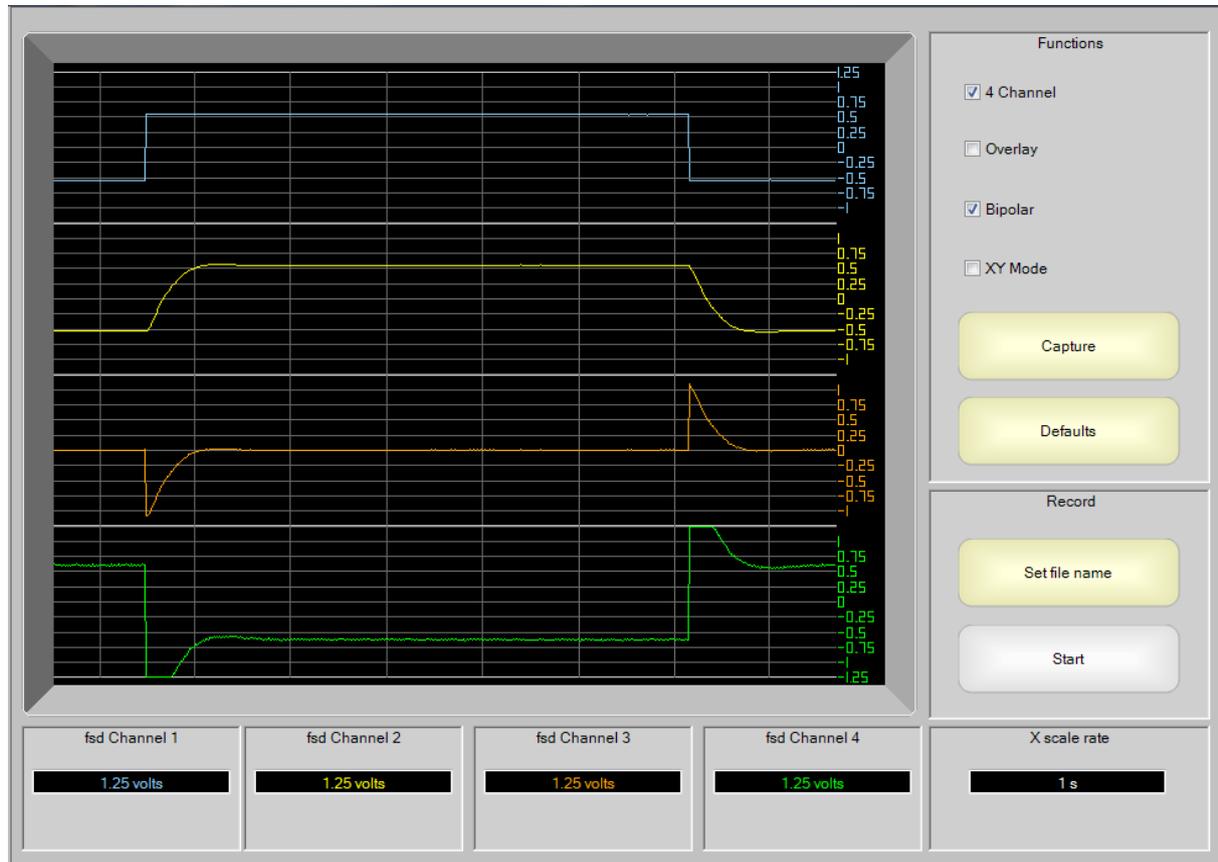
Interprétation des résultats pour $T_i=80\%$:

Figure IV. 10 : Représentation des signaux à des valeurs $K_p=50\%$ et $T_i=80\%$

Comme nous l'illustre la figure (IV. 10) ci-dessus, il y'a un dépassement de valeur $D\%=9\%$, et ce dernier s'accroît avec l'augmentation du T_i . Le système ne gagne pas vraiment en rapidité puisqu'il n'y a pas de diminution de temps de montée et de réponse $t_m=0.3s$ et $tr_{5\%}=0.5s$. Nous pourrions dire donc qu'au-delà des valeurs $K_p=50\%$ et $T_i=75\%$, le système perd en stabilité car il subit des dépassements importants avec des grandes valeurs de K_p et de T_i . Sur la figure suivante les valeurs de K_p et T_i sont égales à 60% et 80% respectivement, ce qui engendre un dépassement de valeur $D\%=27\%$.

Interprétation des résultats pour $K_p<50\%$ $T_i=60\%$:

En diminuant le coefficient K_p à une valeur inférieure à 50% et pour une valeur élevée du coefficient T_i (ici 60%), le système élimine le dépassement au détriment de la rapidité. Comme

nous pouvons le constater sur la figure (IV. 11), le système est assez lent car il met du temps pour atteindre le régime permanent. On note $tr_{5\%}=1.4s$ et $t_m=1s$.

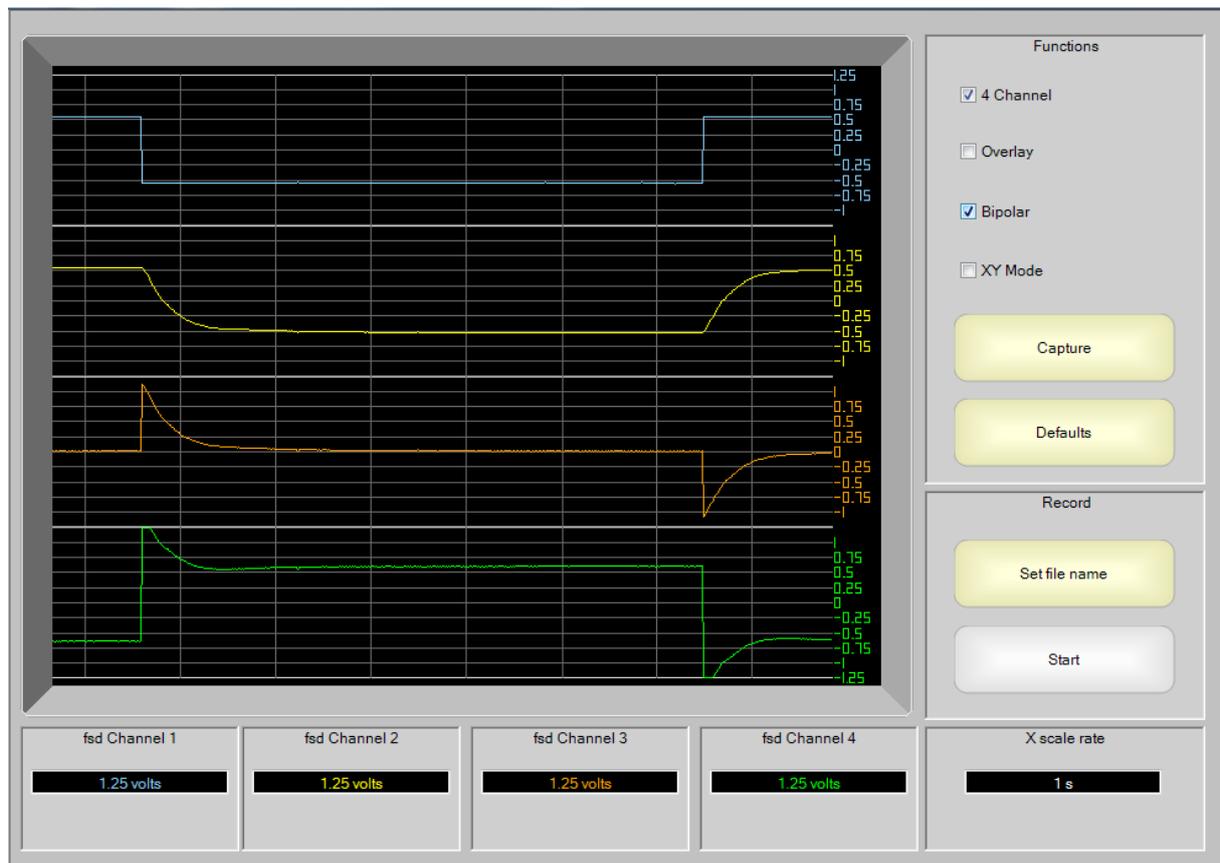


Figure IV. 11 : Représentation des signaux à des valeurs $K_p < 50\%$ et $T_i = 60\%$

Interprétation des résultats pour $K_p = 60\%$ et $T_i = 80\%$:

En prenant un K_p supérieur à 50%, le problème du dépassement ressurgit. Nous obtenons ainsi les signaux représentés dans la figure (IV. 12) suivante.

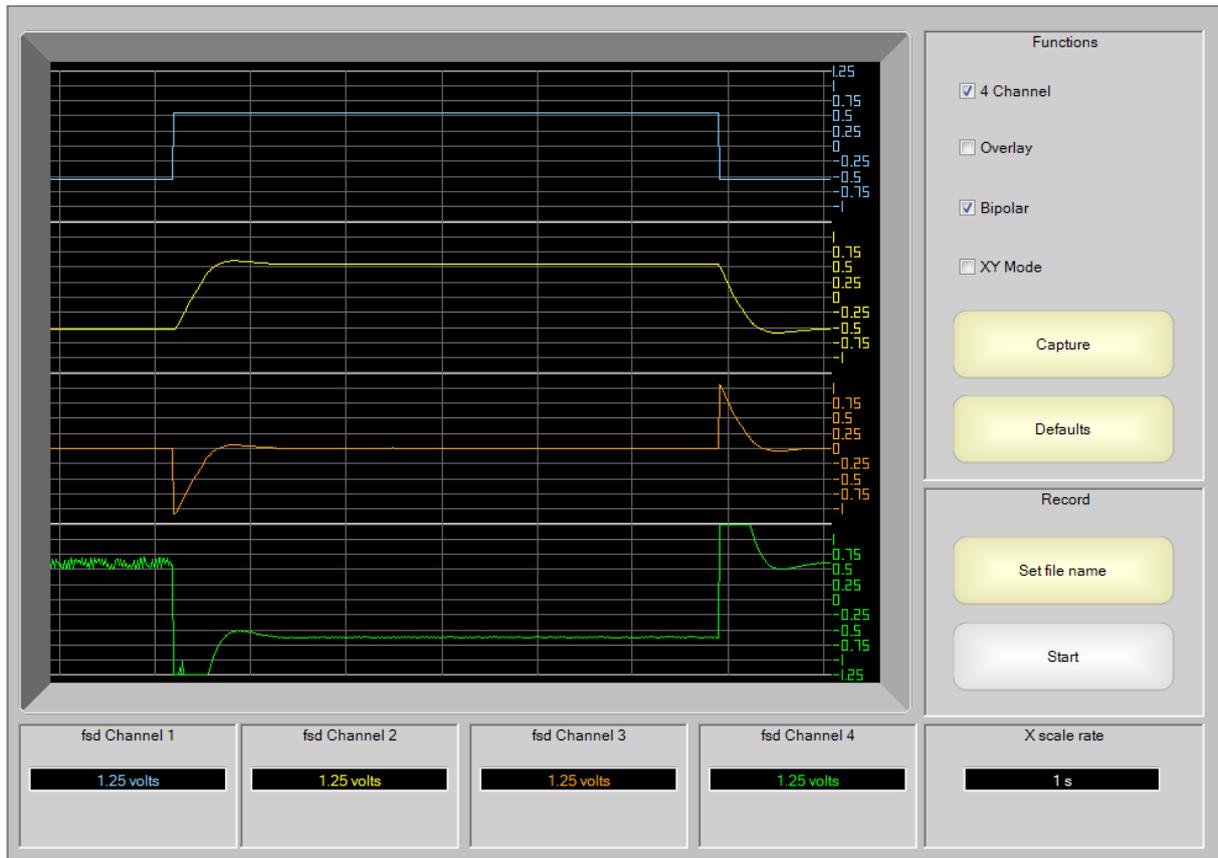


Figure IV. 12 : Représentation des signaux à des valeurs $K_p=60\%$ et $T_i=80\%$

Nous allons donc faire appel à l'action dérivée afin de remédier à ce problème.

IV.2.3 Régulation Proportionnelle Intégrale Dérivée

Pour les mêmes valeurs du K_p et T_i , on rajoute un coefficient $T_d=60\%$.

Interprétation des résultats pour $K_p=60\%$, $T_i=80\%$ et $T_d=60\%$:

Le dépassement a bel et bien diminué, il est à présent à 18%, une valeur qui reste assez élevée. Nous remarquons aussi l'apparition d'oscillations sur le signal de commande (vert), ce qui veut dire que notre moteur est bruité. Ce qui est normal puisque le correcteur dérivateur est un filtre passe haut, puisqu'il laisse passer les signaux de hautes fréquences. L'action dérivée n'a aucun effet sur la rapidité du système. La figure (IV. 13) illustre les courbes signaux pour les valeurs $K_p=60\%$, $T_i=80\%$ et $T_d=60\%$.

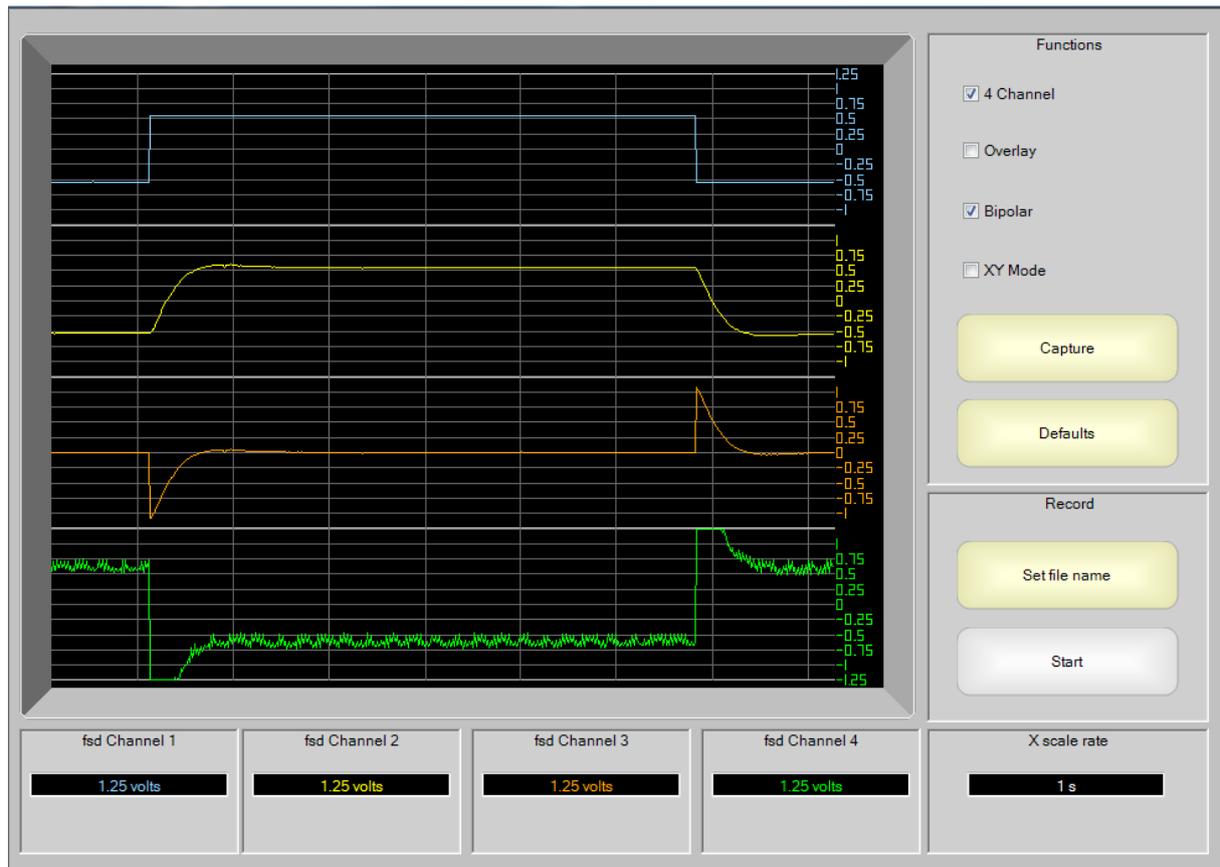


Figure IV. 13 : Représentation des signaux pour les valeurs $K_p=60\%$, $T_i=80\%$ et $T_d=60\%$

Interprétation des résultats pour $K_p=50\%$, $T_i=80\%$ et $T_d=50\%$:

En diminuant le K_p à 50% et le T_d à la valeur de 50%, nous remarquons sur la figure (IV. 14) une légère diminution du dépassement et l'augmentation du temps de réponse fait que la vitesse n'atteint pas sa valeur finale rapidement.

Bien que les oscillations soient réduites, le moteur reste bruyé.

Nous constatons donc que l'action dérivée n'apporte aucune amélioration au système au contraire elle le mène à l'instabilité. Les signaux obtenus sont illustrés par la figure (IV. 14).

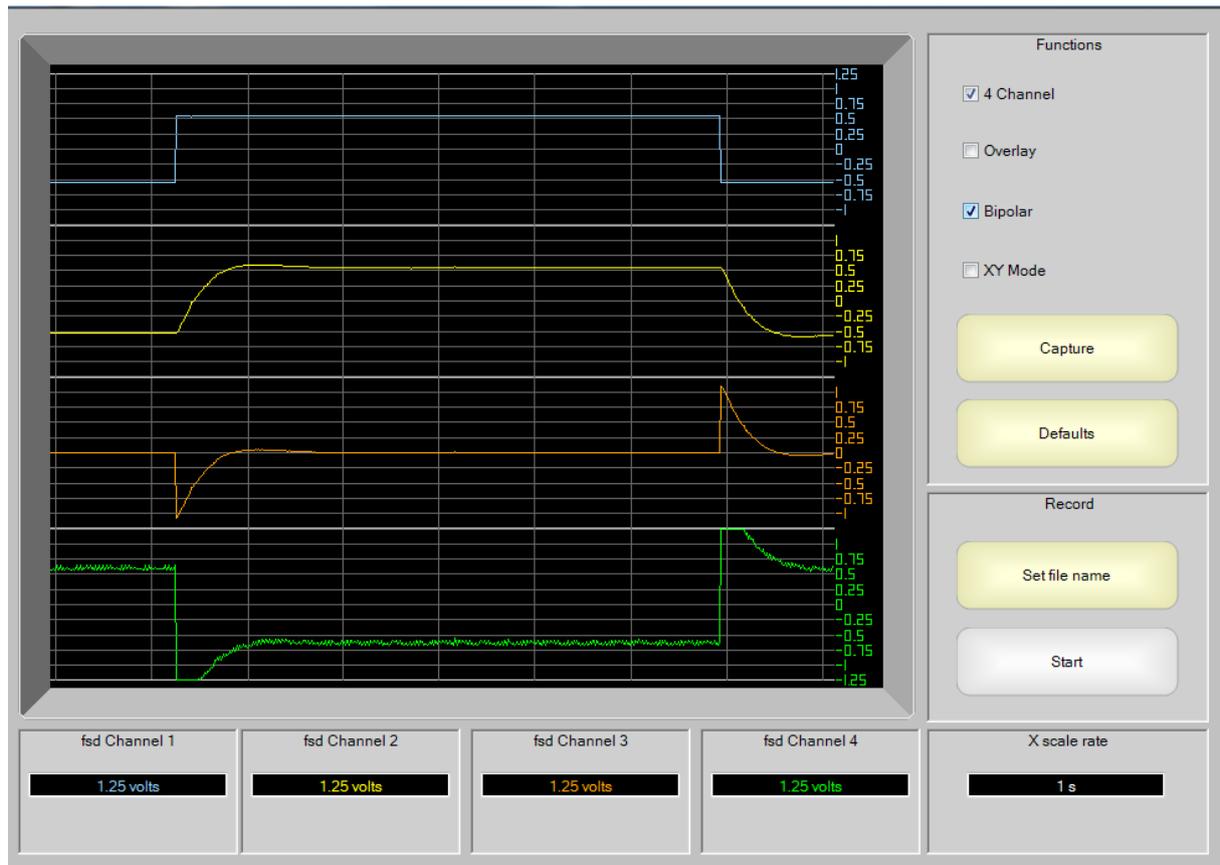


Figure IV. 14 : Représentation des signaux pour les valeurs $K_p=50\%$, $T_i= 80\%$ et $T_d=50\%$

A partir des différents tests effectués pour différentes valeurs des coefficients du correcteur PID, nous constatons que, le correcteur PI suffit à améliorer les performances de notre système.

Dans la deuxième partie, nous testons l'agissement du correcteur PI en présence de perturbations.

IV.3 Régulation analogique du banc didactique 33-033 avec perturbation

La perturbation qui sera appliquée sur le moteur va être un frein. Ce dernier se trouve dans l'unité mécanique du banc. Les caractéristiques de celui-ci sont citées dans le chapitre précédent.

Le signal d'entrée va être un échelon d'amplitude 0.6V auquel on va injecter d'abord un correcteur P de coefficient $K_p = 50\%$.

Les effets du correcteur restent les mêmes peu importe le signal d'entrée comme nous pouvons le voir sur la figure. L'erreur diminue seulement et la sortie n'atteint pas sa valeur de consigne.

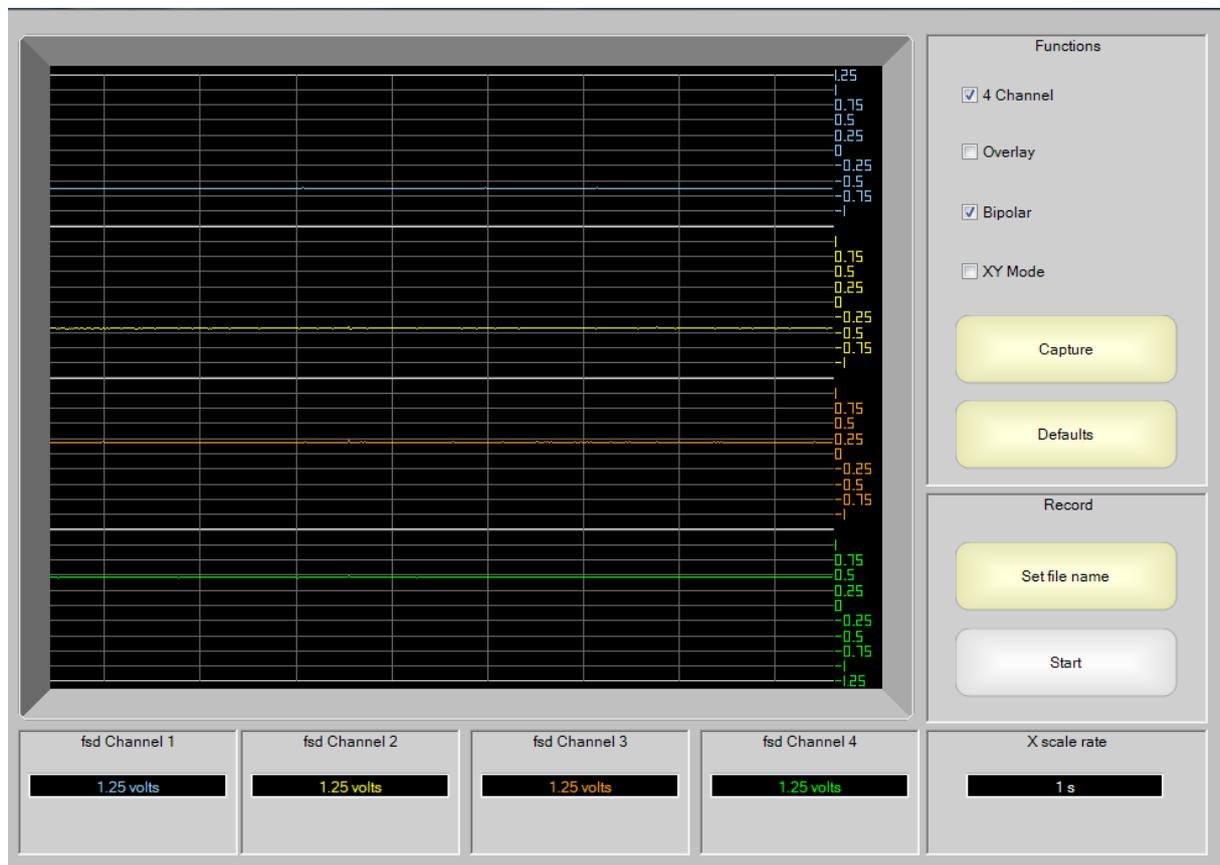


Figure IV. 15 : Représentation des signaux avec un $K_p=50\%$ entrée échelon

Même chose pour un correcteur PI, l'erreur s'annule, la sortie est égale à la consigne. Sur la figure (IV. 16) qui suit, les valeurs des coefficients considérés sont $K_p = 50\%$ et $T_i = 80\%$.

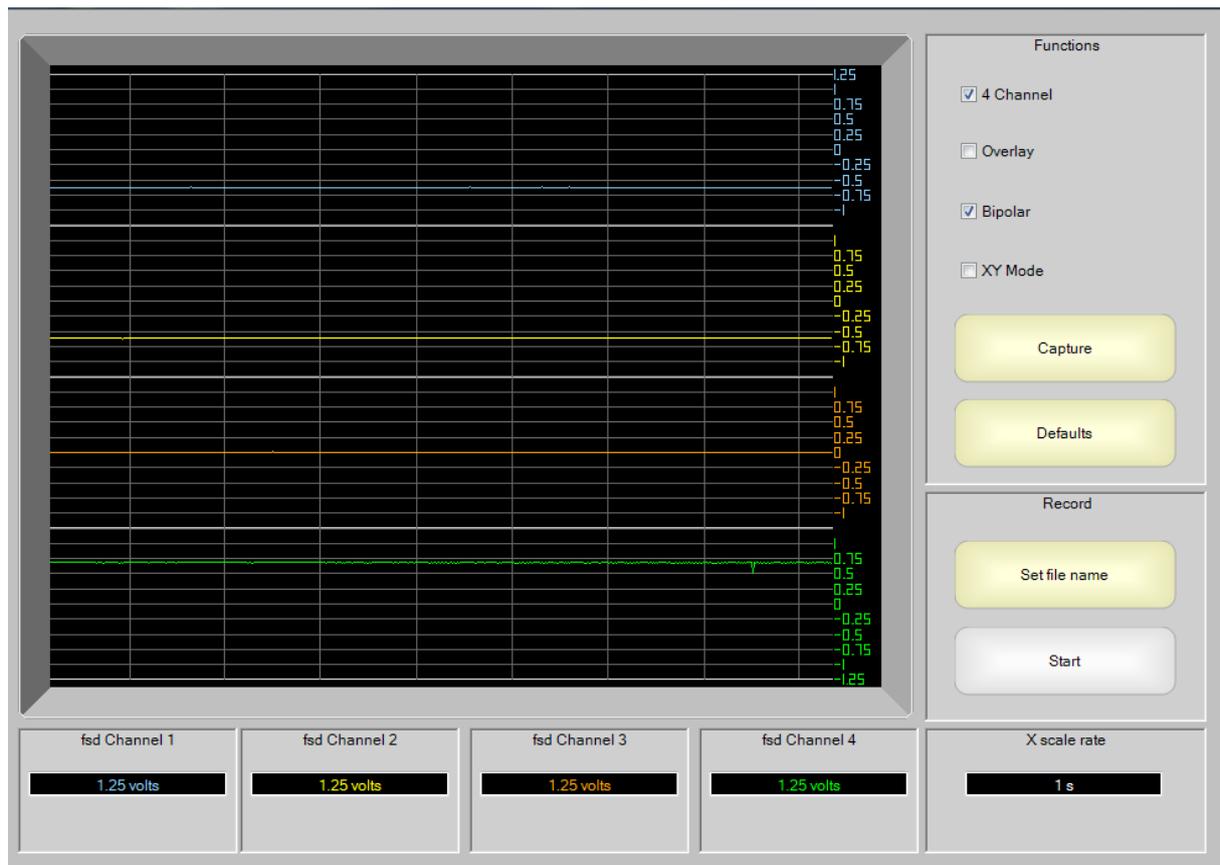


Figure IV. 16 : Représentation des signaux pour les valeurs $K_p=50\%$, $T_i=80\%$ entrée échelon.

Nous allons à présent, pour les mêmes valeurs $K_p=50\%$ et $T_i=80\%$, appliquer un frein de 4 divisions.

Interprétation des résultats $K_p=50\%$, $T_i=80\%$, frein= 4div :

Comme nous pouvons voir d'après la figure (IV. 17), au moment de l'application du frein, la vitesse du moteur a diminué et l'erreur a augmenté. Mais cette perturbation est vite corrigée par le correcteur PI qui a ramené la vitesse à sa valeur de consigne et l'erreur à zéro et ceci en un laps de temps de 0.7s.

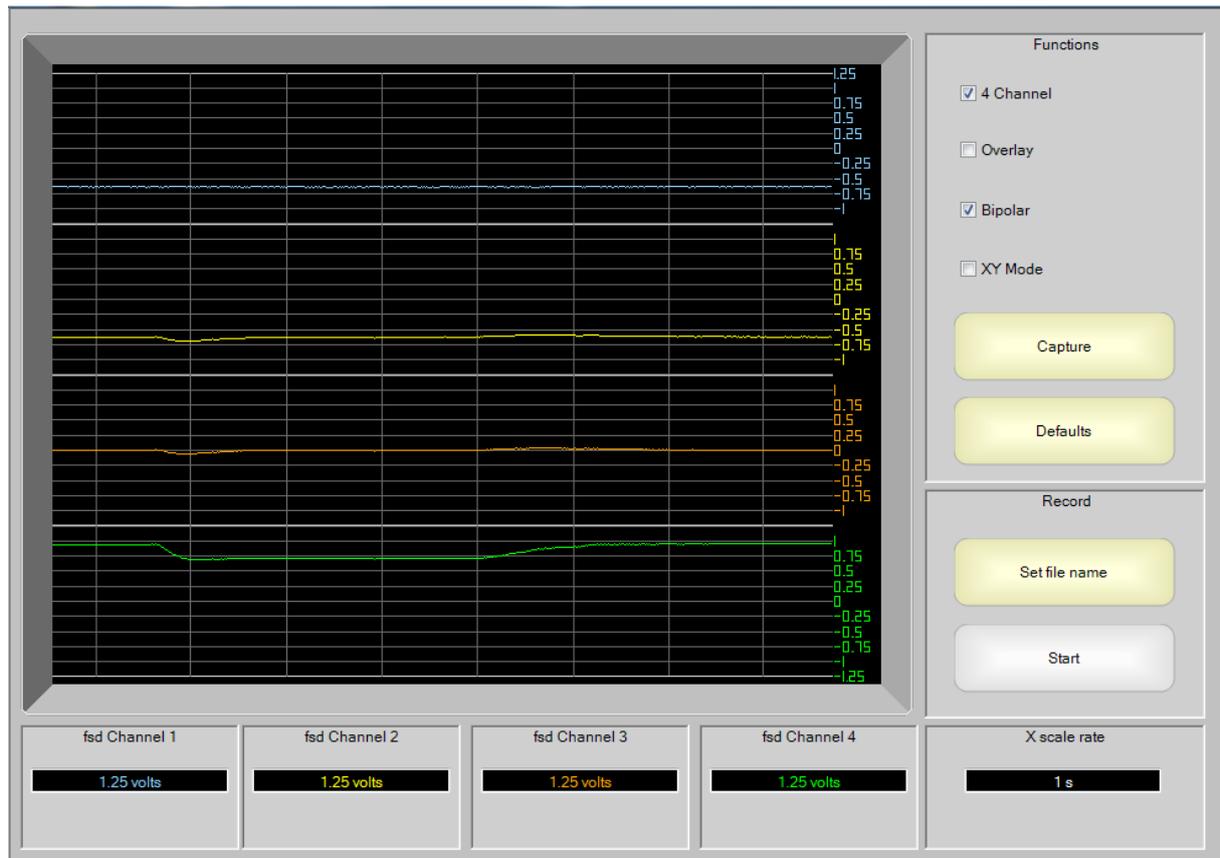


Figure IV. 17 : Représentation des signaux pour les valeurs $K_p=50\%$, $T_i=80\%$, frein= 4div.

Interprétation des résultats $K_p=50\%$, $T_i=80\%$, frein= 5div :

Pour ce nombre de divisions, le correcteur n'arrive pas à corriger la perturbation. En effet, la vitesse a diminué et l'erreur a augmenté sans revenir aux valeurs initiales. Donc au-delà de la valeur de 4 divisions, l'action intégrale est annulée comme nous pouvons le voir sur la figure (IV. 18).

Nous déduisons par-là que les performances du correcteur PI sont limitées quand il s'agit d'une grande perturbation.

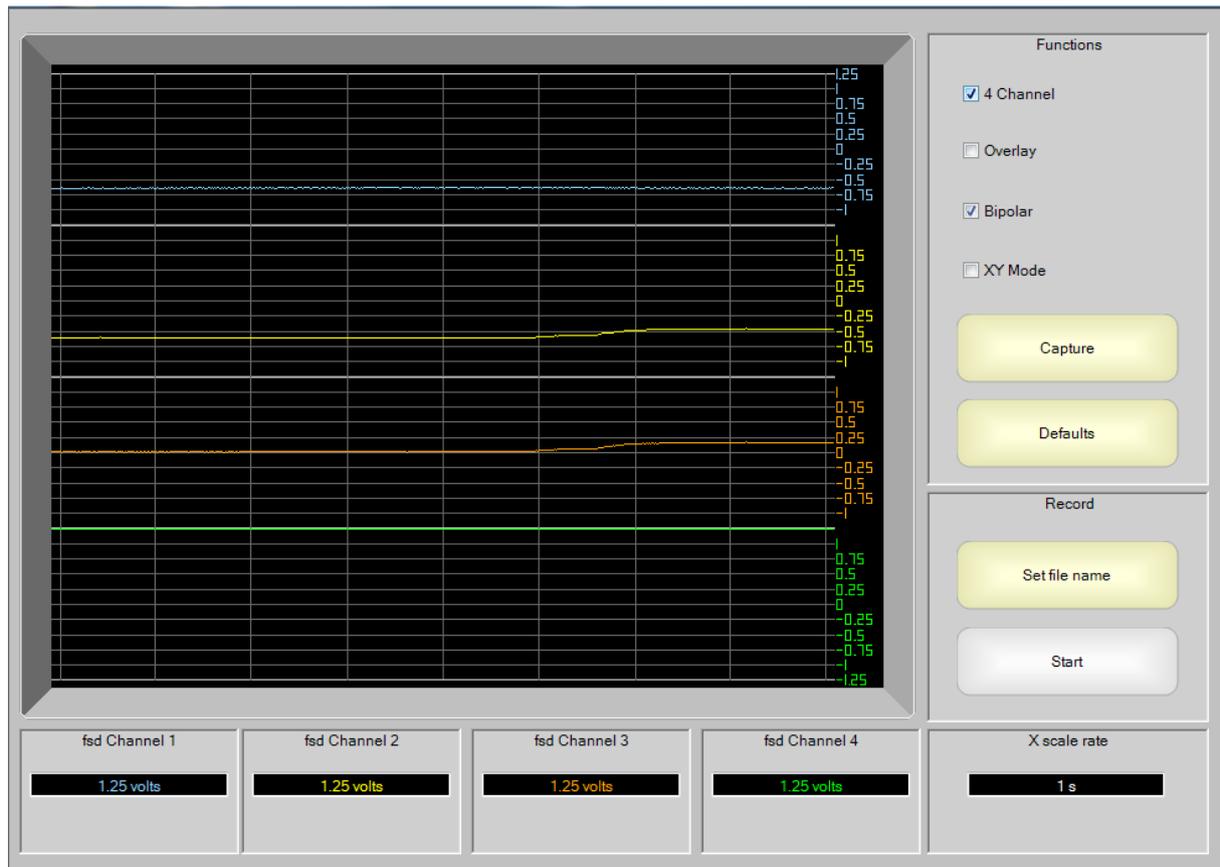


Figure IV. 18 : Représentation des signaux pour les valeurs $K_p=50\%$, $T_i=80\%$, $\text{frein}= 5\text{div}$.

IV.4 Conclusion

Les résultats des tests effectués dans ce chapitre nous ont permis de mieux comprendre le rôle de chaque action P, I, D et différents avantages et inconvénients de chacune.

Nous avons pu déterminer, grâce aux résultats obtenus des variations des coefficients K_p , T_i , T_d , la combinaison idéale des valeurs de ces derniers pour une meilleure performance du système.

Nous avons aussi constaté que pour la régulation de vitesse d'un moteur à courant continu, il suffit d'utiliser un correcteur PI. Car celui-ci fait passer le système d'un système de premier ordre au second ordre soit à un système de classe une. Ce dernier a pour avantage d'annuler l'écart statique ce qui fait que la vitesse atteint la consigne ce qui satisfait parfaitement notre cahier des charges.

L'action dérivée dans notre cas mène à l'instabilité du système. Pour cela, il est préférable de se passer de celle-ci et de se contenter d'une action proportionnelle et intégrale de valeurs $K_p= 50\%$ et $T_i=75\%$. Ces valeurs de coefficients nous permettent d'avoir un système stable puisqu'il n'y a aucun dépassement sur la sortie, précis car l'erreur est complètement nulle et rapide avec un temps de montée de valeur $t_m= 0.3s$ et un temps de réponse de $t_{r5\%}=0.5s$ et corrigé dans le cas où le système est exposé à des perturbations quoi que le correcteur PI reste limité face aux perturbations importantes.

Conclusion générale

Conclusion générale

La régulation de vitesse des moteurs électriques à courant continu est très utilisée en industrie. Il est donc nécessaire de trouver la bonne méthode de régulation pour assurer les meilleures performances du système.

Diverses méthodes permettent la régulation. Mais, il n'existe pas de méthode idéale car pour chacune de ces dernières, l'optimisation des critères de performances (précision, stabilité, rapidité) peut parfois se faire au détriment d'un autre.

Notre travail était alors de trouver le meilleur compromis entre les paramètres du correcteur PID (Proportionnel, Intégrale, Dérivé) de façon à ce que l'erreur statique soit nulle pour permettre à la vitesse du moteur d'atteindre la consigne le plus rapidement possible.

Nous avons pu, par l'intermédiaire du banc didactique 33-033, déterminer les valeurs de chacun des gains K_p , T_i et T_d susceptibles d'optimiser les performances du moteur notamment la précision et la rapidité mais aussi annuler l'effet de la perturbation.

Dans notre travail, nous avons constaté que la commande PI est la plus adéquate pour la commande des moteurs, car l'ajout de l'action dérivée engendre l'apparition d'oscillations ce qui peut le surmener.

Ce travail nous a permis également d'acquérir une expérience enrichissante dans le domaine de la régulation de vitesse, de nous familiariser avec le banc 33-033 tout en mettant en pratique les connaissances théoriques acquises durant notre cursus universitaire.

Bibliographie

- [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] A.Craste, P.Khatchadourian, R.Dias et L.Cuvilliez, « Le moteur à courant continu », Institut National des Sciences Appliquées, Rouen, France, 2017.
- [9] G.Asch et Coll, « Les capteurs en instrumentation industrielle », 7^e édition Dunod, Paris, France, 2010.
- [10] I.Khalil, A.Ghabrini, L.Charpentier, « Capteur de vitesse Tachymètre », Projet de physique des capteurs, Université Aix Marseille, France, 2011.
- [11] A.Pelat, « Pratique de l'amplificateur opérationnel », édition Masson, Paris, France, 1997.
- [12] M.Hajji, « Amplificateur de puissance », Chapitre 4, cours électronique analogique, Institut Supérieur des Etudes et Technologies de Nabeul, Nabeul, Tunisie, 2014.
- [13] Feedback, « Contrôle et instrumentation manuels 33-033 », chapitre 3, 2013.
- [14] Feedback, « Contrôle et instrumentation manuels 33-033 », chapitre 18, 2013.
- [15] Feedback, « Contrôle et instrumentation manuels 33-033 », chapitre 4, 2013.
- [16] Feedback, « Contrôle et instrumentation manuels 33-033 », chapitre 2, 2013.

Annexes

Annexe A

Génératrice synchrone

Le rotor de la machine ou inducteur crée un champ magnétique grâce à l'alimentation de son bobinage par un courant continu ou des aimants permanents. **Le stator** ou induit est composé de 3 bobinages décalés les uns par rapport aux autres de 120° . Ainsi, lorsque le rotor est entraîné par la turbine, son champ magnétique balaie successivement les 3 bobinages du stator, ce qui induit une tension alternative triphasée dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation [10].

La valeur de la vitesse peut être obtenue soit à partir de l'amplitude du signal prélevé sur la machine après redressement et filtrage ou bien à partir de la fréquence des signaux prélevés sur la machine.

Génératrice asynchrone [10]

La différence majeure avec l'alternateur, est que le rotor n'est raccordé à aucune source d'énergie.

Les enroulements statoriques d'une machine asynchrone sont alimentés par des courants alternatifs triphasés (couplage au réseau). Ils génèrent ainsi un champ magnétique tournant statorique. Pour fournir de l'énergie électrique, le rotor doit être entraîné par la turbine à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme. Ses conducteurs, alors balayés par un champ tournant statorique, induisent des courants triphasés qui génèrent à leur tour un champ tournant rotorique. Des tensions alternatives triphasées sont ainsi induites au niveau des bobinages du stator.

La valeur de la vitesse est obtenue après une excitation extérieure sinusoïdale de fréquence fixe en passant par le redressement et le filtrage.

Tachymètre à impulsion [10]

Le corps d'épreuve est constitué d'un disque solidaire de l'arbre dont on veut mesurer la vitesse de rotation. La surface (ou la circonférence) de ce disque porte un certain nombre de repères disposés périodiquement (trou, fente, denture). A chaque passage de l'un de ces repères devant un détecteur approprié (détection de proximité), celui-ci délivre une impulsion électrique.

La fréquence du signal obtenu, en fonction de la vitesse de rotation N , est :

$F = p \cdot N$ tel que p est le nombre de pôle de la machine.

Ce type de tachymètre compte 2 types :

Capteur à réluctance variable

La variation de la réluctance par la variation du circuit magnétique (passage des dents) entraîne des variations de flux et donc l'apparition d'une force électromotrice sous forme impulsionnelle (succession d'impulsions positives et négatives). Plus la vitesse est grande, plus les variations de flux sont rapides. La force électromotrice est donc plus importante [10].

Capteur optique

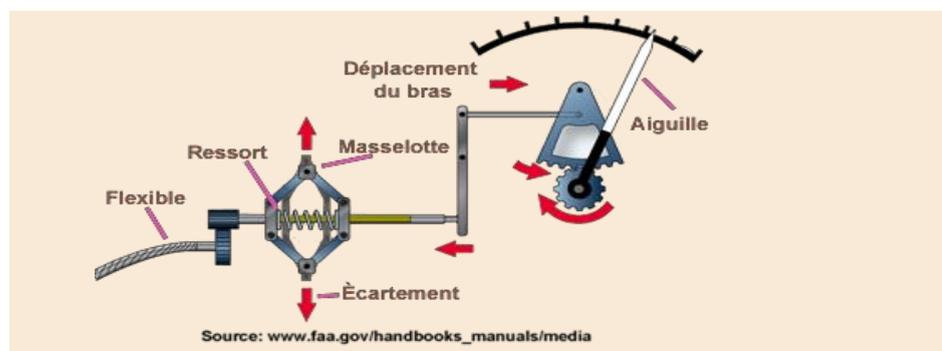
Le principe est le même que celui des codeurs incrémentaux. Pour faire la mesure, une piste est suffisante. La différence est dans l'utilisation de l'information obtenue [10].

Tachymètre mécanique

Le tachymètre mécanique est monté uniquement sur les avions monomoteur légers où le moteur est proche du tableau de bord.

Il se compose d'un transmetteur relié au moteur à un arbre d'entraînement entraîné par un flexible. Le transmetteur contient un ensemble de masselotte couplé à un mécanisme d'engrenage qui entraîne une aiguille. Quand l'arbre d'entraînement tourne, la force centrifuge agit sur les masselottes et les déplace vers l'extérieur. La position des masselottes varie donc avec la vitesse de rotation du moteur. L'amplitude du mouvement des masselottes est transmise par un mécanisme d'engrenage à une aiguille, qui indique directement sur l'instrument la vitesse de rotation du moteur [10].

L'étendue de mesure de ce type de tachymètre est relativement faible de 500 à 3000 tours/min.

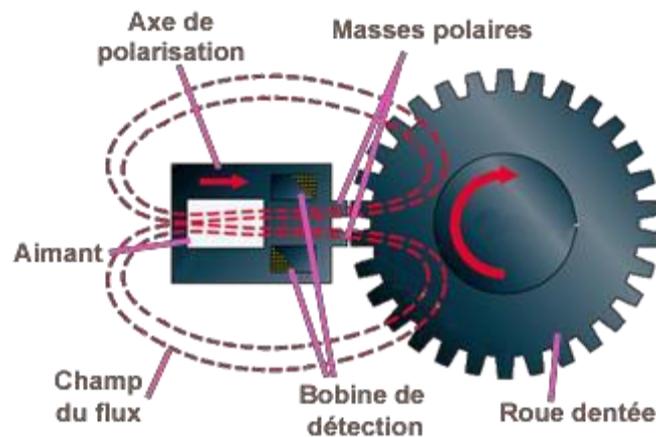


Tachymètre électronique

Le tachymètre électronique est basé sur le comptage d'impulsions électriques par unité de temps duquel on déduit la vitesse de rotation. Un capteur du type inductif est installé perpendiculairement à une roue dentée en métal magnétique qui tourne à la même vitesse que l'arbre du compresseur du moteur dont on veut mesurer la vitesse de rotation.

Le passage d'une dent suivi d'un creux de denture génère une variation de flux magnétique qui induit dans la bobine une impulsion dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation. La mesure du nombre d'impulsions permet d'obtenir la fréquence donc la vitesse de rotation [10].

Le signal est ensuite converti en tension par un convertisseur dans un boîtier électronique et la lecture se fait en pourcentage d'un régime de référence défini par le constructeur [10].



Source: www.faa.gov/handbooks_manuals/media

Annexe B

Erreur statique des systèmes asservis

| Classe Entrée | 0 | 1 | 2 |
|------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| Echelon | $\frac{1}{1 + K_0}$ | 0 | 0 |
| Rampe | ∞ | $\frac{1}{K_1}$ | 0 |
| Parabole | ∞ | ∞ | $\frac{1}{K_2}$ |

Le calcul des valeurs K_0, K_1, K_2 se fait comme suit :

$$K_0 = \lim_{p \rightarrow 0} T(p)$$

$$K_1 = \lim_{p \rightarrow 0} p * T(p)$$

$$K_2 = \lim_{p \rightarrow 0} p^2 * T(p)$$