

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda

Faculté de la Technologie

Département d'Electrotechnique



## Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

**Master (LMD)**

**Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

**Filière : ELECTROTECHNIQUE**

Intitulé :

Commande de vitesse d'un moteur à CC à boucle fermée alimenté par  
un générateur PV : Application pratique

Présenté par :

**Belgacem Fatima**

**Belgacem Aïcha**

Devant le jury composé de :

**Pr. HARTANI Kada**

**Pr. MILOUD Yahia**

**Dr. MOSTEFAI Mohamed**

**Dr. BELGACEM Kheira**

Président

Encadreur

Examineur

Examineur

Soutenu le 03/07/2019

Promotion 2018-2019

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma très chère mère et très cher père, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières, tout au long de mes études.*

*A mes chères sœurs Khadîdja et Fatima, pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.*

*A mon cher frère Ali, pour son encouragement permanent et son soutien.  
A mes chers frères.*

*Sans oublier ma tante Rekia.*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible.*

*A Khadîdja, Soumia, Sabrina et Kheira  
A tous mes amis et Toute ma promotion.*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*Aïcha*

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma très chère mère et très cher père, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières, tout au long de mes études.*

*A mes chères sœurs Khadîdja et Aïcha, pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.*

*A mon cher frère Ali, pour son encouragement permanent et son soutien.*

*A mes chers frères.*

*Sans oublier ma tante Rekia.*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible.*

*A Khadîdja, Soumia, Sabrina et Kheira  
A tous mes amis et Toute ma promotion.*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

**Fatima**

## *Remerciements*

*En préambule à ce mémoire,*

*Nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le  
courage*

*Durant ces longues années d'étude. Nous souhaitons adresser nos  
remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur  
aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la  
réussite de cette formidable année universitaire.*

*Nous tenant à remercier sincèrement Pr MILOUD Yahia, en tant  
qu'Encadreur, qui a toujours montré à l'écoute et très disponible  
tout au long de la réalisation de ce mémoire, Enfin, nous adressons  
nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui  
nous ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation  
de ce mémoire.*

*Merci à tous*



## ***Sommaire***

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction générale                                                  | 1  |
| <i><b>Chapitre 1 : Energie Solaire et système photovoltaïque</b></i>   |    |
| 1.1 Introduction                                                       | 4  |
| 1.2 L'énergie solaire                                                  | 4  |
| 1.2.1 Qu'est-ce que l'énergie solaire ?                                | 4  |
| 1.2.1.1 L'électricité solaire photovoltaïque                           | 5  |
| 1.3 le système photovoltaïque                                          | 5  |
| 1.3.1 L'Effet Photovoltaïque                                           | 5  |
| 1.3.1.1 La cellule photovoltaïque                                      | 6  |
| 1.3.1.1.1 Silicium monocristallin                                      | 7  |
| 1.3.1.1.2 Silicium poly cristalline                                    | 7  |
| 1.3.1.1.3 Silicium amorphe ou en couche mince                          | 8  |
| 1.3.1.2 Circuit équivalent d'une cellule PV                            | 8  |
| 1.3.1.2.1 Modèle idéal de cellules photovoltaïques                     | 9  |
| 1.3.1.2.2 Le courant de sortie de la cellule photovoltaïque            | 10 |
| 1.3.1.3 Influence de la résistance de charge                           | 11 |
| 1.3.1.4 Influence de l'éclairement                                     | 11 |
| 1.3.1.5 Influence de température                                       | 12 |
| 1.3.1.6 Le module photovoltaïque                                       | 12 |
| 1.3.1.6.1 Montage série                                                | 13 |
| 1.3.1.6.2 Montage parallèle                                            | 13 |
| 1.3.1.7 Photovoltaïque facteur de forme et rendement des cellules      | 14 |
| 1.3.1.7.1 Rendement de l'énergie de la cellule                         | 14 |
| 1.3.1.7.2 Le facteur de forme                                          | 15 |
| 1.3.1.8 La comparaison de différents types de cellules photovoltaïques | 15 |
| 1.3.1.9 Avantages et inconvénients du PV                               | 15 |
| 1.3.1.9.1 Avantages du photovoltaïque                                  | 15 |
| 1.3.1.9.2 Inconvénients du photovoltaïque                              | 16 |
| 1.3.1.10 Les caractéristiques des panneaux solaires                    | 16 |
| 1.3.1.10.1 Schéma de relevé des caractéristiques                       | 17 |
| 1.3.1.10.2 Un seul panneau solaire                                     | 17 |
| 1.3.1.10.2.1 Le matériel utilisé                                       | 18 |

|                                                                                                                                                |                                                                                         |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.3.1.10.2.2                                                                                                                                   | La puissance et le courant en fonction de la tension                                    | 18 |
| 1.3.1.10.3                                                                                                                                     | Deux panneaux de 80W en séries                                                          | 19 |
| 1.3.1.10.3.1                                                                                                                                   | Le matériel utilisé                                                                     | 19 |
| 1.3.1.10.3.2                                                                                                                                   | La puissance et le courant en fonction de la tension                                    | 20 |
| 1.3.1.10.4                                                                                                                                     | Deux panneaux 80W en parallèles                                                         | 21 |
| 1.3.1.10.4.1                                                                                                                                   | Le matériel utilisé                                                                     | 21 |
| 1.3.1.10.4.2                                                                                                                                   | La puissance et le courant en fonction de la tension de deux panneaux 80W en parallèles | 22 |
| 1.3.1.10.5                                                                                                                                     | Interprétation                                                                          | 22 |
| 1.4                                                                                                                                            | Conclusion                                                                              | 23 |
| <div style="background-color: #e0b0d0; padding: 5px; text-align: center;"><b>Chapitre 2 : Généralité sur le moteur à courant continu</b></div> |                                                                                         |    |
| 2.1                                                                                                                                            | Introduction                                                                            | 24 |
| 2.2                                                                                                                                            | Définition                                                                              | 24 |
| 2.3                                                                                                                                            | Constitution                                                                            | 24 |
| a)                                                                                                                                             | L'inducteur                                                                             | 25 |
| b)                                                                                                                                             | Le rotor (l'induit)                                                                     | 25 |
| c)                                                                                                                                             | Le collecteur et les balais                                                             | 26 |
| 2.4                                                                                                                                            | Principe de fonctionnement                                                              | 26 |
| 2.4.1                                                                                                                                          | En moteur                                                                               | 26 |
| 2.4.2                                                                                                                                          | En Génératrice                                                                          | 27 |
| 2.4.3                                                                                                                                          | Modèle équivalent de l'induit                                                           | 27 |
| 2.4.4                                                                                                                                          | Equations de fonctionnement                                                             | 28 |
| 2.4.4.1                                                                                                                                        | Equations Electromécanique du moteur à courant continu en régime dynamique              | 28 |
| 2.4.4.1.1                                                                                                                                      | Equations électriques                                                                   | 28 |
| 2.4.4.1.2                                                                                                                                      | Equation mécanique                                                                      | 28 |
| 2.4.4.2                                                                                                                                        | Equations électromécaniques dans le domaine de Laplace                                  | 29 |
| 2.4.5                                                                                                                                          | Réversibilité                                                                           | 30 |
| 2.5                                                                                                                                            | Classification des moteurs à courant continu                                            | 30 |
| 2.5.1                                                                                                                                          | Les moteurs à inducteur à aimant permanent                                              | 30 |
| 2.5.2                                                                                                                                          | Les moteurs à inducteur bobiné                                                          | 31 |
| 2.5.2.1                                                                                                                                        | Moteurs à excitation séparée                                                            | 31 |
| 2.5.2.2                                                                                                                                        | Moteur a excitation shunt (dérivée)                                                     | 32 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.2.3 Moteur à excitation série                                      | 32 |
| 2.5.2.4 Moteur à excitation composée (compound)                        | 33 |
| 2.6 Les avantages Et les inconvénients                                 | 33 |
| 2.6.1 Les avantages                                                    | 33 |
| 2.6.2 Les inconvénients                                                | 33 |
| 2.7 Bilan de la puissance                                              | 34 |
| 2.8 Le rendement                                                       | 34 |
| 2.9 Utilisation de la machine à courant continu                        | 35 |
| 2.10 Conclusion                                                        | 35 |
| <b>Chapitre 3 : Variation de vitesse d'un MCC par un hacheur série</b> |    |
| 3.1 Introduction                                                       | 36 |
| 3.2 La variation de la vitesse                                         | 36 |
| 3.2.1 Réglage rhéostatique                                             | 36 |
| 3.2.2 Réglage par flux                                                 | 37 |
| 3.2.3 Réglage par tension                                              | 37 |
| 3.2.4 Variation de vitesse par variation de la tension d'induit        | 38 |
| 3.3 Les hacheurs                                                       | 38 |
| 3.3.1 Principe de fonctionnement                                       | 39 |
| 3.3.2 Le rapport cyclique $\alpha$                                     | 39 |
| 3.4 Convertisseur Buck                                                 | 39 |
| 3.4.1 Principe de Fonctionnement                                       | 40 |
| 3.4.2 Ondulation du courant                                            | 41 |
| 3.4.3 Intérêt d'utiliser un hacheur série                              | 42 |
| 3.5 Technique de commande MLI                                          | 42 |
| 3.5.1 Principe de la commande MLI                                      | 43 |
| 3.6 Partie pratique                                                    | 45 |
| 3.6.1 Le matériel utilisé                                              | 45 |
| 3.6.2 L'alimentation par réseau                                        | 46 |
| 3.6.2.1 La génération des signaux carrés pour la commande du IGBT      | 47 |
| 3.6.2.2 L'alimentation du hacheur à tension continue fixe              | 49 |
| 3.6.2.3 La tension de sortie du hacheur                                | 50 |
| 3.6.2.4 L'alimentation du moteur à courant continu                     | 51 |

|           |                                                 |    |
|-----------|-------------------------------------------------|----|
| 3.6.2.5   | Interprétation                                  | 52 |
| 3.6.2.5.1 | Démarrage à vide                                | 52 |
| 3.6.2.5.2 | Démarrage à vide puis application d'une charge  | 52 |
| 3.6.3     | L'alimentation par les panneaux photovoltaïques | 52 |
| 3.6.3.1   | Interprétation                                  | 55 |
| 3.7       | Conclusion                                      | 55 |

## ***Chapitre 4 : Régulation de vitesse du MCC avec régulateur PID***

|           |                                                                        |    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1       | Introduction                                                           | 56 |
| 4.2       | Les actions du régulateur PID                                          | 56 |
| 4.2.1     | Action Proportionnelle(P)                                              | 56 |
| 4.2.1.1   | Principe de fonctionnement                                             | 57 |
| 4.2.1.2   | Effet                                                                  | 58 |
| 4.2.2     | Action intégrale (I)                                                   | 58 |
| 4.2.2.1   | Principe                                                               | 59 |
| 4.2.2.2   | Effet                                                                  | 59 |
| 4.2.3     | Action dérivée (D)                                                     | 59 |
| 4.2.3.1   | Principe                                                               | 59 |
| 4.2.3.2   | Effet                                                                  | 60 |
| 4.3       | La commande PID en régulation de vitesse                               | 61 |
| 4.4       | Réglage d'un PID                                                       | 62 |
| 4.5       | Partie pratique                                                        | 64 |
| 4.5.1     | Le matériel utilisé                                                    | 64 |
| 4.5.2     | L'alimentation réseau                                                  | 65 |
| 4.5.2.1   | Résultat à vide                                                        | 67 |
| 4.5.2.2   | Résultat en charge                                                     | 67 |
| 4.5.2.3   | Résultat à vide puis application d'une charge                          | 67 |
| 4.5.2.4   | Résultat de démarrage à vide puis application d'une charge puis à vide | 68 |
| 4.5.2.5   | Interprétations de résultats                                           | 68 |
| 4.5.2.5.1 | Démarrage à vide                                                       | 68 |
| 4.5.2.5.2 | Démarrage en charge                                                    | 68 |
| 4.5.2.5.3 | Démarrage à vide puis application d'une charge                         | 68 |
| 4.5.2.5.4 | Démarrage à vide puis application d'une charge puis le retour à vide   | 68 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.5.3 L'alimentation par les panneaux photovoltaïques                                 | 69 |
| 4.5.3.1 Résultat à vide                                                               | 71 |
| 4.5.3.2 Interprétation                                                                | 72 |
| 4.5.3.2.1 A vide                                                                      | 72 |
| 4.5.3.2.2 À vide avec puis l'application d'une charge                                 | 72 |
| 4.5.3.2.3 A vide puis l'application d'une charge puis l'ombrage d'un panneau          | 72 |
| 4.6 Conclusion                                                                        | 73 |
| <b><i>Chapitre 5 : Commande du moteur à courant continu via la carte Arduino.</i></b> |    |
| 5.1 Introduction                                                                      | 73 |
| 5.2 But                                                                               | 73 |
| 5.3 Définition du module Arduino                                                      | 73 |
| 5.3.1 Entrées-sorties numériques de l'Arduino Uno                                     | 74 |
| 5.3.2 Entrées analogiques de l'Arduino Uno                                            | 74 |
| 5.3.3 Les sorties MLI                                                                 | 75 |
| 5.7 Présentation de la carte Arduino et l'environnement Matlab/Simulink               | 76 |
| 5.7.1 Le matériel :Arduino UNO                                                        | 76 |
| 5.7.2 Le logiciel Arduino                                                             | 77 |
| 5.7.3 L'environnement Matlab/Simulink                                                 | 77 |
| 5.7.4 L'interfaçage Arduino↔Matlab/Simulink                                           | 78 |
| 5.7.5 Présentation des sorties analogiques (mode MLI)                                 | 78 |
| 5.8 Etage d'amplification et isolation                                                | 79 |
| 5.9 Manipulation expérimentale                                                        | 80 |
| 5.9.1 Génération du signale MLI par la carte Arduino                                  | 80 |
| 5.9.1.1 Schéma électronique                                                           | 80 |
| 5.9.1.2 Mdèle Simulink                                                                | 81 |
| 5.9.1.3 Montage pratique                                                              | 81 |
| 5.9.1.4 Visualisation des signaux par l'oscilloscope                                  | 82 |
| 5.9.2 Génération du signale MLI par la carte Arduino avec amplification et isolation  | 82 |
| 5.9.2.1 Schéma électrique du montage                                                  | 82 |
| 5.9.2.2 Montage pratique                                                              | 83 |
| 5.9.3 L'acquisition de signal vitesse et de référence par la carte Arduino            | 84 |
| 5.9.3.1 Modèle Simulink                                                               | 84 |

|           |                                                                                   |     |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.9.3.2   | Visualisation par Simulink /scope                                                 | 85  |
| 5.9.4     | Commande MLI d'un moteur à courant continu                                        | 85  |
| 5.9.4.1   | Modèle Simulink                                                                   | 86  |
| 5.9.4.2   | Résultats visualisé par scope/Simulink                                            | 87  |
| 5.9.4.3   | Interprétation des résultats                                                      | 87  |
| 5.9.5     | La commande de moteur à courant continu en boucle fermée                          | 88  |
| 5.9.5.1   | Implémentation de la commande sous Simulink                                       | 88  |
| 5.9.5.2   | Modèle Simulink                                                                   | 88  |
| 5.9.5.3   | Résultats visualisé par Simulink/scope                                            | 89  |
| 5.9.5.4   | Interprétation des résultats                                                      | 89  |
| 5.9.5.4.1 | Démarrage à vide                                                                  | 89  |
| 5.9.5.4.2 | Démarrage à vide puis l'application d'une charge puis la suppression de la charge | 90  |
| 5.9.5.5   | consigne de tension variable                                                      | 90  |
| 5.9.5.5.1 | Interprétation                                                                    | 91  |
| 5.9.6     | L'alimentation par les panneaux photovoltaïques                                   | 91  |
| 5.9.6.1   | Schéma électrique du montage complet                                              | 91  |
| 5.9.6.2   | Résultats visualisé par Simulink/scope                                            | 92  |
| 5.9.6.3   | Interprétation                                                                    | 92  |
| 5.10      | Conclusion                                                                        | 93  |
|           | <b>Conclusion générale</b>                                                        | 94  |
|           | <b>Annexe</b>                                                                     |     |
|           | Annexe A                                                                          | 96  |
|           | Annexe B                                                                          | 101 |
|           | Annexe C                                                                          | 103 |
|           | Annexe D                                                                          | 108 |
|           | <b>Bibliographie</b>                                                              | 110 |

| <b>Figure</b>      | <b>Nom de figure</b>                                                                                                                                               | <b>N° page</b> |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>Figure 1.1</b>  | Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque.                                                                                                                   | 5              |
| <b>Figure 1. 2</b> | Silicium monocristallin                                                                                                                                            | 7              |
| <b>Figure 1.3</b>  | Silicium poly cristallin                                                                                                                                           | 8              |
| <b>Figure 1.4</b>  | Silicium amorphe ou en couche mince                                                                                                                                | 8              |
| <b>Figure 1.5</b>  | Modèle électrique de la cellule photovoltaïque: (a) modèle de base et (b) le modèle pratique de la cellule photovoltaïque intégrant de résistances shunt et série. | 10             |
| <b>Figure 1.6</b>  | Influence de la résistance de charge sur l'intensité et la tension fournie par une cellule photovoltaïque.                                                         | 11             |
| <b>Figure 1.7</b>  | Influence de l'éclairement sur les performances d'une cellule photovoltaïque.                                                                                      | 12             |
| <b>Figure 1.8</b>  | Influence de la température sur les performances d'une cellule photovoltaïque.                                                                                     | 12             |
| <b>Figure 1.9</b>  | Caractéristiques de cellules photovoltaïques en séries.                                                                                                            | 13             |
| <b>Figure 1.10</b> | Caractéristiques de cellules photovoltaïques en parallèle.                                                                                                         | 13             |
| <b>Figure 1.11</b> | Schéma électrique de mesure d'un seul panneau                                                                                                                      | 17             |
| <b>Figure 1.12</b> | La réalisation pratique d'un module photovoltaïque de 80 W.                                                                                                        | 18             |
| <b>Figure 1.13</b> | Résultats de mesure (a) caractéristique de courant- tension (b) caractéristique puissance-tension de panneau de 80W.                                               | 18             |
| <b>Figure 1.14</b> | Schéma électrique de mesure de deux panneaux solaires en série.                                                                                                    | 19             |
| <b>Figure 1.15</b> | La réalisation pratique de deux modules photovoltaïques en série de 80 W.                                                                                          | 20             |
| <b>Figure 1.16</b> | Résultats de mesure (a) caractéristique du courant-tension et(b) caractéristique puissance-tension de deux panneaux de 80W en séries.                              | 20             |
| <b>Figure 1.17</b> | Schéma électrique de mesure de deux panneaux solaires en parallèle.                                                                                                | 21             |

|                    |                                                                                                                                            |    |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1.18</b> | La réalisation de deux modules photovoltaïques en parallèle de 80 W.                                                                       | 21 |
| <b>Figure 1.19</b> | Résultats de mesure (a) caractéristique de courant tension et (b)caractéristique puissance tension de deux panneaux de 80W en parallèles . | 22 |
| <b>Figure 2.1</b>  | Fonctionnement de machine à courant continu                                                                                                | 24 |
| <b>Figure 2.2</b>  | Description de la machine à courant continu                                                                                                | 25 |
| <b>Figure 2.3</b>  | L'inducteur de la machine à courant continu                                                                                                | 25 |
| <b>Figure 2.4</b>  | Le rotor de la machine à courant continu                                                                                                   | 25 |
| <b>Figure 2.5</b>  | Le dispositif collecteur / balais.                                                                                                         | 26 |
| <b>Figure 2.6</b>  | Sens du courant.                                                                                                                           | 27 |
| <b>Figure 2.7</b>  | Ligne de champ magnétique inducteur.                                                                                                       | 27 |
| <b>Figure 2.8</b>  | Modèle équivalent de l'induit en régime dynamique.                                                                                         | 27 |
| <b>Figure 2.9</b>  | Schéma fonctionnel du MCC en boucle ouverte.                                                                                               | 30 |
| <b>Figure 2.10</b> | Moteur à aimant permanent.                                                                                                                 | 31 |
| <b>Figure 2.11</b> | Schéma électrique d'un moteur à excitation séparée                                                                                         | 31 |
| <b>Figure 2.12</b> | Schéma électriques d'un moteur à excitation shunt                                                                                          | 32 |
| <b>Figure 2.13</b> | Schéma électrique d'un Moteur a excitation série                                                                                           | 33 |
| <b>Figure 2.14</b> | Schéma électrique d'un Moteur à excitation composée                                                                                        | 34 |
| <b>Figure 2.15</b> | Bilan de la puissance                                                                                                                      | 35 |
| <b>Figure 3.1</b>  | Action conjuguée sur la tension et le flux.                                                                                                | 38 |
| <b>Figure 3.2</b>  | Variation de la tension d'induit.                                                                                                          | 38 |
| <b>Figure 3.3</b>  | Le fonctionnement d'un hacheur BUCK.                                                                                                       | 39 |
| <b>Figure 3.4</b>  | La tension aux bornes de la charge avec un hacheur série                                                                                   | 40 |
| <b>Figure 3.5</b>  | La valeur moyenne en fonction de rapport cyclique ( $\alpha$ )                                                                             | 40 |
| <b>Figure 3.6</b>  | Schéma de tension et de courant d'un hacheur série.                                                                                        | 41 |
| <b>Figure 3.7</b>  | Hacheur série commande un moteur à courant continu                                                                                         | 42 |
| <b>Figure 3.8</b>  | Schéma de principe de la commande MLI                                                                                                      | 44 |
| <b>Figure 3.9</b>  | Montage complet pratique boucle ouverte.                                                                                                   | 46 |
| <b>Figure 3.10</b> | Schéma complet (boucle ouverte).                                                                                                           | 47 |
| <b>Figure 3.11</b> | Photo de montage pour la génération des signaux MLI                                                                                        | 48 |
| <b>Figure3.12</b>  | Photo de génération des impulsions.                                                                                                        | 48 |

|                    |                                                                              |    |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 3.13</b> | Une Vue réelle de la maquette                                                | 49 |
| <b>Figure 3.14</b> | Obtention de la tension continue fixe.                                       | 49 |
| <b>Figure 3.15</b> | Une Vue réelle de la maquette.                                               | 50 |
| <b>Figure 3.16</b> | Tension de sortie du hacheur.                                                | 50 |
| <b>Figure 3.17</b> | Une Vue réelle de la maquette                                                | 51 |
| <b>Figure 3.18</b> | Photo de la variation de vitesse démarrage à vide.                           | 51 |
| <b>Figure 3.19</b> | Démarrage à vide puis application d'une charge avec rapport cyclique 1       | 51 |
| <b>Figure 3.20</b> | Schéma électrique complet par l'alimentation photovoltaïque (boucle ouverte) | 53 |
| <b>Figure 3.21</b> | Montage complet en boucle ouverte _alimentation par panneaux photovoltaïque  | 53 |
| <b>Figure 3.22</b> | Photo de signal de vitesse _démarrage à vide                                 | 54 |
| <b>Figure 3.23</b> | Photo de signal de vitesse _démarrage en charge                              | 54 |
| <b>Figure 3.24</b> | Photo de signal de vitesse _démarrage à vide puis l'application d'une charge | 54 |
| <b>Figure 3.25</b> | Photo de signal de vitesse _démarrage en charge dans un temps nuageux        | 54 |
| <b>Figure 4.1</b>  | Schéma bloc d'un système avec correcteur (Boucle fermée)                     | 56 |
| <b>Figure 4.2</b>  | Entrée et sortie du régulateur (P)                                           | 57 |
| <b>Figure 4.3</b>  | Correction proportionnelle (P)                                               | 57 |
| <b>Figure 4.4</b>  | Entrée et sortie du régulateur intégrateur                                   | 58 |
| <b>Figure 4.5</b>  | Régulateur intégrateur(I)                                                    | 59 |
| <b>Figure 4.6</b>  | Correction à action dérivée pure (D)                                         | 60 |
| <b>Figure 4.7</b>  | Entrée et sortie du correcteur à action dérivée (D)                          | 60 |
| <b>Figure 4.8</b>  | Schéma bloc du correcteur PID en régulation de vitesse.                      | 61 |
| <b>Figure 4.9</b>  | la réponse d'un procédé stable                                               | 62 |
| <b>Figure 4.10</b> | Schéma synoptique de l'asservissement à implémenter                          | 64 |
| <b>Figure 4.11</b> | photo montre le montage complet à boucle fermée au sein de laboratoire (EP). | 65 |
| <b>Figure 4.12</b> | schéma complet du montage a boucle fermée                                    | 65 |
| <b>Figure 4.13</b> | photo de signal de vitesse _démarrage à vide                                 | 66 |
| <b>Figure 4.14</b> | photo de signal de vitesse _démarrage en charge                              | 66 |

|                     |                                                                                                            |    |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 4.15</b>  | photo de signal de vitesse _démarrage à vide puis application d'une charge (0.3N.m).                       | 66 |
| <b>Figure 4.16</b>  | photo de signal de vitesse _démarrage à vide puis application de charge (0.3N.m). puis à vide              | 67 |
| <b>Figure 4.17</b>  | Photo du montage complet avec alimentation photovoltaïque en boucle fermée                                 | 68 |
| <b>Figure 4.18</b>  | Schéma électrique de montage complet avec alimentation photovoltaïque en boucle fermée                     | 69 |
| <b>Figure 4.19</b>  | Démarrage à vide avec 8 panneaux en série                                                                  | 70 |
| <b>Figure 4.20</b>  | Démarrage à vide avec 8 panneaux en série et deux panneaux ombrés.                                         | 70 |
| <b>Figure 4.21</b>  | Démarrage à vide avec 8 panneaux en série puis application de la charge 0.2N.m puis l'ombrage d'un panneau | 70 |
| <b>Figure 4.22</b>  | Démarrage à vide avec 8 panneaux en série puis l'application d'une charge.                                 | 71 |
| <b>Figure 5.1</b>   | Représentation des entrées-sorties numériques de l'Arduino Uno                                             | 74 |
| <b>Figure5.2</b>    | Représentation des Entrées analogiques de l'Arduino Uno                                                    | 75 |
| <b>Figure 5.3</b>   | Description de la Carte Arduino "Uno"                                                                      | 76 |
| <b>Figure 5.4</b>   | L'interface du logiciel Arduino                                                                            | 77 |
| <b>Figure 5.5</b>   | Description du signal MLI                                                                                  | 78 |
| <b>Figure 5.6</b>   | Exemples de variation du rapport cyclique                                                                  | 79 |
| <b>Figure5.7</b>    | Communication de carte Arduino avec MATLAB                                                                 | 79 |
| <b>Figure 5.8</b>   | L'optocouleur 4n35                                                                                         | 80 |
| <b>Figure 5.9</b>   | Schéma électronique _Branchement de la carte Arduino UNO avec une lampe                                    | 80 |
| <b>Figure5.10</b>   | Schéma bloc de l'acquisition de signaux par la carte Arduino                                               | 81 |
| <b>Figure5.11</b>   | Une vue de la maquette.                                                                                    | 81 |
| <b>Figure 5.12</b>  | Photo de signal PWM généré par la carte Arduino                                                            | 82 |
| <b>Figure 5. 13</b> | Schéma électrique d'étage d'amplification et isolation                                                     | 82 |
| <b>Figure 5. 14</b> | Photo de montage _Génération du signale MLI par la carte Arduino après amplification                       | 83 |
| <b>Figure 5. 15</b> | Photo de signaux PWM généré par la carte Arduino après amplification                                       | 83 |

### ***Liste des figures***

|                     |                                                                                                   |    |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 5. 16</b> | Schéma synoptique de l'acquisition de signal de référence et de vitesse par la carte Arduino      | 84 |
| <b>Figure 5. 17</b> | Schéma bloc de l'acquisition de signaux par la carte Arduino                                      | 84 |
| <b>Figure 5.18</b>  | Signal de vitesse et de référence (avec régulation PID analogique)                                | 85 |
| <b>Figure 5.19</b>  | Schéma électrique du montage complet                                                              | 85 |
| <b>Figure 5. 20</b> | Le circuit électronique de branchement de la carte Arduino UNO avec MCC                           | 86 |
| <b>Figure 5. 21</b> | Schéma synoptique de commande PWM d'un moteur à courant continu                                   | 86 |
| <b>Figure 5. 22</b> | Schéma bloc de commande du moteur en boucle ouverte                                               | 86 |
| <b>Figure 5. 23</b> | La forme d'onde de vitesse par la commande PWM du MCC en B.O                                      | 87 |
| <b>Figure 5. 24</b> | Signal de vitesse _Démarrage par commande PWM à vide puis application d'une charge                | 87 |
| <b>Figure 5.25</b>  | Schéma synoptique de la boucle d'asservissement à implémenter                                     | 88 |
| <b>Figure 5. 26</b> | Modèle de la régulation PID implémenté avec Matlab/Simulink                                       | 88 |
| <b>Figure 5. 27</b> | Signal de vitesse à vide                                                                          | 89 |
| <b>Figure 5. 28</b> | Signal de vitesse _Démarrage à vide puis application d'une charge puis débranchement de la charge | 89 |
| <b>Figure 5. 29</b> | Signal de vitesse à vide                                                                          | 90 |
| <b>Figure 5. 30</b> | Signal de vitesse _Démarrage à vide puis application d'une charge puis débranchement de la charge | 90 |
| <b>Figure 5. 31</b> | Schéma électrique du montage complet avec alimentation photovoltaïque                             | 91 |
| <b>Figure 5.32</b>  | Signal de vitesse démarrage à vide                                                                | 92 |
| <b>Figure 5.33</b>  | Signal de vitesse démarrage à vide puis application d'une charge                                  | 92 |

### ***Liste des Tableaux***

| <b>Tableau</b>     | <b>Nom de tableau</b>                                           |           |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tableau 1.1</b> | Caractéristique de silicium                                     | <b>6</b>  |
| <b>Tableau 1.2</b> | La comparaison de différents types de cellules photovoltaïques. | <b>15</b> |
| <b>Tableau1.3</b>  | Caractéristiques réel du panneau existant                       | <b>17</b> |

## **Introduction générale**

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Les machines à courant continu ont pendant longtemps été les seuls aptes à la vitesse variable à large bande passante (robotique). En électrotechnique, on s'intéresse toujours en premier lieu à la machine à courant continu, car il est possible d'obtenir de manière relativement simple sa modélisation surtout dans le cas où le flux agissant sur l'induit est constant (machine à flux constant). Il s'ensuit que la machine à courant continu est une référence aussi bien en fonctionnement moteur qu'en génératrice.

Un variateur de vitesse est un équipement permettant de faire varier la vitesse d'un moteur, une nécessité pour de nombreuses applications industrielles.

En effet, la plupart des moteurs tournent à vitesse constante. Pour moduler la vitesse des équipements de procédé, on a longtemps eu recours à divers dispositifs mécaniques.

Aujourd'hui, on fait surtout appel à des variateurs de vitesse électroniques.

Pour les applications industrielles exigeant une régulation précise de la vitesse, on a d'abord utilisé des moteurs à courant continu (CC) commandés par des variateurs électroniques à semi-conducteurs. Cette technique consistait à faire varier la vitesse proportionnellement à la tension.

La liaison d'un moteur à courant continu à une source du même type se fait à l'intermédiaire d'un convertisseur statique « Hacheur » qui permet la variation de la tension moyenne aux bornes de l'induit. Ces dernières années, la commande des convertisseurs statiques industriels était réalisée à l'aide des circuits électroniques à faible ou moyenne puissance et surtout qu'on a l'intention de commander un système à boucle fermée.

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

paramètres du correcteur PID, un travail de recherche continu et intensif est encore en cours pour le rehaussement de la qualité et l'amélioration des performances de la commande.

Dans le domaine de la commande, plusieurs techniques ont été établies pour assurer un réglage désiré. Ces techniques sont élaborées afin de rendre le système insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques [4]. Les techniques de commande classique de type PI ou PID couvrent une large gamme dans les applications industrielles. Ce sont des techniques de commande linéaires et présentent l'intérêt de la simplicité de mise en œuvre et la facilité de la synthèse.

Le présent travail fera l'objet de la commande de vitesse d'une machine à courant continu par un hacheur série alimenté par un GPV en boucle ouverte ensuite en boucle fermée. La boucle fermée a été réalisée pratiquement par un régulateur classique à PID qui est disponible dans notre laboratoire, ensuite on a utilisé une carte ARDOUINO qui fera le même travail. Cet mémoire est divisé en cinq chapitres, selon l'ordre suivant :

Le premier chapitre portera sur l'énergie solaire tout en souhaitant à travers cette partie donner des informations de base sur le soleil en définissant les termes tels que masse d'aire, ensuite, présentera le principe et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que les principales caractéristiques d'un GPV, enfin, on terminera ce chapitre par la réalisation pratique d'un générateur photovoltaïque en relevant les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V).

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des composants et du fonctionnement de la machine à courant continu. Après une brève introduction des constitutions de la machine et leurs principes de fonctionnement, nous présentons les différents types du moteur à courant continu, nous terminons ce chapitre par l'utilisation de cette machine.

Le troisième chapitre est divisé en deux parties; la première est consacrée à l'étude de la variation de vitesse d'un MCC par un hacheur série, nous commençons par présenter les types des réglages pour la variation de vitesse ensuite une généralité sur le hacheur série, enfin une définition de la commande MLI et son principe de base. La deuxième partie est consacrée à la réalisation pratique pour la commande de vitesse d'un moteur à courant continu utilisant un hacheur série à IGBT en boucle ouverte en faisant les essais avec une alimentation du réseau redressée ensuite avec un GPV constitué de huit panneaux en série à raison de 80W chacun.

Le quatrième chapitre se divise également en deux parties principales. La première partie est une présentation théorique de la commande PID avec les actions du régulateur. La deuxième partie est une réalisation pratique. Dans cette dernière, nous allons présenter des

résultats expérimentaux avec deux différentes alimentations: par la tension du réseau qui sera redressée ensuite par l'alimentation à GPV.

Dans le cinquième chapitre, nous exposerons une description théorique d'une carte d'acquisition qui est Arduino et son environnement de développement ensuite on va procéder à la réalisation d'un circuit de commande par cette carte. Cette dernière nous permettra d'obtenir des signaux carrés pour commander l'IGBT. La boucle fermée a été faite par un régulateur PID en utilisant Simulink-Matlab et la carte bien entendu est branchée au micro. La commande de vitesse est réalisée en boucle ouverte et en boucle fermée à vide et en charge en alimentant le moteur par une tension redressée et ensuite par un GPV.

Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale qui portera des perspectives pour la continuité de cet mémoire dans le futur.

### 1.1 Introduction :

Le soleil, une énergie disponible gratuitement et utilisable de plusieurs façons. Quand on parle d'énergie solaire, il convient donc de faire la différence entre :

Chaleur passive : Il s'agit de la chaleur que nous recevons naturellement du soleil. Cet élément peut être pris en compte dans la conception des bâtiments afin de réduire les besoins en chauffage.

Solaire thermique : Technologie utilisant l'énergie du soleil pour fournir de l'eau chaude (ou du chauffage) aux maisons et aux piscines.

Energie photovoltaïque (PV) : Technologie utilisant l'énergie du soleil pour fournir l'électricité alimentant appareils électriques et éclairage. Un système photovoltaïque produit de l'électricité grâce aux rayons du soleil. Là, nous sommes intéressés par l'énergie solaire photovoltaïque, Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée par une cellule peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension ( $I-V$ ) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

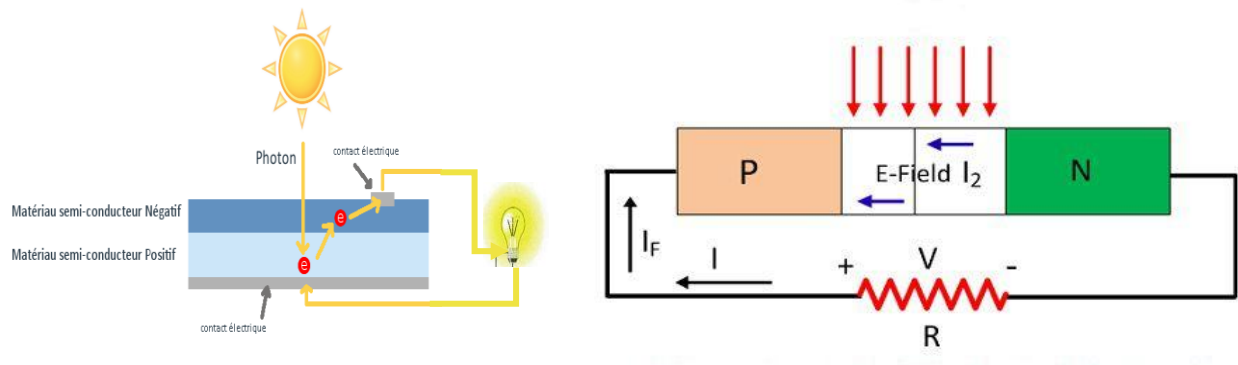
La caractéristique  $I-V$  du GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, son point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge qu'il alimente.

### 1.2 L'énergie solaire :

#### 1.2.1 Qu'est-ce que l'énergie solaire ?

L'expression « énergie solaire » est généralement associée aux méthodes qui permettent d'utiliser cette énergie. Situé à 146 millions de kilomètres de la terre, le soleil est une source d'énergie extraordinairement puissante. Pour s'en faire une idée, il suffit de savoir que le soleil envoie 1,6 milliards de kilowatts à la terre chaque année. Toutefois, 40 % seulement de cette énergie atteignent effectivement la surface terrestre, le reste étant réfléchi par les couches supérieures de l'atmosphère. [1].

L'énergie solaire peut être utilisée de deux manières : comme source de chaleur et comme source d'électricité. Le processus de transformation du rayonnement solaire en électricité est dit « photovoltaïque » (ou *PV*). Le schéma en dessous montre la production de l'électricité par une cellule photovoltaïque qui est exposée aux rayonnements solaires.



**Figure 1.1** Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque.

### 1.2.1.1 L'électricité solaire photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques (*PV*) convertissent directement l'énergie solaire en électricité à partir de modules de cellules solaires qui captent les photons pour produire du courant continu. Le surplus d'énergie peut être emmagasiné dans une pile ou converti en courant *CA* grâce à un inverseur. Les *PV* sont utilisés à grande échelle pour alimenter les tours de télécommunication et les bouées de navigation, les gîtes de camping éloignés et les calculatrices de poche. Ils peuvent également servir à alimenter une maison ou un bureau en électricité, le surplus étant tout simplement redistribué dans le réseau pour équilibrer la charge et réduire les coûts aux consommateurs. On remarque de plus en plus ces systèmes sur les toits et dans les fenêtres, où ils remplacent le matériel de construction conventionnel tout en générant de l'électricité [3].

## 1.3 le système photovoltaïque :

### 1.3.1 L'Effet Photovoltaïque:

C'est la conversion de l'énergie que transportent les photons de la lumière lorsqu'ils rentrent en collision avec des matériaux semi-conducteurs [4].

La clé pour produire un courant électrique utile est d'arriver à extraire les électrons libérés. Un procédé pour faire cela est d'introduire dans le matériau semi-conducteur des éléments chimiques qui contribuent à produire un excès d'électrons et de trous. Ces éléments, qui altèrent notablement les propriétés intrinsèques du semi-conducteur, s'appellent les dopants et le matériau est dit dopé lorsque le processus d'incorporation au semi-conducteur est achevé [5].

Un dopant approprié pour le silicium est le bore. La structure créée s'appelle un semi-conducteur de type *p* (*positif*).

Un autre dopant possible pour le silicium est le phosphore. Le semi-conducteur est dit de type (*néga*tif).

Si les photons de la lumière incidente communiquent de l'énergie aux électrons du semi-conducteur, quelques électrons peuvent traverser la barrière de potentiel, en étant expulsés hors du semi-conducteur dans un circuit extérieur. Ceci génère un courant électrique. Les électrons, après avoir parcouru le circuit externe, retournent dans le semi-conducteur par la face opposée.

Le matériau semi-conducteur ne stocke donc pas d'énergie électrique mais la génère, en transformant l'énergie incidente [5].

La physique quantique prédit un rendement théorique pour la cellule de silicium de 26 %, mais les cellules commerciales obtenues de manière industrielle ne montent pas au-dessus de 17%. Ces valeurs, impliquant une limitation sur la puissance électrique pouvant être obtenue, montrent que seulement une petite partie de l'énergie solaire peut générer de l'électricité [5].

#### 1.3.1.1 La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

Le matériau de base utilisé actuellement est le silicium. Celui-ci se trouve en très grande quantité sur notre planète puisqu'il constitue environ 28% de l'écorce terrestre. En fait, on le trouve surtout sous forme de dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) qui est le constituant principale du sable .Il est donc très abondant et peu coûteux. [6]

Quelques-unes de ses propriétés sont donnés au tableau ci-dessous : [6]

| Symbole | Propriété                           | Valeur                  |
|---------|-------------------------------------|-------------------------|
| Si      | Nombre atomique                     | 14                      |
|         | Masse atomique                      | 28,086                  |
|         | Masse volumique                     | 2330 kg /m <sup>3</sup> |
|         | Température de fusion               | 1683 K                  |
|         | Température d'ébullition            | 2628K                   |
|         | Coefficient de dilatation thermique | $4,2 \cdot 10^{-6}$     |

**Tableau 1.1 :** Caractéristique de silicium.

Cependant, pour être utilisable en électronique, le silicium doit être très pure .il suffit d'un atome d'impureté sur un million pour multiplier les porteurs de charge par dix million cette pureté coute très cher à obtenu.

Il existe plusieurs types de cellules en fonction de la structure microscopique du silicium : [6]

#### 1.3.1.1.1 Silicium monocristallin :

Les panneaux PV avec des cellules monocristallin sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau, et lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristallin. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le Wafer devient cellule.

C'est celui qui se rapproche le plus de modèle théorique d'écrit dans la suite, son rendement est de l'ordre de 15% .Mais il est aussi le plus difficile à obtenir.

Après réduction de l'oxyde au four électrique, on obtient de silicium pur à 98% ce qui n'est pas suffisant pour réaliser des cellules photovoltaïques. Une seconde opération de purification est nécessaire d'où son prix élevé. [6]



**Figure. 1.2 :** Silicium monocristallin.

#### 1.3.1.1.2 Silicium poly crystalline:

Les panneaux PV avec des cellules polycristallin sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir l'orientation différente des cristaux (tonalités différente). L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.

Il est obtenu par coulage de cristaux de silicium ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est plus faible que pour le silicium monocristallin de l'ordre de 10%. [6]



**Figure1.3 :** Silicium poly cristallin.

#### **1.3.1.1.3 Silicium amorphe ou en couche mince :**

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement énergétique n'excède pas actuellement les 6 à 8%. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Bien que le rendement de ses panneaux soit moins bon que celui des technologies poly cristallin ou monocristallin, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.

Il est en général utilisé pour des appareils de faibles puissances (montre, calculatrice...). Le rendement se situe aux alentours de 7%. [6]



**Figure 1.4:** Silicium amorphe ou en couche mince.

#### **1.3.1.2 Circuit équivalent d'une cellule PV:**

Pour comprendre le comportement électronique d'une cellule PV, il est utile de créer un modèle de circuit qui est électriquement équivalent, et est basé sur des composants électriques dont le comportement est bien connu. Un signal idéal cellule photovoltaïque peut être modélisé par une source de courant en parallèle avec une diode; en pratique, aucune cellule photovoltaïque est idéale, si la résistance shunt et les composants de la résistance série sont ajoutés au modèle. [8]

### 1.3.1.2.1 Modèle idéal de cellules photovoltaïques:

Dans l'obscurité de la cellule PV n'est pas actif et se comporte comme une diode, une diode à jonction pn, ne produisant pas de courant.

Le modèle le plus simple d'une cellule photovoltaïque se compose d'une diode et une source de courant connecté en parallèle. La source de courant actuelle  $I_{ph}$  est directement proportionnelle au rayonnement solaire. Les équations d'une cellule photovoltaïque idéale, qui représente le modèle d'une cellule idéale PV, sont: [8].

$$I_D(V) = I_c \left\{ e^{\frac{qV}{\gamma kT}} - 1 \right\} = I_o \left\{ e^{\frac{V}{\gamma V_{th}}} - 1 \right\} \quad 1.7$$

$$I_{ph} = \eta_g \times G \times A_c = \frac{q}{h \times \gamma} P_{in} \quad 1.8$$

Où  $G$  est l'irradiante ambiante,  $W / m^2$

$\eta_g$  est le rendement de génération, et  $A_c$  la cellule est efficace ou une zone active,  $m^2$   
La production nette du courant  $I$  est la différence entre le photo courant  $I_{ph}$  et le courant  $I_D$  de la diode.

$$I(V) = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left\{ e^{\frac{V}{\gamma V_{th}}} - 1 \right\} \quad 1.9$$

Où  $V$  est la tension de diode (V)

$I_{ph}$  est le photo-courant de la source de courant (proportionnel à l'intensité de lumière incidente),

$I_o$  est la saturation du courant d'obscurité ou la diode de courant inverse de saturation, A (environ  $10^{-10}$  / m)

$k$  est la constante de Boltzmann,  $1,38 \times 10^{-23}$  j / K

$h$  est la constante de Planck,  $6,626 \times 10^{-34}$  j.s

$q$  est la charge d'un électron, le  $1,6 \times 10^{-19}$  j / v, C ou As,

$T$  est la température de travail de la cellule en degrés Kelvin, K.

$$V_{th} = \frac{kT}{q} \quad 1.10$$

Où  $V_{th}$ - tension thermique,  $V_{th} = 25.7$ mv à  $25^\circ C$ ,

$Y$ - Diode non idéale facteur = 1 à 2 ( $Y = 1$  pour une diode idéale)

Les deux intensités  $I_o$  et  $I_{ph}$  sont fortement dépendantes de la température.

$$I_o(T) = I_{sc}(T_1) \left( \frac{T}{T_1} \right)^{\left( \frac{\frac{-qE_g}{kT_1} - 1}{\frac{V_{oc,T_1}}{e^{\gamma V_{th,T_1} - 1}}} \right)} \quad 1.11$$

$$I_{ph}(T) = G \frac{I_{sc,nom,T_1}}{G_{nom}} \left\{ 1 + \frac{I_{sc,T_2} - I_{sc,T_1}}{T_2 - T_1} (T - T_1) \right\} \quad 1.12$$

$G_{nom} = 1 \text{KW/m}^2$ ,

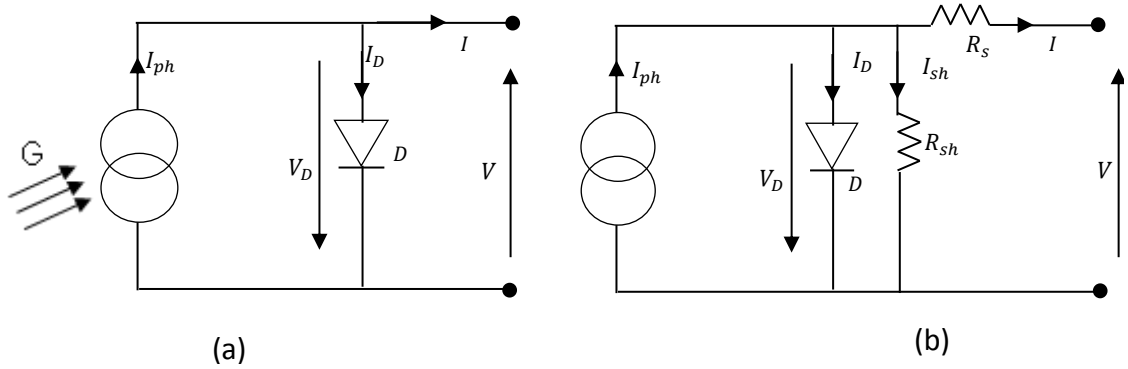
$E_G$  est la tension de bande interdite, ev.

$V_{oc}$  est la tension en circuit ouvert de sortie, qui possède un coefficient de température de  $2.3 \text{mv} / ^\circ \text{C}$

$I_{cc}$  est le courant de court-circuit, le plus grand courant de sortie, La tension à circuit ouvert  $V_{oc}$  est obtenue quand le courant de sortie est zéro,  $I = 0$  et le courant de la diode  $I_d$  sera égal le courant d'entrée généré  $I_{ph}$  en posant l'équation (1.9) égal à zéro.

$$I(V) = I_{ph} - I_o \left\{ e^{\frac{V}{\gamma V_{th}}} - 1 \right\} = 0 \quad 1.13$$

$$V_{oc} = \gamma V_{th} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_o} + 1 \right) \quad 1.14$$



**Figure1.5 :** Modèle électrique de la cellule photovoltaïque : (a) modèle de base et (b) le modèle pratique de la cellule photovoltaïque intégrant de résistances shunt et série.

### 1.3.1.2.2 Le courant de sortie de la cellule photovoltaïque :

Le circuit équivalent d'une cellule pratique PV est une source de courant constant en parallèle avec une diode idéale et une résistance de dérivation  $R_{sh}$ , ainsi que tous en série avec une résistance série  $R_s$ .

L'équation qui décrit la relation entre le courant de sortie et les caractéristiques de tension de sortie, I-V, de la cellule PV sont : [8]

$$I(V) = I_{ph} - I_D - I_{shunt} = I_L - I_o \left\{ e^{\frac{V - IR_s}{\gamma V_{th}}} - 1 \right\} - \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad 1.15$$

-La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;

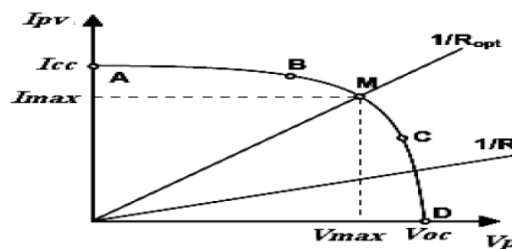
-La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la fonction dont celle-ci a été réalisée. [8]

### 1.3.1.3 Influence de la résistance de charge :

A partir de la caractéristique d'une cellule (figure 1.6), on définit le point de fonctionnement comme l'intersection de cette courbe avec la droite de charge de pente  $1/R$ .

Une cellule photovoltaïque n'impose ni un courant ni une tension mais une courbe (I, V) déterminée par la résistance de charge. Si celle-ci est petite, le point de fonctionnement se trouvera dans la partie (AB) de la courbe pour laquelle la cellule se comporte comme un générateur à courant pratiquement constant tandis que pour une grande résistance, ce point se trouvera dans la partie (CD) où la cellule se comporte comme un générateur pratiquement constante.

La puissance maximale  $P_m = I_m \cdot V_m$  sera obtenue pour une impédance  $R_m$ . Le point M caractérise le plus grand rectangle inscriptible sous la caractéristique de la cellule. [6]



**Figure1.6 :** Influence de la résistance de charge sur l'intensité et la tension fournie par une cellule photovoltaïque.

Au point M, l'hyperbole :

$$I_m = \frac{P_m}{V} \quad 1.16$$

A pour dérivée :

$$\left[ \frac{di}{dv} \right] = \left[ \frac{-p_m}{v^2} \right] = \frac{-I_m \times V_m}{V_m^2} = -\frac{I_m}{V_m} \quad 1.17$$

Et comme

$$V_m = R_m \times I_m \quad 1.18$$

Au point M de fonctionnement optimal on a :

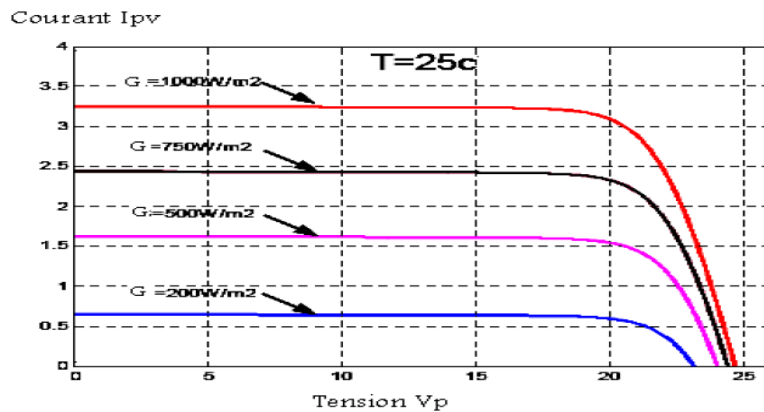
$$\left| \frac{di}{dv} \right| = \frac{1}{R_m} \quad 1.19$$

### 1.3.1.4 Influence de l'éclairement :

Lorsque l'éclairement varie, ce qui est inévitable le long d'une journée ensoleillée, la caractéristique d'une cellule photovoltaïque évolue. Il y a proportionnalité entre le photo-courant

et le flux lumineux tombant sur la cellule. Pour extraire le maximum d'énergie électrique, il faut adapter l'impédance de charge.

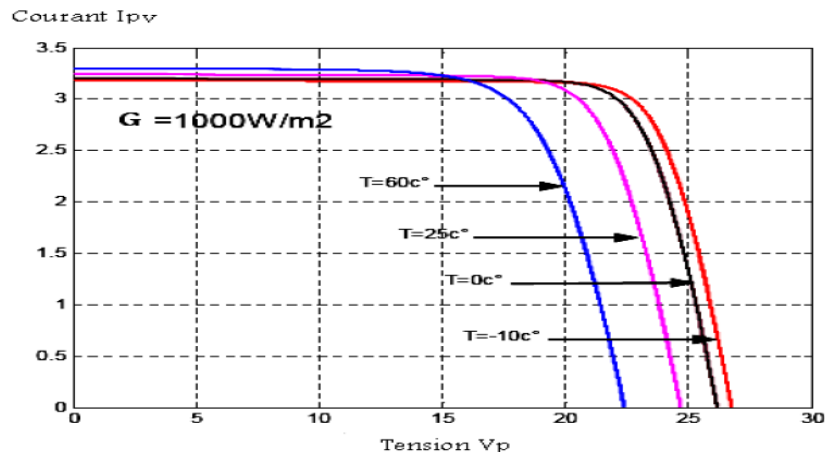
La figure (1.7) montre l'influence de l'éclairement aux performances d'une cellule photovoltaïque [6]



**Figure 1.7 :** Influence de l'éclairement sur les performances d'une cellule photovoltaïque.

#### 1.3.1.5 Influence de température :

Quand la température de la cellule augmente, il en est de même du photocourant  $I_x(E_g$  diminuant) mais également du courant d'obscurité  $I_d$  qui croît très vite, faisant ainsi chuter la tension comme le montre la figure ci-dessous [6]



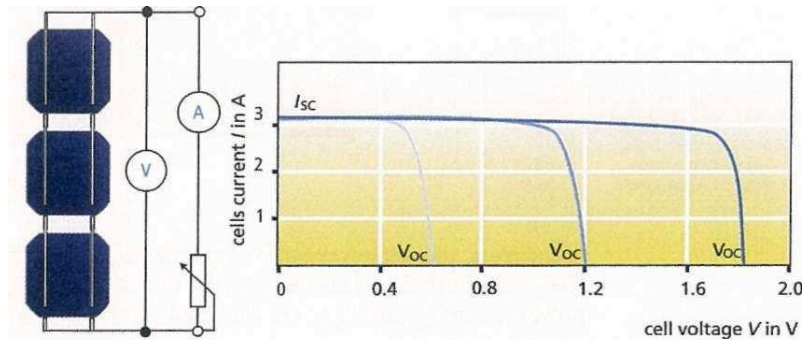
**Figure1.8 :** Influence de la température sur les performances d'une cellule photovoltaïque.

#### 1.3.1.6 Le module photovoltaïque :

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série ce qui représente en général un module. Les modules peuvent être connectés soit en série, en parallèle ou tout simplement en série et en parallèle afin d'obtenir une puissance élevée.

### 1.3.1.6.1 Montage série :

La tension délivrée par une cellule photovoltaïque est toujours très faible. La figure (1.9) montre trois cellules identiques montées en série et permettant d'avoir une tension plus grande au bornes de la résistance de charge. [6]



**Figure1.9 :** Caractéristiques de cellules photovoltaïques en séries.

Connexion en série de cellules identiques n: [8]

- Lorsque connectés en série, la tension s'ajoute

$$V_{\text{total}} = V_{\text{oc1}} + V_{\text{oc2}} + V_{\text{oc3}} + \dots + V_{\text{ocn}} \quad 1.20$$

- Le courant reste constant

$$I_{\text{total}} = I_{\text{sc}} \quad 1.21$$

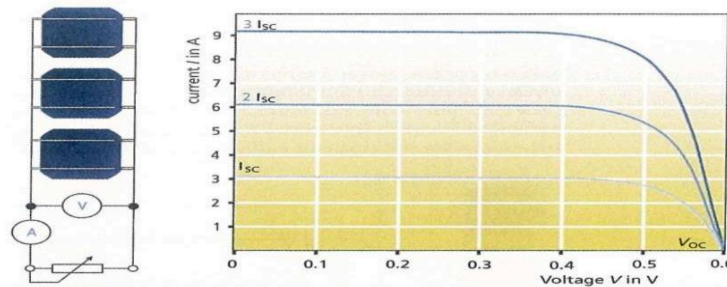
Avec une connexion en série de sources de tension, la tension de chaque source s'ajoute progressivement.

Pour n cellules photovoltaïques reliées en série, chacune avec tension de circuit ouvert  $V_{\text{oc}}$ , la tension de circuit ouvert du module est la suivante : [8].

$$V_{\text{Moc}} = n \times V_{\text{oc}} \quad 1.22$$

### 1.3.1.6.2 Montage parallèle :

Pour accroître le courant, il suffit de placer en parallèle un certain nombre de cellules élémentaires la figure (1.10) montre un module photovoltaïque composé de trois cellules montées en parallèle ; le courant qui passe dans la résistance de charge est trois fois celui qui circule dans chacune des cellules identiques [6].



**Figure1.10 :** Caractéristiques de cellules photovoltaïques en parallèle.

Connexion en parallèle de cellules k identiques: [8]

- Lorsque branché en parallèle, les courants s'ajoutent

$$I_{\text{total}} = I_{sc1} + I_{sc2} + \dots + I_k \quad 1.23$$

- La tension reste constante

$$V_{\text{total}} = V_{oc} \quad 1.24$$

Avec la connexion parallèle de sources de tension, les courants s'ajoutent. La tension correspond à celle d'une source unique.

Pour k connectés en parallèle des cellules photovoltaïques, chacune avec un court-circuit courant  $I_{sc}$ , le module de court-circuit est:

$$I_{Msc} = K \times I_{sc} \quad 1.25$$

Si chaque cellule a une résistance série R, on aura :

$$R_{Ms} = \frac{n}{k} R_s \quad 1.26$$

La même formule est appliquée pour le calcul de la résistance shunt:

$$R_{Msh} = \frac{n}{k} R_{sh} \quad 1.27$$

La puissance P maximale livrable à une charge résistive est :

$$P_M = n \times k \times P_m \quad 1.28$$

La tension  $V_M$  aux bornes du module et la caractéristique d'équation du courant peut être exprimée en termes de chaque cellule ou les caractéristiques du module, à savoir

$$I_M(V_M) = I_{Msc} \left( 1 - e^{\frac{V_M - V_{M,OC} + R_{M,s} \times I_M}{n \gamma V_{th}}} \right) \quad 1.29$$

Ou, en termes de caractéristiques des cellules individuelles

$$I_M(V_M) = k \times I_{sc} \left( 1 - e^{\frac{V_M - n \times V_{oc} + \frac{n}{k} R_s \times I_M}{n \gamma V_{th}}} \right) \quad 1.30$$

En termes de modèle simple dans la figure 1.9.

$$I_M(V_M) = K \times I_{ph} - k \times I_o \left( e^{\frac{V_M}{n \gamma V_{th}}} - 1 \right) \quad 1.31$$

### 1.3.1.7 Photovoltaïque facteur de forme et rendement des cellules

#### 1.3.1.7.1 Rendement de l'énergie de la cellule :

Le rendement de la cellule  $\eta$ , est le pourcentage de la puissance convertie (à partir de la lumière absorbée à l'énergie électrique), quand une cellule PV est connectée, à un circuit électrique. Ce rendement est calculé en utilisant le rapport du point de puissance maximale,  $P_m$  divisé par l'éclairement lumineux d'entrée ( $G$  en  $W/m^2$ ) dans des conditions d'essai standard (STC) et la surface de la cellule PV,  $A_c$  en  $m^2$ . [8]

$$\eta = \frac{P_m}{G \times A_c} \quad 1.32$$

STC spécifie une température de 25 ° C, un éclairement énergétique de 1000W/m<sup>2</sup>, et une vitesse de 0 vent m /s avec une masse d'air AM=1,5 [8]

#### 1.3.1.7.2 Le facteur de forme:

Un autre terme de l'efficacité globale comportement d'une cellule photovoltaïque est le facteur de forme, FF, qui est le rapport de la puissance maximale divisée par le produit de la tension Voc de circuit ouvert et le courant de court-circuit I<sub>cc</sub>.

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{I_{mpp} V_{mpp}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{\eta A_c G}{V_{oc} I_{sc}} \quad 1.33$$

#### 1.3.1.8 La comparaison de différents types de cellules photovoltaïques : [8]

| Type                    | Rendement | Rendement du laboratoire |
|-------------------------|-----------|--------------------------|
|                         | %         | %                        |
| Silicium monocristallin | 12-15     | 24.7                     |
| Silicium polycristallin | 11-14     | 19.8                     |
| Le silicium amorphe     | 5-7       | 12.7                     |

**Tableau 1.2:** La comparaison de différents types de cellules photovoltaïques.

#### 1.3.1.9 Avantages et inconvénients du PV :

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

##### 1.3.1.9.1 Avantages du photovoltaïque :

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

- l'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme
  - les systèmes solaires photovoltaïques sont simples et rapides à installer
  - la production électrique photovoltaïque est robuste, tolérante aux pannes et nécessite très peu de maintenance
  - l'effet photovoltaïque ne comporte aucune partie en mouvement
  - l'installation photovoltaïques présentent un bilan énergétique positif

#### **1.3.1.9.2 Inconvénients du photovoltaïque :**

- La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux. Cela se traduit dans le prix de l'installation qui, aujourd'hui, reste cher
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et sont de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an.

#### **1.3.1.10 Les caractéristiques des panneaux solaires :**

La caractéristique de la cellule solaire n'est pas linéaire et varie en fonction de l'irradiation et la température.

Lors de l'élaboration de notre projet, nous avons utilisé le générateur photovoltaïque constitué de module PV produit par la société SUNTECH.

Le panneau de 80W d'une tension à vide  $V_{co}=21,9V$ , un courant de court-circuit  $I_{sc}=4,95A$  et une puissance maximale  $P_{max}=80W$ . Le tableau 4.1 résume les caractéristiques essentielles de ce panneau

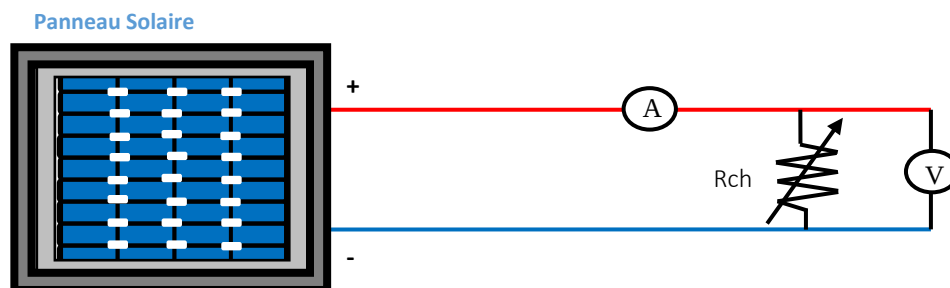
| Nom de fabrication                   | SUNTECH          |
|--------------------------------------|------------------|
| Model                                | STP 080 12/Bb    |
| Tension à circuit ouvert( $V_{OC}$ ) | 21.9V            |
| La tension optimale( $V_{opt}$ )     | 17.5V            |
| Courant de court-circuit( $I_{SC}$ ) | 4.95A            |
| Courant optimal( $I_{opt}$ )         | 4.58A            |
| La puissance maximale ( $P_{Max}$ )  | 80W              |
| La température opérationnelle        | -40° C à 85°C    |
| La tension maximale du système       | 715V DC          |
| Technologie de fabrication           | Mono-SI          |
| Tolérance de puissance               | ±5%              |
| Dimensions                           | 1195×541×30 (mm) |
| Poids                                | 8 kg             |

**Tableau 1.3:** Les caractéristiques du panneau solaire de 80W.**1.3.1.10.1 Schéma de relevé des caractéristiques :**

Plusieurs tests ont été effectués pour relever des caractéristiques du panneau. Le premier test est effectué le 26/05/2019 (journée soleillée) de 12h à 14h. Nous avons relevés les caractéristiques pour les différentes positions des panneaux de 80W (en face au soleil).

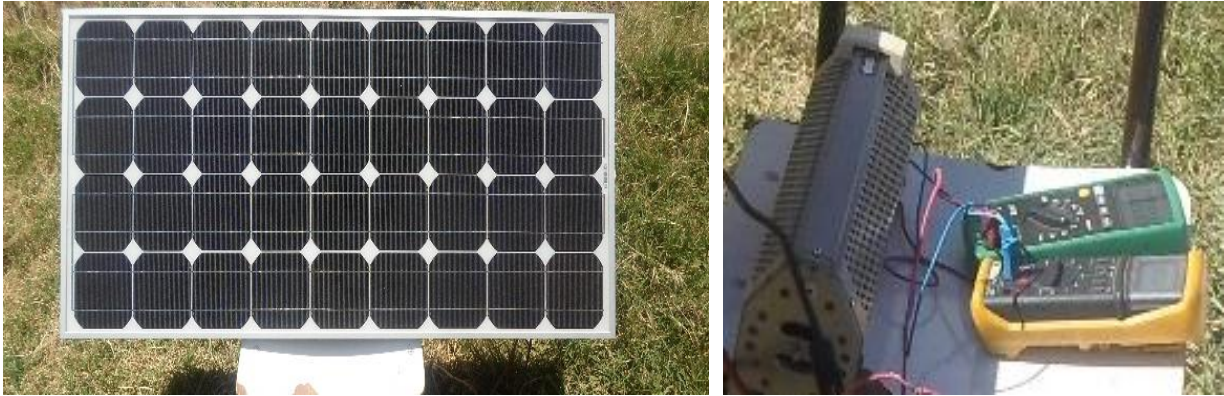
**1.3.1.10.2 Un seul panneau solaire :**

La figure (1.11), représente le schéma électrique de mesure d'un seul panneau. Il est composé d'un panneau solaire, d'un ampèremètre pour mesurer le courant, d'un voltmètre pour la tension de sortie. Un rhéostat est utilisé comme une charge variable.

**Figure1.11 :** schéma électrique de mesure d'un seul panneau.

### 1.3.1.10.2.1 Le matériel utilisé :

- 1 Panneaux de 80W.
- 1 Ampèremètre.
- 1 Voltmètre.
- 1 Résistance variable (rhéostat).

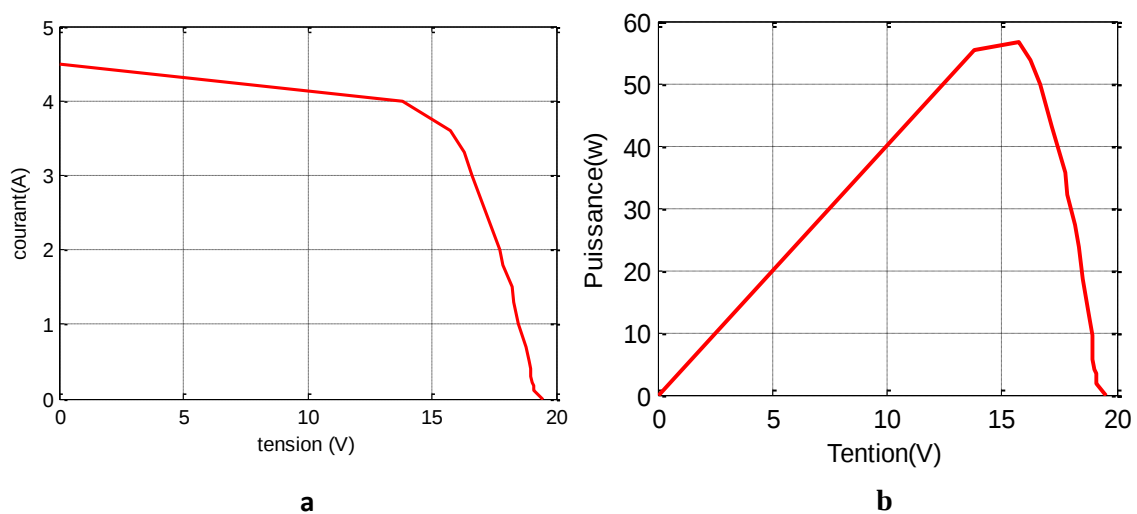


**Figure 1.12:** La réalisation pratique d'un module photovoltaïque de 80 W.

Les caractéristiques électriques  $\{ I_{pv}=f(V_{pv}), P_{pv}=f(V_{pv}) \}$  du modules Photovoltaïques que nous avons utilisé montrent les différentes puissances obtenues durant la journée du 26/05/2019.

### 1.3.1.10.2.2 La puissance et le courant en fonction de la tension :

Voilà le résultat de mesure d'un panneau :



**Figure 1.13 :** Résultats de mesure (a) caractéristique de courant- tension  
(b) caractéristique puissance-tension de panneau de 80W.

Nous observons sur la figure (1.13) que la puissance atteint une valeur maximale de 57W, ainsi que le courant maximal  $I = 4.5A$  et tension maximal  $V = 19.5$  durant une journée soleillée (à 12h). Ce résultat pratique obtenu valide bien celui de la théorie.

#### 1.3.1.10.3 Deux panneaux de 80W en séries :

La figure (1.14), représente le schéma électrique de mesure de deux panneaux en série. Il est composé de deux panneaux solaires, d'un ampèremètre pour mesurer le courant, d'un voltmètre pour la tension de sortie. Un rhéostat est utilisé comme une charge variable.

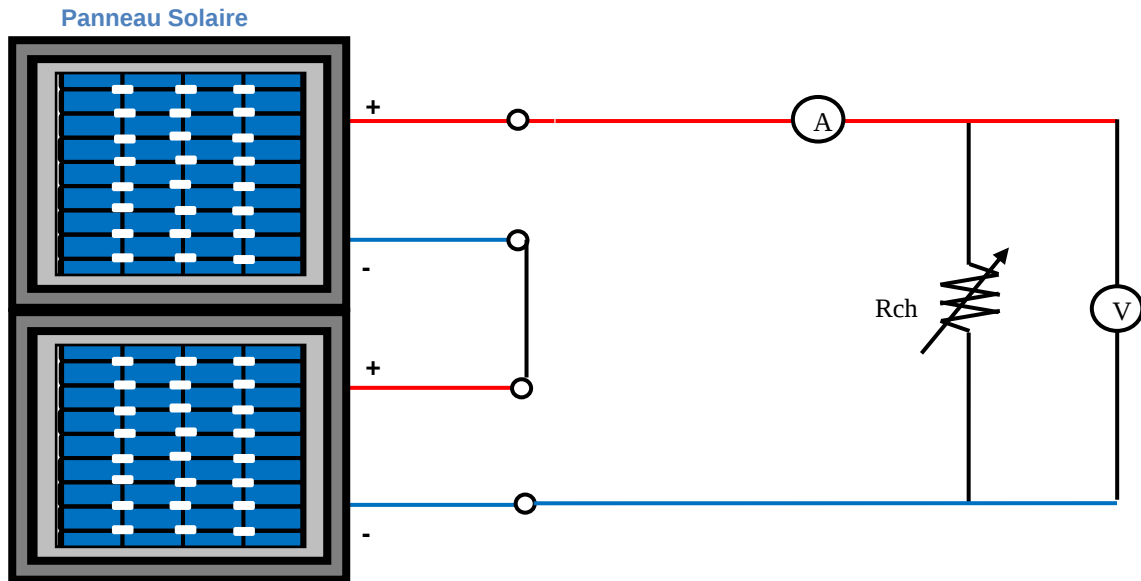


Figure 1.14: Schéma électrique de mesure de deux panneaux solaires en série.

##### 1.3.1.10.3.1 Le matériel utilisé :

- 2 Panneaux de 80W.
- 1 Ampèremètre.
- 1 Voltmètre.
- 1 Résistance variable (rhéostat).

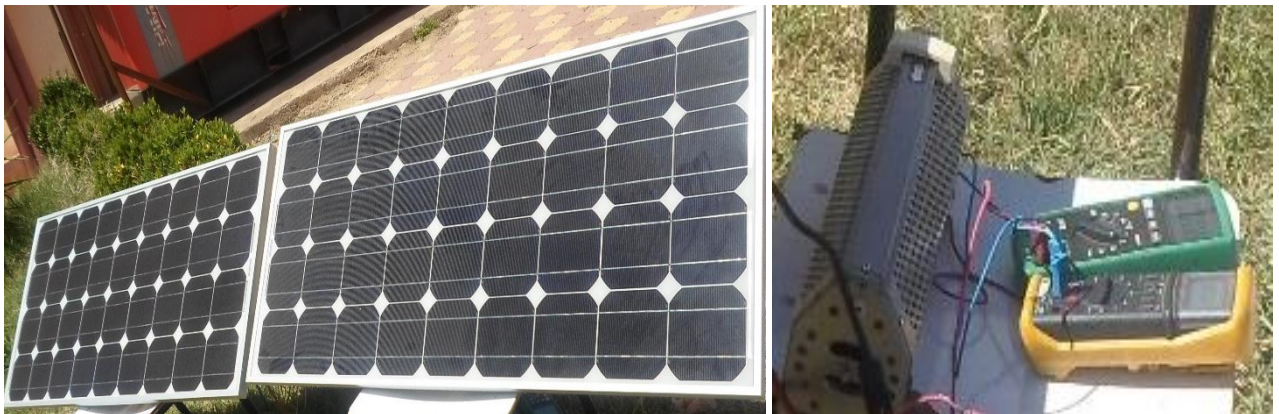
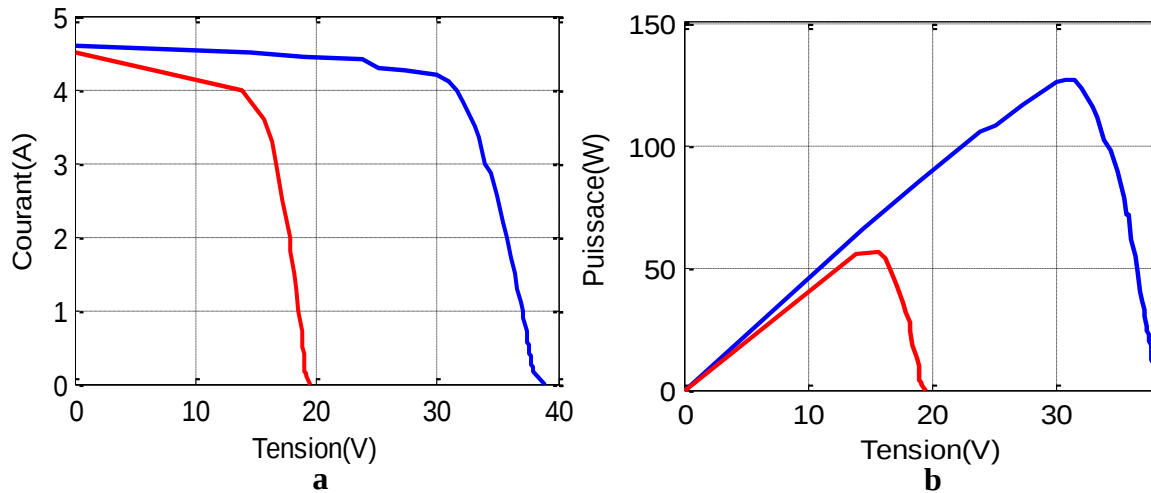


Figure 1.15: La réalisation pratique de deux modules photovoltaïques en série de 80 W.

### La puissance et le courant en fonction de la tension :

- Ce test est effectué le 26/05/2019 (journée ensoleillée) à 13h. Nous avons étudié les caractéristiques de deux panneaux de 80W chacun en séries.

La figure (1.17) présente le courant en fonction de la tension et la puissance en fonction de la tension dans une journée ensoleillée.



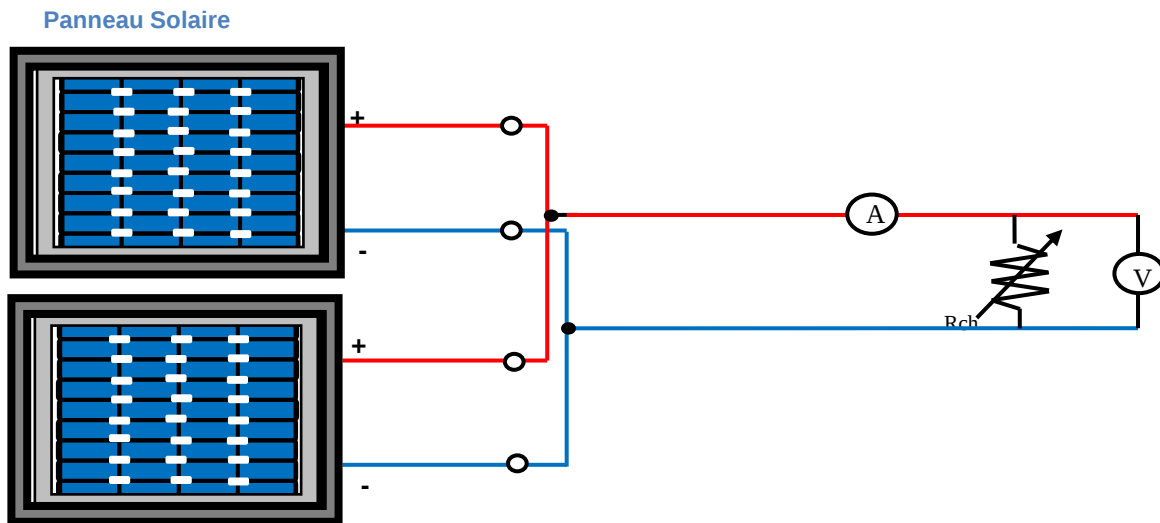
**Figure 1.16 :** Résultats de mesure (a) caractéristique du courant-tension et (b) caractéristique puissance-tension de deux panneaux de 80W montés en séries.

On observe sur la figure (1.16) que la puissance atteint une valeur maximale de 126.3W, et la valeur maximale de tension  $V = 38.34V$  durant une journée ensoleillée. On remarque aussi que la tension et la puissance sont approximativement doublées dans deux panneaux en séries par rapport à un seul panneau tandis que le courant reste pratiquement constant.

On conclut que si on veut obtenir une tension élevée selon notre besoin, on doit mettre en série plusieurs panneaux.

#### 1.3.1.10.4 Deux panneaux 80W en parallèles :

La figure (1.17), représente le schéma électrique de mesure de deux panneaux en parallèles. Le même matériel a été utilisé.



**Figure 1.17 :** Schéma électrique de mesure de deux panneaux solaires en parallèle.

##### 1.3.1.10.4.1 Le matériel utilisé :

- 2 Panneaux de 80W.
- 1 Ampèremètre.
- 1 Voltmètre.
- 1 Résistance variable (rhéostat).

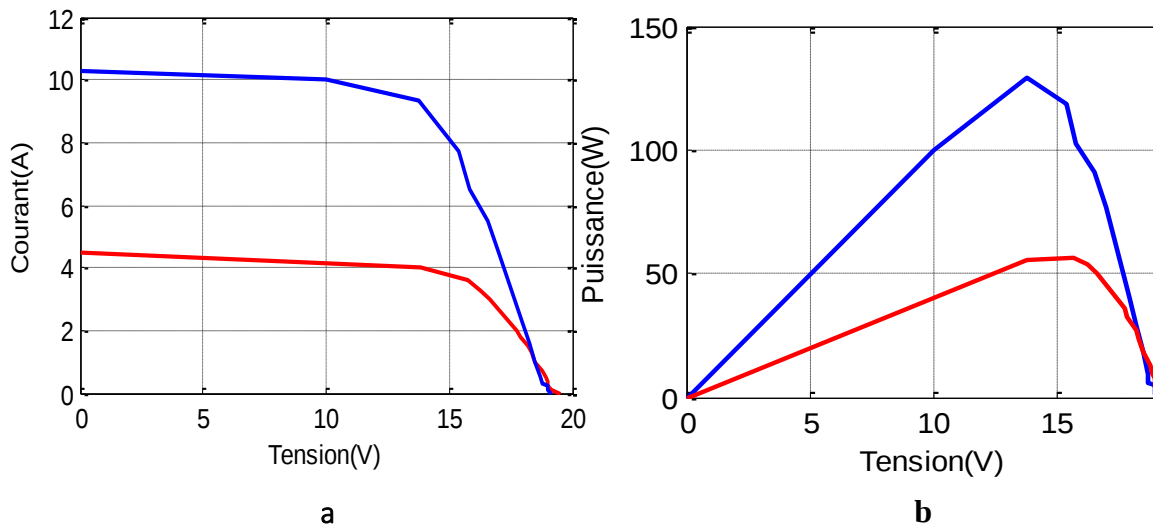


**Figure 1.18 :** La réalisation pratique de deux modules photovoltaïques en parallèle de 80 W.

### 1.3.1.10.4.2 La puissance et le courant en fonction de la tension de deux panneaux 80W en parallèles :

- Ce test est effectué le 11/06/2019 à 14 :30h . Nous avons étudié les caractéristiques de deux panneaux de 80W chacun en parallèle.

La figure (1.19) présente la variation du courant en fonction de la tension et la puissance en fonction de la tension dans une journée en soleillée et parfois nuageuse.



**Figure 1.19 :** Résultats de mesure (a) caractéristique de courant tension et (b) caractéristique puissance tension de deux panneaux de 80W montés en parallèles .

On observe aussi sur la figure (1.19) que la puissance atteint une valeur maximale de 128.75W et la valeur du courant  $I_{sc} = 10.25A$  durant une journée soleillée. D'après ces résultats, en principe le courant devrait être double ce qui n'est pas le cas, cela est du principalement à un passage d'un nuage au moment des relevés des valeurs.

### 1.3.1.10.5 Interprétation :

Cette partie a présenté les différentes caractéristiques du générateur photovoltaïque. D'après les résultats obtenus, la puissance et la tension délivrée par un seul panneau est inférieure à la puissance et la tension de plusieurs panneaux en séries.

Ainsi que la puissance et le courant délivré par un seul panneau est inférieur à la puissance et le courant de plusieurs panneaux en parallèle selon la position du soleil.

Enfin pour une grande tension, il faut monter plusieurs panneaux en série et pour un courant élevé, il faut mettre plusieurs panneaux en parallèle c'est à dire pour une forte puissance, il faut monter les panneaux en série et en parallèle en même temps.

**1.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons expliqué l'importance de l'énergie solaire, la modélisation d'une cellule photovoltaïque et les caractéristiques du générateur PV avec ses performances.

D'après la pratique d'un générateur photovoltaïque d'une puissance de 80W, on a remarqué que l'éclairement a une influence directe sur le courant de court-circuit ainsi que la puissance. Par contre, la température n'a aucun effet sur le courant de court-circuit. En ce qui concerne la tension à circuit-ouvert, l'éclairement a un effet négligeable. La température en général affecte la tension de sortie du panneau.

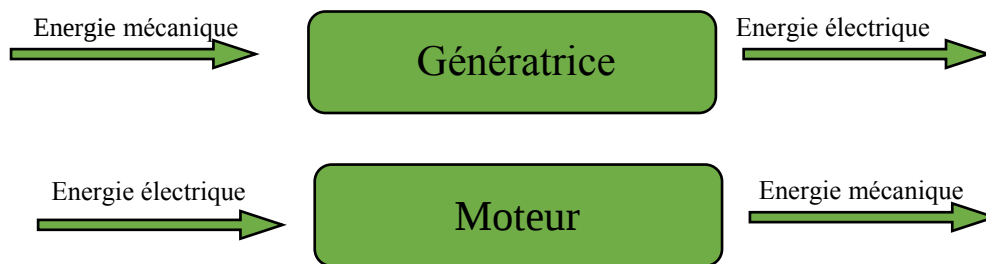
**2.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, on va présenter la constitution de la machine à courant continu et leur principe de fonctionnement. Il s'agit d'établir les différents types des moteurs à courant continu. Ensuite nous donnerons les avantages et les inconvénients. Enfin le domaine d'utilisation.

**2.2 Définition :**

Les machines à courant continu sont des convertisseurs électromécaniques d'énergie :

Soit ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique lorsqu'ils sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en moteur. Soit ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînante. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en générateur [9].

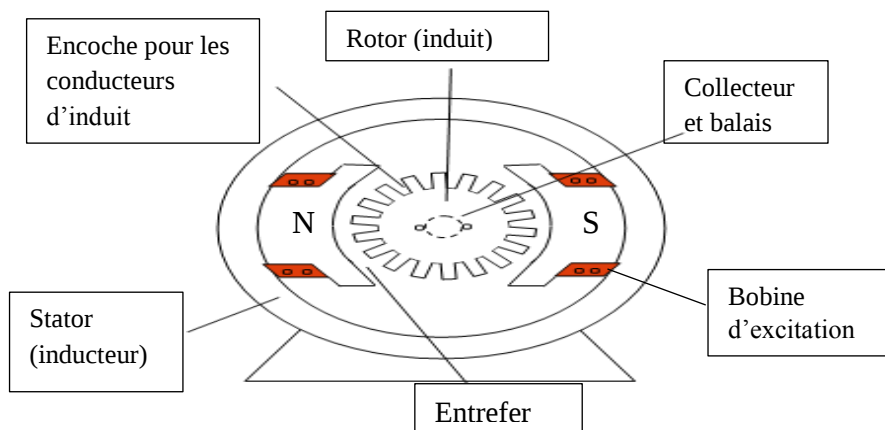


**Figure 2.1 :** Fonctionnement de machine à courant continu

**2.3 Constitution :**

La machine à courant continu est constituée de trois parties principales :

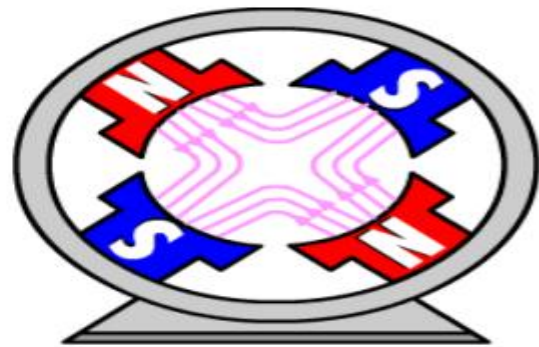
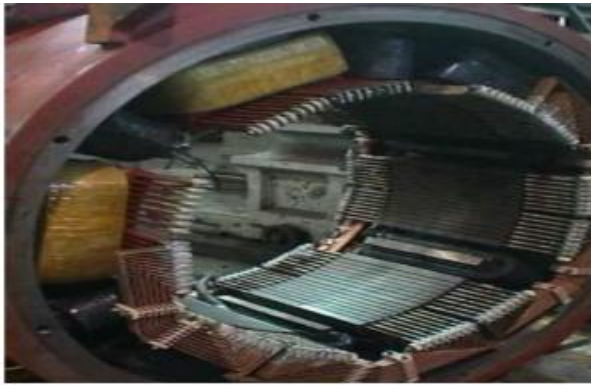
- l'inducteur.
- l'induit.
- le dispositif collecteur / balais.



**Figure 2.2 :** Description de la machine à courant continu

**a) L'inducteur :**

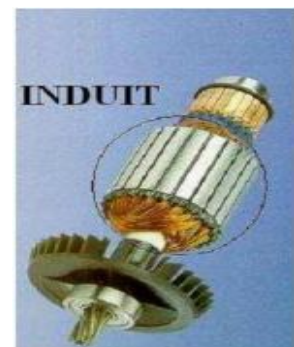
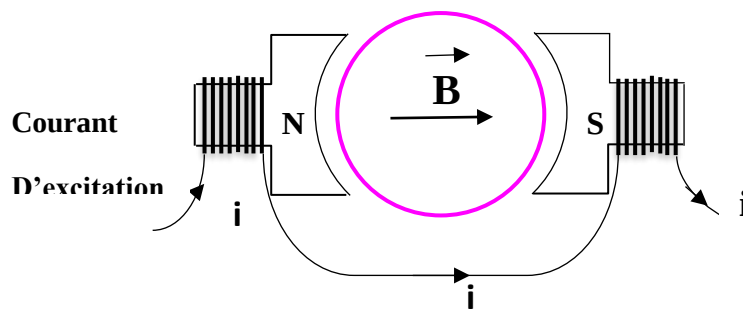
L'inducteur est la partie fixe du moteur. Il est constitué d'un aimant permanent ou d'un électroaimant alimenté par le courant continu d'excitation ( $I_e$ )



**Figure 2.3 :** L'inducteur de la machine à courant continu

**b) Le rotor (l'induit):**

Le rotor est constitué d'encoches dans lesquelles est enroulé un bobinage de (N) conducteurs alimentés en courant continu ( $I$ ) via le collecteur.



**Figure 2.4 :** Le rotor de la machine à courant continu.

### c) Le collecteur et les balais :

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit [10].

Les balais (ou charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation

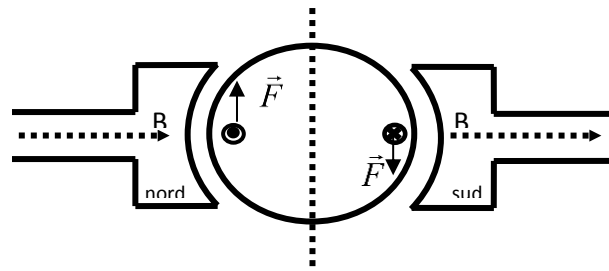


Figure 2.5 : Le dispositif collecteur / balais.

## 2.4 Principe de fonctionnement :

### 2.4.1 En moteur :

Les conducteurs de l'induit plongés dans le champ radial créé par l'inducteur et parcourus par le courant d'induit sont soumis à des forces de Laplace. Deux conducteurs diamétralement opposés créent **un couple électromagnétique** dont le moment tend à faire tourner le rotor [11].



Le sens du courant dans un conducteur doit cependant s'inverser à chaque passage de la ligne neutre ; l'alimentation de l'induit du moteur étant de nature continue, c'est le système balais –collecteur qui permet de réaliser cette commutation :

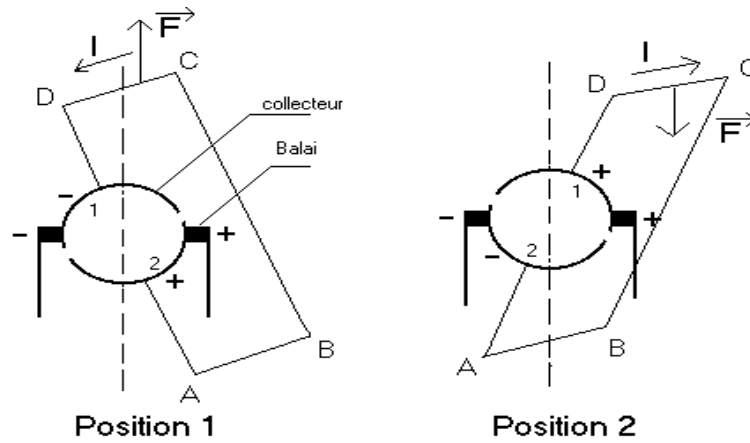


Figure-2.6 : Sens du courant.

**2.4.2 En Génératrice :** L'inducteur est alimenté par une tension continue et produit un champ magnétique constant (**Figure : 2.7**). L'induit est entraîné en rotation par un moteur. Il est le siège de variation de flux au travers de spires qui le constituent. Il en résulte la création d'une **f.é.m.** alternative qui est redressée et transmise au circuit extérieur par l'ensemble collecteur-balais.

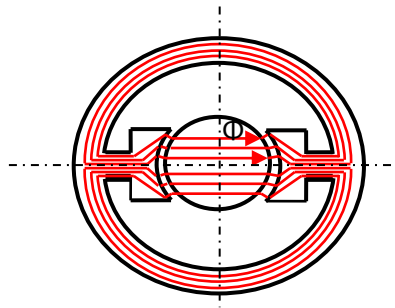


Figure 2.7: Ligne de champ magnétique inducteur.

### 2.4.3 Modèle équivalent de l'induit : [12]

La figure ci-dessous montre le modèle équivalent de l'induit en régime dynamique :

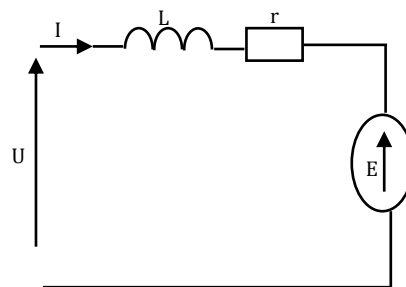


Figure 2.8 : Modèle équivalent de l'induit en régime dynamique.

**2.4.4 Equations de fonctionnement :****2.4.4.1. Equations Electromécanique du moteur à courant continu en régime dynamique :**

On a donc deux relations de proportionnalité : entre la f.é.m. et la vitesse du rotor

$$E = k_e \cdot \Phi \cdot \Omega = k_e \cdot \Omega \quad 1.2$$

Et un moment du couple électromagnétique directement proportionnel au courant

$$C_{em} = k_c \cdot \Phi \cdot I = k_c \cdot I \quad 2.2$$

Avec :

$C_{em}$  : Couple électromagnétique (N.m).

$k$  : Constante du moteur qui ne dépend que de sa constitution on montre que :

$$k = \frac{p}{2\pi a} \quad 2.3$$

$p$  : Nombre de paires de pôles.

$a$  : Nombre de paires de voies d'enroulement.

$\Phi$  : Flux créé par un pôle inducteur, en webers (Wb).

$I$  : Intensité du courant dans chaque conducteur de l'induit, en ampères (A).

$N$  : Le nombre de conducteurs (ou de brins-deux par spires).

$E$  : f.e.m. (volts - V).

$\Omega$  : vitesse de rotation du rotor (rad.s<sup>-1</sup>).

**2.4.4.1.1. Equations électriques:**

La tension d'induit (en convention récepteur)

$$U(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt}(t) + e(t) \quad 2.4$$

Avec :

$U(t)$  : La tension d'induit (v).

$R$  : Résistance d'induit (*Ohm*).

$L$  : Inductance d'induit (Henri-H).

$e(t)$  : f.é.m. (volts-v).

**2.4.4.1.2. Equation mécanique :**

Le principe fondamental de la dynamique (PFD)

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_u - C_r \quad 2.5$$

Avec :

$J$  : Moment d'inertie (kg.m<sup>2</sup>).

$C_u$  : Couple utile (N.m).

$C_r$  : Couple résistant (N.m).

Avec :

$$C_u = C_{em} - C_p \quad 2.6$$

Tel que :

$C_p$  : couple de pertes (dû aux pertes ferromagnétiques et les pertes mécanique)(N.m)

On suppose que le moment du couple de perte est de forme :  $C_p = f \cdot \Omega$

$f$ : Coefficient de frottement visqueux (m.N.rad<sup>-1</sup>.s).

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f \cdot \Omega - C_r \quad 2.7$$

#### 2.4.4.2. Equations électromécaniques dans le domaine de Laplace :

La transformée de Laplace de l'équation :  $U(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt}(t) + e(t)$

Est :

$$U(P) = RI(p) + LI(p) + E \quad 2.8$$

La transformée de Laplace de l'équation :

$$E = k \cdot \Phi \cdot \Omega$$

Est :

$$E = k \cdot \Phi \cdot \Omega(p) \quad 2.9$$

La transformée de Laplace de l'équation :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f \cdot \Omega - C_r$$

Est :

$$J \cdot p \cdot \Omega(p) = k \cdot \Phi \cdot I - f \cdot \Omega - C_r \quad 2.10$$

Soit :

$$\Omega(p) = \frac{k_c \cdot I - C_r}{Jp + f} \quad 2.11$$

Voila le schema bloc de du MCC en boucle ouverte :

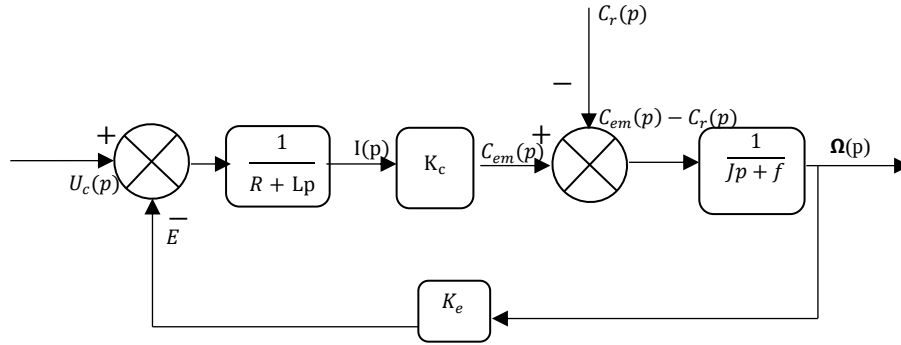
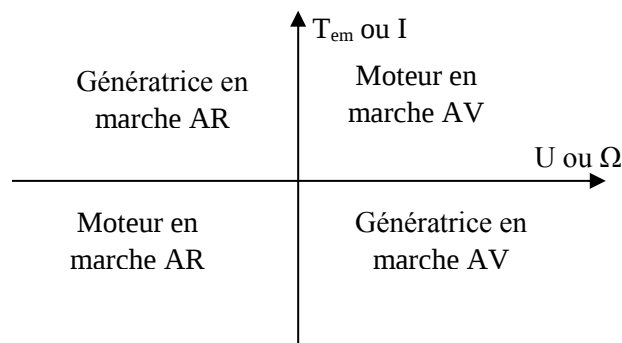


Figure 2.9 : Schéma fonctionnel du MCC en boucle ouverte

### 2.4.5 Réversibilité :

La machine peut fonctionner dans les 4 quadrants possibles, en moteur ( $P_{em} > 0$ ) ou en génératrice ( $P_{em} < 0$ ).



**Remarque :** Les machines à courant continu n'étant pratiquement plus utilisées que comme moteurs, la théorie sera développée à partir de ce mode de fonctionnement.

## 2.5 Classification des moteurs à courant continu :

On constate deux types :

### 2.5.1 Les moteurs à inducteur à aimant permanent :

Il n'y a pas de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent. Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micromoteurs sont des moteurs à aimant permanent. Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu. Ils sont très simples d'utilisation [13].

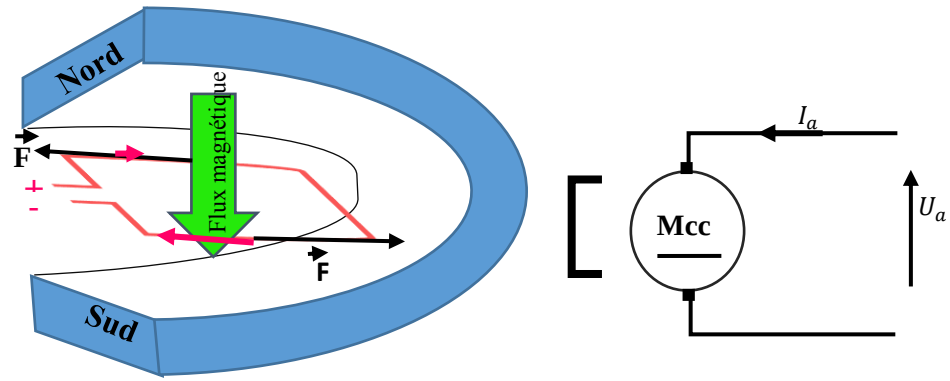


Figure 2.10 : Moteur à aimant permanent

### 2.5.2 Les moteurs à inducteur bobiné :

Il existe 4 types différents de moteurs électriques qui sont classés en fonction du type d'excitation qui est employé, qui sont : [14]

- A excitation séparée,
- A excitation shunt,
- A excitation série,
- A excitation compound ou composée.

#### 2.5.2.1 Moteurs à excitation séparée :

Ce mode d'excitation nécessite deux sources d'alimentations. L'alimentation de l'enroulement inducteur est prise sur une source indépendante de la source principale. On change le sens de rotation en permutant les bornes de l'induit ou de l'inducteur. Le circuit électrique est représenté par le schéma suivant :

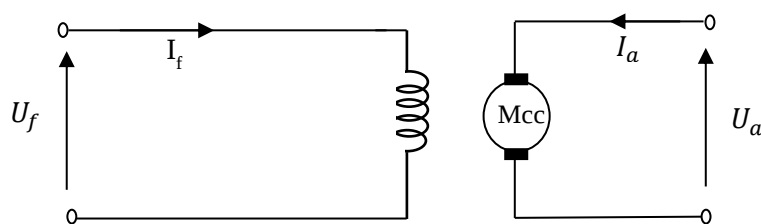


Figure 2.11: Schéma électrique d'un moteur à excitation

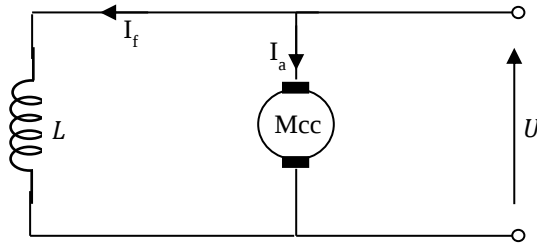
#### - Caractéristiques :

- ✓ L'inducteur est alimenté par une source indépendante,
- ✓ Grande souplesse de commande,
- ✓ Large gamme de vitesse,
- ✓ Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse,

- ✓ Fourni un couple important à faible vitesse.

### 2.5.2.2 Moteur à excitation shunt (dérivée) :

L'enroulement d'excitation est connecté en parallèle sur l'alimentation du moteur, il possède les mêmes propriétés que le moteur à excitation séparée du fait que, dans les deux cas, l'inducteur constitue un circuit extérieur à celui de l'induit. Le circuit électrique est représenté par le schéma suivant :



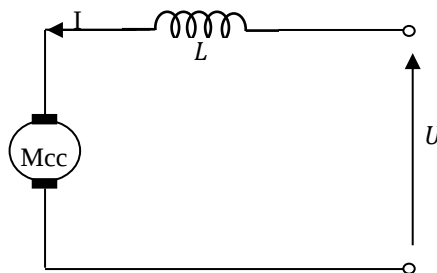
**Figure 2.12** Schéma électriques d'un moteur à excitation shunt

#### Caractéristiques

- ✓ couple constant quel que soit la charge.

### 2.5.2.3 Moteur à excitation série :

Le circuit excitation est placé avec l'induit du moteur. Sa particularité est d'avoir un inducteur qui est traversé par le même courant, l'inducteur possède donc une résistance plus faible que celle des autres types de machines. L'inducteur est en série avec l'induit : une seule source d'alimentation suffit. On change le sens de rotation en permutant les connexions de l'induit et de l'inducteur. Le circuit électrique est représenté par le schéma suivant :



**Figure 2.13:** Schéma électrique d'un Moteur à excitation

#### - Caractéristiques

- ✓ Démarrage fréquent avec couple élevé; couple diminuant avec la vitesse.
- ✓ Toujours mettre le moteur en charge mécanique car si le couple est faible, alors  $\Omega$  tend vers l'infini.

#### 2.5.2.4 Moteur à excitation composée (compound) :

C'est une combinaison des excitations shunt et série, on peut réaliser un compound à additif (si les flux des deux enroulements s'additionnent) ou soustractif (dans le cas contraire).

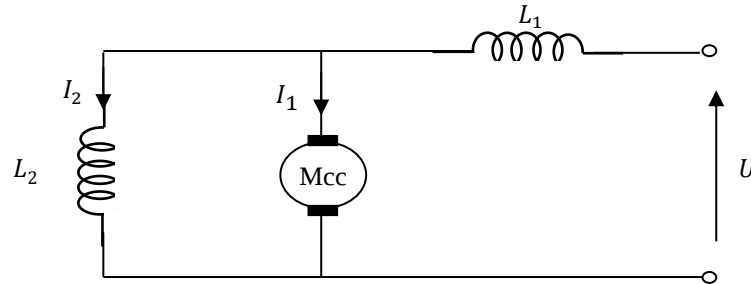


Figure 2.14 : Schéma électrique d'un Moteur à excitation composée

#### - Caractéristiques

- ✓ Le MCC à excitation composée réunit les avantages du série et du shunt tout en éliminant le phénomène d'emballement du série.
- ✓ Entraînements de grande inertie.
- ✓ Couple très variable avec la vitesse.

### 2.6 Les avantages Et les inconvénients :

#### 2.6.1 Les avantages :

- Alimentation aisée dans les systèmes transportant leur réserve d'énergie (autonome): pile ou batterie.
- La variation de fréquence de rotation est simple à réaliser.

#### 2.6.2 Les inconvénients :

Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou charbons et le collecteur rotatif :

- Plus la vitesse de rotation est élevée, plus les balais doivent appuyer fort pour rester en contact et plus le frottement est important.
- Aux vitesses élevées les charbons doivent être remplacés très régulièrement.
- Le contact électrique imparfait cause des arcs électriques, usant rapidement le commutateur et générant des parasites dans le circuit d'alimentation.

Pour des fonctionnements en moteur de petite puissance, ce problème peut être résolu grâce à la technologie du moteur à courant continu sans balais communément appelé moteur

brushless. Un dispositif d'électronique de puissance remplace l'ensemble balai collecteur. La position du rotor est détectée par des capteurs à effet Hall et le courant est commuté par des transistors à effet de champ [15].

## 2.7 Bilan de la puissance :

On peut représenter le bilan des puissances mises en jeu dans un moteur à courant continu en fonctionnement nominal par une flèche qui rétrécit au fur et à mesure que la puissance diminue.

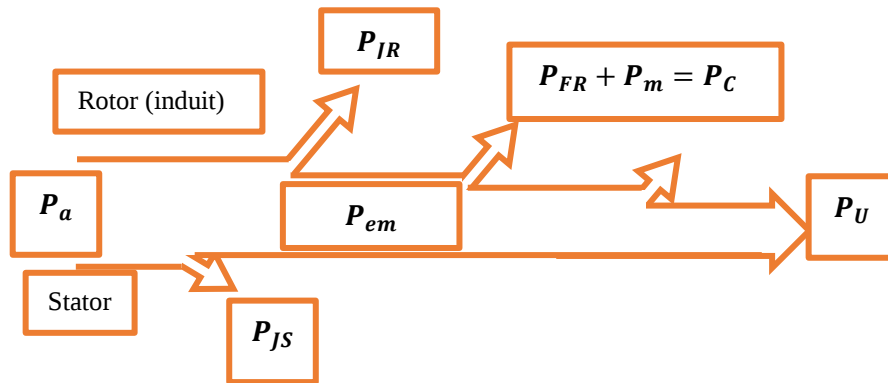


Figure 2.15 : Bilan de la puissance

$P_u$ : Puissance utile

$P_{ém}$  : Puissance électromagnétique

$P_{JS}$ : Pertes par effet joule dans l'inducteur

$P_{JR}$ : Pertes par effet joule dans l'induit

$P_c$  : Pertes fer + pertes mécaniques : dites pertes constantes

## 2.8 Le rendement :

Les moteurs à courant continu consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur fonctionnement. L'énergie mécanique fournie sera toujours plus petite que l'énergie électrique absorbée. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad 2.12$$

$P_a$ : Puissance absorbée.

$P_u$  : Puissance utile.

**2.9 Utilisation de la machine à courant continu :**

Le moteur série est intéressant quand la charge impose d'avoir un gros couple, au démarrage et à faible vitesse de rotation.

Le moteur séparé est particulièrement adapté aux entraînements de machines nécessitant des vitesses réglables (action sur la tension) et présentant un couple important en basse vitesse (machines-outils).

- démarreur (automobile ...).
- moteur de traction (locomotive, métro ...).
- appareils de levage.
- Ventilateurs, pompes centrifuges, compresseurs, pompes à piston.
- Machines-outils à couple variable ou à mouvement alternatif (étaux-limeurs, Raboteuses).

**2.10 Conclusion:**

Ce chapitre a permis de rappeler les différents éléments qui constituent une machine à courant continu et le principe de fonctionnement. D'après notre étude nous avons constaté que les moteurs à excitation séparée et à aimant permanent sont les plus adaptés pour la variation de vitesse. Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la variation de vitesse d'un moteur à courant continu par un hacheur série.

### 3.1 Introduction :

La machine à courant continu a été durant de nombreuses années l'actionneur principalement utilisé dans les applications à vitesse variable. En effet, comme cela a été mis en évidence. Le contrôle de la vitesse de rotation peut être aisément réalisé par action sur la tension d'induit de la machine. Sur un autre plan, on peut agir sur le flux inducteur qui est par le courant d'excitation.

La liaison d'un moteur à courant continu à une source du même type se fait à l'intermédiaire d'un convertisseur statique «Hacheur, Redresseur commandé » qui permet la variation de la tension moyenne aux bornes de l'induit. La tension moyenne d'entrée de la machine à courant continu varie et par conséquent la vitesse de cette dernière varie proportionnellement à cette tension. Diverses procédures de variation de la vitesse existent.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le hacheur qui est utilisé dans les processus de variation de vitesse du moteur à CC. Ensuite, nous donnerons une description détaillée de la stratégie d'obtention d'une onde MLI utilisée pour la commande d'ouverture et de fermeture des interrupteurs électroniques installés au niveau du hacheur.

### 3.2 La variation de la vitesse :

L'expression générale de la vitesse montre les trois paramètres  $R_a$ ,  $U_a$  et  $\phi$  que l'on peut régler ce qui donne les trois procédés pour la variation de vitesse, [16], [17].

$$\Omega = \frac{U_a - R_a I_a}{K\phi} \quad 3-1$$

1. Réglage rhéostatique ( $R_a$ ),
2. Réglage par flux ( $\phi$ ),
3. Réglage par la tension ( $U_a$ ).

#### 3.2.1 Réglage rhéostatique :

Il est possible de réduire la vitesse en augmentant la résistance de l'induit avec un rhéostat branché en série avec l'induit tout en fixant la tension et le flux à leurs valeurs nominales, l'expression de la vitesse est :

$$\Omega = \frac{U_a - (R_a + R_{reg})I_a}{K\phi} \quad 3-2$$

Ce type de réglage est mauvais du point de vue rendement. Le rhéostat insère une consommation d'énergie d'autant plus importante que la chute de vitesse est élevée, c'est ainsi que ce procédé de réglage n'est pas utile que pour le démarrage ou le freinage, en particulier en traction électrique.

### 3.2.2 Réglage par flux :

Au démarrage, un moteur doit absorber un courant important pour pouvoir porter à la vitesse nominale toutes les masses et charges qui ont initialement au repos, d'où la nécessité d'appliquer un flux maximum pour permettre au moteur de développer une force électromotrice d'une valeur suffisante et d'une manière rapide.

Le flux varie de :  $\phi_{min} < \phi < \phi_{nominal}$

Il s'ensuit que la vitesse varie de :  $\Omega_{nominal} < \Omega < \Omega_{max}$

Quelle que soit la vitesse  $\Omega$ , on peut obtenir le courant nominal et donc la puissance nominale :

$$P_n = U_n I_n \quad 3-3$$

L'action sur le flux permet de fonctionner à puissance nominale, mais le couple diminue si la vitesse augmente :

$$T_{em} = \frac{P_n}{\Omega} \quad 3-4$$

### 3.2.3 Réglage par tension :

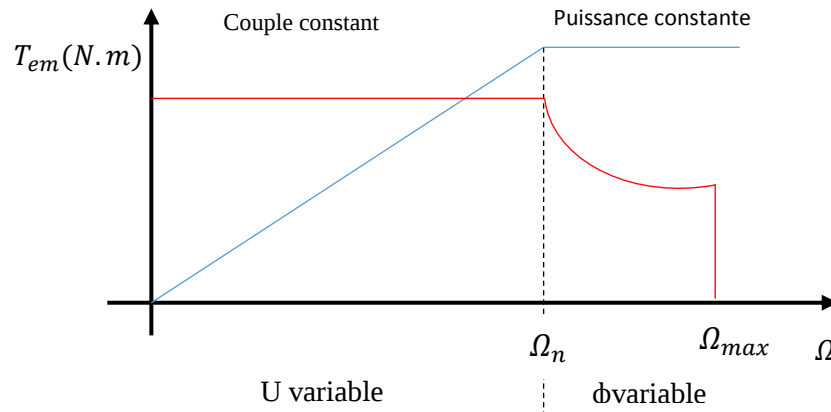
On applique une tension de valeur moyenne variable entre zéro et une valeur maximale tout en réglant le flux à sa valeur maximale. Ce procédé de réglage de vitesse est excellent du point de vue économique car aucune énergie n'est dissipée dans les rhéostats. Le réglage par la tension permet seulement de diminuer la vitesse.

La tension est proportionnelle à la vitesse. Si  $U$  varie de 0 à  $U_n$  la vitesse  $\Omega$  varie de 0 à  $\Omega_n$ .

$$0 < U < U_n \quad \text{et} \quad 0 < \Omega < \Omega_n$$

L'action sur la tension d'alimentation permet de fonctionner à couple nominal constant quelle que soit la vitesse.  $P_n = T_{em} \Omega$  La puissance augmente avec la vitesse.

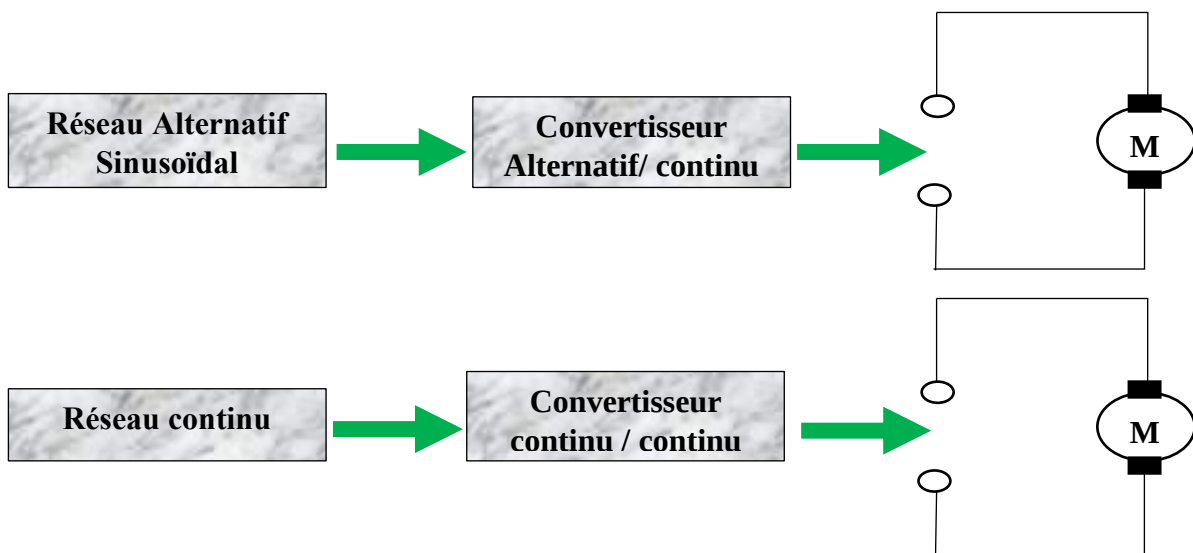
C'est le mode de variation le plus employé car il permet de conserver la caractéristique de couple de la machine.



**Figure 3.1** Action conjuguée sur la tension et le flux.

### 3.2.4 Variation de vitesse par variation de la tension d'induit :

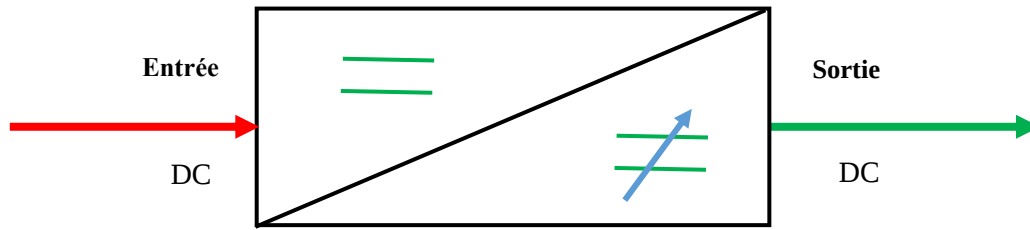
Pour faire varier les tensions d'induit, le variateur utilise des convertisseurs statiques constitués de composants électroniques.



**Figure 3.2** variation de la tension d'induit.

### 3.3 Les hacheurs :

Dans ce mémoire, on a choisi le hacheur série pour commander la vitesse du moteur à courant continu. Le hacheur est un dispositif permettant d'obtenir une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue fixe (batterie d'accumulateurs ou bien pont redresseur - alimenté par le réseau de distribution).



Un hacheur peut être réalisé à l'aide des interrupteurs électroniques commandables à la fermeture et à l'ouverture telle que les transistors bipolaires ou IGBT ou les thyristors GTO.

### 3.3.1 Principe de fonctionnement :

Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide d'un interrupteur électronique [18].

### 3.3.2 Le rapport cyclique $\alpha$ :

Le rapport cyclique est défini comme le temps ( $t_F$ ) pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage (T).

$$\alpha = \frac{t_F}{T} \quad 3.5$$

La valeur de rapport cyclique  $0 \leq \alpha \leq 1$

### 3.4 Convertisseur Buck :

Le hacheur série est un convertisseur direct DC–DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

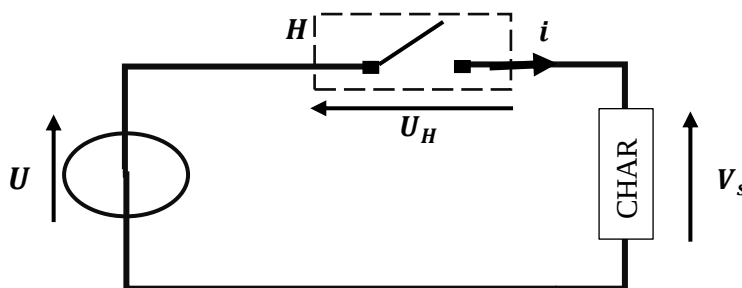
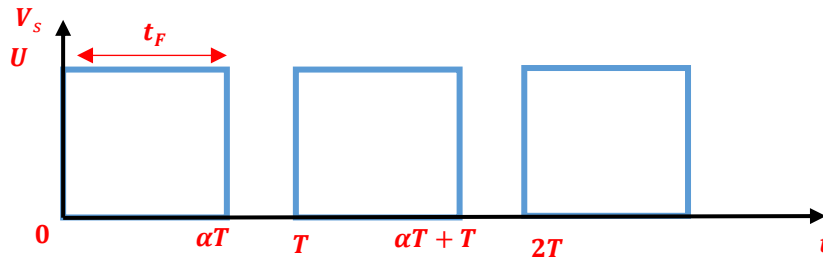


Figure 3.3 : Le fonctionnement d'un hacheur BUCK.

### 3.4.1 Principe de Fonctionnement :

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage ( $T = 1/f$ ) comporte deux Etapes.

Lors de la première étape, on rend le transistor passant et la diode polarisée en inverse est bloquée. Cette phase dure de ( $0 \leq t \leq \alpha T$ ). Lors de la seconde étape on bloque le transistor, la diode devient passante, cette phase dure de  $\alpha T \leq t \leq T$ .



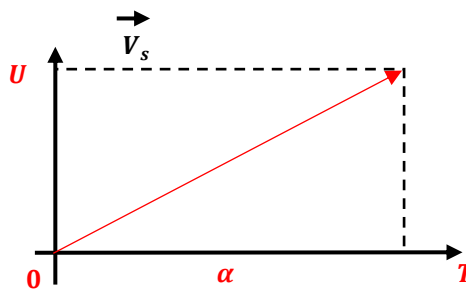
**Figure 3.4:** la tension aux bornes de la charge avec un hacheur série

➤ Valeur moyenne de la tension:

$$V_{Smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_s(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0 dt \quad 3.6$$

$$V_{Smoy} = \frac{U}{T} (\alpha T - 0) = \alpha U \quad 3.7$$

La valeur moyenne de la tension  $V_{Smoy}$  peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique  $\alpha$ . Quand on fait varier  $\alpha$  de 0 à 1,  $V_{Smoy}$  varie linéairement de 0 à  $U$ .



**Figure 3.5 :** La valeur moyenne en fonction du rapport cyclique ( $\alpha$ ).

## 3.4.2 Ondulation du courant :

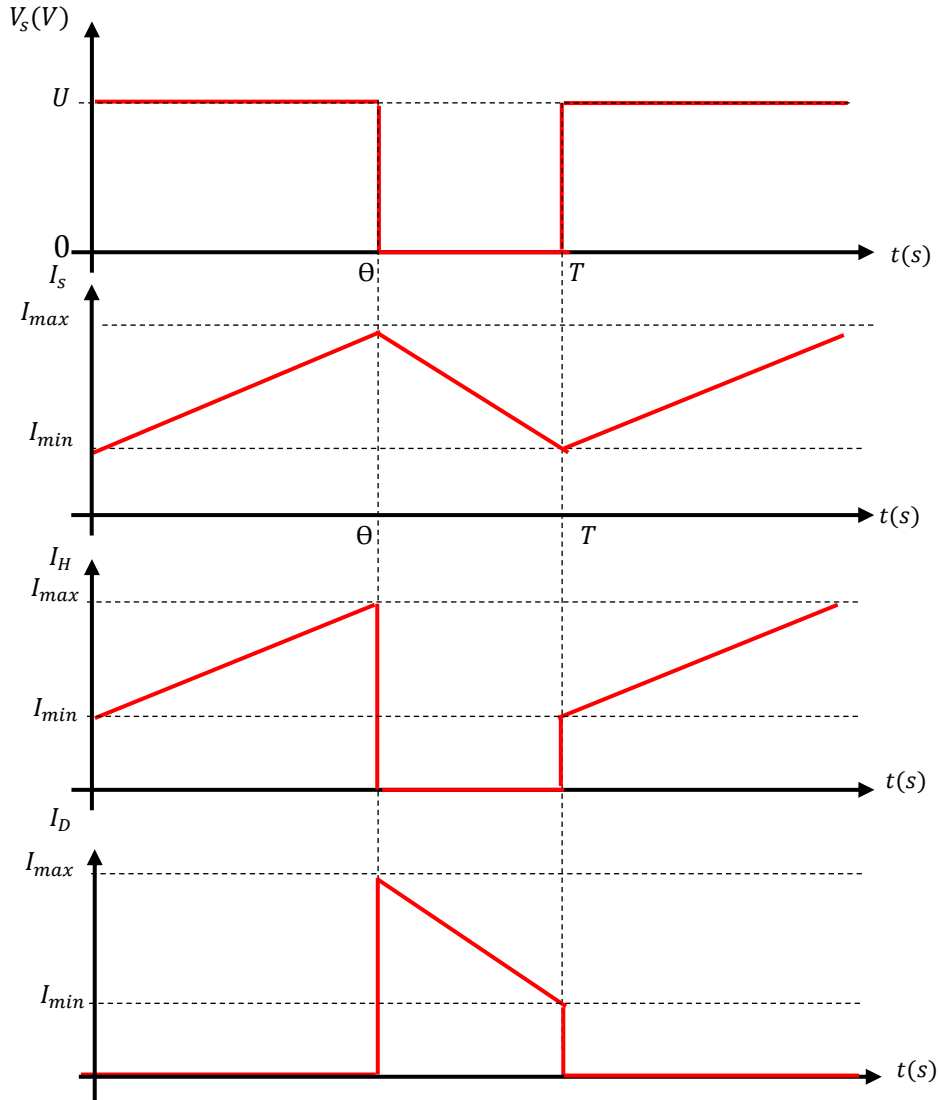


Figure 3.6 : Schéma de tension et de courant d'un hacheur série.

Pour simplifier cette étude, nous supposons que la résistance du récepteur est nulle, comme la charge est inductive. Le graphe du courant se décompose en deux parties distinctes (Figure 3.6)

a)  $0 < t < \theta$  (H fermé)

$$V_s - E = L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow i(t) = \frac{V_s - E}{L} t + I_{min} \quad (i(0) = I_{min}) \quad 3.8$$

$$I_{max} = i(\theta) = \frac{V_s - E}{L} \theta + I_{min} \quad 3.9$$

b)  $\theta < t < T$  (H ouvert)

$$-E = L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow i(t) = -\frac{E}{L} (t - \theta) + I_{max} \quad 3.10$$

$$I_{min} = I(T) = -\frac{E}{L}(T - \Theta) + I_{max} \quad 3.11$$

Des relations (1) et (2) donnent l'ondulation

$$\Delta I = I_{max} - I_{min} \quad 3.12$$

Soit  $E = \alpha U = V_s$  (puisque  $R = 0$ )

Il est facile de calculer l'ondulation  $\Delta I$  crete à crete on a :

$$\Delta I(\alpha) = \frac{\alpha UT(1-\alpha)}{L} \quad \text{Elle est maximale pour } \alpha = \frac{1}{2}$$

$$\text{Soit } (\Delta I)_{max} = \Delta I\left(\alpha = \frac{1}{2}\right) = \frac{UT}{4L} = \frac{U}{4fL} \quad 3.13$$

Pour réduire l'ondulation, on a intérêt à augmenter la fréquence de « hachage ».

### 3.4.3 Intérêt d'utiliser un hacheur série :

Le hacheur série permet de faire varier la vitesse de rotation des moteurs à courant continu. On rappelle que la vitesse d'un tel moteur est proportionnelle à la tension d'alimentation.

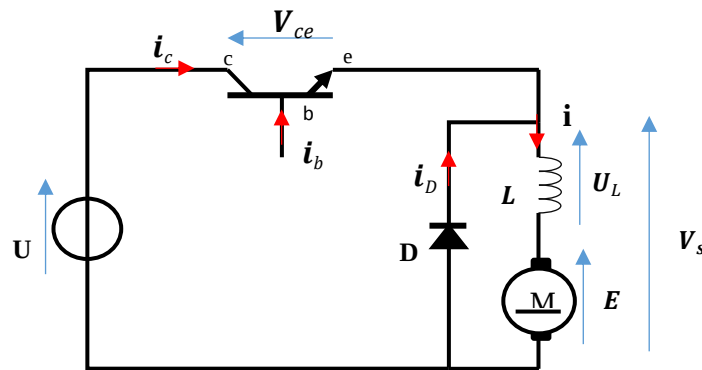


Figure 3.7 : Hacheur série commande un moteur à courant continu.

### 3.5 Technique de commande MLI :

La qualité de la tension de sortie d'un hacheur dépend largement de la technique de commande utilisée pour commander les interrupteurs de ce hacheur. Il existe plusieurs techniques de commande et le choix d'une technique parmi toutes les possibilités dépend essentiellement du type d'application auquel l'appareil est désigné. La technique la plus utilisée dans les variateurs de vitesse pour MCC est la commande par modulation de la largeur d'impulsion MLI.

Les techniques de modulation de largeur d'impulsions sont multiples. Cependant, 04 catégories de MLI ont été développées :

Les modulations sinus-triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence à une porteuse, en général, triangulaire.

Les modulations pré-calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre.

Les modulations post-calculées encore appelées MLI régulières symétriques ou MLI vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.

Les modulations stochastiques pour lesquelles l'objectif fixé est le blanchiment du spectre (bruit constant et minimal sur l'ensemble du spectre). Les largeurs des impulsions sont réparties suivant une densité de probabilité représentant la loi de commande.

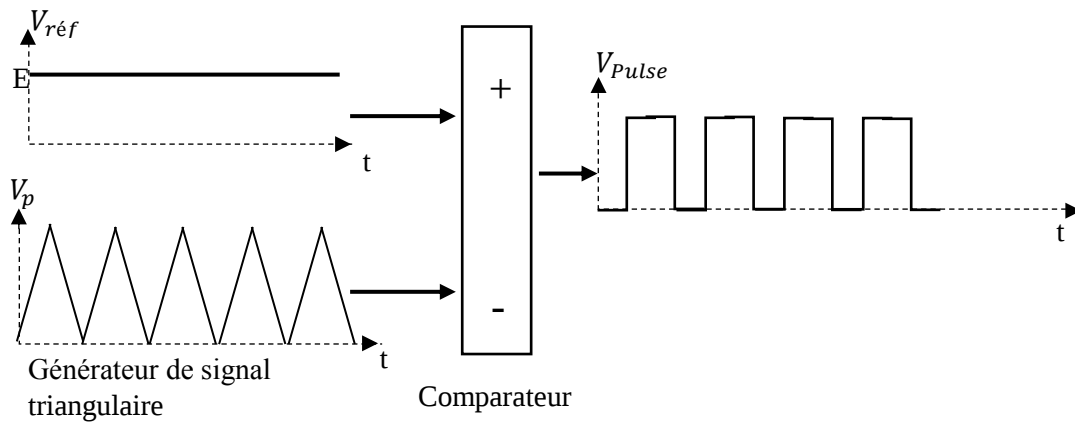
Le développement considérable de la technique de modulation en largeur d'impulsion ouvre une large étendue d'application dans les systèmes de commande et beaucoup d'autres fonctions. Elle permet une réalisation souple et rentable des circuits de commande des hacheurs.

### **3.5.1 Principe de la commande MLI :**

Le Principe de base de la Modulation de la Largeur d'impulsion MLI est fondé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi, la tension de sortie est formée par une succession de créneau d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la production d'un signal MLI est de comparer entre deux signaux.

- Le premier, appelé signal de référence, est un signal continu qui varie entre deux seuils définis en fonction de notre application.
- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.
- L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

Le signal de sortie vaut 1 si la modulante est plus grande que la porteuse, 0 sinon ; le signal de sortie change donc d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse.



**Figure 3.8 :** Schéma de principe de la commande MLI.

L'intersection de la référence avec la porteuse, en sens croissant, commande l'ouverture du transistor (T), son intersection avec la porteuse, en sens décroissant, commande la fermeture de (T). Le principe se fait par comparaison entre les deux signaux utilisant un amplificateur opérationnel [15].

### 3.6 Partie pratique :

Cette partie est réservée à la réalisation pratique pour la commande de vitesse d'un moteur à courant continu utilisant un hacheur série à IGBT.

Cette réalisation est divisée en deux parties essentielles :

1. L'alimentation par la tension alternative du réseau : cette partie contient :

-L'obtention des signaux carrés à modulation de largeur d'impulsion variable et fréquence fixe à partir d'une unité de commande..

-La génération d'une tension filtrée et fixe d'un pont redresseur monophasé alimentant le hacheur série.

-La commande de vitesse du moteur à courant continu en appliquant une charge résistive à la sortie d'une génératrice.

2. L'alimentation par la tension continue obtenues par des panneaux photovoltaïques :

-La commande de vitesse du moteur à courant continu en appliquant une charge résistive à la sortie d'une génératrice.

#### 3.6.1 Le matériel utilisé est composé de :

- 1 Cadre profilé à deux étage , de largeur 120 cm.
- 1 Transformateur triphasé 45/90, 30N.
- 2 Branche de convertisseur à deux diodes.
- 1 Capacité de 990 $\mu$ F.
- 1 IGBT
- 1 Rhéostat à curseur  $\Omega/1,5A$ .
- 1 Unité de commande à **MLI**
- 1 Alimentation stabilisé  $\pm 15V/3A$ .
- 2 Apareils de mesure AV
- 1 Oscilloscope bicanal, par ex.HAMEG HM 412-5.
- 1 Moteur à CC et 1 Génératrice à CC.
- 1 Alimentation continue 220V.
- 8 panneaux 80w.

| LEYBOLD-DIDACTIC GMBH |                   |       |                 |
|-----------------------|-------------------|-------|-----------------|
| Typ                   | 731 16            |       |                 |
| — MOTOR               | Nr. 200 26 956    |       |                 |
| 220                   | V                 | 0.55  | A               |
| 0.1                   | KW                | S 1   | COS $\varphi$ — |
| 2000                  | min <sup>-1</sup> | —     | Hz              |
| ERR.                  | 220 V             | 0.1   | A               |
| I.K.L.                | B                 | IP 23 |                 |
| VDE 0530              |                   |       |                 |

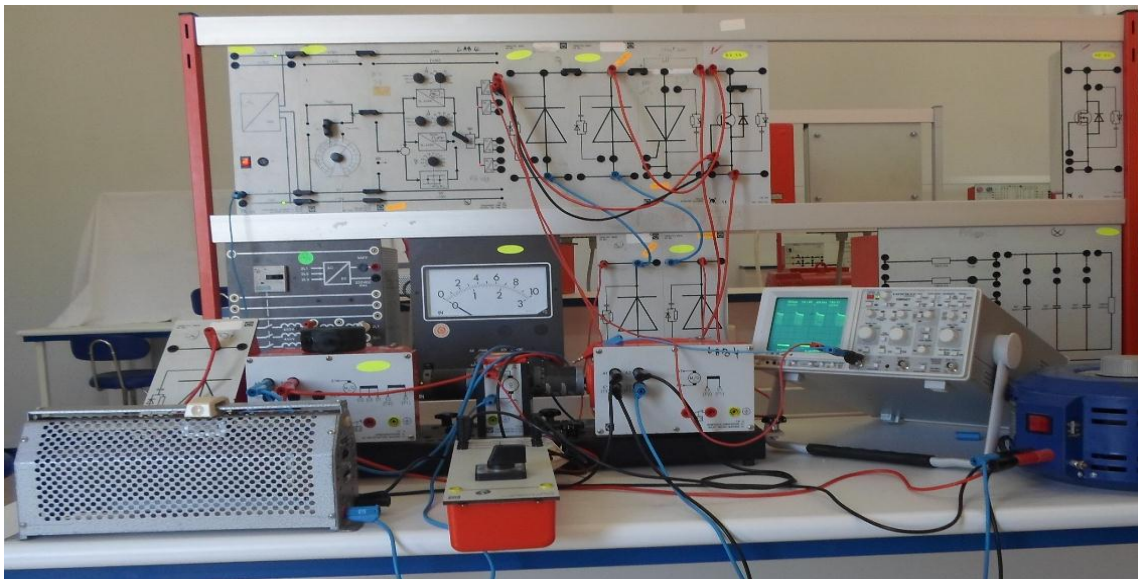
**Moteur**

| LEYBOLD-DIDACTIC GMBH |                   |       |                 |
|-----------------------|-------------------|-------|-----------------|
| Typ                   | 731 21            |       |                 |
| — MOTOR               | Nr. 200 26 957    |       |                 |
| 220                   | V                 | 0.63  | A               |
| 0.1                   | KW                | S 1   | COS $\varphi$ — |
| 2000                  | min <sup>-1</sup> | —     | Hz              |
| ERR.                  | 220 V             | 0.08  | A               |
| I.K.L.                | B                 | IP 23 |                 |
| VDE 0530              |                   |       |                 |

**Génératrice**

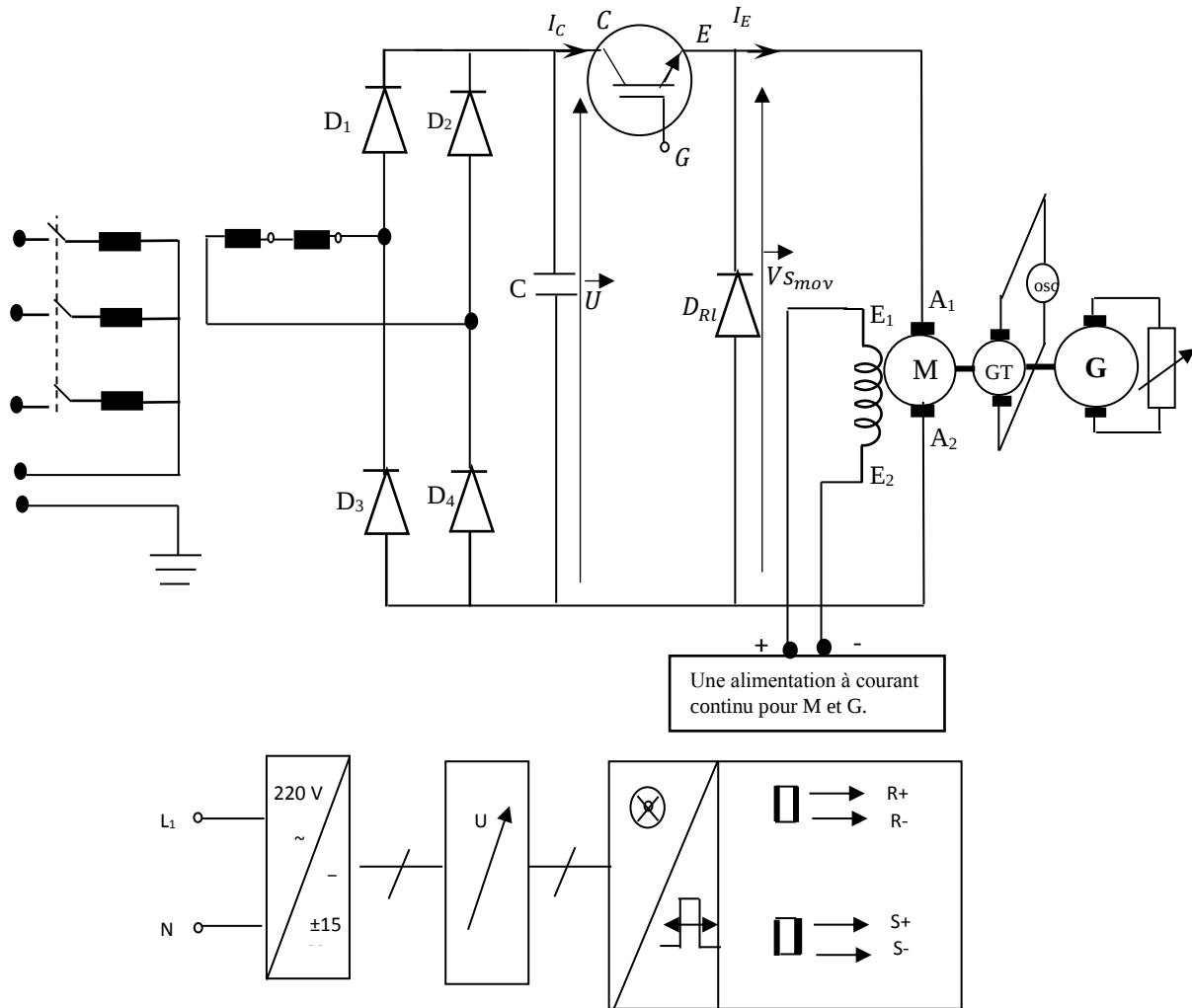
### 3.6.2 L'alimentation par réseau :

La figure (3-9) représente le montage complet de la réalisation pratique (La tension efficace d'alimentation AC est 98 v) :



**Figure 3. 9 :** Montage complet pratique à boucle ouverte.

La réalisation pratique pour la commande de vitesse du moteur à courant continu a été effectuée en utilisant un hacheur série à IGBT. La figure (3.10) représente le schéma complet électrique.

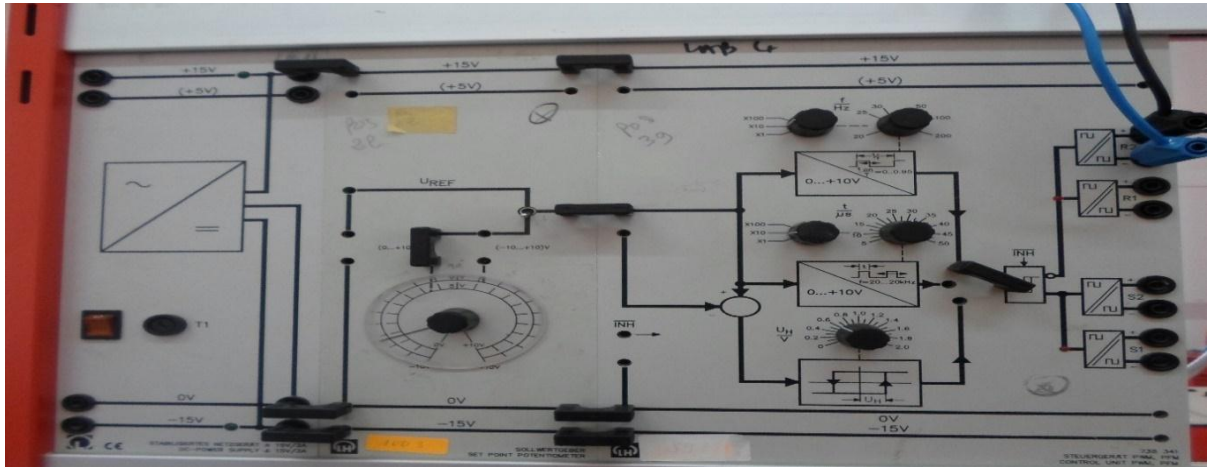


**Figure 3.10** Schéma complet électrique (boucle ouverte).

### 3.6.2.1 La génération des signaux carrés pour la commande d'IGBT :

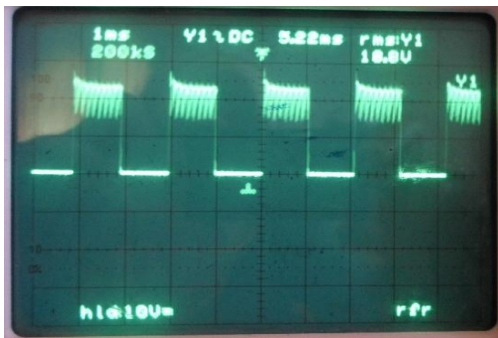
La figure 3.11 montre le montage pratique pour la génération des signaux carrés pour la commande du IGBT. La largeur d'impulsion varie selon la valeur du rapport cyclique. Dans un premier temps, on a ajusté le rapport cyclique sur 0.5 puis 0.25. Concernant la fréquence du hachage, on peut choisir celle qui nous convient et selon le semiconducteur utilisé. Donc, la

figure 3.12 montre deux fréquences différentes 500Hz et 1Khz respectivement. Dans notre projet on a choisi par exemple une fréquence égale à 500 Hz et cette fréquence devrait être fixe, le plus important c'est de varier la largeur d'impulsion (MLI).

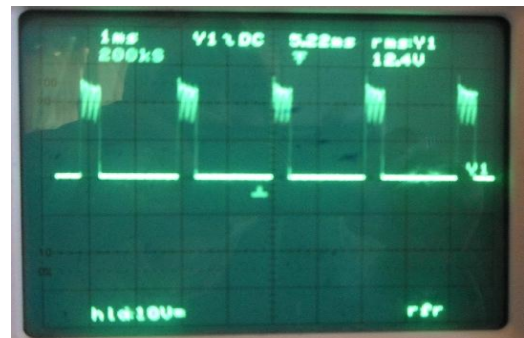


**Figure 3.11** : Photo du montage pour la génération des signaux MLI.

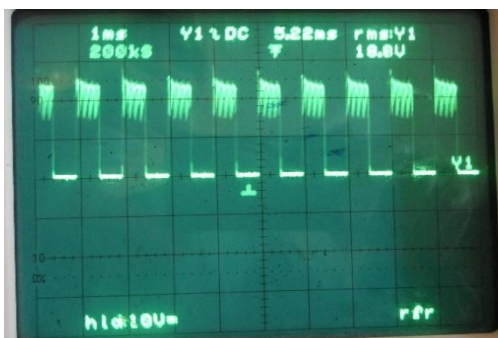
Pour la visualisation des résultats on a utilisé l'oscilloscope numérique HM 504 :



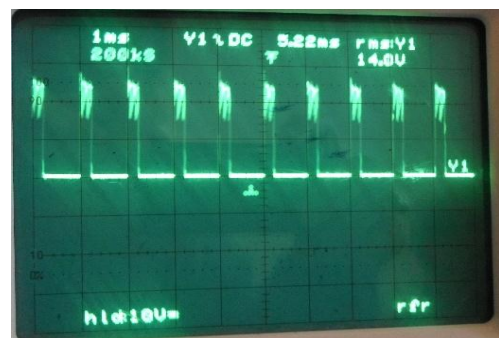
Signal MLI à fréquence 0.5 KHz et rapport cyclique  $\alpha = 0.5$



Signal MLI à fréquence 0.5 KHz et rapport cyclique  $\alpha = 0.25$



Signal MLI à fréquence 1 KHz et rapport cyclique  $\alpha = 0.5$



Signal MLI à fréquence 1 KHz et rapport cyclique  $\alpha = 0.25$

**Figure 3.12** : Photo de génération des impulsions .

On remarque bien la différence de largeur d'impulsion en changeant le rapport cyclique de 0.5 à 0.25.

### 3.6.2.2 L'alimentation du hacheur à tension continue fixe :

Pour l'alimentation du hacheur à tension continue fixe, nous avons utilisé un pont à diodes monophasé avec un condensateur de filtrage (figure 3.13). La première figure montre la tension de sortie du pont qui est ondulée et après filtrage, la tension devient plus au moins continue tout dépend de la valeur du condensateur, figure 3.14.

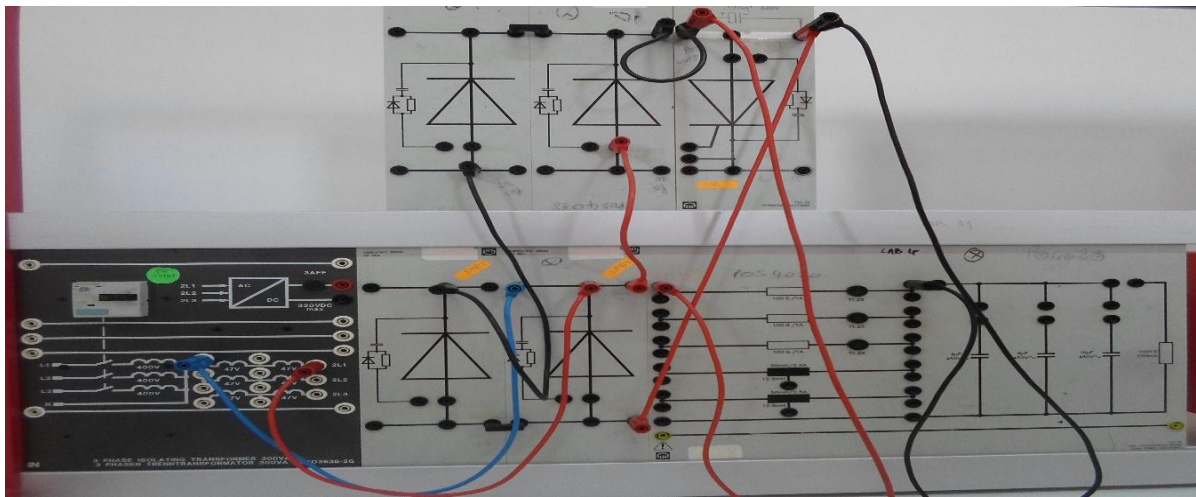
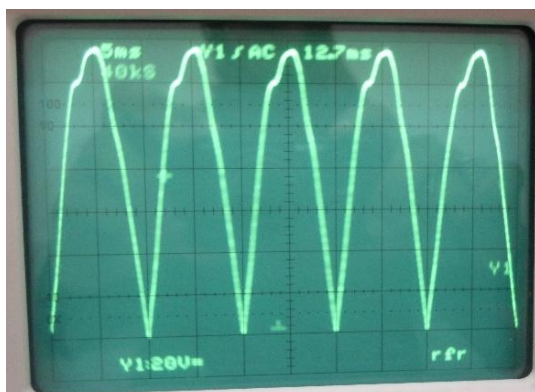
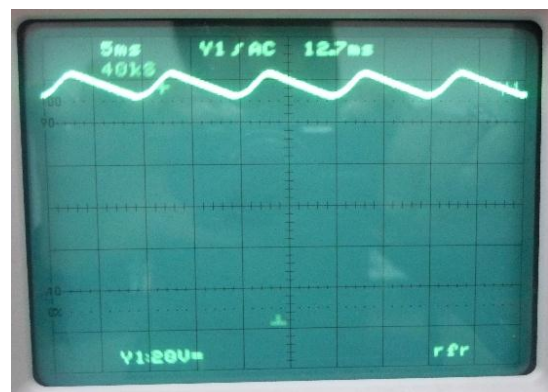


Figure 3.13: Une Vue réelle de la maquette



Tension de sortie de pont PD2 avant filtrage



Tension de sortie de pont PD2 avec filtrage

Figure 3.14 : Obtention de la tension continue fixe.

### 3.6.2.3 La tension de sortie du hacheur :

Le montage présenté dans la figure 3.15 est fait pour visualiser la tension de sortie du hacheur aux bornes d'une charge résistive.

Cette tension alimentant le moteur à courant continu est de valeur moyenne variable tout en variant le rapport cyclique  $\alpha$ . (Figure 3.16).

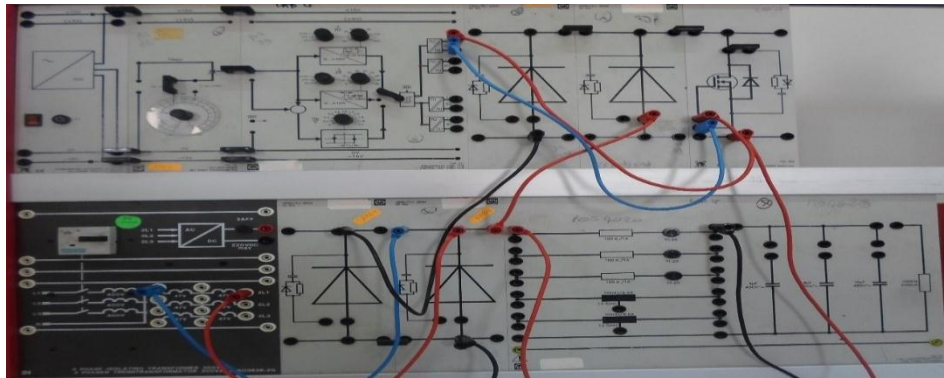
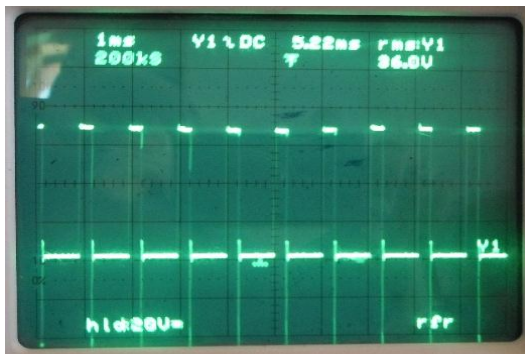
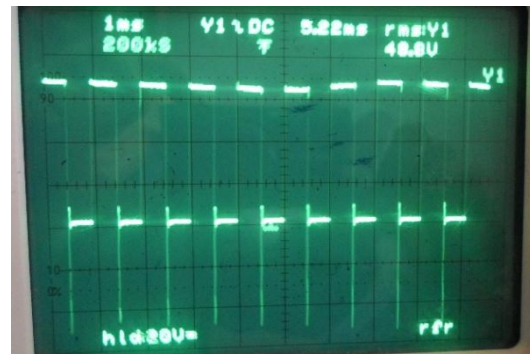


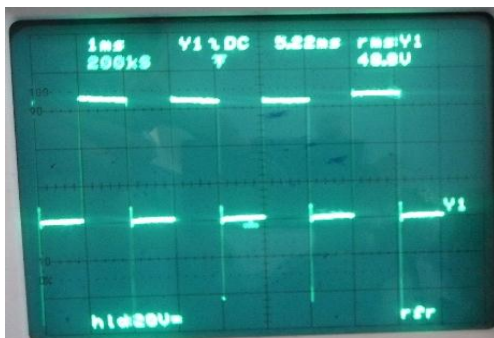
Figure 3.15: Une vue réelle de la maquette.



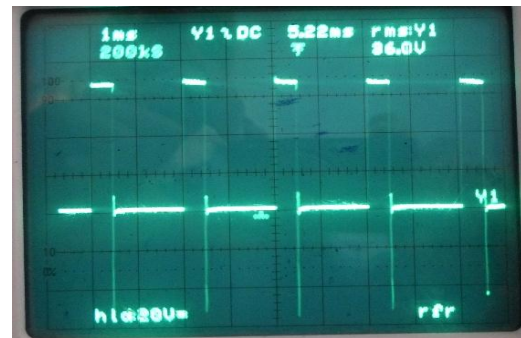
Signal MLI à fréquence 1 KHz et rapport cyclique  $\alpha = 0.25$ -charge R



Signal MLI à fréquence 1 KHz et rapport cyclique  $\alpha = 0.5$ -charge R



Signal MLI à fréquence 0.5 KHz et rapport cyclique  $\alpha = 0.5$ -charge R



Signal MLI à fréquence 0.5 KHz et rapport cyclique  $\alpha = 0.25$ -charge R

Figure 3.16: Tension de sortie du hacheur

### 3.6.2.4 L'alimentation du moteur à courant continu :

Pour la variation de vitesse du moteur à courant continu, nous avons alimenté notre moteur à travers le hacheur série. Nous avons démarré notre moteur à vide au premier lieu avec un rapport cyclique maximum, ensuite on a effectué une variation de  $\alpha$  ce qui nous a donné la variation de vitesse soit on la diminuant ou on l'augmentant.

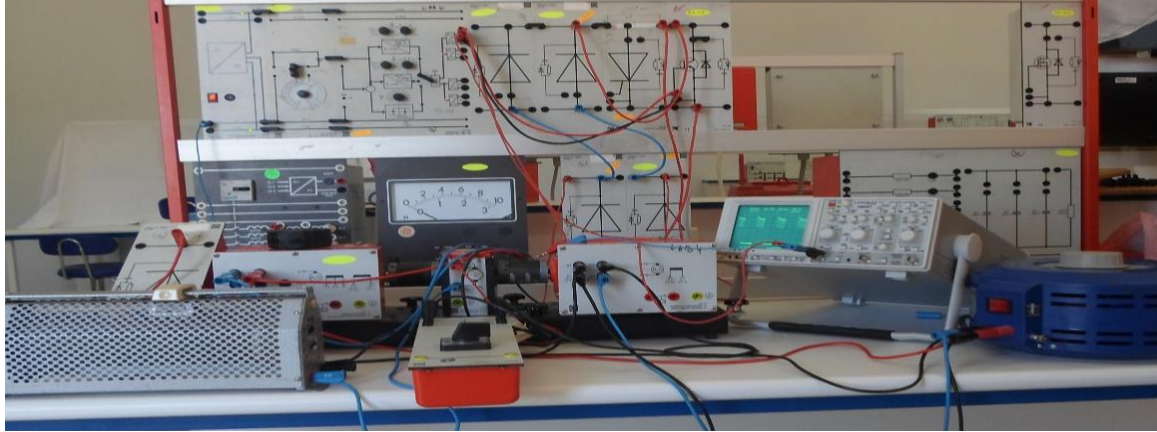
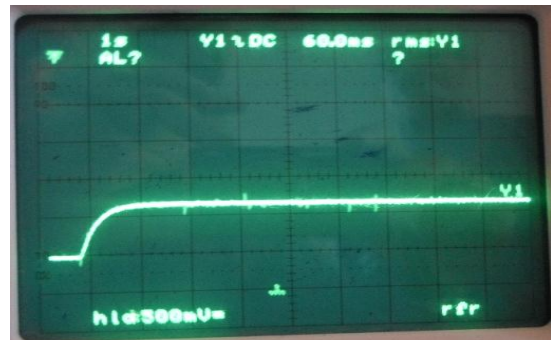
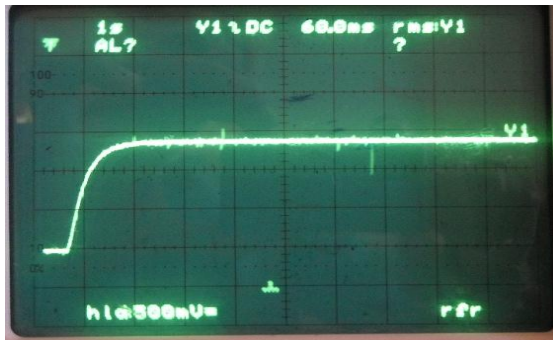


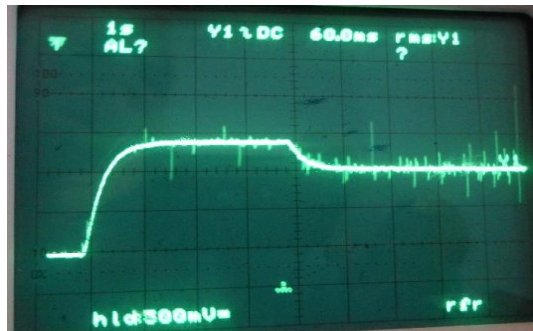
Figure 3.17: Une vue réelle de la maquette pour visualisation de la vitesse .



Démarrage à vide\_rapport cyclique  $\alpha = 1$

Démarrage à vide\_rapport cyclique  $\alpha = 0.5$

Figure 3.18 : Photo de la variation de vitesse démarrage à vide.



**Figure 3.19 :**Démarrage à vide puis application d'une charge  
(0.4N.m) avec rapport cyclique  $\alpha = 1$

### 3.6.2.5 Interprétation :

#### 3.6.2.3.1 Démarrage à vide :

On a démarré le moteur à vide avec un rapport cyclique égal à 1 ensuite on l'a démarré avec un rapport cyclique 0.5. On remarque que la vitesse diminue avec la diminution du rapport cyclique, dans notre exemple une diminution de 50%.

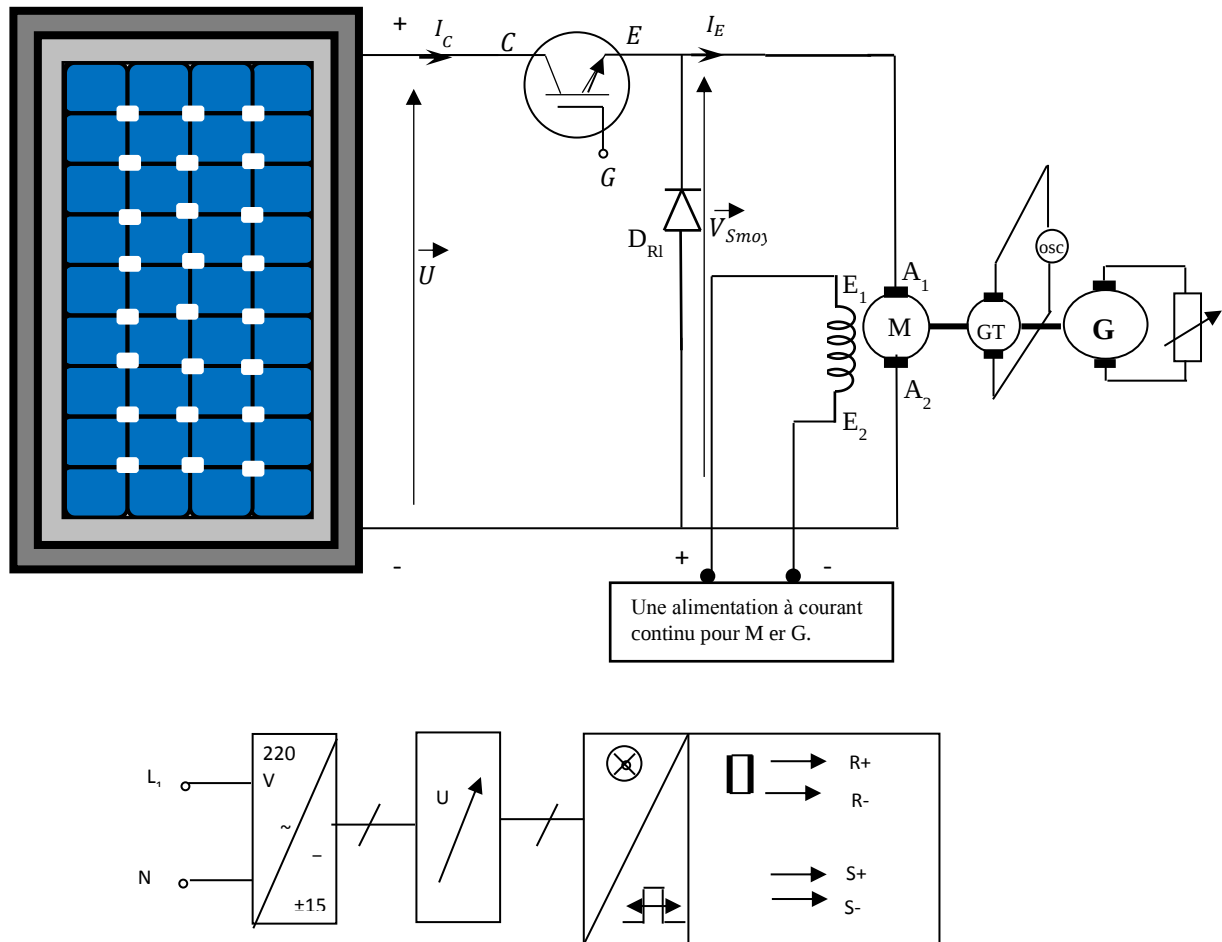
#### 3.6.2.3.2 Démarrage à vide puis application d'une charge :

Cette fois-ci, nous avons démarré le moteur à vide ensuite nous avons appliqué une charge (0.4 N.m) à l'instant 4 sec tout en ajustant le rapport cyclique en 1(au maximum). On constate bien qu'il y a une diminution de vitesse sans retour à sa valeur initiale le faite que c'est une boucle ouverte.

### 3.6.3 L'alimentation par les panneaux photovoltaïques :

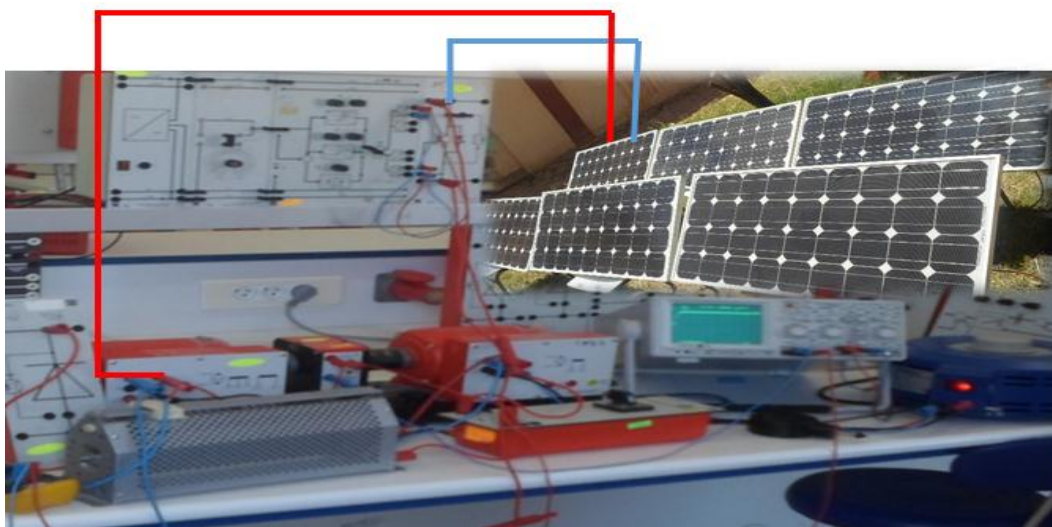
Nous allons effectuer l'essai pratique pour la variation de vitesse d'un moteur à courant continu commandé par un hacheur série alimenté cette fois-ci par une alimentation photovoltaïque. On a remplacé l'alimentation alternative du réseau par l'alimentation continue des panneaux photovoltaïques, et on a éliminé la partie de redressement (le pont à diode), comme il est représenté dans la figure suivante. On a utilisé 8 panneaux c'est-à-dire une tension égale à 153.5v dans un temps ensoleillé

Panneaux solaires



**Figure 3.20 :** Schéma électrique complet par l'alimentation photovoltaïque (boucle ouverte).

Le montage pratique en boucle ouverte avec l'alimentation PV :



**Figure 3.21:** Montage complet en boucle ouverte \_alimentation par panneaux photovoltaïques

Les figures suivantes contiennent des photos des signaux de vitesse de moteur :

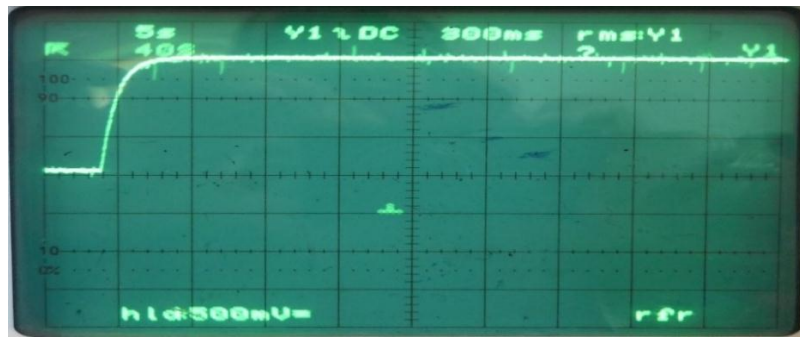


Figure 3.22 : Photo de signal de vitesse \_démarrage à vide.

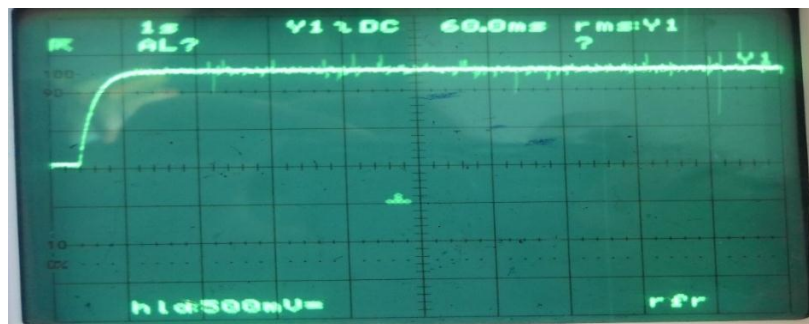


Figure 3.23 : Photo de signal de vitesse \_démarrage en charge (0.4N.m).

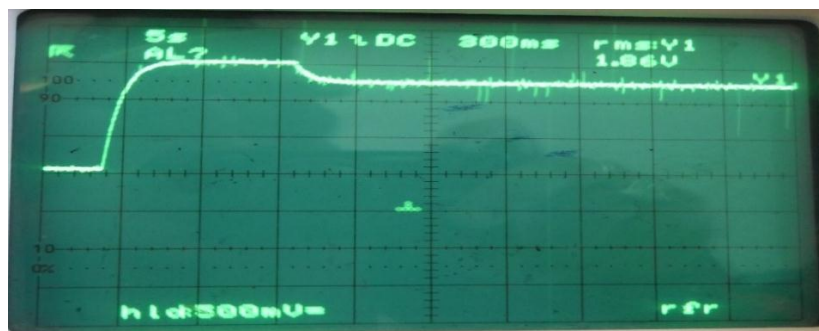


Figure 3.24: Photo de signal de vitesse \_démarrage à vide puis l'application d'une charge (0.4N.m).

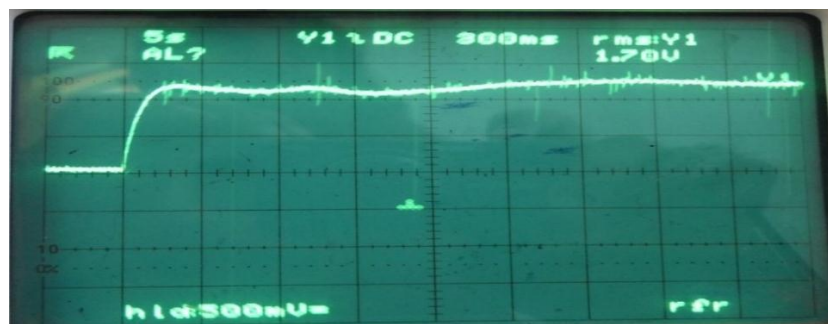


Figure 3.25: Photo de signal de vitesse \_démarrage en charge dans un temps nuageux.

### 3.6.3.1 Interprétation :

Les résultats de la variation de vitesse du moteur obtenu avec une alimentation photovoltaïque sont presque les mêmes que celle du réseau redressée. Quand on a démarré le moteur en charge, la vitesse diminue par rapport au démarrage à vide, et quand on a démarré le moteur à vide et après un temps donné on a appliqué une charge, on constate bien qu'il y a une diminution de vitesse sans retour à sa valeur initiale.

Dans un temps partiellement nuageux, on remarque bien la variation de la vitesse.

Une autre remarque importante, on a utilisé 8 panneaux en série qui nous ont donné une tension égale à 153.5V qui est supérieure à celle du réseau redressée 138.6V, pour cela vous remarquez une légère diminution de la vitesse quand le moteur est alimenté par le réseau pour le même rapport cyclique qui est égal à 1.

### 3.7 Conclusion :

Pour faire varier la vitesse d'un moteur à CC, on doit varier la tension d'alimentation à ses bornes, qui se fait avec un hacheur et ainsi on obtient une tension moyenne variable.

Dans ce chapitre, nous avons choisi le hacheur série qui présente des qualités non négligeables à savoir sa simplicité de son montage et qui permettrait de varier la vitesse de la MCC.

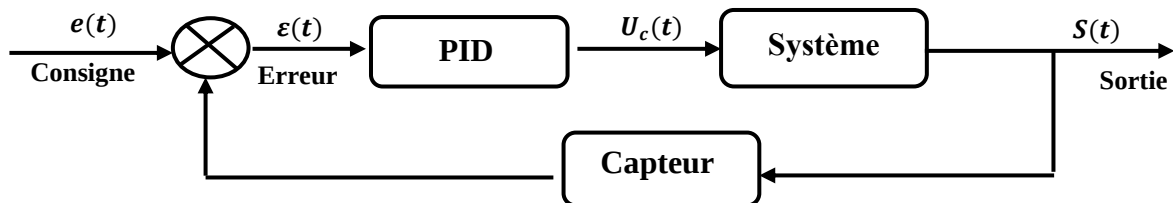
Dans la partie pratique, nous avons effectué l'essai pratique pour la variation de vitesse d'un moteur à courant continu alimenté par un hacheur série, mais avec l'application d'un couple résistant on a remarqué une diminution de vitesse sans retour à la valeur de consigne.

Les résultats obtenus sont satisfaisants et peuvent être améliorés en utilisant un régulateur pour une boucle fermée lors de l'application d'une charge. Dans le chapitre suivant, nous allons faire la commande de vitesse à boucle fermée utilisant deux méthodes de régulation: PID classique et à travers la carte Arduino-Uno.

### 4.1 Introduction :

La commande PID est dite aussi (correcteur, régulateur, contrôleur), se compose de trois termes P, I, D d'où le 'P' correspond au terme proportionnel, I pour terme intégral, D pour le terme dérivé de la commande. Les régulateurs PID sont probablement les plus largement utilisés dans le contrôle industriel. Même les plus complexes systèmes de contrôle industriel peut comporter un réseau de contrôle dont le principal élément de contrôle est un module de contrôle PID. [19]

Ce chapitre a pour but, d'implémenter la commande PID classique pour un moteur à courant continu à excitation séparée, pour un seul objectif est d'annuler l'erreur statique, diminuer le dépassement, diminuer le temps de réponse et le temps de montée afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation et d'avoir un système précis, rapide, stable et robuste.



**Figure 4.1:** Schéma bloc d'un système avec correcteur (Boucle fermée) [18]

- Le correcteur PID agit de trois manières :

Action proportionnelle : l'erreur est multipliée par un gain  $K_p$  ;

Action intégrale : l'erreur est intégrée et divisée par un gain  $T_i$  ;

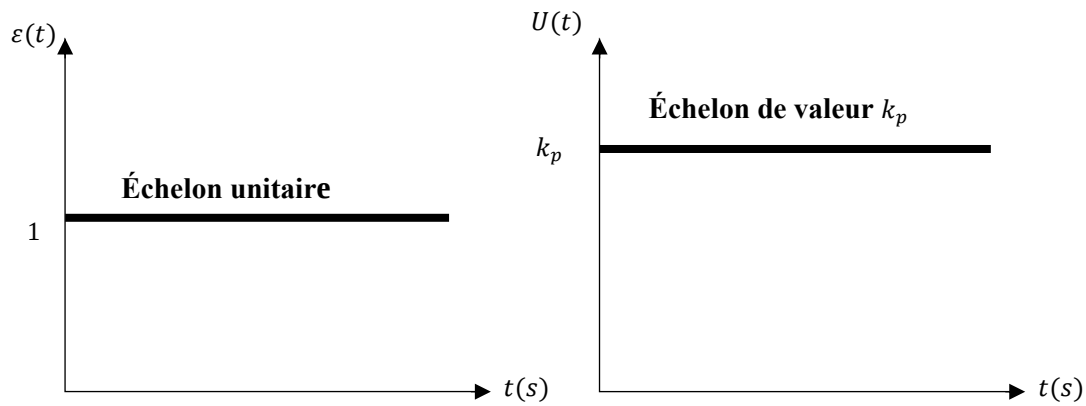
Action dérivée : l'erreur est dérivée et multipliée par un gain  $T_d$ .

### 4.2 Les actions du régulateur PID [20] [21] :

#### 4.2.1 Action Proportionnelle(P) :

Cette action est la plus classique. Elle consiste à appliquer une correction en rapport avec la différence instantanée entre la mesure et la consigne courante. Le rapport erreur/commande s'appelle le gain ou (Bande proportionnelle).

La limite de cette commande arrive à partir du moment où l'erreur devient petite ou si la consigne n'est pas constante; en effet l'annulation de l'écart considère que la consigne à l'instant  $T + 1$  sera la même qu'à l'instant  $T$ .



**Figure 4.2 :** Entrée et sortie du régulateur (P).

L'action proportionnelle corrige de manière instantanée, donc rapide, tout écart de la grandeur à régler, elle permet de vaincre les grandes inerties du système. Afin de diminuer l'écart de réglage et rendre le système plus rapide, on augmente le gain (on diminue la bande proportionnelle) mais est limité par la stabilité du système. Le régulateur P est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante.

#### 4.2.1.1 Principe de fonctionnement :

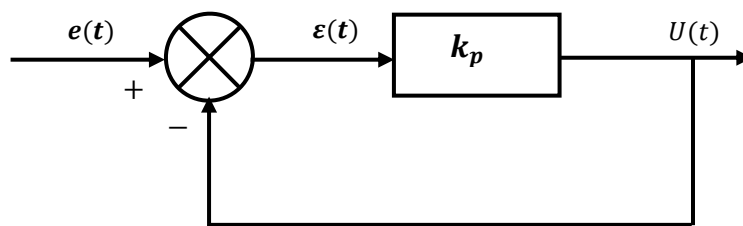
La relation entre la sortie  $U(t)$  et le signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  est :

$$U(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) \quad 4.1$$

Donc :

$$K_p = U(t) / \varepsilon(t) \quad 4.2$$

$K_p$  : Gain proportionnel



**Figure 4.3 :** Correction proportionnelle (P)

#### 4.2.1.2 Effet :

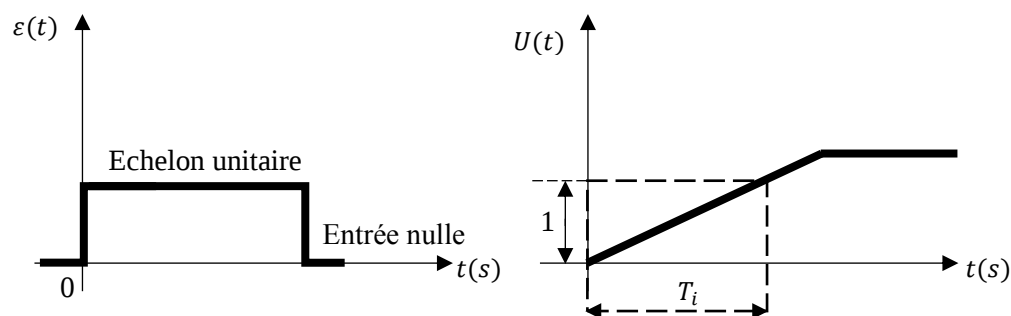
L'action proportionnelle  $P$  crée un signal de commande  $u(t)$  proportionnel au signal d'erreur  $\varepsilon(t)$ . Elle agit donc principalement sur le gain du système asservi et permet :

- D'améliorer notablement la précision.
- Entraîne une augmentation du gain, d'où une diminution de l'erreur statique
- Augmente la bande passante du système.
- Améliore la rapidité du système et augmente l'instabilité du système.

Le correcteur proportionnel  $P$  n'est généralement pas utilisé seul. On verra que tout correcteur possède au moins l'action proportionnelle [22].

#### 4.2.2 Action intégrale (I) [20][21] :

Cette action calcule sa contribution à la commande en n'utilisant pas l'écart instantané mais une mémoire des écarts intervenus lors des précédents échantillonnages. Ceci permet d'éliminer à la fois les erreurs statiques trop petites. La limite de cette commande intervient à partir du moment où le système ne réagit plus à la commande passée (blocage d'organe, limitation de sécurité, etc.). Dans ce cas précis, le régulateur va amplifier à l'infini sa contribution intégrale. On parle de saturation d'intégrale. La résolution de problèmes passe de l'utilisation d'un PID à intégrale externe. La contribution intégrale se calcule en ajoutant tous les  $T_i$  secondes la valeur de l'entrée de l'intégrateur à l'ancienne valeur.



**Figure 4.4 :** Entrée et sortie du régulateur intégrateur.

Le réglage de la contribution intégrale peut se faire de deux façons : soit réglage de  $T_i$ , soit réglage de «  $n$  » qui est le nombre de fois où l'on somme l'entrée durant l'unité de temps (1 minute ou 1 seconde). Nous avons la relation  $T_i = 1/n$ . Elle permet d'éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent. Afin de rendre le système plus dynamique (diminuer le temps de réponse), on diminue l'action intégrale mais, ceci provoque l'augmentation du déphasage ce qui provoque

l'instabilité du système en boucle fermée. Et elle est aussi utilisée lorsqu'on désire avoir en régime permanent, une précision parfaite, en outre, elle permet de filtrer la variable à régler d'où l'utilité pour le réglage des variables bruitées.

#### 4.2.2.1 Principe :

La relation entre la sortie  $u(t)$  est le signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  est :

$$\frac{dU(t)}{dt} = K_i \varepsilon(t) \quad 4.3$$

Avec :

$$U(t) = K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad 4.4$$

Donc :

$$\frac{U(t)}{\varepsilon(t)} = K_i / p = 1 / T_i p \quad 4.5$$

$K_i$ : gain intégral

$T_i$  : constante de temps d'intégration

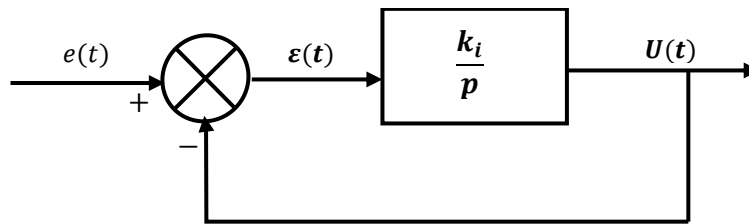


Figure 4.5 : Régulateur intégrateur(I).

#### 4.2.2.2 Effet :

L'intérêt principal de ce régulateur est d'ajouter dans la chaîne de commande une intégration.

Nous savons que la présence d'une intégration augmente la classe du système et réduit ou annule, selon le type d'entrée, l'erreur statique du système. L'action intégrale pure :

- améliore la précision en réduisant ou annulant l'erreur statique.
- introduit un déphasage de  $-90^\circ$  qui risque de déstabiliser le système (diminution de la marge déphasé).

Le régulateur à action exclusivement intégrale n'est pratiquement jamais utilisé, en raison de sa lenteur et de son effet déstabilisant. Il est, en général, associé au régulateur proportionnel.

### 4.2.3 Action dérivée (D) : [21]

#### 4.2.3.1 Principe :

La relation entre la sortie  $U(t)$  et le signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  est :

$$U(t) = K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad 4.6$$

C'est à dire :

$$\frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_d \cdot P = T_d \cdot P \quad 4.7$$

Avec  $K_d$  appelé " gain dérivé ",

$T_d$  appelée " constante de temps de dérivation "

Son schéma fonctionnel est celui de la Figure-4.6

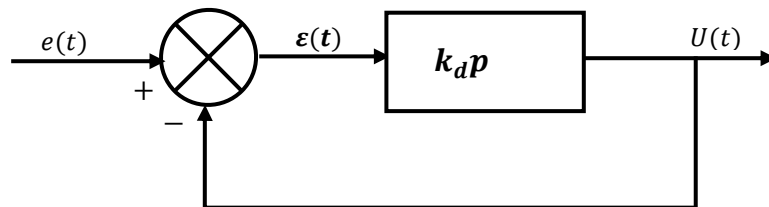


Figure 4.6: Correction à action dérivée pure (D).

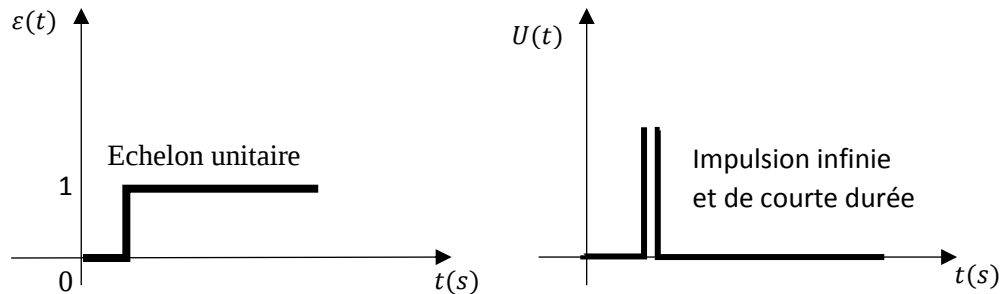


Figure 4.7: Entrée et sortie du correcteur à action dérivée (D).

#### 4.2.3.2 Effet :

La réponse indicielle montre qu'un correcteur à action exclusivement dérivée ne permet pas la transmission d'un signal. L'action dérivée ne peut donc être utilisée seule. On fait appel à elle lorsque le signal de commande  $u$  doit être particulièrement efficace. En effet, ce correcteur permet de faire intervenir la dérivée du signal d'erreur ; il sera d'autant plus actif que la variation de  $\varepsilon(t)$  est rapide.

L'action dérivée pure :

- améliore la stabilité du système par l'introduction d'un déphasage supplémentaire de  $+90^\circ$  (augmentation de la marge de phase),
- Mais fait diminuer la précision du système,
- Et amplifie les bruits de hautes fréquences.

Le correcteur à action exclusivement dérivée n'est pratiquement jamais utilisé. Il est en général associé au correcteur Proportionnel.

### 4.3 La commande PID en régulation de vitesse : [19]

La commande proportionnel-intégral-dérivé (PID) est insérée dans la chaîne directe de l'asservissement, en série avec le processus, comme indiqué dans la (Figure.4.8). Ce régulateur élabore à partir du signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  une commande  $U_c(t)$  en fonction de trois actions proportionnelle, intégrale, dérivée,

$$U(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad 4.8$$

$$= K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad 4.9$$

$$\Rightarrow U(p) = K_p \cdot \varepsilon(p) + K_i \frac{\varepsilon(p)}{p} + K_d \cdot \varepsilon(p) \cdot p \quad 4.10$$

$K_p$ : gain d'action proportionnelle.

$K_i = 1/T_i$  : gain d'action intégrale.

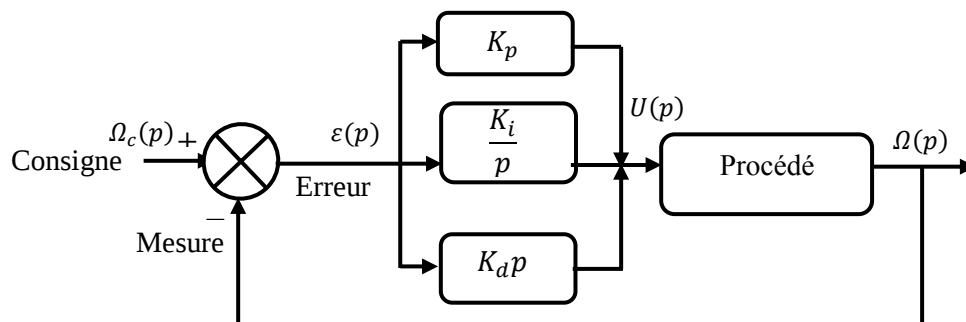
$K_d = T_d$  : gain d'action dérivée.

$T_i$  : constante de temps, dite temps d'action intégrale.

$T_d$  : constante de temps, dite temps d'action dérivée.

Le régulateur PID est donc conçu dans le domaine temporel comme la somme des trois actions.

On obtient alors un asservissement composée d'un terme proportionnel, un terme intégral et un terme dérivé, mises en parallèle, on parle d'asservissement PID :



**Figure4.8** : Schéma bloc du correcteur PID pour la régulation de la vitesse.

#### 4.4 Réglage des coefficients d'un PID :

Le réglage des coefficients  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  d'un PID peut se faire expérimentalement par essais/erreurs. Il ne sert à rien de vouloir régler les trois coefficients en même temps : il y a trop

Combinaisons possibles et trouver un triplé performant relèverait de l'exploit. Il vaut mieux procéder par étape.

- Tout d'abord, il faut mettre en place un simple régulateur proportionnel (les coefficients  $K_i$  et  $K_d$  sont donc nuls). Par essais/erreurs, il faut régler le coefficient  $K_p$  afin d'améliorer le temps de réponse du système. C'est-à-dire qu'il faut trouver un  $K_p$  qui permette au système de se rapprocher très vite de la consigne tout en faisant attention de garder la stabilité du système: il ne faut pas que le système réponde très vite tout en oscillant beaucoup.

- Une fois ce coefficient réglé, on peut passer au coefficient  $K_i$ . Celui-là va permettre d'annuler l'erreur finale du système afin que celui-ci respecte exactement la consigne. Il faut donc régler  $K_i$  pour avoir une réponse exacte en peu de temps tout en essayant de minimiser les oscillations apportées par l'intégrateur.

- Enfin, on peut passer au dernier coefficient  $K_d$  qui permet de rendre le système plus stable.

Son réglage permet donc de diminuer les oscillations.

En général, pour régler ces coefficients, on donne au système une consigne fixe (exemple : pour un moteur : tourne à 3 tours par seconde) et on observe la réponse du système (exemple : l'évolution du nombre de tours par seconde du moteur au cours du temps). Le graphe résultant possède donc cette forme :

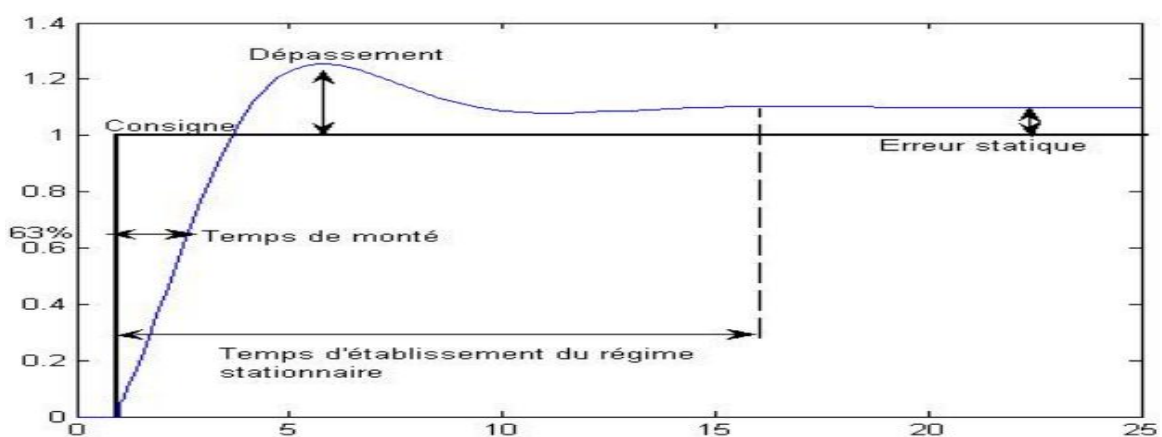


Figure 4.9 : la réponse d'un procédé stable.

Le PID parfait n'existe pas, tout est une question de compromis. Certaines applications autoriseront un dépassement afin d'améliorer le temps de stabilisation, alors que d'autres ne l'autoriseront pas (exemple, contrôler un stylo pour écrire sur une feuille. S'il y a dépassement dans le PID, le stylo traversera la feuille). Tout dépend donc du cahier des charges. Chacun des coefficients a un rôle à jouer sur la réponse à une consigne :

- L'erreur statique, c'est l'erreur finale une fois que le système est stabilisé. Cette erreur doit être nulle. Pour diminuer l'erreur statique, il faut augmenter  $K_p$  et  $K_i$ .
- Le dépassement, c'est le rapport entre le premier pic et la consigne. Ce dépassement diminue si  $K_p$  ou  $K_i$  diminuent ou si  $K_d$  augmente.
- Le temps de montée correspond au temps qu'il faut pour arriver à 63 % ou dépasser à la consigne. Le temps de montée diminue si  $K_p$  ou  $K_i$  augmentent ou si  $K_d$  diminue.
- Le temps de stabilisation, c'est le temps qu'il faut pour que le signal commette une erreur inférieure à 5% de la consigne. Ce temps de stabilisation diminue quand  $K_p$  et  $K_i$  augmentent.

Attention, les coefficients  $K_i$  et  $K_d$  dépendent de la fréquence d'échantillonnage du système! En effet, l'intégrateur fera la somme des erreurs au cours du temps. Si on échantillonne deux fois plus vite, on sommera deux fois plus d'échantillons. Du coup, le coefficient  $K_i$  devra être divisé par 2. A l'inverse, pour le dérivateur, si on double la fréquence d'échantillonnage, il faudra doubler le coefficient  $K_d$  afin de garder les mêmes performances du PID. Plus la fréquence d'échantillonnage est élevée et plus le PID sera performant (l'intégration et la dérivée seront plus précises). [23]

#### 4.5 Partie pratique :

Cette partie est réservée à la réalisation pratique pour la commande de vitesse d'un moteur à courant continu par régulateur PID.

Cette réalisation est divisée en deux parties essentielles :

1. L'alimentation par la tension alternative du réseau : cette partie contient :
  - L'obtention des signaux de vitesse de rotation du moteur à vide.
  - L'obtention des signaux de vitesse de rotation du moteur en appliquant une charge résistive à la sortie d'une génératrice.
2. L'alimentation par la tension continue des panneaux photovoltaïques :
  - L'obtention de signal de vitesse de rotation du moteur à vide avec une alimentation de 8 panneaux puis 8 panneaux avec 2 panneaux ombrés.

-L'obtention de signal de vitesse de rotation du moteur avec l'application d'une charge aux bornes de la génératrice puis l'ombrage d'un panneau en remarquant l'efficacité du régulateur PID.

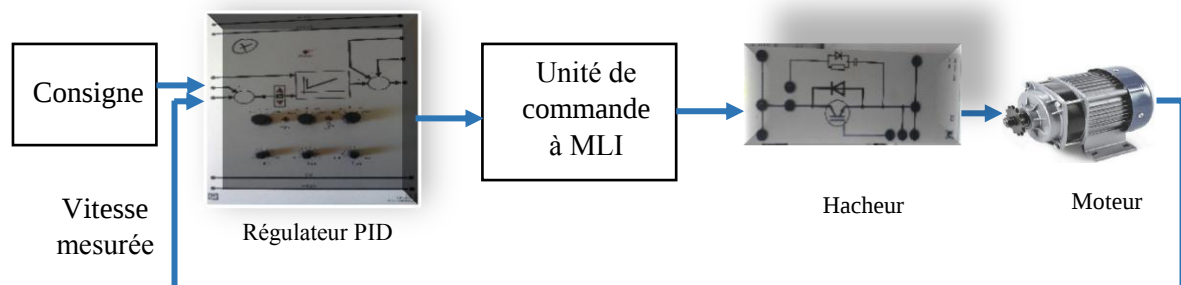
#### 4.5.1 Le matériel utilisé est composé de :

- 1 Cadre profilé à deux étage , de largeur 120 cm.
- 1 Transformateur triphasé 45/90, 30N.
- 2 Branche de convertisseur à deux diodes.
- 1 Capacité de 990 $\mu$ F.
- 1 IGBT
- 1 Rhéostat à curseur  $\Omega/1,5A$ .
- 1 Unité de commande à MLI
- 1 Alimentation stabilisé  $\pm 15V/3A$ .
- 2 Apareils de mesure AV
- 1 Oscilloscope bicanal, par ex.HAMEG HM 412-5.
- 1 Moteur à CC et 1 Génératrice à CC.
- 1 Alimentation continue 220V.
- 8 panneaux 80w.

#### 4.5.2 L'alimentation réseau :

Pour la régulation de vitesse du moteur, on a fait l'implémentation de la commande PID. On a réglé les trois paramètres par la méthode par approches successives, Avec  $k_p=35$  et  $k_i=1$  et  $k_d=0.06$  (meilleurs paramètres obtenus après plusieurs essais).

Le schéma synoptique suivant montre l'implémentation de la commande PID :



**Figure 4.10:** Schéma synoptique de l'asservissement à implémenter.

La photo ci-dessous montre le montage complet à boucle fermée avec l'usage d'un régulateur PID :

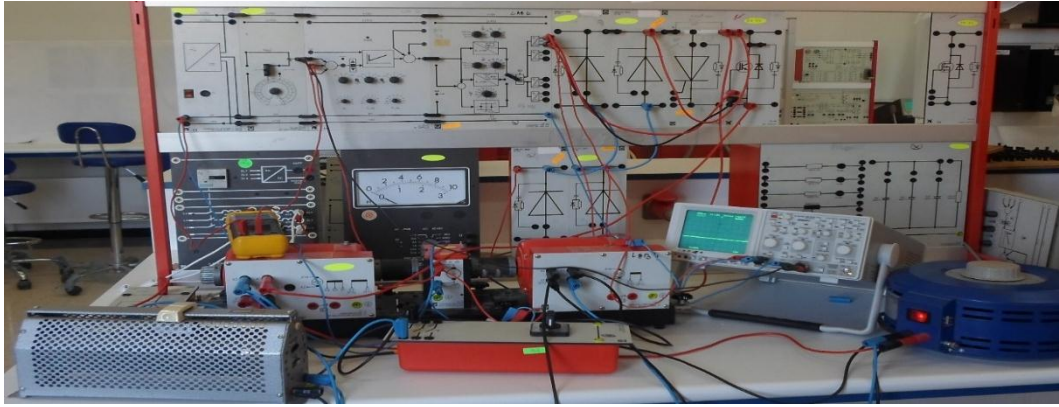


Figure 4.11 : Photo montrant le montage complet à boucle fermée au sein de notre laboratoire (E

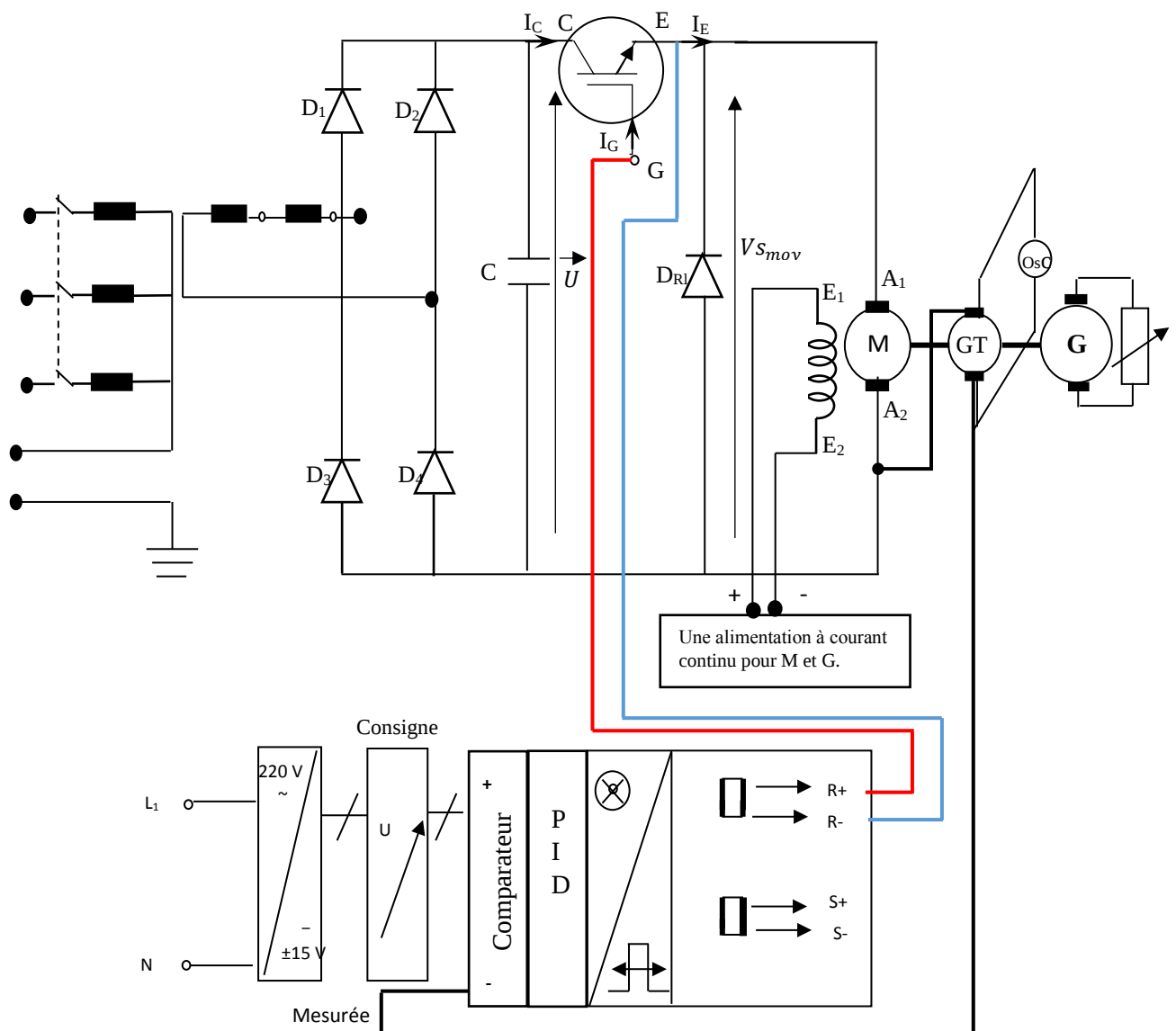


Figure 4.12: Schéma complet du montage a boucle fermée.

Les figures suivantes montrent les signaux de vitesse visualisés par l'oscilloscope :

#### 4.5.2.1 Résultat à vide :

On a démarré le moteur à vide et on a obtenu le signal de vitesse suivant:

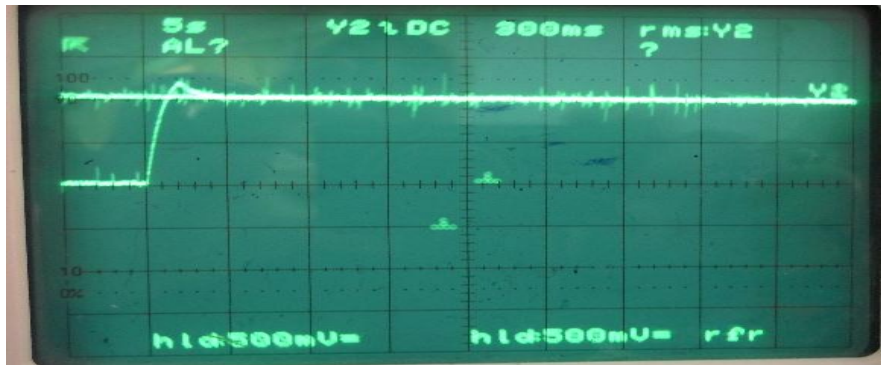


Figure 4.13 : Photo de signal de vitesse \_démarrage à vide.

#### 4.5.2.2 Résultat en charge :

Cette fois ci on a redémarré le moteur en charge :

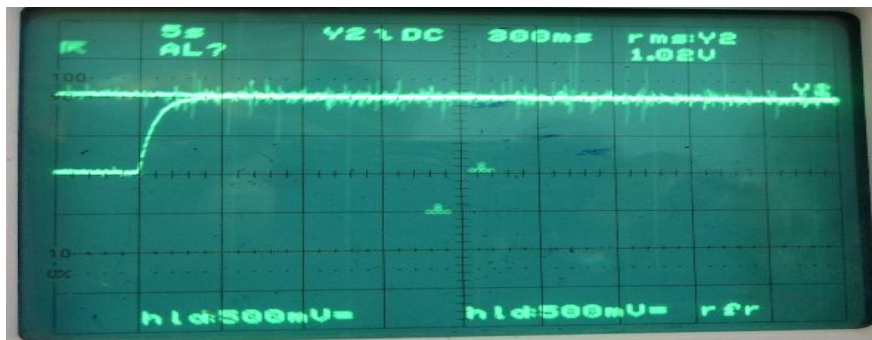


Figure 4.14: Photo de signal de vitesse \_démarrage en charge (0.3N.m).

#### 4.5.2.3 Résultat à vide puis application d'une charge :

Une deuxième fois on a démarré le moteur à puis on a appliqué une charge :

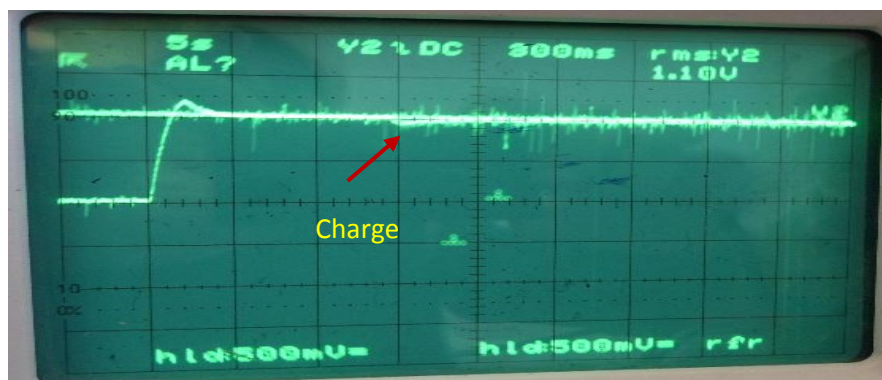
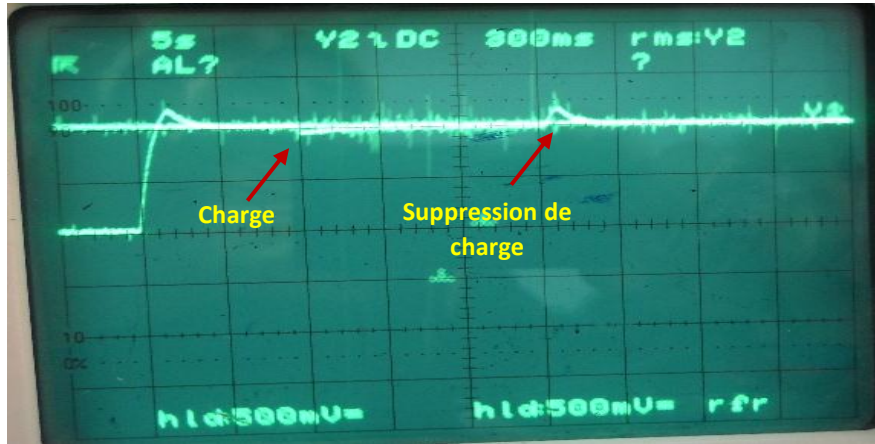


Figure 4.15 : Photo de signal de vitesse \_démarrage à vide puis application d'une charge (0.3N.m).

#### 4.5.2.4 Résultat de démarrage à vide puis application d'une charge puis à vide :

Dans cet essai on débranché la charge après le retour de vitesse a la valeur de consigne :



**Figure 4.16** : Photo de signal de vitesse \_démarrage à vide puis application de charge (0.3 N.m) puis à vide.

#### 4.5.2.5 Interprétations de résultats :

##### 4.5.2.5.1 Démarrage à vide :

La photo illustre la forme d'onde de la vitesse de rotation. (Figure 4.13)

Au démarrage du moteur, la vitesse fait un dépassement acceptable puis elle suit la consigne (1088 tr/min) avec un temps de réponse abordable.

On remarque qu'une poursuite de trajectoire est réalisée. C'est-à-dire, la vitesse de rotation du moteur suit la sortie du modèle de référence.

##### 4.5.2.5.2 Démarrage en charge :

On démarre le moteur en charge (couple résistant 0.3N.m), on remarque que la vitesse suit la consigne sans faire de dépassement, avec précision et un temps de réponse acceptable.

##### 4.5.2.5.3 Démarrage à vide puis application d'une charge :

##### 4.5.2.5.4

On démarre le moteur à vide et après 15 secondes, on a appliqué une charge (couple résistant 0.3N.m). On remarque que la vitesse diminue. Puis, elle retourne à sa valeur initiale après un temps court.

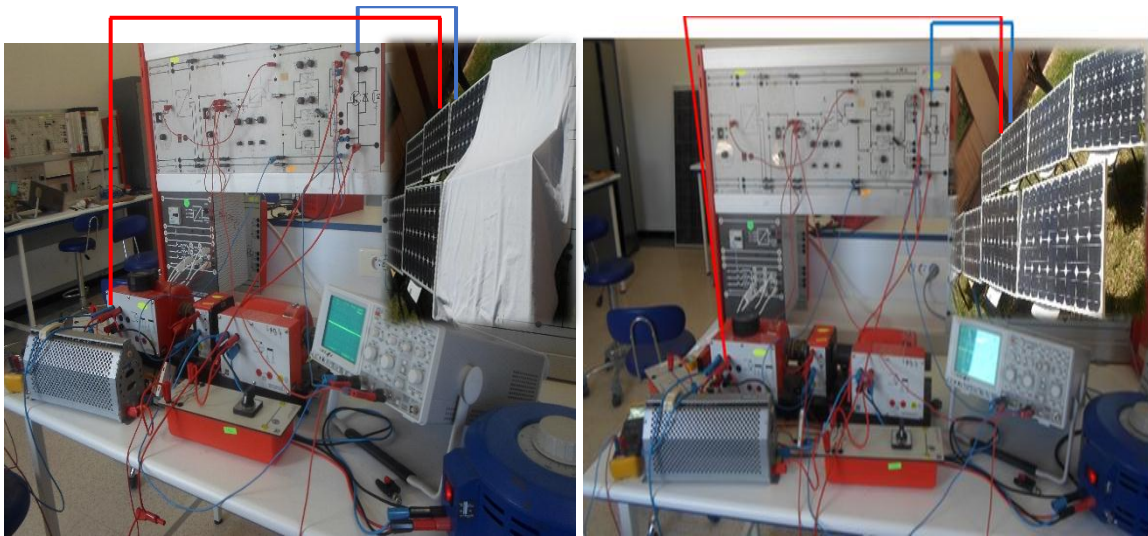
**4.5.2.5 Démarrage à vide puis application d'une charge puis le retour à vide :**

On applique une charge après 10 sec la vitesse chute puis retourne à sa valeur de référence.

A partir de 25sec on débranche la charge (0.3N.m), on remarque que la vitesse fait un petit dépassement et puis elle retourne toujours à sa valeur de référence (1088 tr/min) (voir figure 4.16).

**4.5.3 L'alimentation par les panneaux photovoltaïques :**

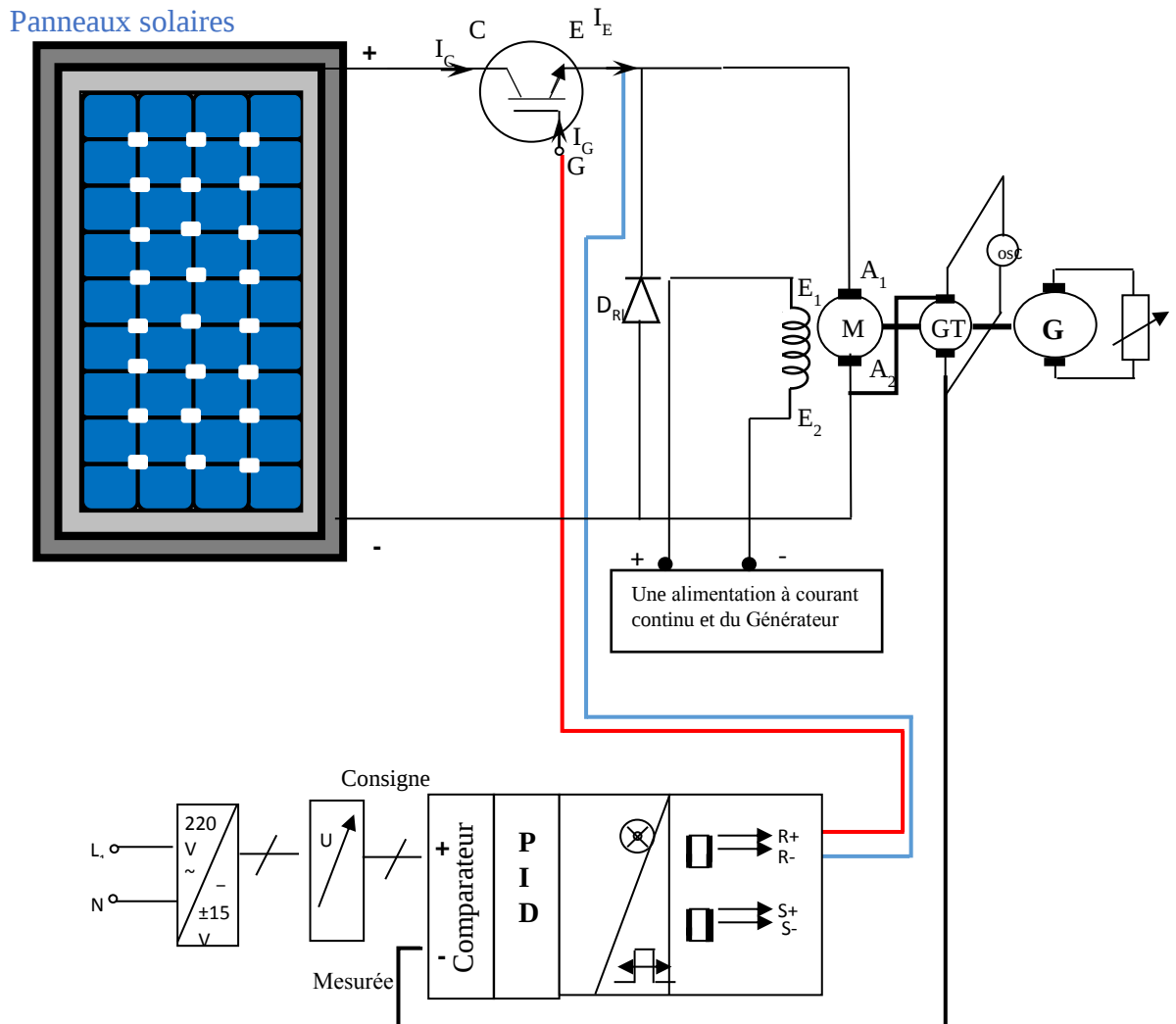
Tout en gardant les mêmes paramètres du régulateur, on a remplacé l'alimentation alternative du réseau par l'alimentation continue des panneaux photovoltaïques, on a éliminé la partie de redressement (le pont à diode), comme il est représenté dans la figure suivante.



(a)Alimentation PV de 8 panneaux

(b)Alimentation PV de 8 panneaux avec ombrage de deux panneaux.

**Figure 4.17 :** Photo du montage complet avec alimentation photovoltaïque en boucle fermée.



**Figure 4.18** : Schéma électrique de montage complet avec alimentation photovoltaïque en boucle fermée.

#### 4.5.3.1 Résultat des essais :

Les figures (4.19), (4.20) et (4.21) montrent le signal de vitesse de démarrage à vide avec 8 panneaux en série ensuite démarrage à vide avec 6 panneaux et enfin, démarrage à vide avec 8 panneaux en série puis application de la charge et finalement un panneau est mis sous ombrage.

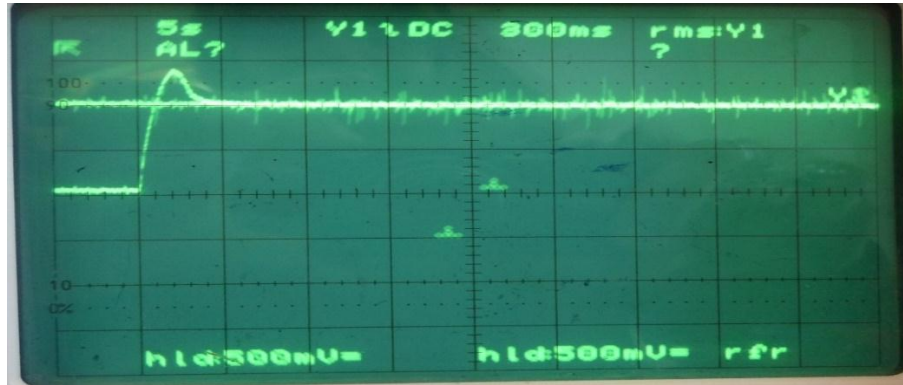


Figure 4.19 : Démarrage à vide avec 8 panneaux en série.

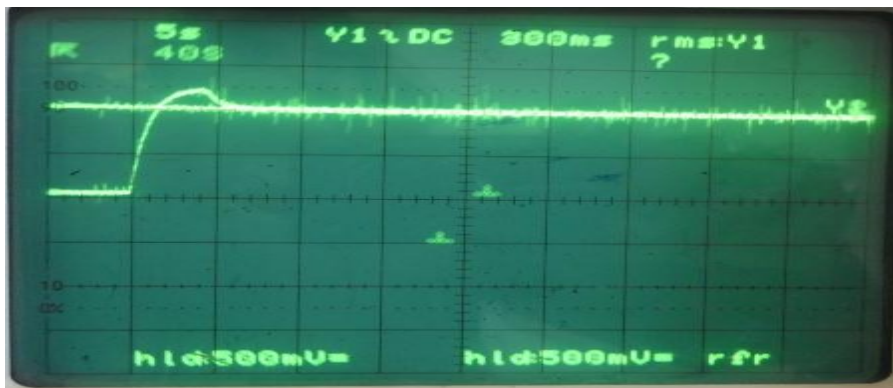


Figure 4.20: Démarrage à vide avec 8 panneaux en série et deux panneaux ombrés.

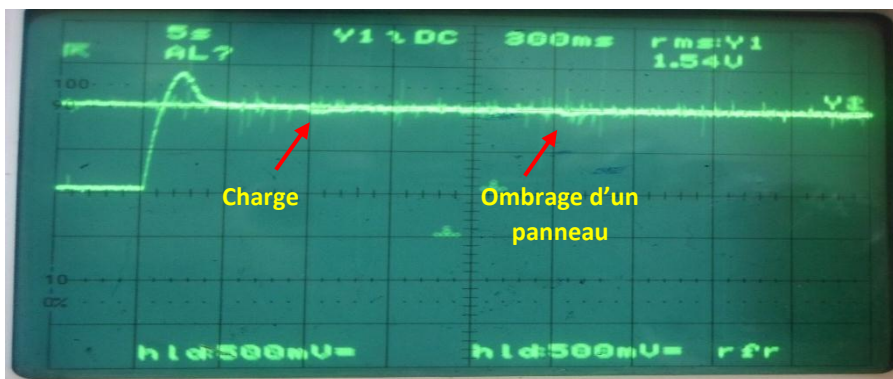
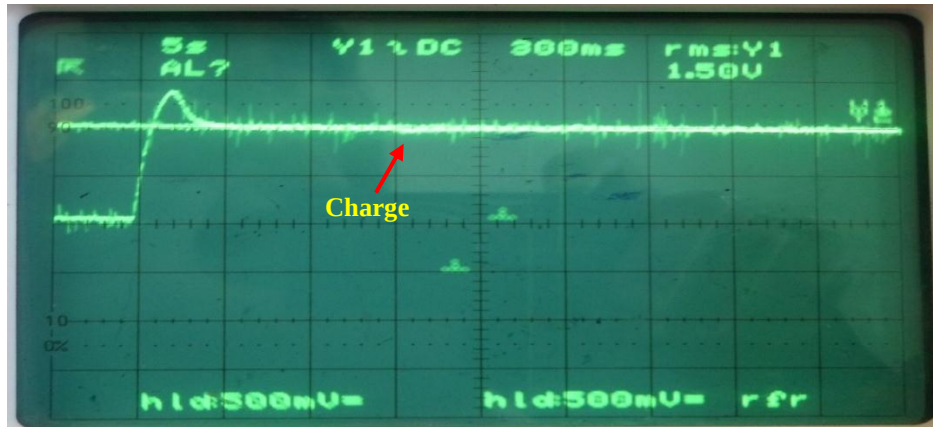


Figure 4.21 : Démarrage à vide avec 8 panneaux en série puis application de la charge de 0.2N.m, ensuite l'ombrage d'un panneau.

La figure ci-dessous nous permet d'observer le signal de vitesse de démarrage à vide avec 8 panneaux en série puis l'application d'une charge (0.2N.m).



**Figure 4.22:** Démarrage à vide avec 8 panneaux en série puis l'application d'une charge.

#### 4.5.3.2 Interprétation des résultats :

##### 4.5.3.2.1A vide : (Figure 4.19, Figure 4.20)

Quand on a alimenté notre moteur avec 8 panneaux dans un temps ensoleillé c'est-à-dire une alimentation continu de 153v, on a remarqué un dépassement acceptable au démarrage puis la vitesse se stabilise à (1043tr/min) selon la valeur de consigne.

Dans un deuxième temps, on a alimenté le moteur avec 6 panneaux ; une tension continue égale à 130v, on remarque alors que seul le dépassement qui a diminué par rapport à l'alimentation précédente ensuite la vitesse suit la même consigne parfaitement.

##### 4.5.3.2.2 À vide avec puis l'application d'une charge : (Figure 4.22)

On a démarré le moteur à vide puis on a appliqué une charge après 15 sec, la vitesse diminue puis elle retourne à sa valeur initiale.

##### 4.5.3.2.3A vide puis l'application d'une charge puis l'ombrage d'un panneau : (Figure 4.21)

Le démarrage était à vide puis on a appliqué une charge à 10 sec, on remarque une diminution de la vitesse qui dure 2 sec puis elle retourne à sa valeur initiale grâce au régulateur PID, après 15 sec de l'application de la charge, on a fait l'ombrage d'un panneau ce qui a fait la diminution de la vitesse puis le retour à la valeur de consigne.

#### Remarque :

On a gardé les paramètres du régulateur constants que ce soit pour l'alimentation à travers le redresseur (PD2) ou l'alimentation obtenue par PV.

**4.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté au premier lieu une étude théorique concernant la commande des systèmes par des régulateurs classiques de type proportionnel intégral dérivé (PID).

Les résultats de la validation expérimentale montrent que l'utilisation du réglage conventionne à base de régulateur PID donne de bonnes performances.

D'après les différents résultats, nous avons conclu que la poursuite pour une consigne de vitesse de 1088tr/min est satisfaisante avec un dépassement acceptable et un faible temps de réponse 3s environ. La vitesse du moteur à courant continu diminue quand une charge est appliquée, mais grâce au régulateur PID, la vitesse retourne toujours à sa valeur initiale. Donc, le régulateur PID est indispensable afin de contrôler notre système convenablement.

Le choix des paramètres du régulateur PID à savoir P, I et D est très important. Il faut avoir un compromis entre dépassement et temps de réponse et de rejet et cela bien entendu selon les applications. Dans le prochain chapitre, on va procéder aux mêmes essais, mais cette fois-ci le régulateur PID est remplacé par la carte Arduino Uno qui nous délivre les signaux de commande pour attaquer l'IGBT.

### 5.1 Introduction :

Aujourd'hui, l'électronique est de plus en plus remplacée par de l'électronique programmée. On parle aussi de système embarquée ou d'informatique embarquée. Son but est de simplifier les schémas électroniques et par conséquent réduire l'utilisation de composants électroniques, réduisant ainsi le coût de fabrication d'un produit. Il en résulte des systèmes plus complexes et performants pour un espace réduit.

Depuis que l'électronique existe, sa croissance est fulgurante et continue encore aujourd'hui. L'électronique est devenue accessible à toutes personnes en ayant l'envie.

Ce travail d'initiation à base d'une carte Arduino UNO permet de commander la vitesse d'un moteur à courant continu par la commande PID, après avoir donné une description théorique sur le module Arduino et son environnement de développement, on va procéder à l'application expérimentale ; pour cette raison, plusieurs blocs ont été nécessaires afin de réaliser une telle combinaison.

### 5.2 But :

Dans ce but, notre travail comporte trois axes principaux :

- Contrôle d'un moteur à courant continu
- Réalisation d'une interface pour commander le moteur à courant continu
- Mise en œuvre de la régulation par un contrôleur PID

### 5.3 Définition du module Arduino :

Arduino est un projet créé par une équipe de développeurs, composée de six individus :

Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino, David Mellis et Nicholas Zambetti. Cette équipe a créé le "système Arduino". C'est un outil qui va permettre aux débutants, amateurs ou professionnels de créer des systèmes électroniques plus ou moins complexes. [24]

Le module Arduino est un circuit imprimé en matériel libre (plateforme de contrôle) dont les plans de la carte elle-même sont publiés en licence libre dont certains composants de la carte: comme le microcontrôleur et les composants complémentaires qui ne sont pas en licence libre. Un microcontrôleur programmé peut analyser et produire des signaux électriques de manière à effectuer des tâches très diverses. Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications comme l'électrotechnique industrielle et embarquée ; le modélisme, la domotique mais aussi dans des domaines différents comme l'art contemporain et le pilotage d'un robot, commande des moteurs et faire des jeux de lumières, communiquer avec l'ordinateur, commander des

appareils mobiles (modélisme). Chaque module d'Arduino possède un régulateur de tension +5 V et un oscillateur à quartz 16 MHz (ou un résonateur céramique dans certains modèles). Pour programmer cette carte, on utilise le logiciel IDE Arduino [25]

### 5.3.1 Entrées-sorties numériques de l'Arduino Uno :

Les broches numérotées de 0 à 13 sont les entrées sorties numériques. Certaines d'entre elles peuvent également être utilisées en sortie MLI (en rose), les broches 0 et 1 servent aussi à la communication série (en rouge). L'I2C en gris est en haut et non étiqueté sur la carte.

Il est préférable de **ne pas dépasser une consommation de 20 mA sur une broche programmée en sortie** et absolument nécessaire de ne pas dépasser 40 mA sous peine de risque la destruction de la sortie du MCU. Il s'agit aussi de ne pas dépasser au total 200 mA.

Les sorties numériques sont employées de nombreuses manières : alimentation d'une DEL pour un éclairage ou un témoin, commande d'un transistor, connexion à un afficheur LCD, etc.

Les entrées numériques permettent également de connecter de nombreuses choses : interrupteur, bouton poussoir, interrupteurs à lame souple REED mais aussi des capteurs de présence plus sophistiqués.

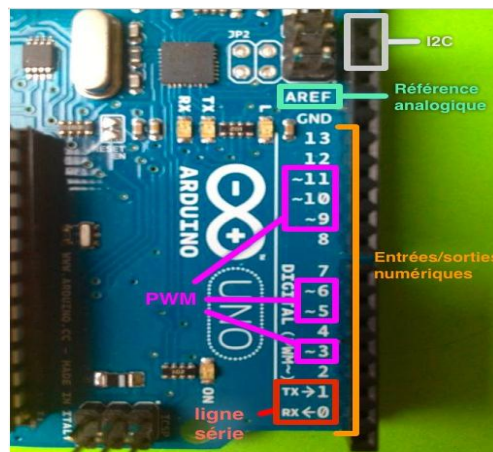


Figure 5.1: Représentation des entrées-sorties numériques de l'Arduino Uno.

### 5.3.2 Entrées analogiques de l'Arduino Uno :

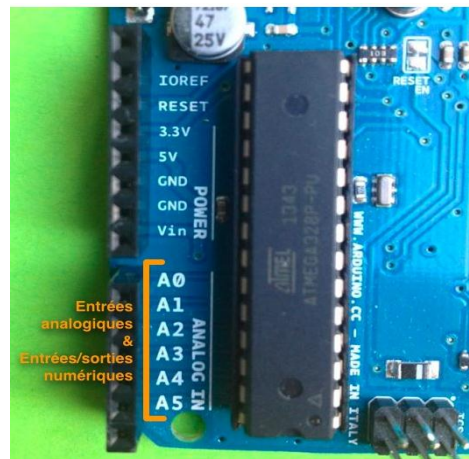
Ces broches peuvent également être utilisées comme entrées-sorties numériques.

Le convertisseur des Arduino à base d'AVR effectue une conversion sur 10 bits, c'est à dire qu'il convertit la tension en un nombre entier ayant une valeur de 0 à 1023.

0 correspond au 0V de la tension et 1023 au 5V. La résolution, c'est à dire la différence entre deux valeurs successives de la tension correspondant à une différence de 1 sur l'entier résultat, est donc d'environ 5mV.

Il est possible de changer la tension de référence de la conversion analogique-numérique, c'est à dire la tension comprise comme 1023. Le MCU des Arduino possède une référence de tension interne de 1,1V qui peut être sélectionné à la place de la tension d'alimentation. Cela permet une meilleure résolution, environ 1mV, sur les faibles valeurs de tension à convertir. Il est également possible de sélectionner la tension fournie sur la broche AREF comme tension de référence.

Plusieurs types de capteurs analogiques peuvent trouver place sur ces broches. On citera la mesure de courant traversant une résistance ou la mesure d'intensité lumineuse via une photo-résistance.



**Figure5.2** : Représentation des Entrées analogiques de l'Arduino Uno.

### 5.3.3 Les sorties MLI :

Selon les Arduino, de 6, pour l'Arduino Uno, à 15 broches, pour l'Arduino Méga, peuvent être configurées en sortie MLI. La configuration est effective dès que le programme utilise la fonction `analogWrite(...)` [1] sur une des broches configurable en MLI. Le rapport cyclique de la MLI est réglé via cette même fonction entre 0, le signal est constamment à l'état bas, 0V, à 255, le signal est constamment à l'état haut, 3,3V ou 5V selon l'Arduino, soit un rapport cyclique de 100%.

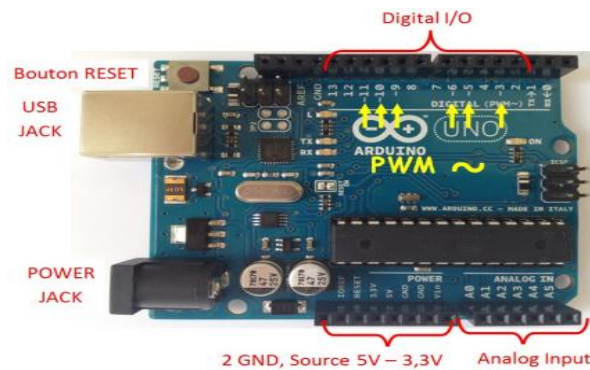
La MLI trouve son emploi lorsqu'il s'agit de commander un moteur électrique à courant continu, comme celui qui équipe nos locomotives, ou une intensité lumineuse, par exemple dans une DEL. Si le courant nécessaire à une DEL est compatible avec ce que peut fournir une

sortie MLI, il n'est pas de même pour la commande d'un moteur. Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'amplifier le signal via un transistor qui permettra également de passer des 3,3V ou 5V de l'Arduino aux 12V ou plus selon le besoins de nos engins.

## 5.7 Présentation de la carte Arduino et l'environnement Matlab/Simulink :

### 5.7.1 Le matériel : Arduino UNO

C'est un circuit imprimé comportant tous les composants électroniques nécessaires pour faire fonctionner un microcontrôleur (Atmega 328) associé à une interface USB lui permettant de communiquer avec un ordinateur.



**Figure 5.3** – Description de la Carte Arduino "Uno".

- Microcontroller: ATmega328.
- Operating Voltage: 5v.
- Input Voltage (recommended): 7-12 v.
- Input Voltage (limits): 6-20 v.
- DC Current per I/O Pin: 40mA.
- DC Current for 3.3V Pin: 50mA.
- Flash Memory: 32 KB.
- Clock Speed: 16MHz.
- Pins assignments:
- Analog read (A0-A5).
- Analog write [MLI] (3, 5, 6, 9, 10, and 11).
- Digital read (2-19).
- Digital write (2-19).

### 5.7.2 Le logiciel Arduino

Arduino IDE (Integrated Development Environment). Le logiciel est gratuit et open source dont la simplicité d'utilisation est remarquable. Ce logiciel va nous permettre de programmer la carte Arduino pour :

- Réaliser l'interfaçage avec Matlab/Simulink.
- Implémenter la commande directement sur la carte.

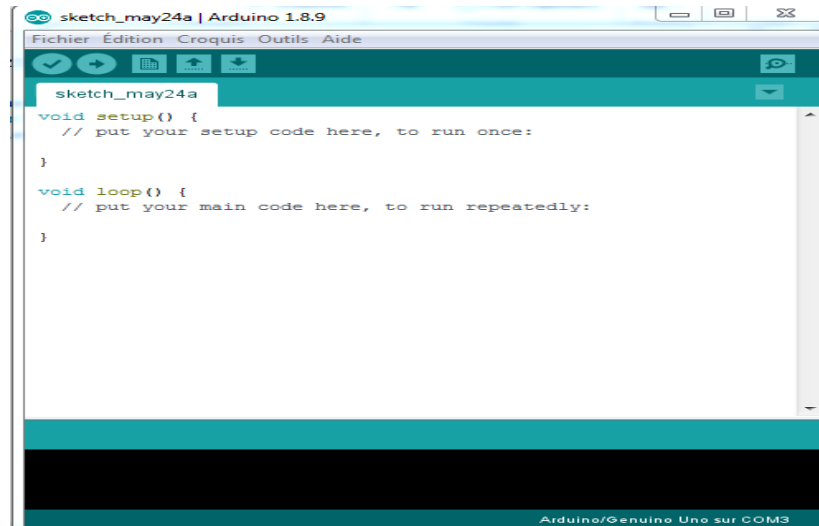


Figure 5.4– L'interface du logiciel Arduino.

### 5.7.3 L'environnement Matlab/Simulink

C'est un logiciel de calcul mathématique pour les ingénieurs et les scientifiques créé par Mathworks.

MATLAB est un environnement de programmation pour le développement d'algorithme, d'analyse de données, de visualisation, et de calcul numérique. En utilisant MATLAB, la résolution des problèmes de calcul complexes se fait plus rapidement qu'avec des langages de programmation traditionnels, tels que C, C++, et le Fortran.

SIMULINK est un environnement pour la simulation multidomaine. Il fournit un environnement graphique interactif et un ensemble de bibliothèques de bloc qui permettent de concevoir, simuler, mettre en application, et examiner une variété de systèmes, tel que les systèmes de communications, de commandes, de traitement des signaux, de traitement visuel, et de traitement d'image.

### 5.7.4 L'interfaçage Arduino↔Matlab/Simulink

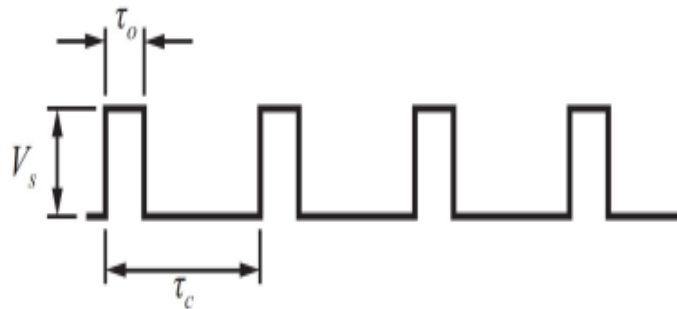
Il existe trois possibilités d'interfacer la carte Arduino avec Matlab/Simulink, à savoir :

1. Programmation de la carte Arduino Uno comme une carte d'interface.
2. Utilisation du package Arduino IO.
3. Utilisation du package Arduino Target.
4. Envoie des données.

Concernant notre projet on a utilisé le package Arduino IO.(Voir annexe D)

### 5.7.5 Présentation des sorties analogiques (mode MLI)

La carte Arduino Uno dispose de 6 sorties (3, 5, 6, 9,10 et 11) qui peuvent être utilisées en mode MLI, c'est-à-dire en modulation de largeur d'impulsion. Ce sont des signaux logiques binaires de fréquence constante (500Hz) mais de rapport cyclique variable.



**Figure 5.5** – Description du signal MLI

Lorsqu'un moteur ou une lampe est alimenté par ce type de tension, tout se passe comme si il était alimenté par une tension continue ajustable entre 0V (rapport cyclique= 0) et 5V (Rapport cyclique=255). Ces sorties doivent être initialisées comme des sorties digitales.

$$V_{out} = V_s \cdot \frac{T_o}{T_c} \quad 5.1$$

Avec :  $T_c=2\text{ms}$

La syntaxe de l'instruction permettant de générer le signal MLI est la suivante :

`analogWrite (pin, valeur) ;`

- pin : la pin sur laquelle on souhaite envoyer le signal (3, 5, 6, 9,10 ou 11).
- valeur : le rapport cyclique entre 0 et 255.

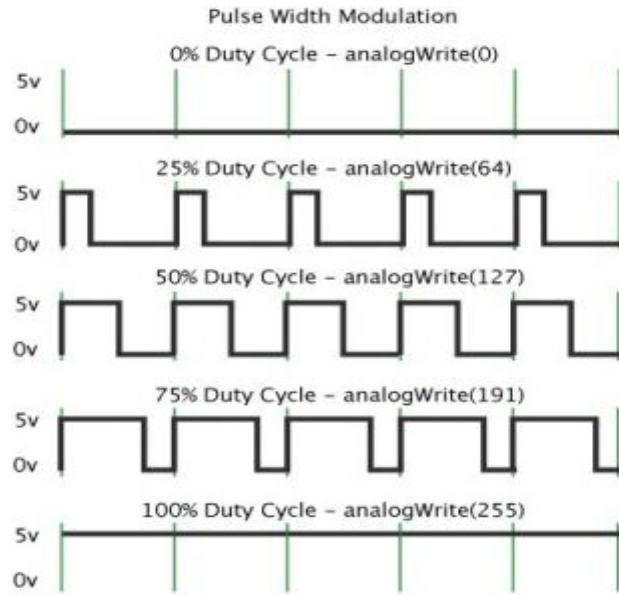


Figure 5.6 – Exemples de variation du rapport cyclique [24].

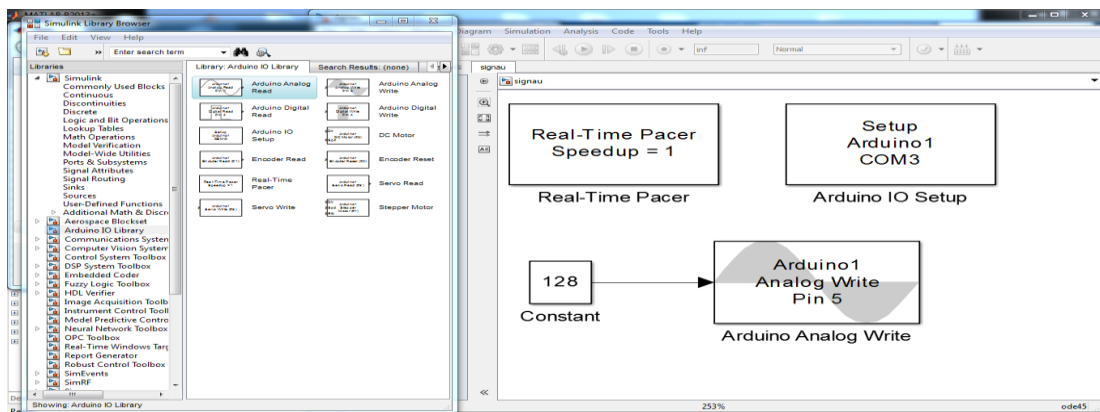


Figure 5.7: Communication de carte Arduino avec MATLAB.

### 5.8 Etage d'amplification et isolation :

Généralement les signaux délivrés par les cartes électroniques à des faibles puissances incapables d'attaquer les composants de grande puissance, pour cette raison on ajoute un étage d'amplification et isolation dans le circuit, pour cela on a ajouté un optocoupleur choisissant 4n35; voilà une description générale sur l'optocoupleur :

Les optocoupleurs sont des composants prévus pour isoler des signaux électriques et peuvent être utilisés en commutation. L'isolation électrique assure la sécurité si une partie de l'optocoupleur est reliée au secteur. Plus le courant dans la LED est élevé, plus le courant dans le collecteur est élevé aussi, le rapport des deux étant le CTR.

Un optocoupleur est formé d'une LED infrarouge et d'un phototransistor ou d'une photodiode. Il y a un isolement électrique entre les deux. Les caractéristiques électriques sont :

- courant maximum dans la LED-
- courant maximum dans le phototransistor-
- taux de transfert (CTR : current transfer ratio)-
- courant de fuite dans le phototransistor (dark current)-
- puissance que l'ensemble peut dissiper-
- tension d'isolation de l'optocoupleur.

- Le principe de fonctionnement de l'optocoupleur est le suivant :

Un optocoupleur repose sur une LED et un phototransistor ou une photodiode. Lorsqu'on fait passer un courant dans la LED, elle brille (elle émet de l'infrarouge) dans un boîtier bien hermétique à la lumière. La lumière émise par la LED est captée par le phototransistor qui devient alors passant. On peut donc transmettre un courant électrique tout en isolant électriquement. Dans son principe, l'optocoupleur fait les conversions successives : courant électrique - lumière infrarouge - courant électrique. [28]

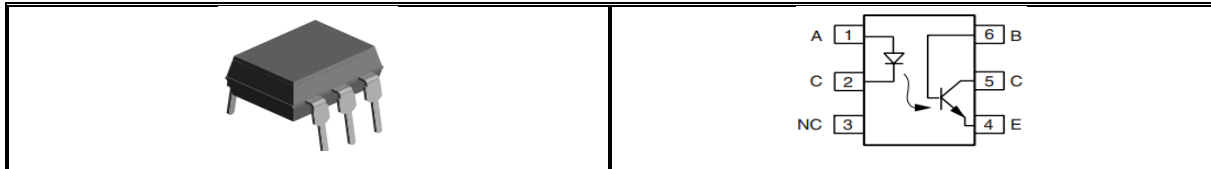


Figure 5.8: L'optocoupleur 4n35

## 5.9 Manipulation expérimentale :

### 5.9.1 Génération du signal MLI par la carte Arduino :

#### 5.9.1.1 Schéma électronique :

Présentation du schéma électronique :

Le circuit électronique comporte :

- Une lampe halogène
- Une résistance

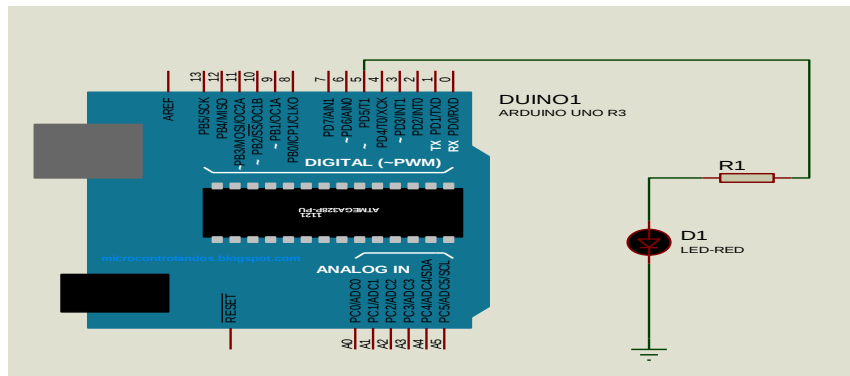
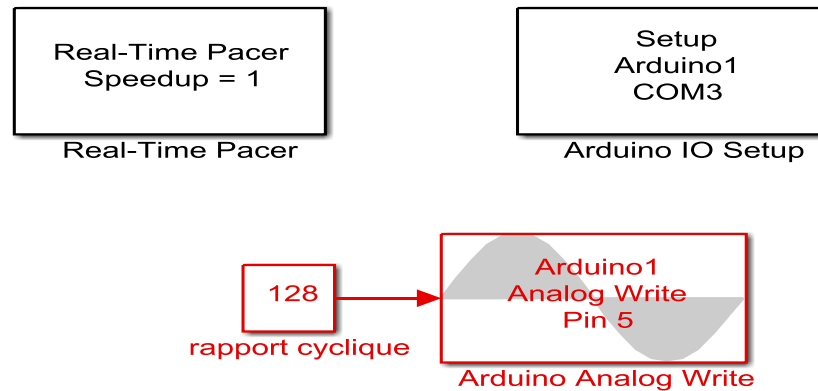


Figure 5.9 : Schéma électronique \_Branchement de la carte Arduino UNO avec une lampe.

### 5.9.1.2 Modèle Simulink :

La figure (5.10) montre le schéma de Simulink utilisé pour la génération de MLI par la carte Arduino Uno. Comme il est présenté, le signal MLI est généré par le pin 5 de la carte Arduino.



La figure 5.10 : Schéma bloc de l'acquisition de signaux par la carte Arduino.

### 5.9.1.3 Montage pratique :

L'utilisation de la commande MLI à partir de la carte Arduino permet de faire varier la tension appliquée aux bornes de la lampe autrement ceci permet de contrôler l'intensité lumineuse de la lampe.

La figure ci-dessous montre une vue réelle de la maquette utilisée :

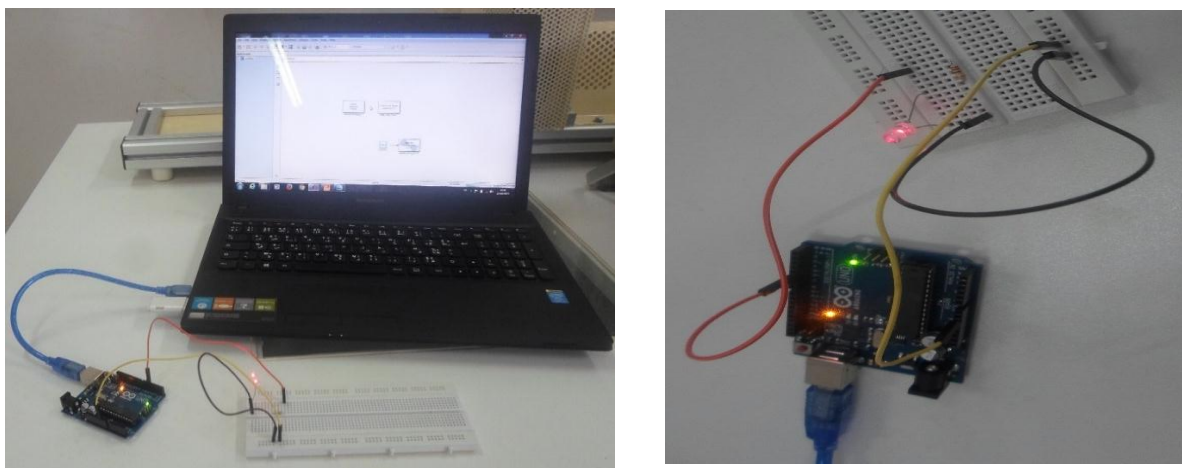
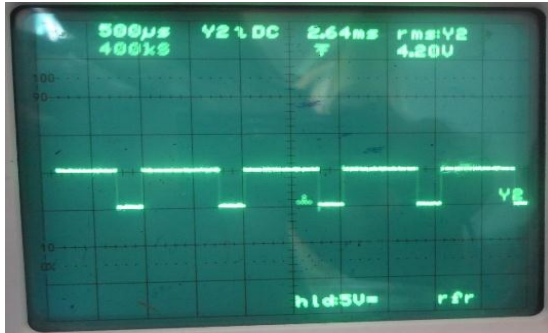


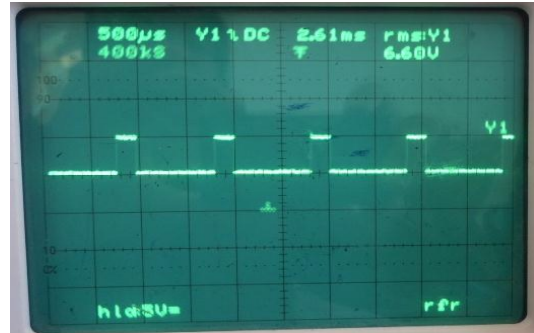
Figure5.11 : Une vue de la maquette

#### 5.9.1.4 Visualisation des signaux par l'oscilloscope HM 412-5. :

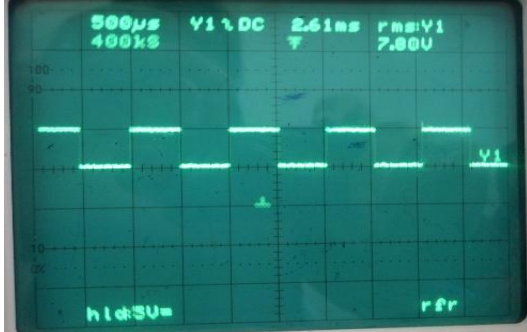
La figure 5.12 montre la visualisation des signaux générés par la carte Arduino Uno avec différents valeur du rapport cyclique :



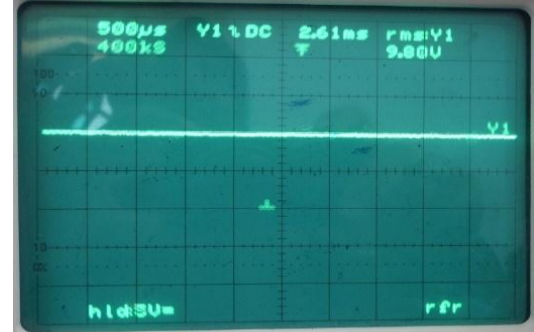
Signal MLI avec rapport cyclique ( $\alpha = 0.75$ )



Signal MLI avec rapport cyclique ( $\alpha = 0.25$ )



Signal MLI avec rapport cyclique ( $\alpha = 0.5$ )



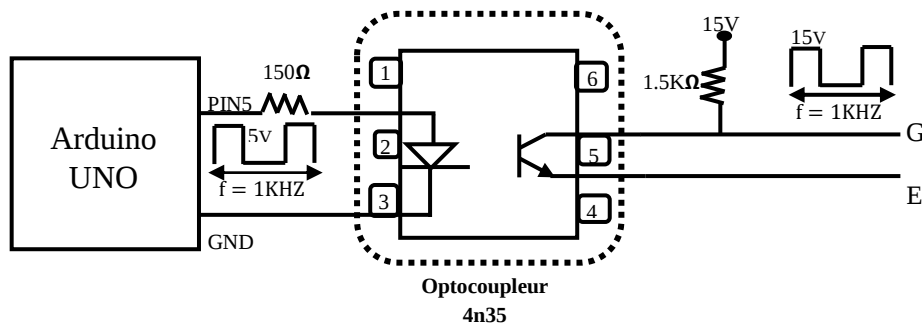
Signal MLI avec rapport cyclique ( $\alpha = 1$ )

**Figure 5.12** : Photo de signal MLI généré par la carte Arduino.

#### 5.9.2 Génération du signal MLI par la carte Arduino avec amplification et isolation :

##### 5.9.2.1 Schéma électrique du montage :

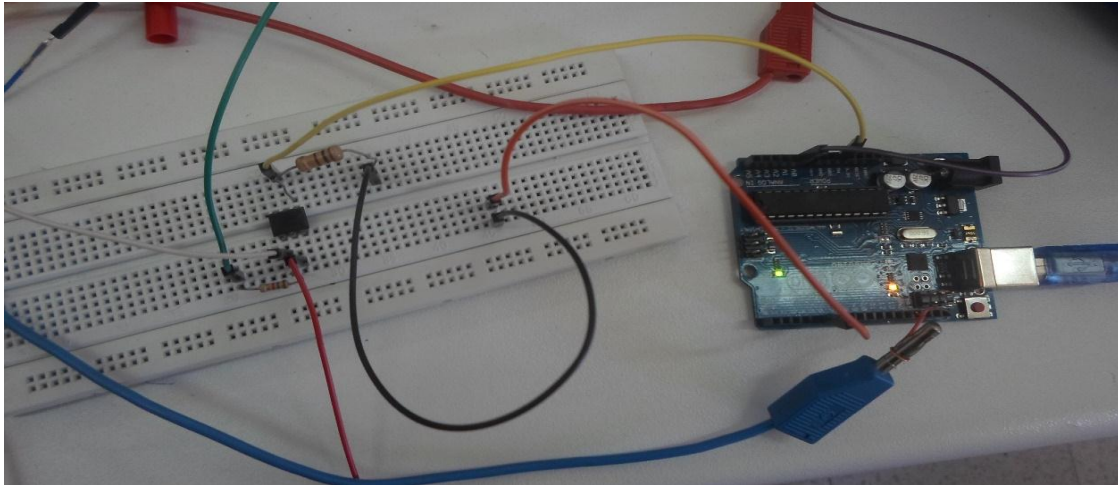
La figure ci-dessous montre le schéma électrique de l'étage d'amplification et l'isolation. Ce montage doit amplifier la tension de sortie de la carte Arduino et doit aussi supporter la variation du rapport cyclique du signal MLI. Parmi les optocoupleurs pouvant satisfaire ces conditions on a choisi 4n35 :



**Figure 5.13**: Schéma électrique d'étage d'amplification et isolation.

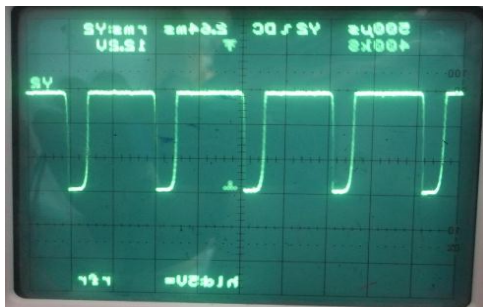
### 5.9.2.2 Montage pratique :

La figure (5.14) montre le montage de génération MLI par la carte Arduino avec l'étage d'amplification et isolation utilisant l'optocoupleur 4n35 :

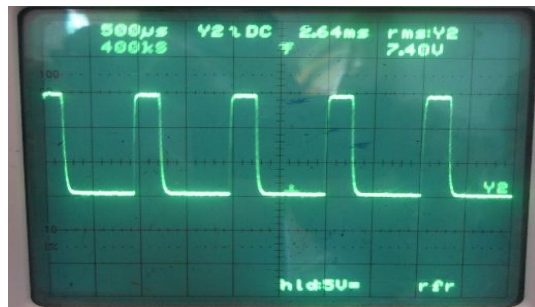


**Figure 5.14:** Photo de montage \_génération du signale MLI par la carte Arduino après amplification.

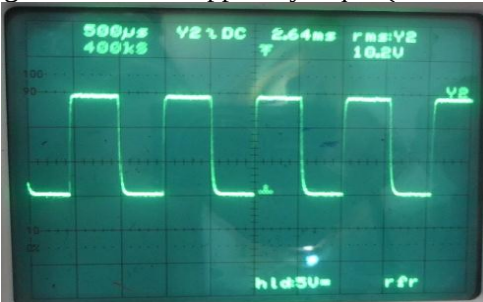
Voilà les signaux générés après amplification :



Signal MLI avec rapport cyclique ( $\alpha = 0.75$ ).



Signal MLI avec rapport cyclique ( $\alpha = 0.25$ ).



Signal MLI avec rapport cyclique ( $\alpha = 0.5$ ).

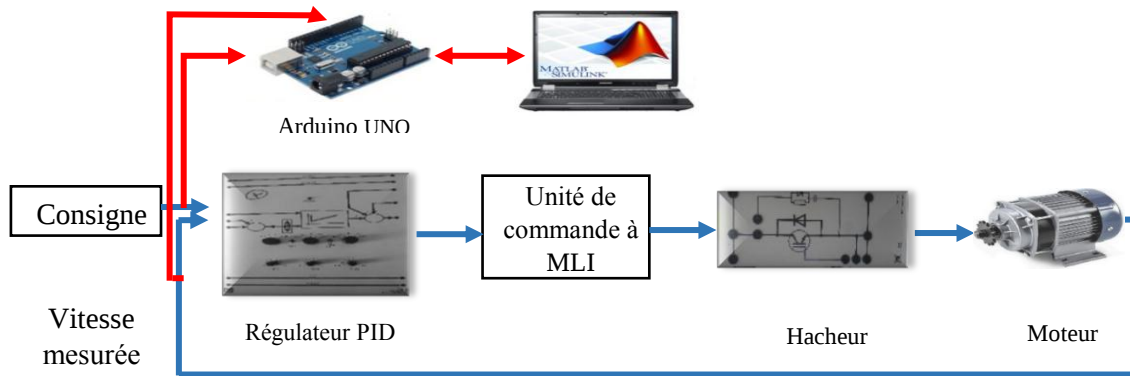


Signal MLI avec rapport cyclique ( $\alpha = 1$ ).

**Figure 5.15 :** Photo de signaux MLI généré par la carte Arduino après amplification.

### 5.9.3 L'acquisition de signal de la vitesse et de la référence par la carte Arduino :

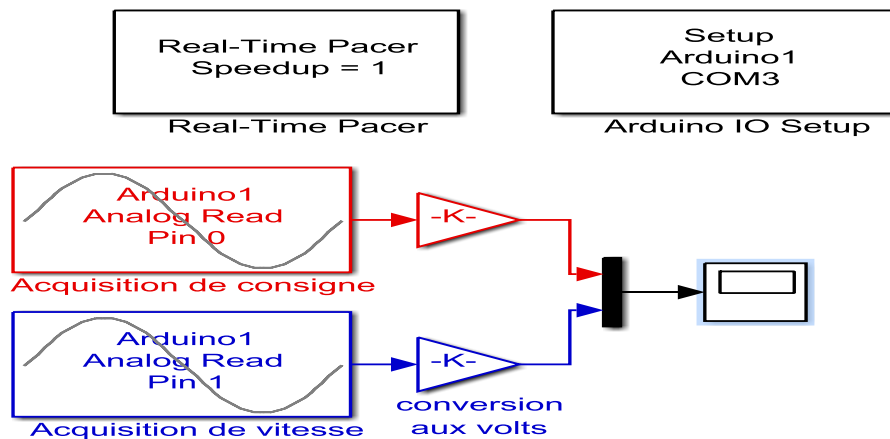
La carte Arduino nous permet d'acquérir le signal de référence et le signal de vitesse afin de les visualiser. le schéma synoptique ci-dessous montre un exemple de visualisation de référence et de vitesse après l'implémentation de commande PID :



**Figure 5.16:** Schéma synoptique de l'acquisition de signal de référence et de vitesse par la carte Arduino.

#### 5.9.3.1 Modèle Simulink :

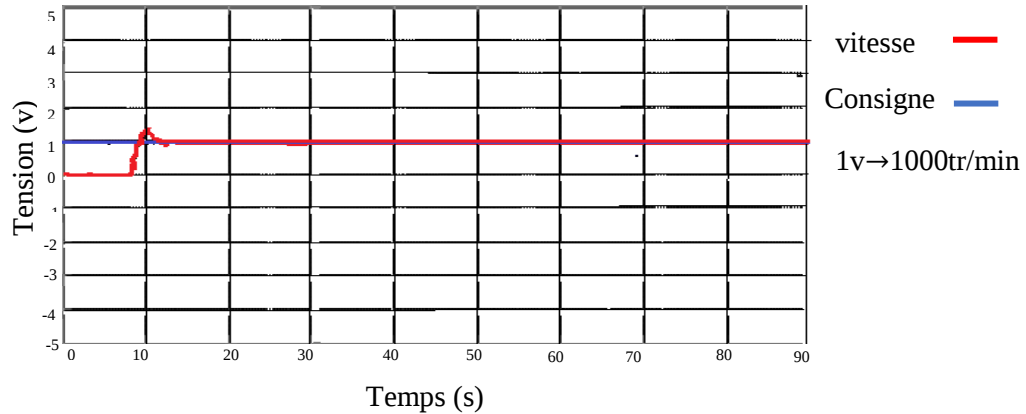
La figure (5.17) montre le schéma de Simulink utilisé pour visualisation de référence et de vitesse. Comme il est présenté dans de la figure, la vitesse mesurée est acquiert à partir le pin 1 de la carte Arduino, D'autre part, la tension de consigne est acquiert par le pin 5 de la carte Arduino.



**Figure 5.17:** Schéma bloc de l'acquisition de signaux par la carte Arduino.

### 5.9.3.2 Visualisation par Simulink /scope :

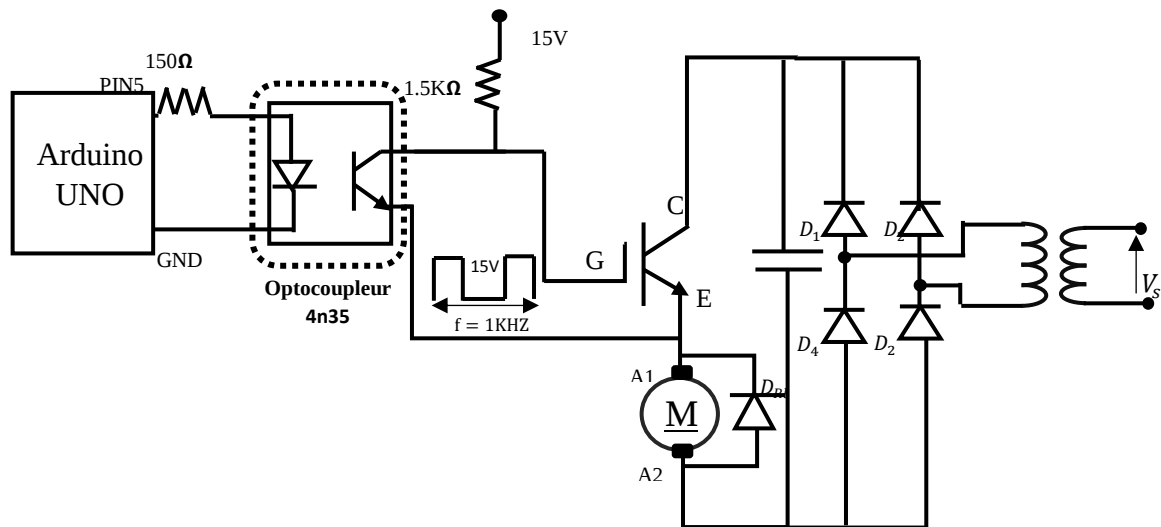
La figure (5.18) montre un exemple d'acquisition de signal de vitesse et de référence visualisé par Simulink/Scope:



**Figure 5.18 :** Signal de vitesse et de référence (avec régulateur PID classique).

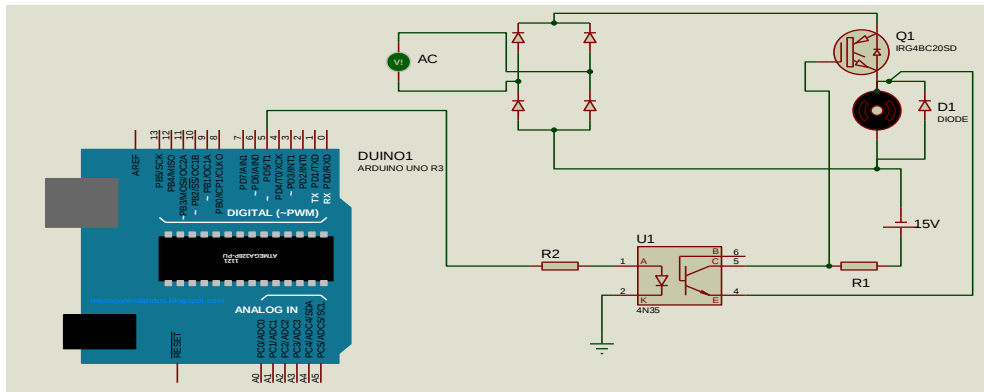
#### 5.9.4 Commande MLI d'un moteur à courant continu :

Voilà le schéma électrique du montage complet de la commande MLI du MCC par la carte Arduino Uno :



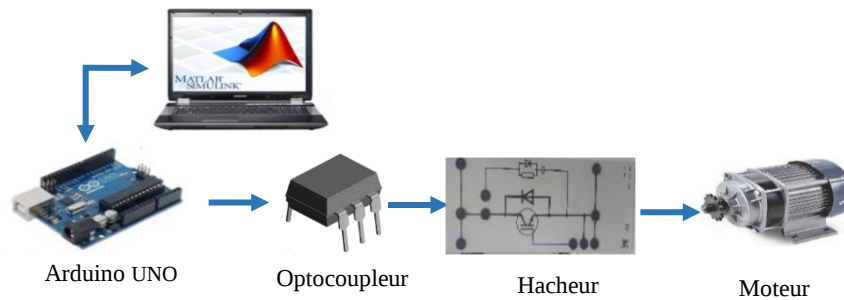
**Figure 5.19 : Schéma électrique du montage complet.**

Le circuit électronique dans la figure (5.20) permet de contrôler un moteur à courant continue à partir des sorties MLI de la carte Arduino.



**Figure 5.20:** Le circuit électronique de branchement de la carte Arduino UNO avec MCC.

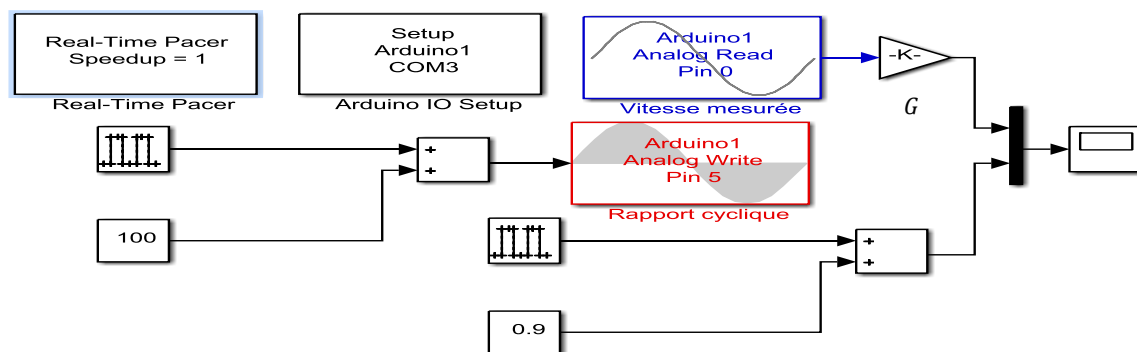
Le schéma synoptique (figure 5.21) traduit la boucle de commande du moteur par la carte Arduino.



**Figure 5.21:** Schéma synoptique de commande MLI d'un moteur à courant continu.

#### 5.9.4.1 Modèle Simulink :

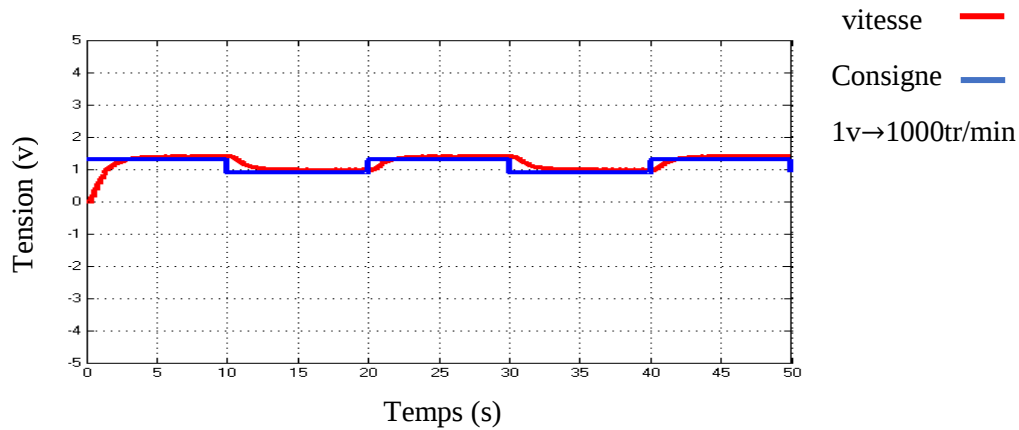
La figure (5.22) montre le schéma de Simulink utilisé pour commander le convertisseur Buck afin de commande le moteur à courant continu en boucle ouverte, comme il est présenté dans de la figure, la vitesse mesurée est acquiert par le pin 0 de la carte Arduino. D'autre part, le rapport cyclique généré est transformé en un signale MLI à partir du pin 5 de la carte Arduino.



**Figure 5.22:** Schéma bloc de commande du moteur en boucle ouverte.

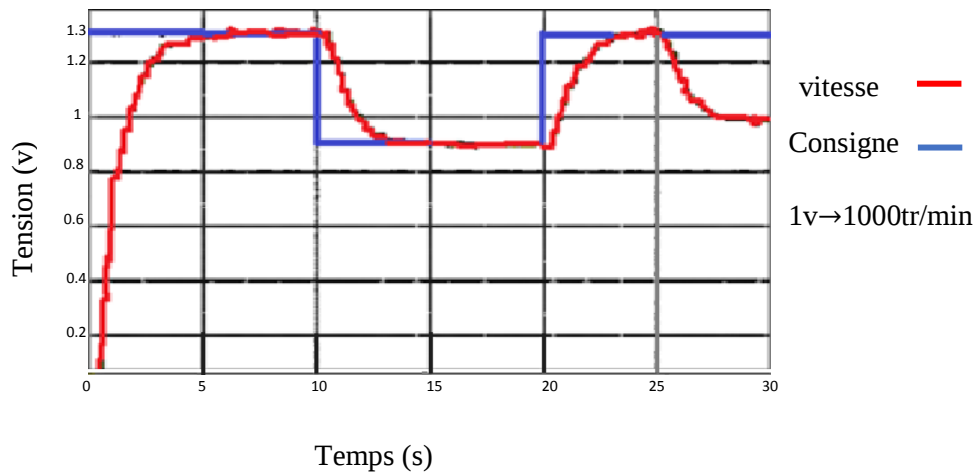
#### 5.9.4.2 Résultats pratiques visualisé par scope/Simulink :

Dans un premier temps, nous avons soumis notre système à un test à vide pour un rapport cyclique variable entre 1 et 0.8. (Figure 5.23)



**Figure 5.23:** Signal de vitesse à vide par la commande MLI du MCC en B.O.

A l'instant  $t=25$  sec, on a appliqué une charge (couple résistant), la figure ci-dessous montre la réponse du système :



**Figure 5.24 :** Signal de vitesse \_Démarrage par commande MLI à vide puis application d'une charge (0.4 N.m).

#### 5.9.4.3 Interprétation des résultats :

D'après les résultats des tests de la commande du moteur en boucle ouverte, on remarque clairement qu'on peut varier la vitesse en variant le rapport cyclique qui se transforme en un

signale MLI à partir de la carte Arduino. La variation de la vitesse suit la variation du rapport cyclique comme il est montré dans la figure (5.23).

Lorsqu'on a appliqué une charge (couple résistant) à 25 sec la vitesse diminue sans la capacité de la ramener à la valeur de consigne (Figure 5.24), ce qui nous a forcés à commander le moteur en boucle fermée en implémentant la régulation PID.

### 5.9.5 La commande du moteur à courant continu en boucle fermée :

#### 5.9.5.1 Implémentation de la commande PID sous Simulink :

La boucle d'asservissement à implémenter sur Simulink se traduit par le schéma suivant :

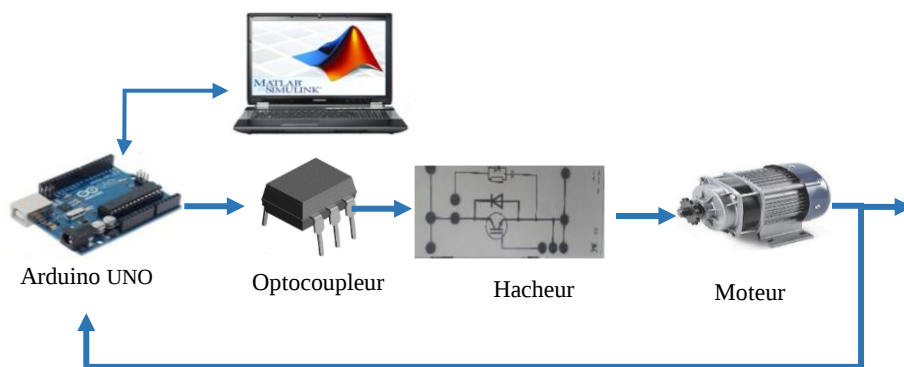


Figure 5.25: Schéma synoptique de la boucle d'asservissement à implémenter.

#### 5.9.5.2 Modèle Simulink :

L'asservissement de notre procédé est assuré par le schéma Simulink ci-dessous qui regroupe la consigne, le comparateur, le correcteur PID, le traitement de la vitesse issue du capteur et l'envoi de la commande MLI. (concernant les gains  $G_1$ ,  $G_2$  et  $G_3$  voir Annexe C)

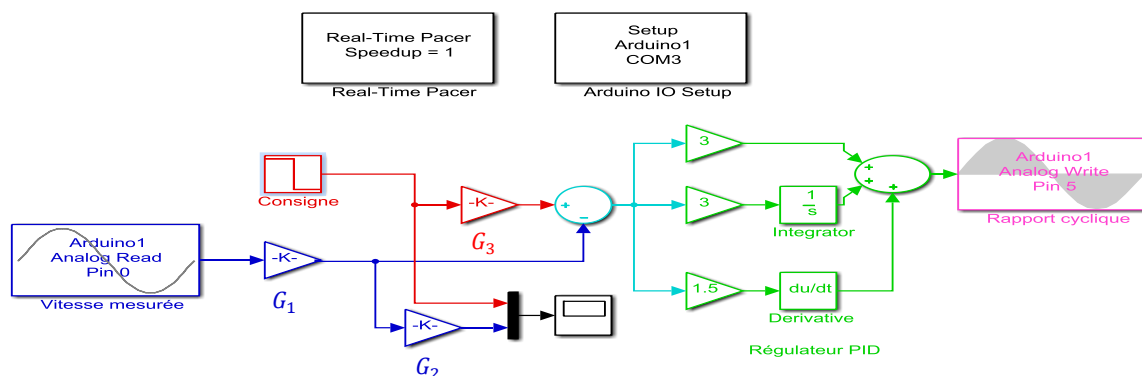


Figure 5.26 : Modèle de la régulation PID implémenté avec Matlab/Simulink.

### 5.9.5.3 Résultats visualisé par Simulink/scope :

Avec la méthode par l'approches successives on a réglé les paramètres du régulateur PID et après plusieurs essais, on a obtenu les paramètres les plus performants ( $k_p = 3$ ,  $k_i = 3$  et  $k_d = 1.5$ ).

Par la suite, on a eu les résultats suivants :

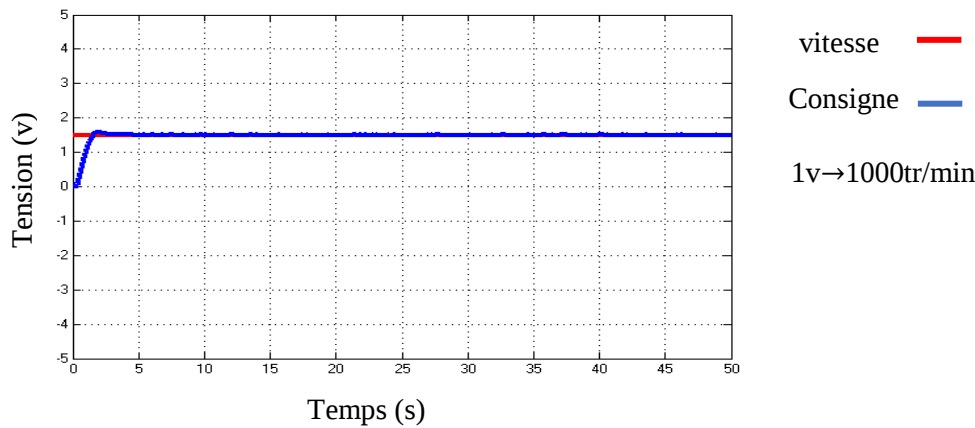


Figure 5.27: Signal de vitesse à vide.

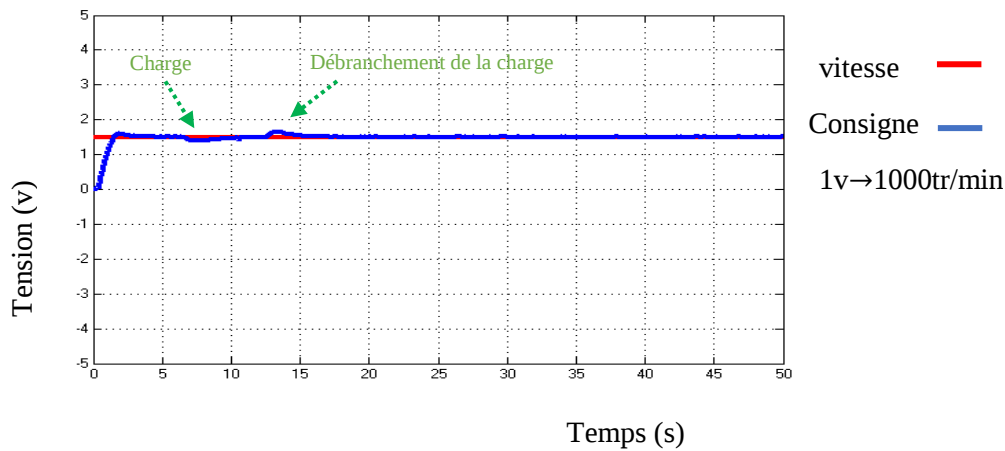


Figure 5.28: Signal de vitesse \_Démarrage à vide puis application d'une charge (0.4N.m) puis débranchement de la charge.

### 5.9.5.4 Interprétation des résultats :

#### 5.9.5.4.1 Démarrage à vide :

Les résultats de tests pratiques montrent l'efficacité du régulateur utilisé dont laquelle la vitesse mesurée est parfaitement superposée sur la valeur de référence. Il est clair que la réponse

de la vitesse présentée dans la figure (5.27) montre que le dépassement est acceptable et le temps de réponse est faible.

#### 5.9.5.4.2 Démarrage à vide puis l'application d'une charge puis la suppression de la charge:

A l'instant 7 sec on a appliqué une charge (couple résistant), la vitesse de rotation du moteur diminue puis elle retourne à sa valeur initiale grâce au régulateur ensuite on a débranché la charge ce qui fait un petit dépassement à l'instant 13 sec (Figure 5.28).

#### 5.9.5.5 consigne de tension variable :

- Afin d'évaluer les performances du système d'entraînement global, nous avons soumis notre système à un test pour une consigne de tension variable.

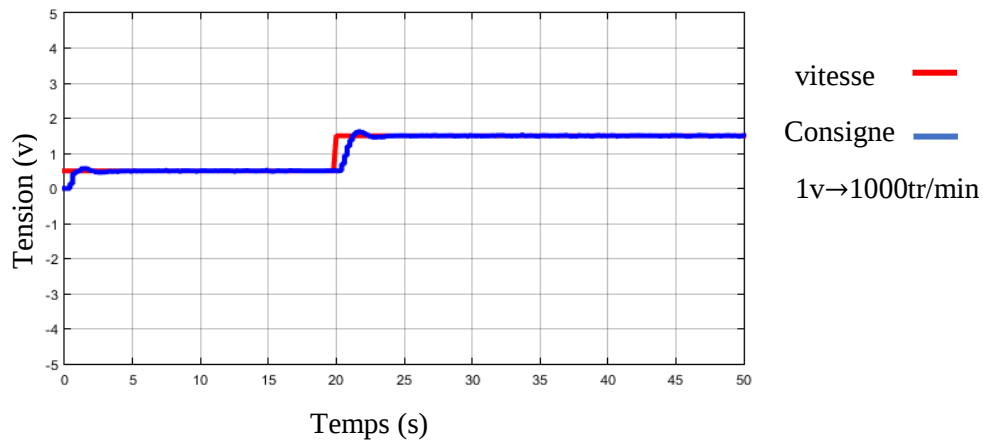


Figure 5.29 : Signal de vitesse à vide.

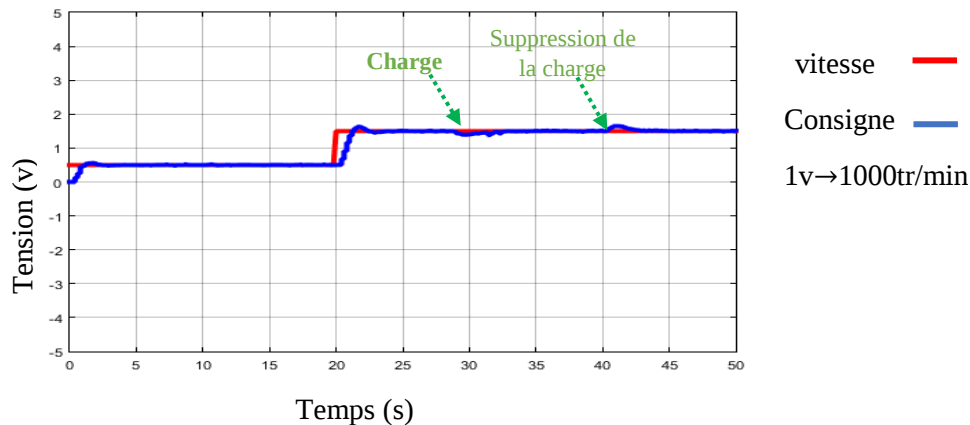


Figure 5.30 : Signal de vitesse \_ Démarrage à vide puis application d'une charge puis débranchement de la charge (0.4N.m).

#### 5.9.5.5.1 Interprétation :

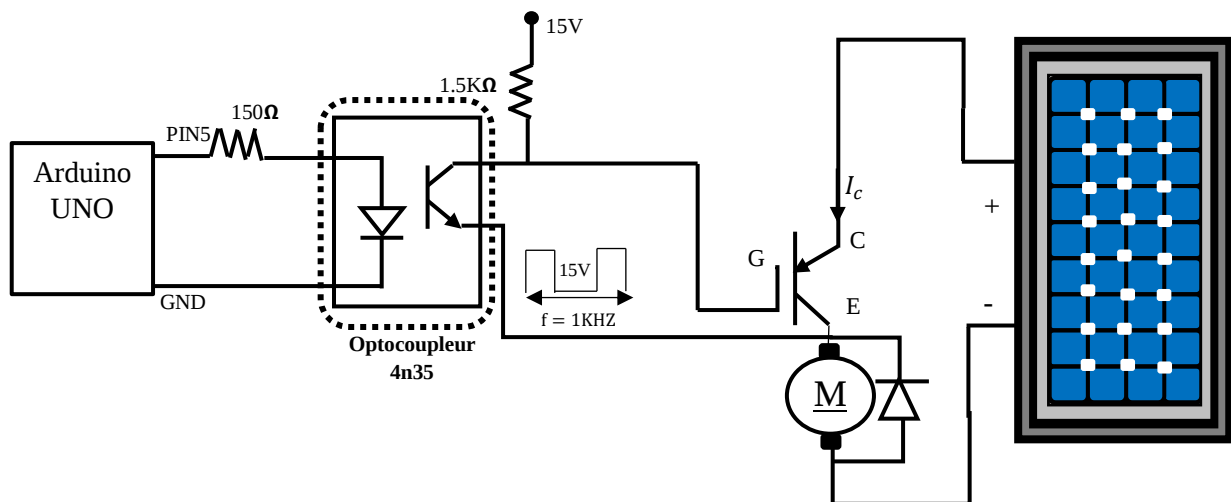
Les résultats de test sont représentés sur les figures (5.29) et (5.30), on voit d'après la figure (5.29), que la vitesse suit parfaitement la consigne et cela est dû bien entendu au bon choix des paramètres du régulateur PID. Tandis que la figure (5.30) représente le signal de vitesse pour un test démarrage à vide puis l'application d'une charge à l'instant 28 sec où on voit clairement une diminution de la vitesse puis un retour à la valeur de consigne et quand on a débranché la charge, on remarque un petit dépassement avant que la vitesse se superpose sur la valeur de consigne. Alors, on peut remarquer que le régulateur PID possède une large capacité de réglage de la vitesse et une bonne réponse aussi bien en régime transitoire qu'en régime permanent.

#### 5.9.6 L'alimentation par les panneaux photovoltaïques :

On a remplacé l'alimentation alternative du réseau qui est redressée et filtrée par l'alimentation continue des panneaux solaires.

##### 5.9.6.1 Schéma électrique du montage complet :

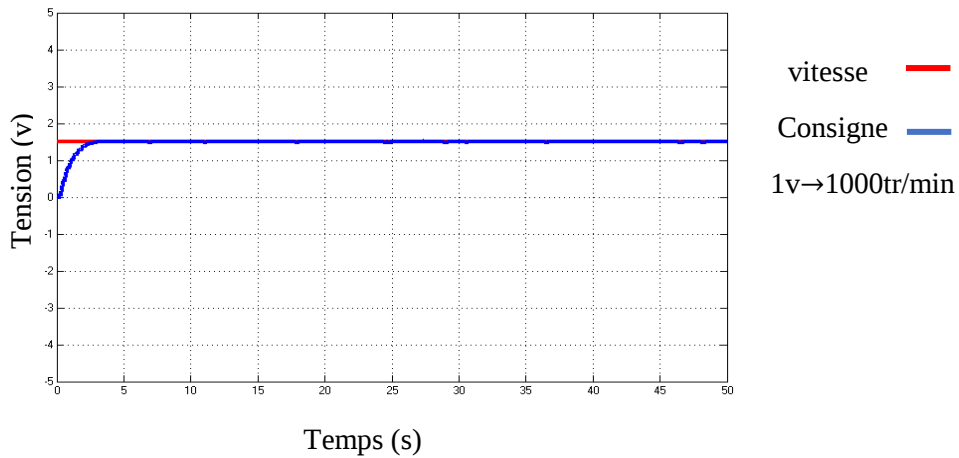
On a éliminé l'étage de redressement (PD2) en le remplaçant par un GPV comme il est montré dans la figure (5.31) :



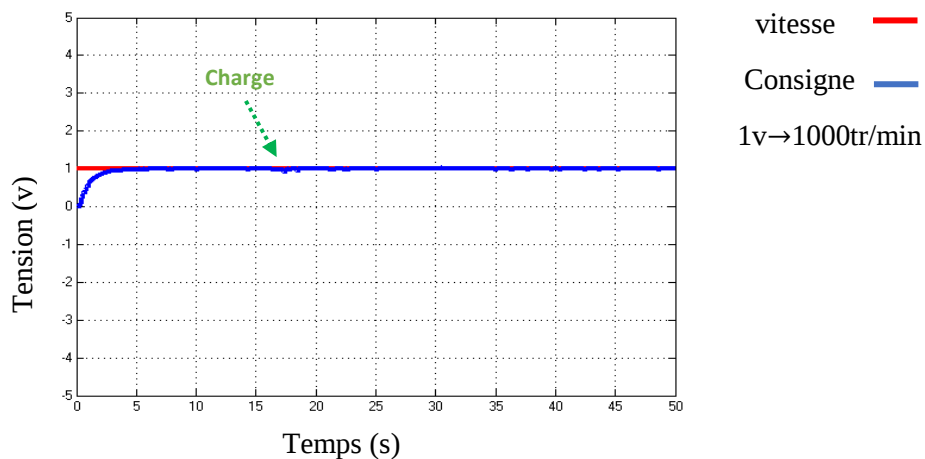
**Figure 5.31:** Schéma électrique du montage complet avec alimentation photovoltaïque

### 5.9.6.2 Résultats pratiques visualisé par Simulink/scope :

Les résultats suivants sont obtenus :



**Figure 5.32 :** Signal de vitesse démarrage à vide.



**Figure 5.33:** Signal de vitesse démarrage à vide puis application d'une charge (0.2N.m).

### 5.9.6.3 Interprétation :

Après avoir remplacé l'alimentation du réseau redressée par l'alimentation continu des panneaux solaires (6) dans une journée ensoleillée, en gardant les mêmes paramètres du PID, les résultats des tests étaient satisfaisants et montrent clairement l'efficacité du régulateur PID via Arduino avec Matlab/Simulink .

**5.10 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons projeté la lumière sur une carte d'acquisition qui est l'Arduino donnant ainsi les raisons pour lesquelles on l'a choisie, puis nous avons cité des différents types de cette dernière. Ensuite, nous avons également expliqué le principe de fonctionnement de la carte Arduino sans oublier ses caractéristiques. Passant à la validation expérimentale, nous avons réalisé un système de commande PID d'un moteur à courant continu par un convertisseur de type Buck (série) avec Matlab via la carte Arduino, en particulier la carte Arduino Uno utilisé dans ce travail. Enfin, nous avons fait des tests pratiques sur le système en l'alimentant avec la tension alternative du réseau redressée et ensuite avec la tension des panneaux solaires qui ont montré l'efficacité de la commande PID dans ce travail. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et encourageants.

## **Conclusion générale**

Dans ce travail, nous avons traité la commande de vitesse d'un moteur à courant continu utilisant un hacheur série à base d'un IGBT alimenté par un GPV en boucle fermée. Les signaux de commande pour le hacheur ont été obtenus par deux méthodes : l'unité de contrôle du laboratoire de l'électronique de puissance à travers un régulateur PID et par une carte Arduino Uno avec son circuit d'interface réalisé. Le montage du régulateur PID a été fait dans Simulink-Matlab ensuite transféré à la carte pour éviter le temps de calcul. La commande de vitesse a été réalisée en utilisant un hacheur série à IGBT et deux alimentations différentes ont été utilisées à savoir: l'alimentation par l'intermédiaire d'un redresseur à pont complet à diodes (PD2), ensuite par un GPV constitué de 6 et 8 panneaux respectivement montés en série.

L'énergie solaire photovoltaïque est un moyen intéressant de réduire les coûts de distribution de l'électricité dans certaines régions. C'est une source d'énergie d'une fiabilité remarquable qui présente un bilan énergétique et environnemental tout à fait favorable. Cette énergie est une technologie utilisant l'énergie du soleil pour fournir l'électricité alimentant des appareils électriques et éclairage. Les systèmes photovoltaïques (*PV*) convertissent directement l'énergie solaire en électricité à partir de modules solaires qui captent les photons pour produire du courant continu. Cette tension continue obtenue va nous servir à commander notre moteur MCC.

Les commandes sont principalement liées à la commande en vitesse et en couple.

Toutefois, la mise en œuvre de ces stratégies de contrôle n'a pu se faire qu'avec l'évolution des composants de puissance. Dans ce mémoire, nous avons proposé une commande en vitesse d'un moteur à courant continu à boucle ouverte au premier lieu ensuite à boucle fermée utilisant un régulateur à base d'un PID. Ses paramètres ont été obtenus par la méthode des essais successifs.

Dans ce cadre, nous avons débité notre partie expérimentale dans ce mémoire par la utilisation d'un seul générateur photovoltaïque de 80W dans le but de relever les caractéristiques courant-tension (*I-V*) et puissance-tension (*P-V*). Ensuite, nous avons monté deux panneaux en série pour voir l'effet sur la tension de sortie  $V_{oc}$ , par la suite deux panneaux en parallèle pour visualiser l'augmentation du courant  $I_{sc}$ . Les résultats obtenus pratiquement sont non seulement satisfaisants mais valident bien ceux de la théorie.

La deuxième partie concerne la commande de vitesse de notre moteur à courant continu qu'elle est l'objectif principale dans ce mémoire.

Nous avons pratiquement varié la vitesse du moteur en boucle ouverte en variant le rapport cyclique qui nous fournit la tension variable de aux bornes du moteur. Ensuite, on a appliqué une charge (couple résistant) et on a bien remarqué la diminution de vitesse sans retour à sa valeur initiale ce qui nous a obligé d'implémenter une commande en boucle fermée à base d'un PID. On a réalisé cette commande par un régulateur PID classique au sein de notre laboratoire .D'après plusieurs tests et en alimentant une fois par la tension du réseau redressée (PD2) et filtrée et autre fois par un GPV constitué de six panneaux en série et huit panneaux respectivement. Les résultats obtenus de la manipulation pratique sont très satisfaisants et viennent approuver ce choix .Enfin, nous avons réalisé un circuit de commande du moteur à courant continu par une carte Arduino Uno qui assure l'aspect numérique de la commande soit en boucle ouverte soit avec régulateur PID, Nous avons montré d'après les résultats des tests pratiques que le régulateur PID est indispensable afin de contrôler notre système convenable.

En perspective, nous souhaitons la continuité de ce travail utilisant d'autres régulateurs robustes à savoir : régulateur à logique floue, réseau de neurones et une comparaison sera faite avec le régulateur conventionnel PID.

## Bibliographies

- [1] Wave Energy. [http://europa.eu.int/comm/energy\\_transport/atlas/htmlu/wavint.html](http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/wavint.html)
- [2] ANNE LABOURET et MICHEL VELLOZ, "*Energie solaire Photovoltaïque*" 3eme edition dunod paris 2006.
- [3] Wave Dragon – a large offshore wave energy converter. <http://www.wavedragon.net/>
- [4] Ocean Power Delivery Limited. <http://www.oceanpd.com/>
- [5] Archimedes Waveswing AWS II. <http://www.waveswing.com/>
- [6] SATIE. Les Projets de Recherche. [http://www.satie.ens-cachan.fr/php/projdeta.php?id\\_proj=48](http://www.satie.ens-cachan.fr/php/projdeta.php?id_proj=48)
- [7] Energie Solaire .Jacques Bernard. Ellipses edition, 2004.
- [8] Ecole Centrale de Nantes. <http://www.ec-nantes.fr/>
- [9] [www.elec.jbd.free.fr](http://www.elec.jbd.free.fr), « Machine électromagnétique », Chapitre 13.
- [10] Luc Lasne, Notions de base et machine électrique, Dunod, Paris, 2005.
- [11] Principales and Elements of Power Electronics –Barry W. Williams, 2006.
- [12] MODELISATION MOTEUR A COURANT CONTINU <http://electronique71.com/wp-content/uploads/2016/02/modelisation-moteur-a-courant-continu-1.pdf>
- [13] Fabrice DESCHAMP, « Cours BAC S SI – Convertir L'énergie – Machine à Courant Continu » Sciences de L'ingénieur, LYCEE JACQUES PREVERT.
- [14] FRANCOIS BERNOT " Machine à courant continu constitution et fonctionnement ,Technique de l'ingénieur 11-1996 D3- II- génie électrique, machine électrique ,[www.technique.ingenierie.fr](http://www.technique.ingenierie.fr) D3 555 pp 2-16.
- [15] Amine AYAD, « Etude et réalisation d'une commande MLI pilotant un hacheur série », Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2014.
- [16] Power Electronics Circuit Devices And Applications, Muhammad H.Rashid- Prentice-Hall 2004.
- [17] Projet de fin d'étude 2012, 'Conception d'un hacheur Buck 200W, 24-12V Université François Rabelais, Tours.
- [18] M.L.LOUAZENE, « Cours d'électroniques de puissance », université d'Ouargla, 2011.
- [19] BOUICHE Hachemi, BRAHAMI Mohamed «Commande PID d'un moteur électrique à courant continu», Mini Projet, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2010
- [20] Bapio BAYALA « Machines à courant continu», Edition Ellipse, 2010
- [21] Prof. Mohammed-Karim FELLAH «Cours d'Asservissements Linéaires Continus», Université Djillali Liabès – Sidi Bel-Abbès, 2007

- [22] TIR Zoheir « Modélisation et Simulation de la Machine à Courant Continu », Mémoire Magister en électrotechnique, 2008
- [23] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Regulateur\\_PID](https://fr.wikipedia.org/wiki/Regulateur_PID)
- [24] CHELLY Nizar et CHARED Amine, « Commande d'un système thermique à l'aide de la carte Arduino UNO », FORMATION ARDUINO↔MATLAB/SIMULINK, Hammamet, 3/4 Mai 2014
- [25] KRAMA Abdelbasset et GOUGUI Abdelmoumen, « Etude et réalisation d'une carte de contrôle par Arduino via le système Androïde », Mémoire de Master, université d'Ouargla, 2015.
- [26] GUENAOUA LILIA « Commande en position du a MCC par Arduino »,Mémoire MASTER en génie électrique, ANNABA UNIVERSITY,2017
- [27] Dominique, Guillaume, Jean-Luc\_ Le 12 novembre 2014\_Les entrées sorties de l'Arduino\_Locoduino\_
- [28] <https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/l-optocoupleur-principe-de-fonctionnement>

## Annexe A :

### A.1 Géométrie terre-soleil :

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint  $1391000 \text{ km}$ . Il est situé à une distance moyenne de  $149598000 \text{ km}$  de la Terre. Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est siège de réactions de fusion nucléaire permanente et sa température de cœur atteint  $10^7 \text{ K}$  [1].

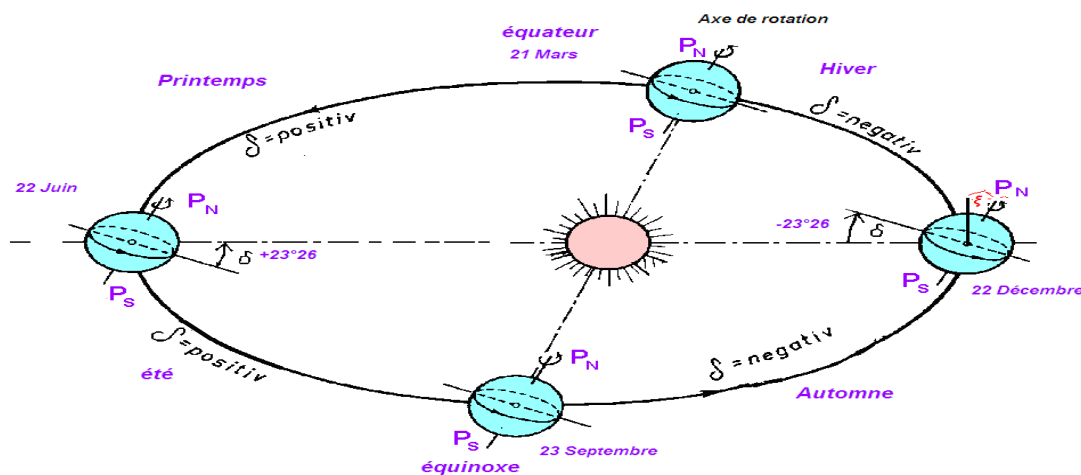


Figure A.1 : Trajectoire de la terre autour du soleil.

### A.2 Mouvement de la terre :

La terre décrit autour du Soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le Soleil occupe un foyer. En fait la distance qui les sépare varie de  $\pm 1.69\%$  au cours de l'année due à la légère excentricité de l'orbite terrestre ( $e = 0.017$ ).

L'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de  $23.27^\circ$  par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). On appelle déclinaison  $\alpha$  l'angle formé par l'axe Terre-Soleil avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. La déclinaison vaut donc  $+23.27^\circ$  au solstice d'été  $-23.27^\circ$  au solstice d'hiver, et est nulle aux équinoxes. Cette déclinaison est responsable des saisons car dans l'hémisphère Nord, les rayons nous parviennent avec un angle plus élevé en été, plus bas sur l'horizon en hiver (c'est le contraire dans l'hémisphère Sud). Elle explique aussi que les différences saisonnières soient plus marquées vers les hautes latitudes [1].

On sait également que l'activité solaire n'est pas constante et subit des éruptions solaires, mais leurs conséquences ne dépassent pas 4% de variation d'intensité du rayonnement émis.

### A.3 Le spectre solaire :

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueur d'ondes ou « couleurs ». La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad 1.1$$

Où  $h$  est la constante de Planck.

$\nu$ : La fréquence.

$c$ : La vitesse de la lumière.

$\lambda$ : La longueur d'onde.

C'est cette relation, mise à jour par Louis de Broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules -les photons- et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde.

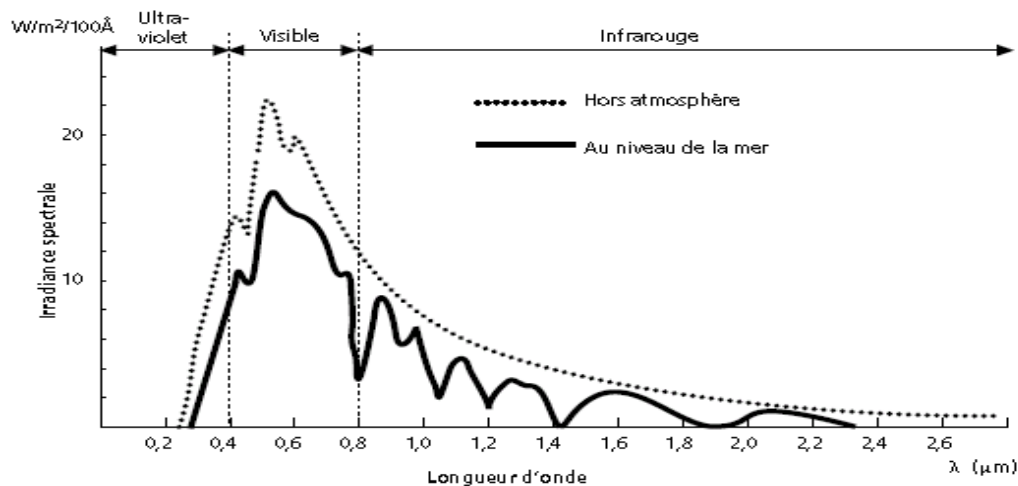
Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de.

**AM0.** Sa distribution en énergie est répartie comme suit [1] :

|                       |                               |       |
|-----------------------|-------------------------------|-------|
| <i>Ultraviolet UV</i> | $0.20 < \lambda < 0.38 \mu m$ | 06.4% |
| <i>Visible</i>        | $0.38 < \lambda < 0.78 \mu m$ | 48.0% |
| <i>Infrarouge IR</i>  | $0.78 < \lambda < 10 \mu m$   | 45.6% |

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré ( $kW/m^2$ ), à plus ou moins 3 %, selon que la Terre s'éloigne ou se rapproche du Soleil dans sa rotation autour de celui-ci [2].

L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement  $1,2kW/m^2$  ( $1200W/m^2$ ). La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [2].



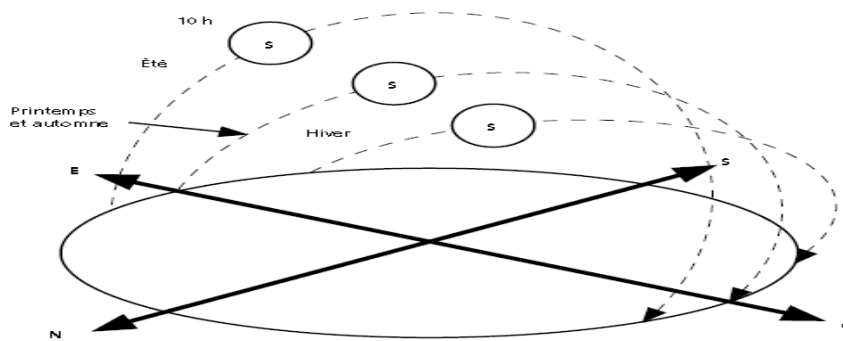
**Figure A.2 :** Analyse spectrale du rayonnement solaire.

L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose donc un problème bien particulier. En effet, le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible ; en outre, on ne peut l'emmagasiner ni le transporter.

Le concepteur d'un système qui emploie le rayonnement solaire comme source d'énergie doit donc déterminer la quantité d'énergie solaire disponible à l'endroit visé et le moment où cette énergie est disponible. Il faut d'abord comprendre l'effet de la rotation (moment de la journée) et de l'inclinaison (saison de l'année) de la Terre sur le rayonnement solaire.

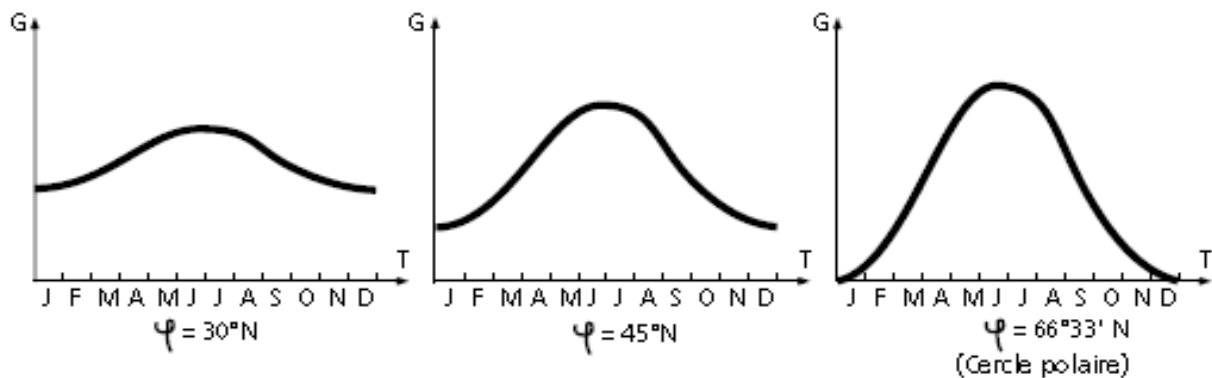
L'absorption atmosphérique est plus faible lorsque le Soleil se trouve à son point le plus haut dans le ciel, c'est-à-dire plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud. En effet, la distance que doit parcourir le rayonnement dans l'atmosphère est plus courte lorsque le Soleil est directement au-dessus de l'endroit visé. C'est le « midi solaire », moment où le rayonnement solaire direct est le plus intense. Comme le Soleil est plus haut et que les journées sont plus longues en été, la quantité totale d'énergie reçue sur un plan horizontal y est plus grande qu'en hiver [2].

La figure (Figure. A.3) illustre ce phénomène, en reproduisant la trajectoire du soleil dans le ciel au cours des quatre saisons de l'année.

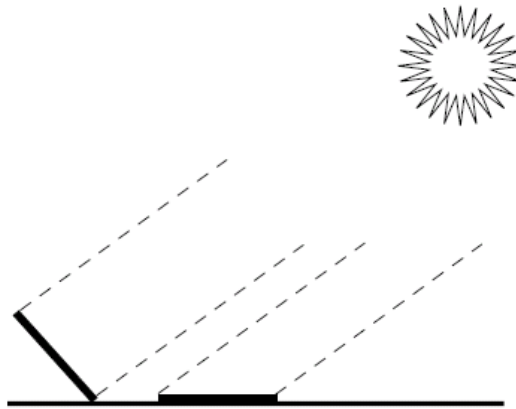


**Figure.A.3 :** Trajectoire du Soleil selon les saisons pour une latitude *nord*

Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes La latitude a aussi un effet important : les journées estivales allongent à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, et le Soleil est plus bas au midi solaire. Les journées d'hiver sont également plus courtes, et le Soleil encore plus bas qu'à l'équateur. Autrement dit, l'intensité maximale (à midi) et la quantité totale de rayonnement solaire ( $G$ ) sur un plan horizontal diminuent à mesure qu'augmente la latitude (FigureA.4) [2].



**Figure. A.4 :** Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes.



**Figure A.5:** Un plan incliné capte plus de rayonnement qu'un plan

Inversement, le rayonnement atteint son intensité maximale lorsque le plan est perpendiculaire aux rayons du Soleil, donc l'intensité du rayonnement solaire sur un plan quelconque augmente quand on l'incline vers le Soleil (Figure A.5).

On maximise par conséquent la quantité d'énergie solaire directe captée quand on change constamment l'inclinaison du plan pour le maintenir à angle droit avec les rayons du Soleil. Si le plan est fixe, la quantité d'énergie reçue sera moindre, car les rayons du Soleil le frapperont de biais la majorité du temps [2].

#### A.4 Rôle de l'atmosphère :

Cette énergie lumineuse dite « extraterrestre » c'est-à-dire hors atmosphère a été évaluée avec précision par la NASA et vaut  $1367 \text{ W/m}^2$ . Il s'agit de l'irradiante reçue. Ou rayonnement solaire instantané. À un instant donné au-dessus de l'atmosphère terrestre, en incidence normale (c'est-à-dire sur un plan perpendiculaire à la direction du soleil). On appelle cette valeur « constante » solaire, mais elle ne l'est pas tout à fait à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil.

Cette énergie qui descend en ligne droite vers notre planète ne peut pas nous parvenir sur la Terre en intégralité car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère : par absorption et par diffusion [1].

En effet, l'atmosphère contient, on le sait, une majorité d'azote et d'oxygène (respectivement 78 et 21%), mais aussi de l'argon, du  $\text{CO}_2$ , de la vapeur d'eau et la fameuse couche d'ozone de la stratosphère, dont le rôle de filtrage des UV les plus dure est si important.

Les poussières et les nuages (formés de minuscules gouttelettes d'eau, à ne pas confondre avec la vapeur d'eau, qui elle est un gaz) ont aussi leur importance dans la diffusion du rayonnement solaire.

## **Annexe B :**

### **B.1 Les programme de relever les caractéristiques de panneau de 80W qui désigné à l'aide de logiciel MATLAB :**

#### **a- Un seul panneau de 80W :**

##### **Programme de courant-tension (I-V) :**

```
>>i=[0 0.092 0.096 0.1 0.12 0.13 0.15 0.17 0.22 0.3 0.4 0.5 0.7 1 1.3 1.5 1.8 2 2.5 3 3.3 3.6 4 4.5] ;
```

```
>>v=[19.5 19.14 19.13 19.13 19.12 19.11 19.10 19.08 19.03 18.98 18.97 18.92 18.78 18.5 18.32 18.21 17.86 17.76 17.17 16.63 16.28 15.74 13.83 0];
```

```
>> plot(v,i);grid
```

##### **Programme puissance-tension (P-V) :**

```
>>P=[0 1.76088 1.83648 1.93 2.9244 2.4843 2.865 3.2436 4.1866 5.694 7.588 9.46 13.146 18.5 23.816 27.315 32.148 35.52 42.925 49.89 53.724 56.664 55.32 0];
```

```
>>v=[19.5 19.14 19.13 19.13 19.12 19.11 19.10 19.08 19.03 18.98 18.97 18.92 18.78 18.5 18.32 18.21 17.86 17.76 17.17 16.63 16.28 15.74 13.83 0];
```

```
>> plot(v,P);grid
```

#### **b- deux panneaux de 80W en series :**

##### **Programme courant-tension (I-V) :**

```
>>v=[0 14.53 19.06 23.9 25.14 27.34 30 30.9 31.58 32.14 33.05 33.42 33.98 34.4 34.97 35.5 35.79 35.83 36.12 36.42 36.6 36.88 37.06 37.17 37.27 37.38 37.44 37.5 37.5 37.58 37.64 37.67 37.67 37.72 37.75 37.79 37.83 37.84 37.88 37.91 37.97 37.96 38.84];
```

```
>> i=[4.6 4.5 4.45 4.4 4.3 4.25 4.2 4.1 4 3.83 3.5 3.34 3 2.85 2.55 2.2 2 2 1.7 1.5 1.3 1.1 0.98 0.88 0.8 0.7 0.65 0.6 0.57 0.52 0.48 0.43 0.4 0.37 0.34 0.32 0.29 0.26 0.22 0.2 0.17 0.167 0];
```

```
>>plot(v,i);grid
```

**Programme puissance-tension (P-V) :**

```
>>P=[0 65.3850 84.817 105.16 108.102 116.1950 126 126.69 126.3200 123.0962 115.6750  
111.6228 101.9400 98.0400 89.1735 78.1000 71.5800 71.6600 61.4040 54.6300 47.5800  
40.5680 36.3188 32.7096 29.8160 26.1660 24.3360 22.5000 21.3750 19.5416 18.0672  
16.1981 15.0680 13.9564 12.8350 12.0928 10.9707 9.8384 8.3336 7.5820 6.4549 6.3393  
0];
```

```
>> v=[0 14.53 19.06 23.9 25.14 27.34 30 30.9 31.58 32.14 33.05 33.42 33.98 34.4 34.97 35.5  
35.79 35.83 36.12 36.42 36.6 36.88 37.06 37.17 37.27 37.38 37.44 37.5 37.5 37.58 37.64  
37.67 37.67 37.72 37.75 37.79 37.83 37.84 37.88 37.91 37.97 37.96 38.84];
```

```
>>plot(v,P);grid
```

**c -deux panneaux de 80W en parallèles :****Programme courant-tension (I-V) :**

```
>> v=[19.14 19 19 19 19 18.75 18.68 18.5 18.28 18 17 16.6 15.8 15.4 13.8 10 0];
```

```
>> i=[0 0.09 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.5 1 1.6 2.25 4.5 5.5 6.5 7.72 9.33 10 10.25];
```

```
>> plot(v,i);grid
```

**Programme puissance-tension (P-V) :**

```
>>P=[0 1.71 1.9 2.85 3.8 4.75 5.625 9.34 18.5 29.2480 40.5 76.5 91.3 102.7 118.888  
128.754 100 0];
```

```
>> v=[19.14 19 19 19 19 18.75 18.68 18.5 18.28 18 17 16.6 15.8 15.4 13.8 10 0];
```

```
>>plot(v,P);grid
```

## **Annexe C :**

### **C.1 Les gammes de la carte Arduino :**

Actuellement, il existe plus de 20 versions de module Arduino, nous citons quelques un afin d'éclaircir l'évaluation de ce produit scientifique et académique :

- Le NG d'Arduino, avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un ATmega8.
- L'extrémité d'Arduino, avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un Microcontrôleur ATmega8.
- L'Arduino Mini, une version miniature de l'Arduino en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Nano, une petite carte programme à l'aide porte USB cette version utilisant un microcontrôleur ATmega168 (ATmega328 pour une plus nouvelle version).
- Le LilyPad Arduino, une conception de minimaliste pour l'application wearable en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- Le NG d'Arduino plus, avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un ATmega168.
- L'Arduino Bluetooth, avec une interface de Bluetooth pour programmer en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Diecimila, avec une interface d'USB et utilise un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Duemilanove ("2009"), en utilisant un microcontrôleur l'ATmega168 (ATmega328 pour une plus nouvelle version) et actionné par l'intermédiaire de la puissance d'USB/DC.
- L'Arduino Méga, en utilisant un microcontrôleur ATmega1280 pour I/O additionnel et mémoire.
- L'Arduino UNO, utilisations microcontrôleur ATmega328.
- L'Arduino Mega2560, utilisations un microcontrôleur ATmega2560, et possède toute la mémoire à 256 KBS. Elle incorpore également le nouvel ATmega8U2 (ATmega16U2 dans le jeu de puces d'USB de révision 3).
- L'Arduino Leonardo, avec un morceau ATmega32U4 qui élimine le besoin de raccordement d'USB et peut être employé comme clavier.
- L'Arduino Esplora : ressemblant à un contrôleur visuel de jeu, avec un manche et des sondes intégrées pour le bruit, la lumière, la température, et l'accélération [26].

## C.2 Les entrées sorties de l'Arduino :

Le nombre d'entrées-sorties est variable selon les cartes Arduino. Toutefois leurs principes de fonctionnement se retrouvent quasiment à l'identique. On se veut une présentation générale des entrées-sorties et de leur usage.

### Remarque :

Quel que soit la broche de l'Arduino, on ne peut y brancher une tension supérieure à la tension d'alimentation, c'est à dire 5V ou 3,3V selon le modèle, ni une tension inférieure à la masse, le 0V, sous peine de destruction d'au moins la broche concernée si ce n'est l'Arduino en entier. Quelques Arduino 3,3V, ou assimilés comme le Teensy, acceptent une tension jusqu'à 5V.

### C.2.1 Les entrées-sorties numériques :

Quasiment toutes les broches d'une Arduino peuvent être programmées en entrée ou sortie numérique (et non les deux en même temps). Par exemple, sur l'Arduino Uno, il s'agit d'une part des broches numérotées de 0 à 13 mais également des broches A0 à A5. Une broche programmée ainsi peut être :

- une entrée : Le programme peut lire une tension présente sur cette broche en utilisant `digitalRead(...)`. Comme cette tension est interprétée comme un chiffre binaire (0 ou 1), la datasheet du MCU de l'Arduino Uno garantit que toute tension inférieure à  $0,3 \times V_{cc}$ ,  $V_{cc}$  étant égale à 5V, soit 1,5V sera comprise comme un 0 et que toute tension supérieure à  $0,6 \times V_{cc}$ , soit 3V, sera comprise comme un 1. Entre les deux, c'est flou. `digitalRead(...)` renverra de toute façon un 0 ou un 1 mais de manière plus ou moins aléatoire et variable selon l'Arduino utilisé.

- une sortie : Le programme peut écrire un chiffre binaire, au moyen de `digitalWrite(...)`, chiffre qui dans le programme sont nommées HIGH pour le 1 et LOW pour le 0, qui sera traduit en une tension de 5V pour le 1 et de 0V pour le 0. Attention toutefois, cette tension peut respectivement être plus basse ou plus haute si le courant qui est tiré de la broche commence à être important.

### C.2.2 Les entrées analogiques :

Les Arduino sont pourvus de 6, pour le Uno, à 16 entrées analogiques, pour le Mega. Ce sont les broches étiquetées A suivie d'un nombre. Les tensions, toujours entre 0 et 5V, présentes sur ces broches, peuvent être numérisées via un convertisseur analogique-numérique ou ADC (Analog Digital Converter). La fonction `analogRead(...)` remplit ce rôle.

### C.2.3 La ligne série :

Les 2 broches étiquetées TX et RX sont respectivement la ligne d'émission série (T pour Transmit, émettre) et la ligne de réception série (R pour receive, recevoir). Cette ligne est

principalement employée pour dialoguer avec l'ordinateur hôte, votre Mac ou votre PC. Des fonctions permettent d'afficher des messages dans une fenêtre de l'ordinateur hôte et de lire le clavier de l'ordinateur hôte.

Elle est également employée pour dialoguer avec certains modules comme les modules radio XBee ou certains modules WiFi ou encore Bluetooth.

#### **C.2.4 Le bus I2C :**

L'I2C est l'un des bus de communication disponibles pour dialoguer soit avec un autre Arduino soit avec des circuits périphériques disposant de ce bus. 2 broches sont employées pour l'I2C, l'horloge et l'adresse/donnée. De nombreux circuits périphériques disposent d'une interface I2C. On peut citer les expenseurs d'entrées/sorties, circuits qui permettent d'ajouter des entrées/sorties numériques à l'Arduino et les générateurs de PWM qui permettent donc d'augmenter le nombre de PWM pilotables.

#### **C.2.5 Le bus SPI :**

Enfin, le SPI est également un bus de communication destiné à dialoguer avec les circuits périphériques. À la différence de l'I2C, il est bidirectionnel. Il permet aussi un débit de communication plus important. 4 broches sont employées pour le SPI, l'horloge, les données en sortie, les données en entrée et la sélection du circuit avec lequel l'Arduino veut dialoguer. Il faudra autant de broches de sélection que de circuit branché sur le SPI.

#### **C.2.6 Les broches d'alimentation :**

Elles ne font pas partie des entrées/sorties mais les voici pour que la visite soit complète :

- IOREF : Cette broche est destinée à indiquer aux shields la tension de fonctionnement de l'Arduino. Sur un Arduino 5V, elle aura une tension de 5V et sur un 3,3V une tension de 3,3V
- RESET : Cette broche permet de réinitialiser l'Arduino et donc de redémarrer le programme au début. Pour réinitialiser l'Arduino, il suffit de mettre cette broche à 0V puis de la repasser à 5V, ou 3,3V selon l'Arduino.
- 3.3V : Un Arduino Uno est équipé d'un régulateur 3,3V dont la sortie est connectée à cette broche. On peut s'en servir pour alimenter un circuit externe en 3,3V.
- 5V : L'Arduino, s'il fonctionne sous une tension de 5V, est équipé d'un régulateur 5V. La sortie de ce régulateur est connectée sur cette broche qui peut donc être employée pour alimenter des circuits externes en 5V. Si on désire construire sa propre alimentation 5V, on peut également fournir cette tension à l'Arduino via cette broche.
- GND : La masse ou 0V
- Vin : L'entrée du régulateur embarqué sur l'Arduino. On peut choisir d'alimenter l'Arduino via cette broche au lieu d'utiliser la prise d'alimentation. [27]

### **C.3 Avantages de la carte Arduino :**

Il y a de nombreuses cartes électroniques qui possèdent des plateformes basées sur des microcontrôleurs disponibles pour l'électronique programmée. Tous ces outils prennent en charge les détails compliqués de la programmation et les intègrent dans une présentation facile à utiliser.

De la même façon, le système Arduino simplifie la façon de travailler avec les microcontrôleurs tout en offrant à personnes intéressées plusieurs avantages cités comme suit:

- **Prix (réduits) :** les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses comparativement aux autres plates-formes.

- **Multi plateforme :** le logiciel Arduino, écrit en JAVA, tourne sous les systèmes d'exploitation Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.

- **Environnement de programmation clair et simple :** l'environnement de programmation Arduino (le logiciel Arduino IDE) est facile à utiliser pour les débutants, tout en étant assez flexible pour que les utilisateurs avancés puissent en tirer profit également.

- **Logiciel Open Source et extensible :** le logiciel Arduino et le langage Arduino sont publiés sous licence open source, disponible pour être complété par des programmeurs expérimentés. Le logiciel de programmation des modules Arduino est une application JAVA multi plateformes (fonctionnant sur tout système d'exploitation), servant d'éditeur de code et de compilateur, et qui peut transférer le programme au travers de la liaison série (RS232, Bluetooth ou USB selon le module).

- **Matériel extensible :** les cartes Arduino sont basées sur les microcontrôleurs Atmel ATMEGA8, ATMEGA168, ATMEGA 328, les schémas des modules sont publiés sous une licence créative Commons, et les concepteurs des circuits expérimentés peuvent réaliser leur propre version des cartes Arduino, en les complétant et en les améliorant. Même les utilisateurs relativement inexpérimentés peuvent fabriquer la version sur plaque d'essai de la carte Arduino, dont le but est de comprendre comment elle fonctionne pour économiser le coût. **[26]**

Parmi ces types, nous avons choisi une carte Arduino UNO (carte Basique). L'intérêt principal de cette carte est de faciliter la mise en œuvre d'une telle commande qui sera détaillée par la suite.

#### **C.4 Explication des gains de la figure 5.26 :**

$$G_1=255/1023$$

$$G_2=5/255$$

$$G_3=255/5$$

Ces gains servent à convertir aux volts les signaux générés par les pins de la carte Arduino ou convertir les signaux en volt pour que cette valeur soit comprise par la carte, c le cas avec gain 2 ; le signal de vitesse mesurée est converti par le gain pour qu'on puisse le visualiser.

La consigne a été fixé à 1v pour que cette valeur soit comprise par l'arduino , il faut la multiplier par le gain 3

#### **Annexe D :**

##### **D.1 ArduinoIO :**

Cette solution consiste à utiliser la carte Arduino comme une interface d'entrées(Analog Input)/sorties(Analog/Digital Output).Ce package permet de communiquer Matlab ou Simulink avec la carte Arduino via un câble USB.

Elle consiste à pré-charger un programme dans la carte Arduino afin que celle-ci fonctionne en serveur.

Ce programme consiste à "écouter" les requêtes envoyées via la liaison série (USB) et de répondre à ces requêtes en renvoyant l'état d'une entrée ou en modifiant l'état d'une sortie. Ces mêmes entrées/sortie sont vues dans matlab comme des entrées logiques ou analogiques (utilisation du CAN) ou des sorties analogiques (mode PWM).

##### **D.2 Pré-chargement du programme dans la carte Arduino**

1. Télécharger le package ArduinoIO
2. Décompresser à la racine de votre disque dur, exemple E :\arduinoio
3. Ouvrir le dossier décompressé.
4. Aller vers : "ArduinoIO\pde\adiosrv" \*
5. Charger le fichier adiosrv.pde vers le logiciel Arduino.
6. Televerser !

\* adiosrv est l'abréviation de : Analog and Digital Input and Output Server for MATLAB.

La carte Arduino UNO est maintenant configuré pour être utiliser comme une carte d'interface Entrées/Sorties.

### D.3 Installation du package ArduinoIO

1. Lancer Matlab2013 et placer vous dans le répertoire E :\arduinoio
2. Exécuter la commande : install-arduino
3. Fermer et relancer Matlab puis Simulink
4. Dans les bibliothèques se trouvent maintenant les blocs dans Arduino IO library.

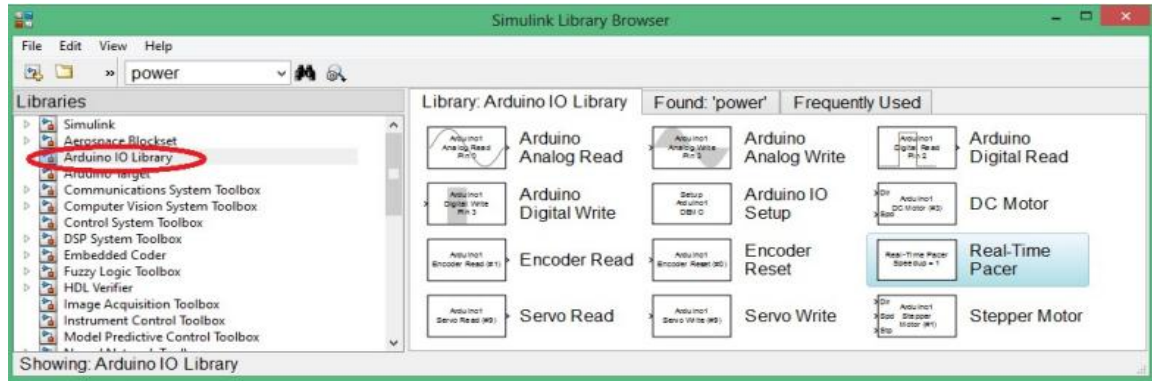


Figure 6 – ArduinoIO Library

### D.4 Exploitation de la bibliothèque ArduinoIO sous Simulink :

Les blocs nécessaires pour notre objectif d'asservissement sont les suivants :



Figure 7 – Les Blocs d'ArduinoIO nécessaires pour la commande

**Real-Time Pacer** : Ce bloc permet de ralentir le temps de simulation de sorte qu'il synchronise avec le temps réel écoulé. Le coefficient de ralentissement est contrôlable par l'intermédiaire du paramètre Speedup.

– **Arduino IO Setup** : Pour configurer sur quel port la carte Arduino UNO est connectée. Pour cela il suffit de voir dans Gestionnaire des périphériques. Voir Figure 4.

– **Arduino Analog Read** : Pour configurer à partir de quel pin [0,1,2,3,4,5] on va acquérir les données du capteur.

– **Arduino Analog Write** : Pour configurer à partir de quel pin [3,5,6,9,10,11] on va envoyer la commande en PWM vers l'actionneur.

## D.5 Exploitation du package ArduinoIO sous Matlab :

Le package ArduinoIO offre une panoplie de commandes permettant d'écrire un programme sous Matlab (M-file). Pour accéder à ces commandes il faut créer un objet arduino dans l'espace de travail et spécifier le port sur lequel la carte arduino est connectée avec la commande :

```
>> a = arduino('port');
```

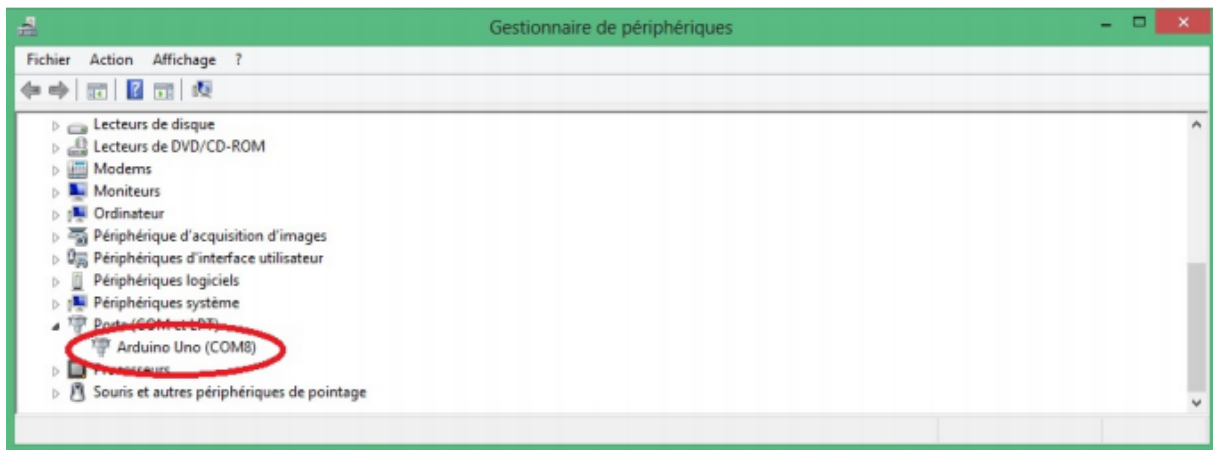


Figure 8 – Emplacement COM de la carte Arduino UNO

Parmi les commandes qui sont accessibles on retrouve :

– pinMode

Exemple : `a.pinMode(11,'output')` // configurer la pin 11 comme sortie.

– digitalRead

Exemple : `val=a.digitalRead(4)` ; // lecture de l'état de la pin 4

– digitalWrite

Exemple : `a.digitalWrite(13,0)` ; // mettre la pin 13 à l'état bas 0V

– analogRead

Exemple : `val=a.analogRead(0)` ; // lecture de la pin 0 de l'ADC

– analogWrite

Exemple : `a.analogWrite(3,10)` ; // envoyer sur la pin 10 un signal MLI de rapport cyclique

10/255

## *Symbole*

|                       |                                                                                       |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| PV                    | Photovoltaïque                                                                        |
| GPV                   | Générateur Photovoltaïque                                                             |
| STC                   | Les conditions d'essai standard                                                       |
| FF                    | Facteur de forme (filling factor)                                                     |
| f.é.m.                | Force électromotrice                                                                  |
| SC                    | Méthode de court-circuit                                                              |
| OC                    | Méthode de circuit ouvert                                                             |
| $C$ ( m/s)            | La vitesse de la lumière                                                              |
| $\lambda$ (m )        | La longueur d'onde                                                                    |
| $R_s$ ( $\Omega$ )    | Résistance série                                                                      |
| $R_{sh}$ ( $\Omega$ ) | Résistance shunte                                                                     |
| $I_{ph}$              | est le photo-courant de la source de courant.                                         |
| $I_o$                 | est la saturation du courant d'obscurité ou la diode de courant inverse de saturation |
| $K$                   | la constante de Boltzmann, $1,38 * 10^{-23}$ j / K.                                   |
| $h$                   | la constante de Planck, $6,626 * 10^{-34}$ j.s                                        |
| $q$                   | la charge d'un électron, le $1,6 * 10^{-19}$ j / v, C ou As,                          |
| $T$                   | la température de travail de la cellule en degrés Kelvin, K.                          |
| $I_{sc}$              | le courant de court-circuit                                                           |
| $C_{em}$              | Couple électromagnétique (N.m).                                                       |
| $k$                   | Constante du moteur.                                                                  |
| $p$                   | Nombre de paires de pôles.                                                            |
| $a$                   | Nombre de paires de voies d'enroulement.                                              |
| $\Phi$                | Flux créé par un pôle inducteur, en webers (Wb).                                      |
| $I$                   | Intensité du courant dans chaque conducteur de l'induit, en ampères (A).              |
| $N$                   | Le nombre de conducteurs (ou de brins-deux par spires).                               |
| $E$                   | f.e.m. (volts - V).                                                                   |
| $\Omega$              | Vitesse de rotation du rotor (rad.s <sup>-1</sup> ).                                  |
| $U(t)$                | La tension d'induit (v).                                                              |
| $R$                   | Résistance d'induit (Ohm).                                                            |
| $L$                   | Inductance d'induit (Henri-H).                                                        |
| $e(t)$                | f.é.m. (volts-v).                                                                     |
| $J$                   | Moment d'inertie (kg.m <sup>2</sup> ).                                                |
| $C_u$                 | Couple utile (N.m).                                                                   |

|          |                                                                                 |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $C_r$    | Couple résistant (N.m).                                                         |
| $C_p$    | Couple de pertes (dû aux pertes ferromagnétiques et les pertes mécanique)(N.m). |
| $f$      | Coefficient de frottement visqueux (m.N.rad <sup>-1</sup> .s).                  |
| $P_u$    | Puissance utile.                                                                |
| $P_{ém}$ | Puissance électromagnétique.                                                    |
| $P_{JS}$ | Pertes par effet joule dans l'inducteur.                                        |
| $P_{JR}$ | Pertes par effet joule dans l'induit.                                           |
| $P_c$    | Pertes fer + pertes mécaniques : dites pertes constantes.                       |
| $P_a$    | Puissance absorbée.                                                             |
| $K_p$    | Un gain proportionnel.                                                          |
| $T_i$    | Un gain intégral. Constante de temps d'intégration.                             |
| $T_d$    | Un gain dérivé. Appelée " constante de temps de dérivation ".                   |
| PID      | Régulateur.                                                                     |
| P        | Action proportionnelle, I : Action intégrale, D :Action dérivée .               |
| MLI      | modulation de largeur d'impulsion.                                              |

### **Résumé :**

*L'évolution des technologies conduit à utiliser des machines nécessitant des vitesses de rotation précises et variables pour l'entraînement de TGV par exemple.*

*L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation ainsi que leur raccordement direct à une source d'énergie (batteries d'accumulateur, piles, etc.) Malgré leur principal problème qui se pose au niveau de la liaison entre les balais, ou «charbons» et le collecteur rotatif, le moteur à courant continu continue d'exister à travers de nombreuses applications.*

*L'alimentation du moteur peut être également effectuée par l'énergie solaire qui est notre cas.*

*Concernant la commande de vitesse du moteur elle peut être réalisée à boucle ouverte ou à boucle fermée. Les deux boucles ont été faites pratiquement en utilisant le régulateur PID qui se trouve dans notre laboratoire ainsi que par la carte arduino uno.*

*La partie électronique de puissance, nous avons utilisé un hacheur série à base d'IGBT et sa commande par une unité de contrôle de fréquence. Deux alimentations différentes ont été réalisées :*

- Celle du réseau qui est redressée par un convertisseur biphasé (PD2), ensuite filtrée*
- Alimentation directe par l'énergie photovoltaïque utilisant des panneaux solaires.*

*La validation expérimentale de la variation de vitesse en boucle ouverte puis la réalisation de la commande de vitesse par le régulateur PID, ont été effectués et les résultats obtenus sont très satisfaisants .*

### **Abstract:**

*The evolution of technologies leads to use machines requiring precise and variable speeds for the TGV drive for example.*

*The main advantage of DC machines lies in their easy adaptation to ways to adjust or vary their speed, torque and direction of rotation as well as their direct connection to a power source(accumulator, batteries,etc.) Despite their major problem at the connection between the brushless, or “coal” and the rotary collector, the DC motor continues to exist across many applications.*

*In this work, we present several cases, that it is the experimental validation of speed in open loop then the realization of the speed control by regulator PID. These tests were carried out namely the control of the DC motor by series chopper powered by either:*

- Two-phase converter PD2.*
- powered directly by photovoltaic energy through the chopper.*

*The results obtained in handling make it possible to confirm that it is a robust and promising control no matter is the continuous supply.*