

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes En MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE

Présenté par
Malik BOUKHALFA
Yanis CHABANE

Thème

Utilisation d'un capteur de température et de lumière pour un émulateur photovoltaïque.

Mémoire soutenu publiquement le 11 Octobre 2018 devant le jury composé de :

M^{elle} D. HATEM
Professeur, UMMTO, **Présidente**

M^{elle} R. KACHENOURA
Maître de conférence-B, UMMTO, **Rapporteur**

Mr Y. ATTAF
Maître Assistant-A, UMMTO, **Examineur**

Remerciements

Nous remercions d'abord avant tous, le bon Dieu qui nous a donné le courage, la patience, la santé et la volonté pour venir à bout de ce travail, et qui nous a permis d'acquérir ce savoir et d'enrichir nos connaissances.

Nos remerciements les plus vifs à toutes les personnes ayant pris part de près ou de loin à notre formation, à tous ceux qui nous ont un jour donné un conseil et à tous ceux qui nous ont guidé sur la voie du savoir. Particulièrement, notre promotrice M^{elle} : R. KACHENOURA pour son aide, ses conseils judicieux, sa disponibilité sans faille, son amour de travail, le suivi et l'intérêt qu'elle nous a apportée tout au long de notre travail.

Nous adressons de chaleureux remerciements aux membres de jury Mr : y. Attaf, R. Kachenoura, dj. hatem qui ont aimablement accepté de juger notre travail et de lui accorder l'attention nécessaire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail a ceux qui me pérenne la dignité, l'honneur et la joie de ma vie mes très chers Farid et Anis et je dis merci à leurs soutien, patience et confiance.

A ma chère sœur djazia, mon frère Anis et mon oncle Mokrane et son épouse Wissem, mon oncle Rachid et son épouse, et a toute la famille chaque un par son nom.

A tous les amis Ghiles, Massi, Nassim, Doudan, Yacine, Spoka, Karim, Fatima, selma , à mon binôme Yanis et toute sa famille ainsi qu'à tous les amis qui m'ont aidé de près et de loin.

M.BOUKHALFA

Je dédie ce modeste travail a mes très chers parents Said et Cherifa et je dis merci à leurs soutien, patience et confiance.

A mes frères :Zidane, Rachid, juba.

A tous mes amis Mayas, Mazigh, Ghiles, Massi, Hocine et tous ceux qui m'ont donné leurs aides de prit ou de loin.

Y.CHABANE

A toute la promotion Master II professionnel (2017/2018)

Sommaire

Introduction Générale

Chapitre I Généralités en électronique de puissance

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition d'un cahier des charges en électronique de puissance.....	4
I.3 Méthode de synthèse.....	5
I.4 Les convertisseurs en fonctionnement réel	7
I.4.1 Détail du convertisseur.....	9
I.4.2.Principe d'un convertisseur deux-niveaux.....	11
I.5 Conclusion	12

Chapitre II utilisation d'un capteur photorésistance

Introduction	13
II.1- Objectifs Une photorésistance de type LDR.....	15
II.2- Variation de la résistance d'une photorésistance en fonction de l'éclairement qu'elle reçoit	16
II.3- Le flux lumineux et l'éclairement.....	17
II.4- Questions et exploitation des documents	18
II.5- Etude expérimentale de la résistance R d'une photorésistance en fonction de l'éclairement	18
II.6-Utilisation de la photorésistance avec l'arduino	19
II.7- Acquisition du programme sous matlab sur l'arduino	23
II.8- Etalonnage d'un capteur de lumière : La photorésistance.....	24
II.8.1-la loi d'étalonnage du capteur de lumière	25

II.8.2 Validation expérimental.....	26
9- Conclusion	29

Chapitre III utilisation d'un capteur de température

III.1 Introduction	30
III.2 La thermoélectricité.....	31
III.2.1 La température.....	32
III.2.2 Echelle de température	32
III.3 Le thermocouple.....	34
III.4.-Mesurer une température avec un capteur LM35 et une carte Arduino / Genuino.....	43
III.4.1-Qu'est-ce qu'un capteur LM35.....	44
III.4.2-Mesurer une température avec un capteur LM35	44
III.5-Étalonnage d'un capteur de température lm35	48
III.6-Validation expérimental.....	53
III.7-Conclusion	53

Chapitre IV Modélisation des cellules photovoltaïques

IV.1 – Introduction.....	53
IV.2. Rappels sur la cellule photovoltaïque	53
IV.3. Cellule photovoltaïque	54
IV.3.1. Structure d'une cellule photovoltaïque	54
IV.3. 2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	55
IV.3.3 Les différents types d'une cellule	57

IV.3.4	Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	58
IV.3.5.2	Caractéristique courant-tension et schéma équivalent	61
IV.3.5.3	Le rendement de conversion	65
IV.3.5.4	La puissance délivrée par une cellule photovoltaïque.....	65
IV.4	Paramètres d'un panneau photovoltaïques.....	66
IV.4.1	Courant de court-circuit, I_{CC}	67
IV.4.2	Tension à circuit ouvert, V_{OC}	67
IV.4.3	Point de fonctionnement optimum P_{max} (V_{max} , I_{max})	68
IV.4.4	Facteur de forme FF	68
IV.4.5	Le rendement	68
IV.5	Association des cellules photovoltaïques	69
IV.5.1	Association en série	69
IV.5.2	Association en parallèle	69
IV.6	Modélisation de la cellule photovoltaïque	70
IV.6.1	Modélisation de la cellule photovoltaïque	70
IV.6.2	Modèles mathématique de la cellule PV	71
IV.7	Etudes du modèle à une seule diode (5 paramètres L5P).....	73
IV.7.1	Simulation du modèle choisi(L5P)	74
IV.7.2	Résultat de Simulation	75
IV.9	Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	76
IV.10	Générateur photovoltaïque	77

IV.10 .1 Fonctionnement d'un Générateur PV à sa Puissance Maximale	77
IV.10 .2 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge	79
IV.10 -Conclusion	80
Conclusion générale	81

Références bibliographiques

Annexes

La liste des figures

Figure I.1 : Prototype virtuel « du convertisseur de puissance »	6
Figure I.2 : Système utilisant un convertisseur en milieu industriel	7
Figure I.3 : Représentation généralisé de la cellule de commutation	9
Figure I.4 : Représentation particulière de la cellule de commutation.....	10
Figure I.5 : Synoptique d'une commande d'une cellule de commutation	11
FigureII.1 : une photorésistance.....	13
FigureII.2 : circuit électrique du capteur de lumière	13
FigureII.3 : l'éclairement en fonction de l'intensité	14
FigureII.4 : la résistance de la photorésistance en fonction de l'éclairement	15
FigureII.5 : représentation de la sensibilitéD'une photorésistance en fonctionDe la longueur d'onde du flux	15
Figure II.6 : représentation du comportement de la résistance R En fonction du flux	15
FigureII.7 : les composants d'une photo résistance	16
FigureII.8 :courbe lumière vs résistance	18
FigureII.9 : Le courant Ri en fonction de la lumière	20
FigureII.10 :une photorésistance.....	21
FigureII.11 :Montage pour lire la photorésistance.....	21
FigureII.12 :Circuit de bronchement.....	22
FigureII.13 :zoom sur la photorésistance.....	22
Figure II.14 : Sortie du capteur de lumière $V=F(s)$	26
Figure II.15 : Sortie du capteur de lumière $Lum=F(s)$	27
Figure II.16 : $Lum=F(s)$ sans excitation flash.....	28
Figure II.17 : image représentante du résultat du capteur photorésistance.....	28
Figure III.1 : Courbe de température en fonction de la FEM.....	36
Figure III.2 : Circuite de la mesure par opposition.....	38
Figure III.3 : Circuit de la mesure par opposition	38
Figure III.4 : Divers emplacement d'une hétérogénéité	41
Figure III.5 : Circuit de réalisation	42
Figure III.5.1 : Brochage du capteur LM35.....	43
Figure III.6 : Courbes de précision des différentes versions de LM35	44
Figure III.7 : Matériel nécessaire.....	45

La liste des figures

Figure III.8 : Vu schématique du montage.....	45
Figure III.9 : prototypage de montage.....	46
Figure III.10 : Capture d'écran du moniteur série.....	48
Figure III.11 : fiche technique de capteur LM35	49
Figure III.12 : tension en fonction de la température	50
Figure III.13 : tension en fonction de température	51
Figure III.14 : image représentante des résultats du capteur de température.....	53
Figure IV.1 : Cellule photovoltaïque.....	54
Figure IV.2 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	55
Figure IV.3 La Création de paires électrons/trous	56
Figure IV.4 jonction une barrière de potentiel	56
Figure IV.5 : Modèle de la cellule photovoltaïque idéal	58
Figure IV.6 : Modèle de la cellule photovoltaïque réel	59
Figure IV.7 :Caractéristique (I, V) d'une cellule photovoltaïque.....	61
Figure IV.8 : Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	62
Figure IV.9 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	63
Figure IV.10 : caractéristique $I=f(v)$	66
Figure IV.11 : caractéristique $P=f(v)$	66
Figure IV.12 :Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.....	67
Figure IV.13 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques ..	69
Figure IV.14 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de np cellules identiques	70
Figure IV.15 : Modèles électriques de la cellule PV	70
Figure IV.16 : Schéma équivalent simple d'une cellule photovoltaïque	71
Figure IV.17 : Caractéristique (I, V) d'une cellule PV sous différents éclairagements E_i	72
Figure IV.18 :Schéma équivalent d'un modèle à une diode (L5p) de la cellule	73
Figure IV.19 :Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK.....	74
Figure IV.20 :Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque, L5P.....	75
Figure IV.21 :Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques PV	76
Figure IV.22 :L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I=f(V)$ (a)et $P=f(V)$	77

La liste des figures

Figure IV.23 : L'influence de la température sur les caractéristiques $I=f(V)$ (a) et $P=f(V)$...	77
Figure IV.24 : a) Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge	78
Figure IV.25 : Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P_{MAX} du GPV	79

L'électronique de puissance a pris beaucoup d'importance avec le développement industriel et la diversification ainsi que les exigences techniques de son utilisation. Elle touche tous les domaines où un traitement d'énergie est nécessaire. Les puissances traitées s'étalent de quelques mW jusqu'au GW. Ceci est d'autant plus vrai que tout circuit électronique a besoin d'une alimentation en énergie qui doit être conforme aux conditions et aux restrictions du futur. Ainsi, une utilisation efficace de la puissance est non seulement avantageuse mais aussi indispensable.

L'électronique de puissance est une branche de l'électrotechnique qui évolue extrêmement vite, cela est due principalement aux performances des composants qui ne cessent de s'améliorer, en raison notamment de l'application aux courants forts des procédés de fabrication de la micro-électronique cela nous permet d'avoir des convertisseurs avec de très bons indicateurs des performances, à savoir :

- De très bon rendement ;
- Des volumes les plus réduits possible ;
- Un poids le plus faible possible ;
- Un coût le plus bas possible ;
- Une grande fiabilité.

Cette évolution est aussi une conséquence de l'emploi de la micro-informatique qui permet d'élaborer des commandes de plus en plus sophistiquées.

Un convertisseur est considéré comme une simple fonction de transfert avec une constante de temps imposée par la charge, pour un électrotechnicien le problème est plus complexe à cause des différentes bases de temps qui se côtoient, souvent, on parle de deux bases de temps, liée à la fréquence de la porteuse et à celle de la référence. Les fréquences de la porteuse sont très exigeantes. Si la commande est réalisée par un microcontrôleur, c'est cette fréquence qui doit être prise comme référence de travail.

La carte Arduino est un microcontrôleur qui draine des passions dans différents domaines d'utilisation. Depuis son développement en 2005 à ce jour elle a réussi à s'incruster dans différents milieux en commençant par des utilisations de loisirs jusqu'à atteindre des domaines de recherche.

Pour mener à bien notre travail nous l'avons organisé comme suit :

Après une introduction générale, le premier chapitre introduit succinctement les problèmes liés à la conception en électronique de puissance.

Le deuxième chapitre est consacré à la réalisation d'un capteur de lumière on utilisant comme élément de base une photorésistance, la carte arduino est utiliser comme carte d'acquisition de la tension de référence au borne de ce capteurs, afin d'avoir une information concernant la valeur instantané de la lumière.

Le troisième chapitre quand a lui sera consacré l'acquisition de la température en temps réel.

Dans le quatrième chapitre, nous allons utiliser les informations acquise au niveau du chapitre deux et du troisième pour simule en temps réelle le comportement d'une station photovoltaïque. À l'analyse du l'utilisation des cartes Arduinos avec le logiciel Matlab.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

1.1.Introduction

La puissance de gestion est un aspect essentiel de conception des systèmes dans tous les domaines de l'électrotechnique, c'est le souci principal dans les systèmes de l'électronique de puissance ainsi que dans la production et la distribution de l'énergie. On se concentre dans l'électronique de puissance beaucoup plus sur la conversion, l'efficacité de la conversion, et le contrôle du transfert de l'énergie électrique, qui doit être réalisé par des convertisseurs statiques. L'importance de l'électronique de puissance augmente avec la croissance de la complexité d'utilisation et l'augmentation des équipements électroniques dans la société moderne. Ceci est d'autant plus valable parce que n'importe quel circuit électronique a besoin d'une alimentation d'énergie qui doit être conforme aux conditions et aux restrictions du futur. Ainsi, une utilisation efficace de la puissance est non seulement avantageuse mais aussi essentielle.

Le domaine d'application des convertisseurs de puissance s'étend des alimentations pour des équipements, tel que l'alimentation pour équipement utilisé au niveau des télécommunications où les alimentations d'énergie pour l'électronique grand public (comme les ordinateurs portatifs, les téléphones mobiles, etc...), jusqu'au transport et à la production de l'énergie, surtout les énergies renouvelables. Ce type de source exige des convertisseurs de puissance qui doivent s'adapter à leur nature qu'elle soit de nature électromécanique, électrochimique ou autre, avec la charge, qui est dans de nombreux cas, le réseau de distribution.

1.2. Définition d'un cahier des charges en électronique de puissance [1,2]

La définition rigoureuse d'un cahier de charges est la chose la plus difficile. Cela ne peut être vraiment établi que par approches successives. On aboutit à la notion de projet et de prototype de projet si le produit n'existe pas dans le commerce. Il va sans dire que, si c'est possible, il est toujours préférable de se procurer un convertisseur du commerce et de le modifier, qu'en créer un de toutes pièces. La difficulté essentielle est non seulement la conception d'un prototype, mais aussi de prévoir le fait qu'il doit fonctionner en milieu industriel. En définitive, on s'efforce de définir :

- La puissance apparente mise en jeu dans l'ensemble du système.
- Les tensions nominales prévues pour la source d'alimentation et d'utilisation.
- Les courants nominaux.
- Les composants de puissance normalement prévus pour le convertisseur.
- Les critères aboutissant au choix entre une commande analogique et une commande numérique.
- La procédure normale de mise en route ou l'arrêt d'urgence du système convertisseur associé à une charge.
- Les sécurités de fonctionnement de l'ensemble.
- l'action des divers modes de commande et de contrôle, en particulier le rôle des commandes par ordinateur ou par automate.
- L'importance des harmoniques de courant sur le réseau alternatif : on parle de « pollution » du réseau.
- L'action ou l'influence des signaux parasites : la CEM, la compatibilité électromagnétique de l'ensemble.
- Le coût de l'étude préalable et de la mise au point du prototype.
- Le coût financier de fabrication selon le nombre d'unités produites.
- Le coût d'entretien par unité.

Enfin, et surtout, il faut déterminer :

- S'il est possible d'utiliser un convertisseur déjà existant, et définir alors les réglages, voire les modifications à y apporter.
- S'il est indispensable de concevoir complètement un prototype à 100 %, avec tous les moyens d'étude, de conception (appareils, maquettes, logiciels...) correspondants.
- Si une solution de compromis entre les deux précédentes est envisageable.

1.3.Méthode de synthèse

Paradoxalement, ce qui semble le moins important à priori se révèle être le plus délicat. On pourrait penser que seule compte la puissance commandée et transférée, et le fonctionnement au niveau des signaux de commande. On ne s'intéresserait alors qu'aux composants de puissance et aux drivers qui permettent leur commande en commutation. [1, 2, 3].

Les outils logiciels commerciaux existants sont seulement capables d'exécuter l'analyse, laissant la synthèse entièrement au concepteur. Par exemple, le " prototype virtuel " dans trois domaines temporel de conception est hors de portée du logiciel de Berkeley PSPICE [5], qui est capable d'effectuer des simulations électriques seulement. On peut citer également le logiciel Matlab qui peut effectuer des simulations couplées, toute fois vu les base de temps utilisées en électronique de puissance cela devient impossible. En outre PLECS [4] et PSIM [6] n'exécutent que seulement l'analyse des circuits de conversion de puissance. Si l'on veut effectuer des simulations dans le but d'une réalisation, l'ensemble des éléments constituant le convertisseur (partie puissance, partie commande éloignée, partie commande rapprochée et l'ensemble des capteurs), sa source d'alimentation, le récepteur et l'environnement (problème de compatibilité électromagnétique) doivent être pris en considération, voire figure suivante.

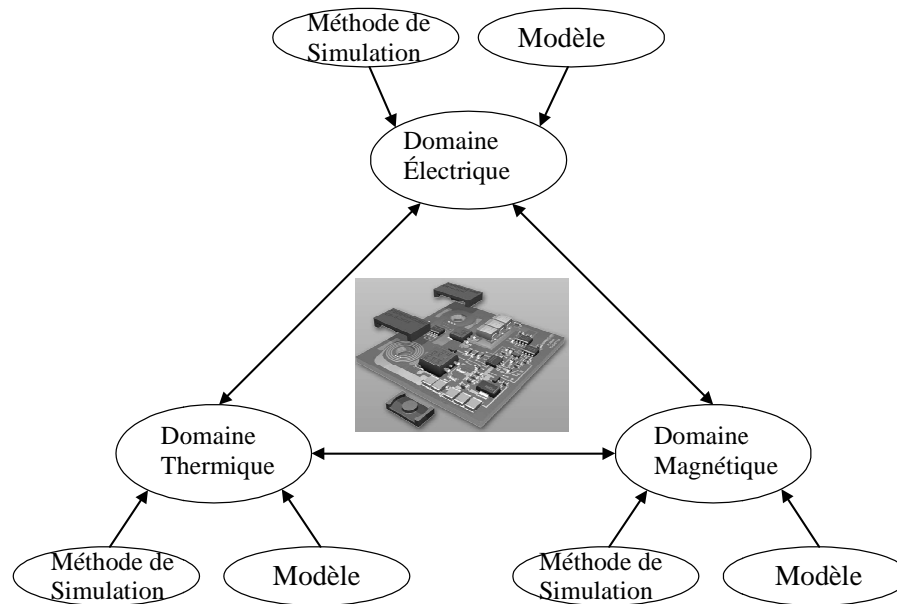


Figure 1.1 : Prototype virtuel « du convertisseur de puissance ».

A travers cette figure nous constatons que la commande éloignée où le microcontrôleur est le cerveau du convertisseur.

1.4. Les convertisseurs en fonctionnement réel

Pour la conception d'un convertisseur dédiée à l'industrie, les contraintes sont encore plus exigeantes, la figure 1.2 schématise l'ensemble des protections rajouter par rapport à l'exemple précédent [3].

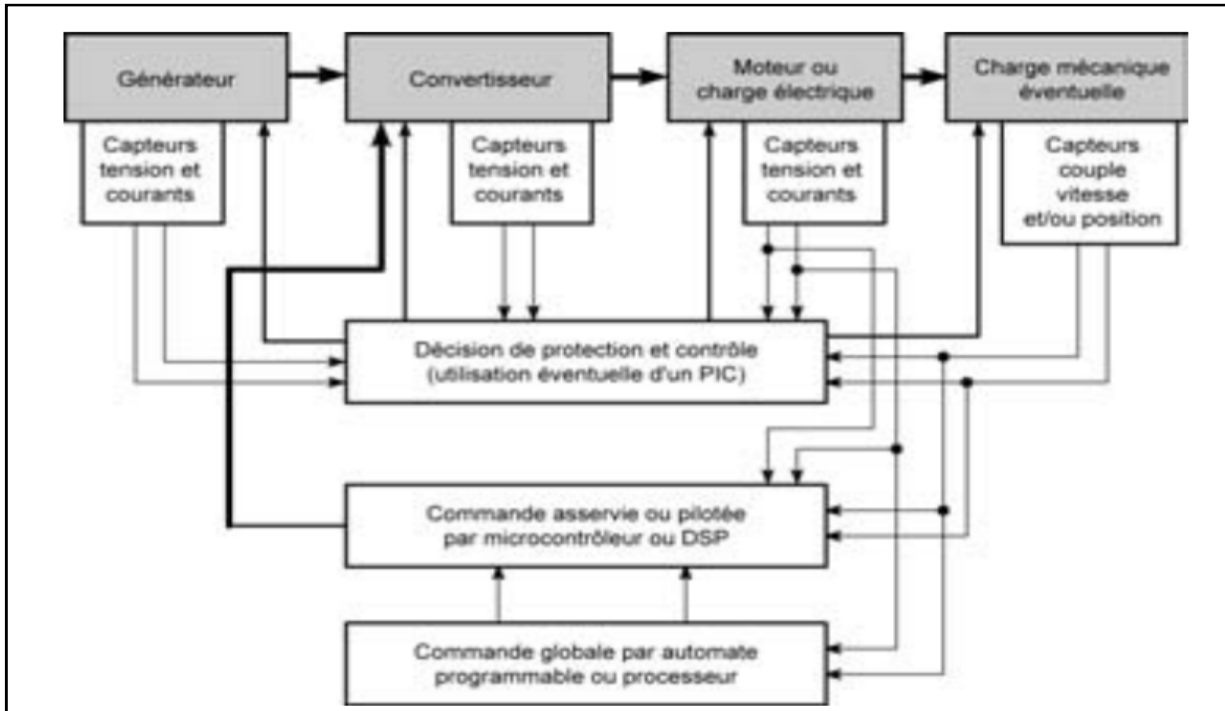


Figure 1.2 : Système utilisant un convertisseur en milieu industriel.

En électronique de puissance, un convertisseur fonctionne toujours en association avec d'autres systèmes électriques et mécaniques. On cherche à faire réaliser au convertisseur une fonction bien précise qui consiste à :

Commandé soit analogiquement, soit numériquement par un processeur ou un automate, fonction qu'il s'agit de définir et de caractériser.

Les « sous-systèmes » d'un ensemble destinés à entraîner une charge mécanique présentent certains risques de défaillance en raison des fragilités dues à leur fonctionnement même.

Un sous-système électrique est fragile :

- Electriquement, dans le cas d'un mauvais isolement des bobinages, ce qui impose un contrôle au moment de la fabrication et lors de vérifications périodiques.
- Electriquement, dans le cas d'un mauvais isolement des câblages, ce qui impose un contrôle au moment de la fabrication et lors de vérifications périodiques. De plus, si l'introduction de l'électronique dans les systèmes de commande et de contrôle des moteurs procure des avantages du point de vue souplesse et finesse de réglage en vitesse ou en position, en contrepartie, les signaux utilisés dans les cartes électroniques sont souvent perturbés par les systèmes qu'ils sont censés commander (auto-parasitage). Parfois les cartes sont soumises à des signaux parasites externes qui vont rendre certaines commandes inopérantes. La compatibilité électromagnétique (CEM) est une approche de l'étude des systèmes qui permet de connaître « leur sensibilité » au parasitage.
- Mécaniquement, sur l'arbre, dans le cas d'un moteur : un dépassement de la limite d'élasticité de l'arbre de transmission provoque une déformation irréversible, qui rend le moteur inutilisable.
- Mécaniquement, dans le cas d'un moteur, sur le châssis et les pièces mobiles du stator (balais) : une commande par hacheur ou par onduleur provoquant une résonance peut être très nocive à long terme.
- Chimiquement dans le cas d'un fonctionnement d'une atmosphère explosible. Un convertisseur de puissance est fragile.
- Thermiquement, ce qui impose une surveillance permanente des pertes dans les composants électroniques et de l'effet Joule des conducteurs.
- Thermiquement, ce qui impose une surveillance permanente de l'effet Joule des conducteurs.

Enfin l'information concernant les grandeurs physiques importantes dans la connaissance d'un système est difficile à établir.

1.4.1. Detaille du convertisseur

En toute rigueur, à quel que soit la conversion qui doit être assurée et la topologie du convertisseur, la cellule de commutation est suffisante pour décrire d'une manière rationnelle le fonctionnement des structures en électronique de puissance. C'est une approche puissante d'analyse permettant de dégager autour d'une commutation, les acteurs principaux. Initialement appliquée à la seule étude du fonctionnement global des convertisseurs, cette approche peut également trouver son application dans une étude de synthèse dans le but de réaliser un convertisseur respectant un cahier de charge bien défini, à condition de bien représenter tout l'environnement des semi-conducteurs. Ainsi, la figure 1.3 est complétée par le rajout de deux inductances parasites à savoir L_s et L_g , comme représenté par la figure 1.4. Notre cellule se compose alors de deux boucles : la maille de puissance et le circuit de grille. Deux inductances couplées sont suffisantes pour se rendre compte de tous les phénomènes [3].

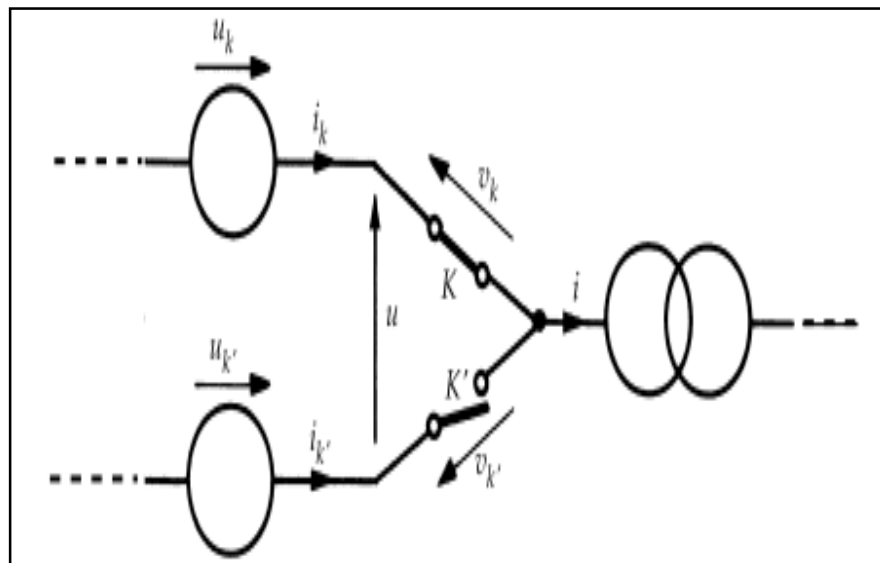


Figure 1.3 : Représentation généralisé de la cellule de commutation.

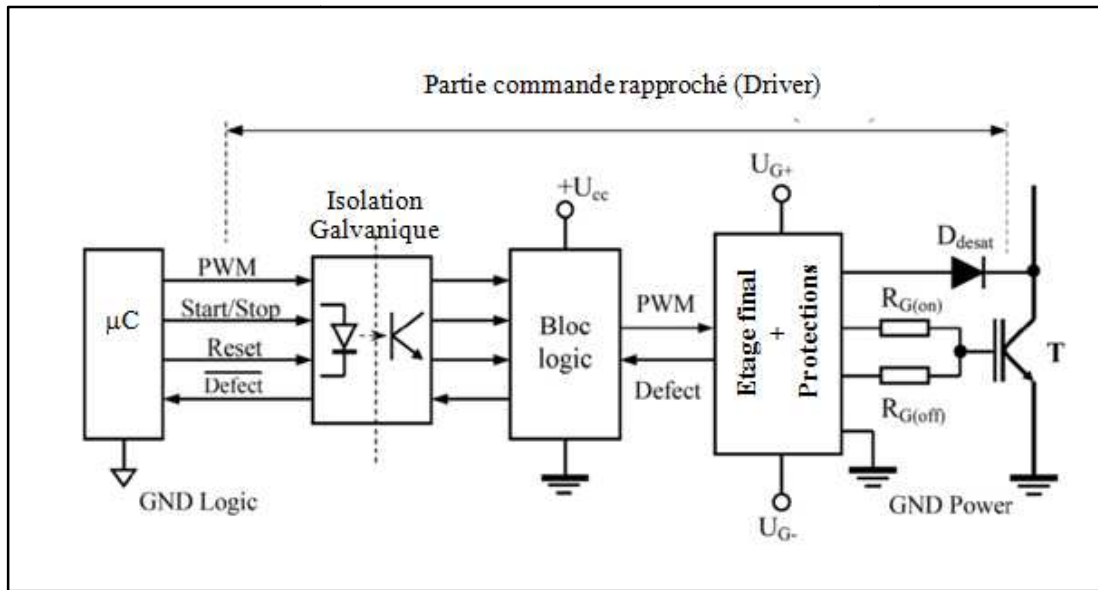


Figure 1.5 : Synoptique d'une commande d'une cellule de commutation [7].

1.4.2. Principe d'un convertisseur deux-niveaux

La majorité des convertisseurs statiques utilisent la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI ou PWM en anglais, pour Pulse Width Modulation). Le principe de fonctionnement consiste à connecter et à déconnecter deux sources de natures différentes, tension et courant, à un rythme rapide de période T_{dec} , afin d'avoir une valeur moyenne de tension ou courant souhaitée. Plus la proportion entre la durée de connexion et de non connexion des deux sources est grande, plus la puissance fournie à la charge sera importante. La phase de connexion est appelée dans ce manuscrit *phase de transfert direct* ou *phase active*, de durée $\alpha \cdot T_{dec}$; la phase de non connexion est appelée *phase de roue libre*, de durée $(1-\alpha)T_{dec}$. Les phases de transfert direct et de **roue libre** caractérisent les deux modes de fonctionnement des convertisseurs statiques. Pour la réalisation d'une telle *cellule* de commutation, nous n'avons besoin que d'interrupteurs fonctionnant en régime saturé/bloqué, imposant une tension quasi-nulle, ou un courant quasi nul. La caractéristique principale des convertisseurs statiques est donc de hacher le courant, côté haute tension, et la tension, côté basse tension.

1.5.Conclusion

Dans ce chapitre, une étude succincte d'une approche à des fins de réalisation d'un système de conversion d'énergie est faite. Une connaissance du matériel à utiliser est primordiale. La partie puissance des convertisseurs statiques est une amplification de leur partie commande, toute erreur provenant de cette dernière sera donc amplifiée, éloignant ainsi le récepteur de sa tâche fondamentale dans le meilleur des cas, ou provoquant des défaillances ou des désagréments allant jusqu'à la destruction de l'ensemble du dispositif.

Dans la suite de ce mémoire nous allons-nous intéresser à cette partie des convertisseurs. Le travail qui nous est confié est l'étude des possibilités d'utilisation des cartes Arduinos pour le contrôle des dispositifs de l'électronique de puissance.

Introduction : [10]

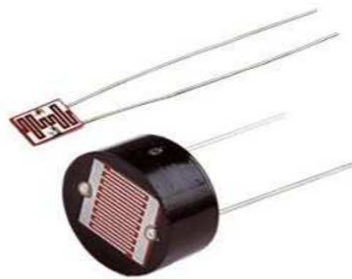
Les dispositifs de détection de rayonnement comportent une surface émettrice qui collecte le rayonnement des particules ou électromagnétique et le concentre en direction d'un qui transforme l'information reçue en une grandeur physique mesurable. A chaque type de détecteur de rayonnement électromagnétique est associée une sensibilité spectrale qui identifie le domaine du spectre électromagnétique sur lequel il sera particulièrement adapté.

Comme son nom l'indique dans la langue de Shakespeare : (**LDR pour Light Dependent Resistor,**)

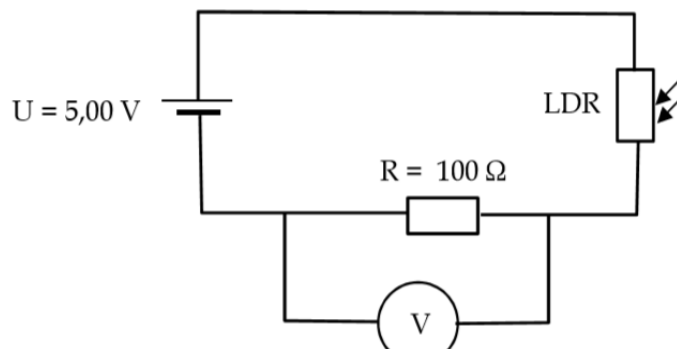
La photorésistance est un dipôle dont la résistance dépend de la lumière qu'il reçoit.

La partie sensible du capteur est une piste de sulfure de cadmium en forme de serpent : l'énergie lumineuse déclenche une augmentation de porteurs libres dans ce matériau, de sorte que sa résistance électrique diminue a priori.

Pour préciser cette dépendance, on réalise le montage électrique suivant. L'éclairement lumineux de la lampe utilisée est estimé à l'aide d'un luxmètre.



Figure(II.1) : une photorésistance



Figure(II.2): Circuit électrique du capteur de lumière.

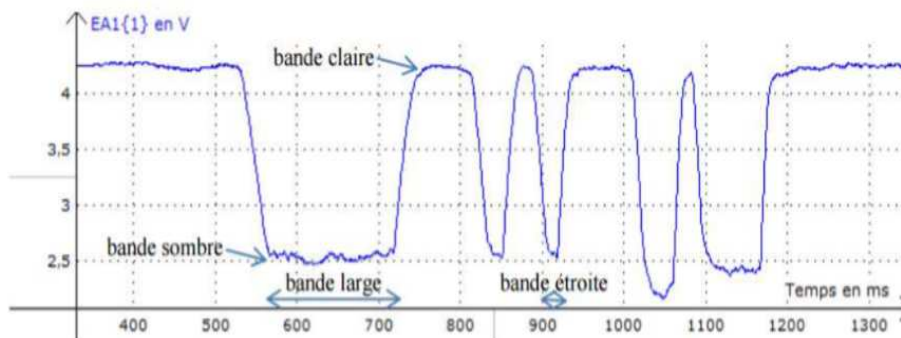
Les mesures obtenues sont les suivantes :

Distance (cm)	120	100	80	60	40	20	0
Eclairement (lux)	450	500	600	620	800	1400	5000
Tension U_R (V)	0,200	0,293	0,351	0,486	0,622	0,960	1,700

Tableau -II.1 : Résultats obtenues des mesures

On peut voir ici que plus l'éclairement n'est intense, plus la tension aux bornes de la LDR est élevée.

Exemple d'application : le lecteur à codes-barres

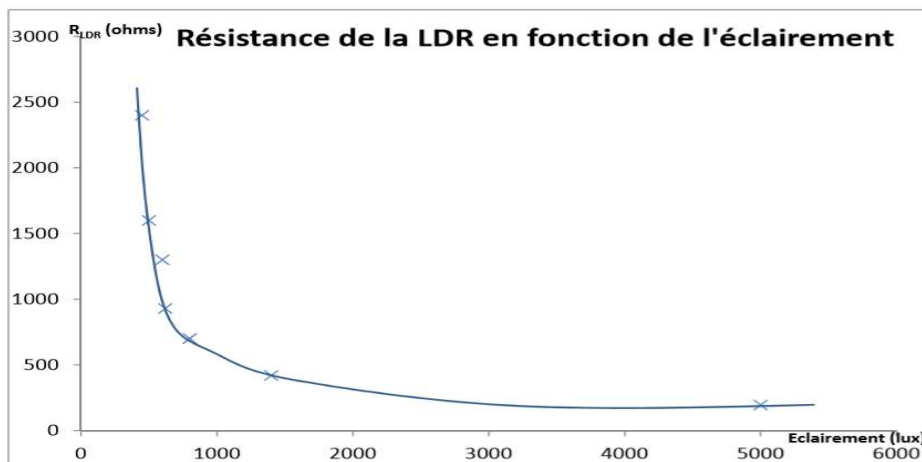


Figure(II.3): l'éclairement en fonction de l'intensité.

Il s'agit maintenant de caractériser la résistance de ce composant. • La tension mesurée par le voltmètre permet de calculer l'intensité qui circule dans le circuit série par la loi d'Ohm : $I = U_R/R$.

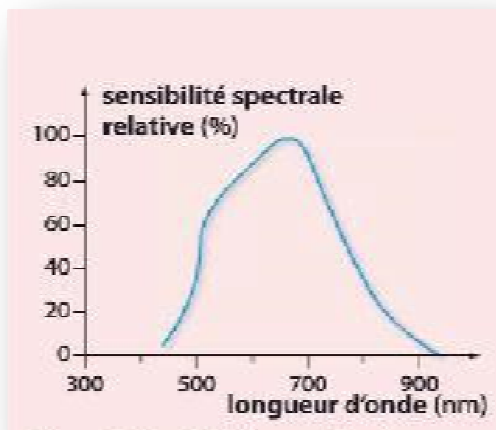
• La tension aux bornes de la LDR s'obtient par la loi des mailles, $U_{LDR} = U - U_R$. • On en déduit la résistance de la LDR par la loi d'Ohm, $R_{LDR} = U_{LDR}/I$.

Eclairement (lux)	450	500	600	620	800	1400	5000
I (mA)	2,00	2,93	3,51	4,86	6,22	9,60	17,00
U_{LDR} (V)	4,800	4,707	4,649	4,514	4,378	4,040	3,300
RLDR (Ω)	$2,4 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	930	700	420	194

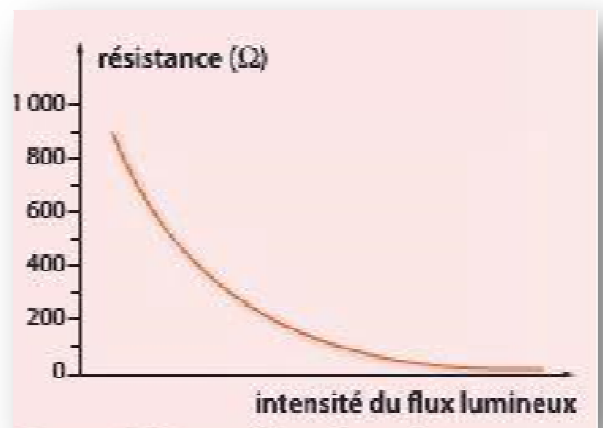


Figure(II.4): la résistance de la photorésistance en fonction de l'éclairement.

II.1- Objectifs Une photorésistance de type LDR : [11] (Light Dépendant Resistance) est un capteur de lumière dont la résistance varie en fonction de l'éclairement. Le but est d'étudier l'influence de l'éclairement sur ce capteur optoélectronique.



Figure(II.5): représentation de la sensibilité du capteur de lumière en fonction De la longueur d'onde du flux.



Figure(II.6): représentation du comportement de la résistance R En fonction du flux.

Description et principe de fonctionnement d'une photorésistance : Un cristal de semi-conducteur à température basse contient peu d'électrons libres.

La conductivité du cristal est très faible, proche de celle d'un isolant.

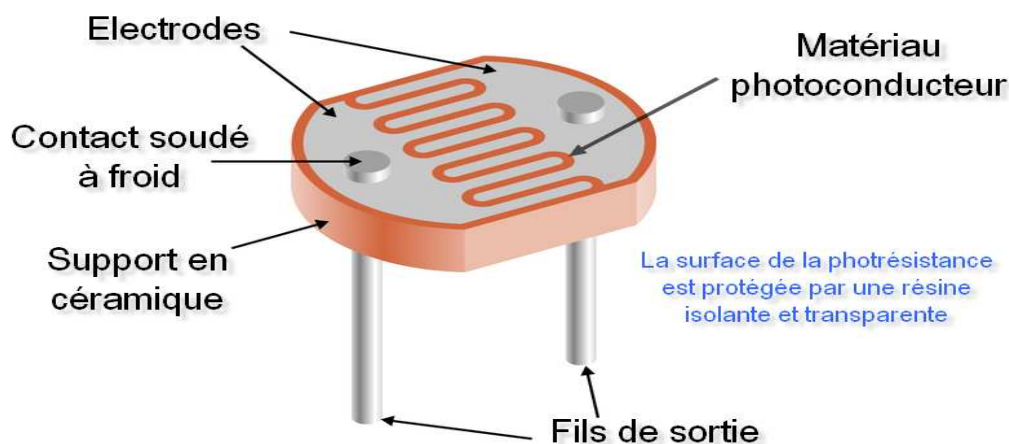
Lorsque la température du cristal augmente de plus en plus d'électrons qui étaient immobilisés dans les liaisons covalentes s'échappent et peuvent participer à la conduction.

A température constante si le même cristal semi-conducteur est soumis à une radiation lumineuse, l'énergie apportée par les photons peut suffire à libérer certains électrons utilisés dans les liaisons covalentes entre atomes du cristal.

Plus le flux lumineux sera intense, plus le nombre d'électrons disponibles pour assurer la conduction sera grand, ainsi la résistance de la photorésistance est inversement proportionnelle à la lumière reçue.

Caractéristiques

- Le capteur possède un indicateur de signal de sortie digitale (dépassement de niveau).
- La sensibilité numérique est ajustable pour modifier le seuil.
- Puce LM 393, photorésistance.
- Parfait pour les applications de mesure et détection de lumière.
- Montage facile du PCB (30 x 16 mm) avec un trou de fixation.



Figure(II.7): les composants d'une photo résistance.

II2- Variation de la résistance d'une photorésistance en fonction de l'éclairement qu'elle reçoit :

Dans l'obscurité, la valeur de la résistance d'obscurité R_{obs} d'une photorésistance dépend de sa géométrie, de la nature du matériau employé et de la température d'utilisation.


Lorsqu'elle est éclairée, la résistance R de la photorésistance diminue rapidement quand son éclairement (intensité lumineuse) E croît (figure 3) suivant la relation $R=K.E^{-\gamma}$ où K est une constante dépendant du matériau, de la température, de la nature spectrale du rayonnement reçu ainsi que de la surface sensible de la photorésistance et où γ est une valeur numérique comprise entre 0,5 et

II. 3- Le flux lumineux et l'éclairement :

Le flux lumineux :

Le flux lumineux est la quantité de lumière émise par une source lumineuse. Son unité est le **lumen** dont le symbole est **lm**.

Le flux lumineux peut varier fortement d'un type de lampe à l'autre.



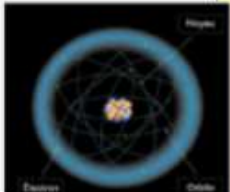
Qu'est ce qu'une quantité de lumière ?

La lumière est une forme d'énergie produite par la matière. Les constituants de la matière sont les atomes. Un atome ressemble un peu à une ruche autour de laquelle tourne de gros essaims d'abeilles : la ruche correspond au noyau de l'atome tandis que les essaims d'abeilles représentent les nuages d'électrons que l'on retrouve autour du noyau.

L'électron peut donc évoluer autour du noyau mais doit pour cela, se défaire d'une partie de son énergie.

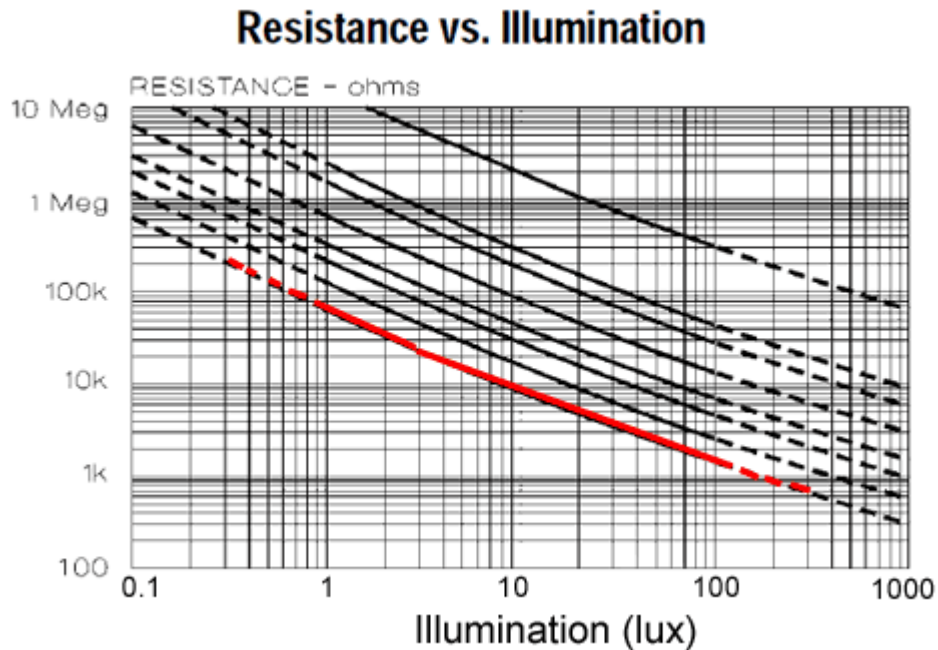
C'est sous la forme de petits « paquets d'énergie », appelés photons, que l'électron se débarrasse de son surplus d'énergie en produisant de la lumière.

La lumière peut donc être associée à une quantité de photons.



L'éclairement E en Lux (lx) en un point est inversement proportionnel au carré de la distance $d(m)$ de la source de lumière. $E = I / d^2$ où I est l'intensité lumineuse qui s'exprime en Candela (cd).

E : lux , exprimé en W/m^2



Figure(II.8): courbe lumière vs résistance.

II.4- Questions et exploitation des documents :

Information :

La relation entre la résistance ρ d'un conducteur, sa surface S , sa longueur L et la résistivité du matériau est: $R = \rho \cdot L/S$.

- Questions :

1. Quels sont les paramètres ayant une influence sur la valeur de la résistance d'un semi-conducteur?
2. Quel paramètre doit sans doute être sensible à l'intensité lumineuse?
3. Comment évolue la valeur de la résistance de la photorésistance en fonction du flux lumineux?
4. Une photorésistance est-elle sensible de la même façon à toutes les radiations lumineuses?
5. Expliquer l'utilisation de photorésistances comme détecteur de lumière.
6. Expliquer l'interaction rayonnement matière pour une photorésistance.

II.5- Etude expérimentale de la variation de la résistance R d'une photorésistance en fonction de l'éclairement :

1. Estimer l'ordre de grandeur la résistance de la photorésistance en position verticale éclairée par la lumière ambiante de la salle.

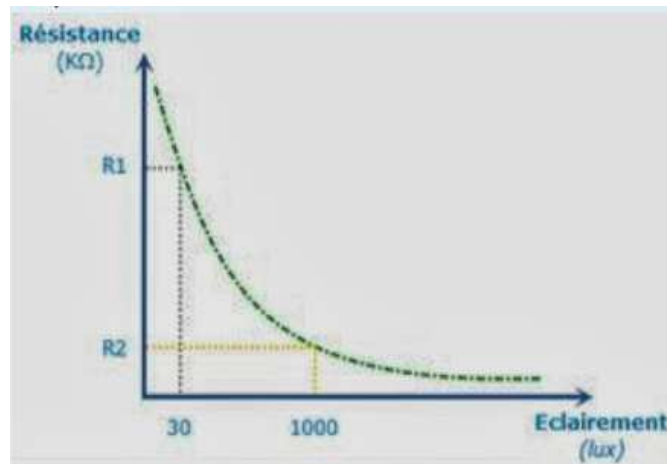
2. Masquer le capteur et noter la nouvelle valeur de sa résistance. 3. Comparer les valeurs de la résistance dans l'obscurité, avec la lumière ambiante de la salle est avec la lumière émise par la diode laser.
4. Comment évolue la valeur de la résistance R de la photorésistance en fonction de l'éclairement?
5. Placer la photorésistance sur le banc optique à la distance $d=10\text{cm}$ de la lampe. Mesurer à l'aide de l'ohmmètre la valeur de la résistance de la photorésistance.
6. Schématiser cette expérience.
7. Relever la valeur de la résistance R de la photorésistance en la déplaçant par pas de 10cm jusqu'à environ une distance d de 1,50m par exemple.
8. Tracer le graphe de la valeur de la résistance R en fonction de la distance d . Quel type de courbe obtient-on? La modéliser.
9. Tracer le graphe de la valeur de la résistance R en fonction de $1/d^2$, inverse du carré de la distance d . Quel type de courbe obtient-on? La modéliser.
10. Imprimer ces courbes.
11. En s'aidant des documents conclure quant à la possibilité d'utiliser cette photorésistance en tant que luxmètre.
12. Identifier les différentes sources d'erreur qui influent sur la précision des mesures réalisées.

II.6-Utilisation de la photorésistance avec l'arduino :

Le principe de fonctionnement :

Une photorésistance est un composant dont la résistivité dépend de la luminosité ambiante. On va donc s'en servir pour détecter la forte variation de la luminosité. Ce module capteur de lumière a photorésistance est ajustable avec un potentiomètre de réglage, à dévisser pour réduire le seuil.

La résistance décroît avec la lumière ce qui augmente le courant qui circule. la relation n'est pas linéaire, on peut fixer des seuils avec arduino ou faire un étalonnage.



Figure(II.9): Le courant Ri en fonction de la lumière.

Il faut noter aussi que ces capteurs ne sont pas sensibles de la même manière à toutes les longueurs d'onde (et donc aux couleurs). Les lumières bleues seront par exemple moins efficaces que des lumières jaunes / vertes.

Pour lire une photorésistance et calculer sa luminosité on enchaîne les étapes suivantes ci après :

Le matériel



- Une breadboard 170 pts
- Une photorésistance
- Une résistance 10Kohm
- Une carte Arduino.

Et évidemment quelques fils de connexion mâle / mâle.

Et c'est tout. C'est un montage on ne peut plus simple, qui permettra ensuite d'être facilement étendu pour interagir avec d'autres éléments.



Figure(II.10): une photorésistance.

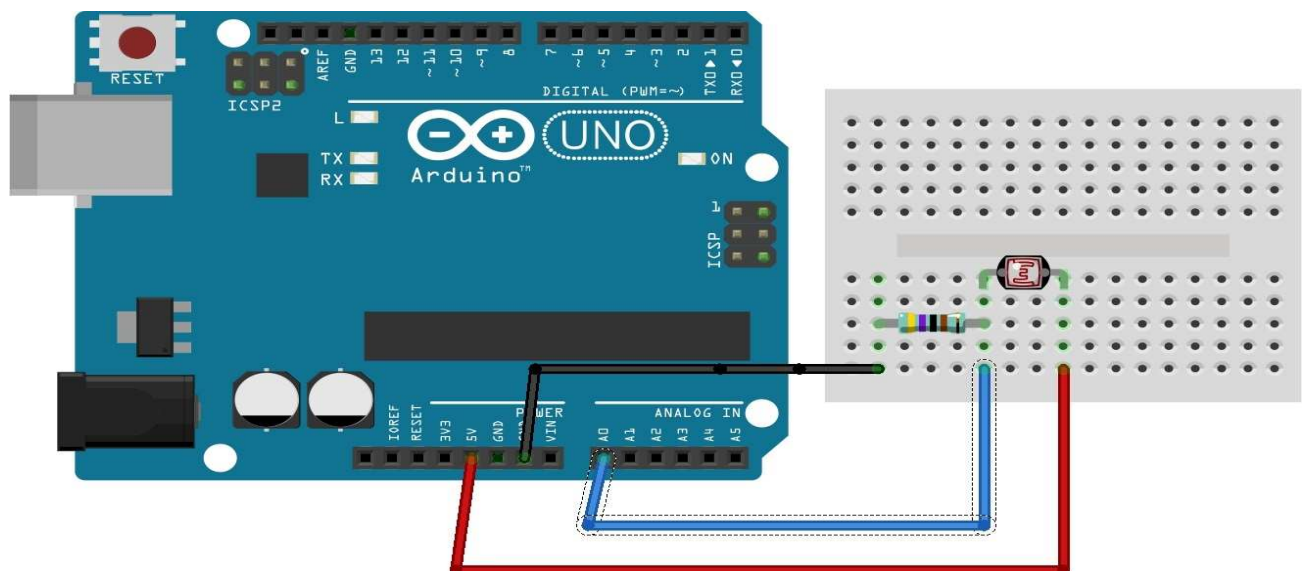
Le branchement :

Vu le peu de composants, vous allez voir, le montage est extrêmement simple à réaliser :

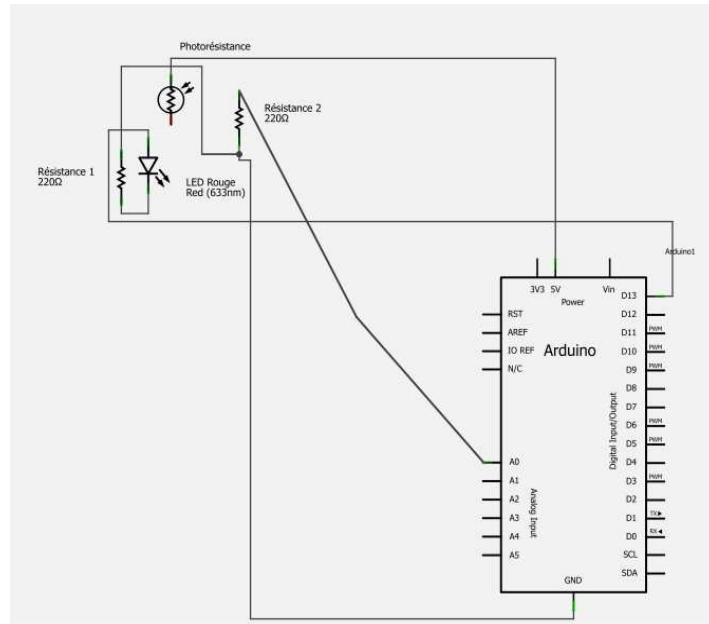
Le module prêt à l'emploi comporte 4 broches

Module --> Arduino

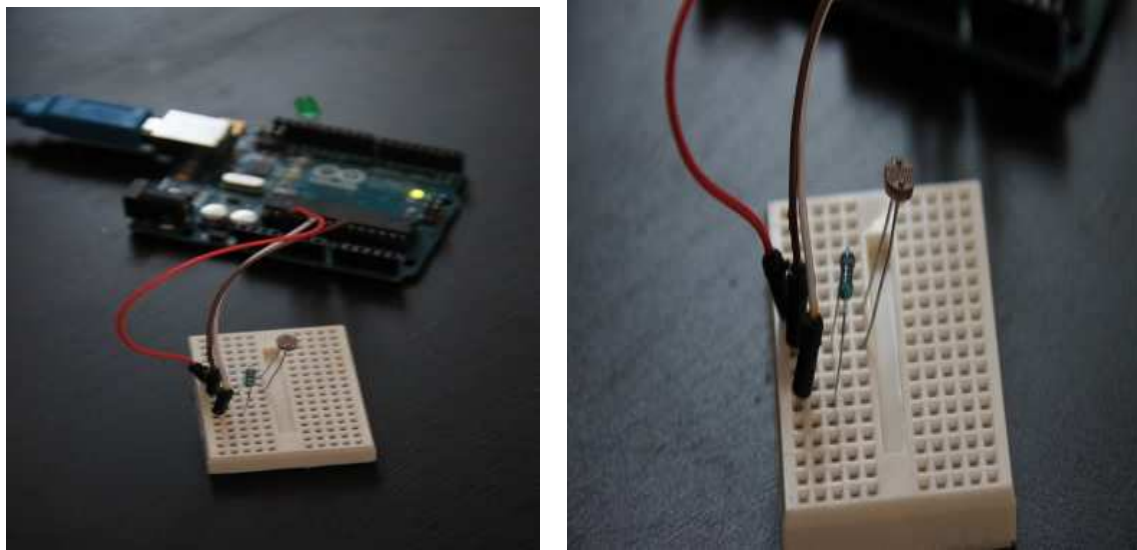
- A0 --> Sortie analogique (résistance variable) en tension ->pin A0 analogique
- D0 --> Sortie digitale 0/5V ->pin 3 digitale
- GND --> masse -> GND
- Vcc --> Alimentation de 3 à 5V DC -> +5V



Figure(II.11): Montage pour lire la photorésistance.



Figure(II.12): Circuit de branchement.



Figure(II.13): zoom sur la photorésistance

Idées d'utilisations :

Voici plusieurs exemples d'utilisation de ce capteur :

- Contrôle de la lumière : éteindre automatiquement la lumière d'une pièce grâce à un relais contrôlant l'arrivée de courant de la lampe. Lorsque la lumière est forte, on envoie alors un signal au relais pour qu'il se ferme ou reste fermé, inversement, quand il fait

sombre, il déclenche l'allumage de la lumière. Si on rajoute à cela un capteur de mouvement ou de présence, cela permet de gérer plus finement le fonctionnement. Le must : mettre cela en place pour une serre, afin de diffuser de la lumière en permanence sur ses plants.

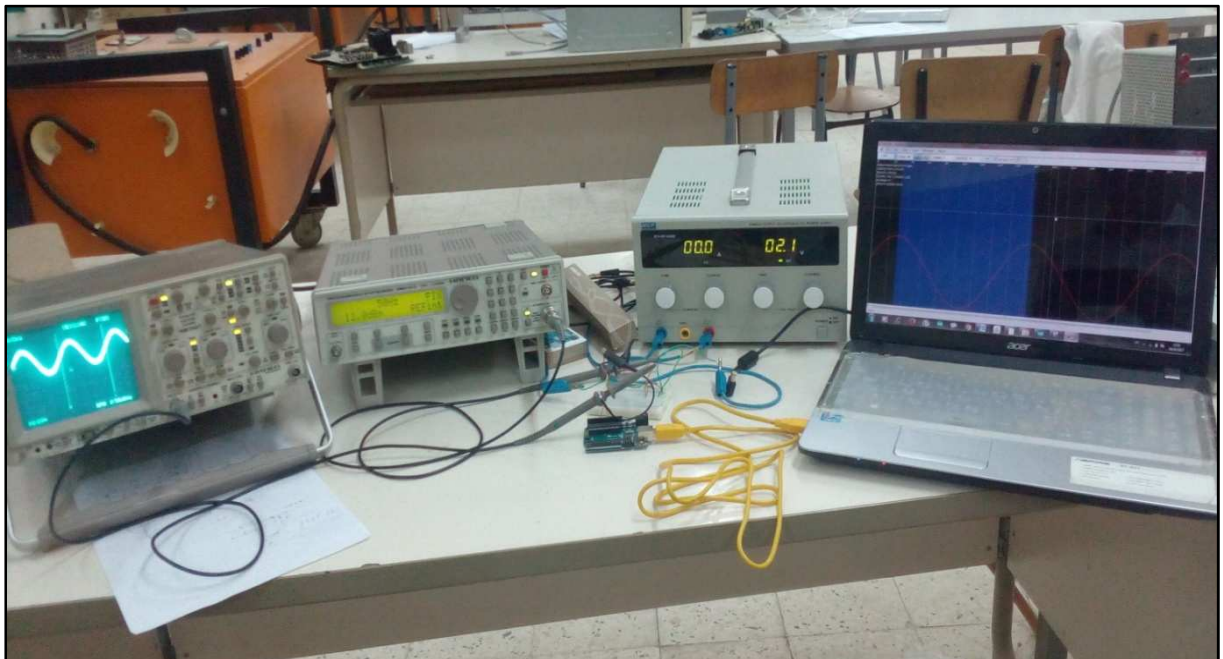
- Robot suiveur de lumière : un robot, qui va se diriger vers la source la plus lumineuse, assez fun à utiliser.
- Station météo : ce genre de petit composant peu cher a tout à fait sa place au sein d'une station météo.

Et évidemment, bien d'autres applications auxquelles je n'ai pas encore pensé.

II.7- Acquisition du programme sous matlab sur l'arduino :

Le matériel utilisé :

- Un oscilloscope ;
- Un synthétiseur de fréquence ;
- Une source de tension continue ;
- Une carte Arduino UNO ;
- Un additionneur sur lab de test.

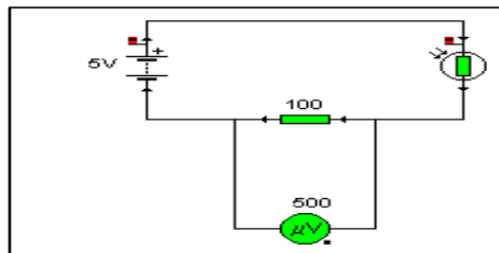


II.8- Etalonnage d'un capteur de lumière : La photorésistance [8,9]

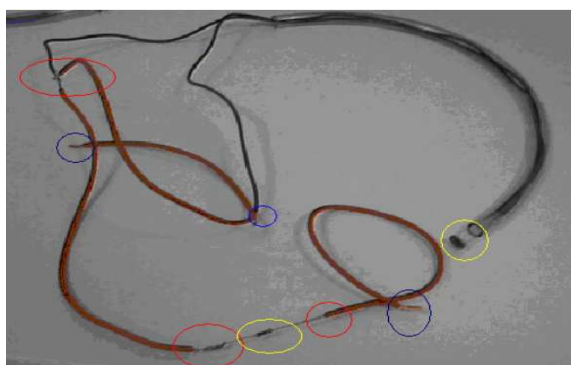
I. Le capteur :






II. Circuit d'adaptation :



Nous utilisons un générateur variant de 0 à 5 volts et une résistance de 100ohms. Et un voltmètre aux bornes de la résistance pour mesurer la tension.

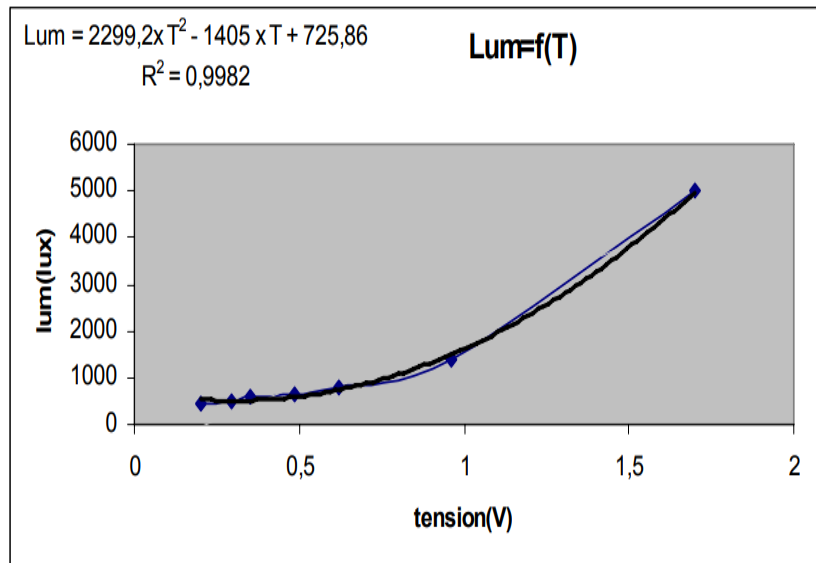


-  De gauche à droite, la mesure, l'entrée et la sortie
-  De haut en bas, les différents éléments, la photorésistance et la résistance
-  Les différentes soudures.

II.8.1-la loi d'étalonnage du capteur de lumière :

longueur (cm)	120	100	80	60	0
lumière (lux)	450	500	600	620	5000
Tension(V)	0.2	0.293	0.351	0.481	1.7

Tableau II.2 : Les résultats obtenus



La loi pour étalonner est $Lum = 2299,2 \times T^2 - 1405 \times T + 725,86$. Vérification: $V = 0,486$ Volt $Lum = 2299,2 \times 0,486^2 - 1405 \times 0,486 + 725,86 = 590,31$ lux

lumière (lux)	450	500	600	620	800	1400	5000
Tension(V)	0.2	0,293	0.351	0.486	0.622	0.96	1.7

Tableau II.3 : T=f(lum)

Cette loi est :

$$T = 0.6182 \ln(Lum) - 3.5445$$

Vérification : Lum=620 lux

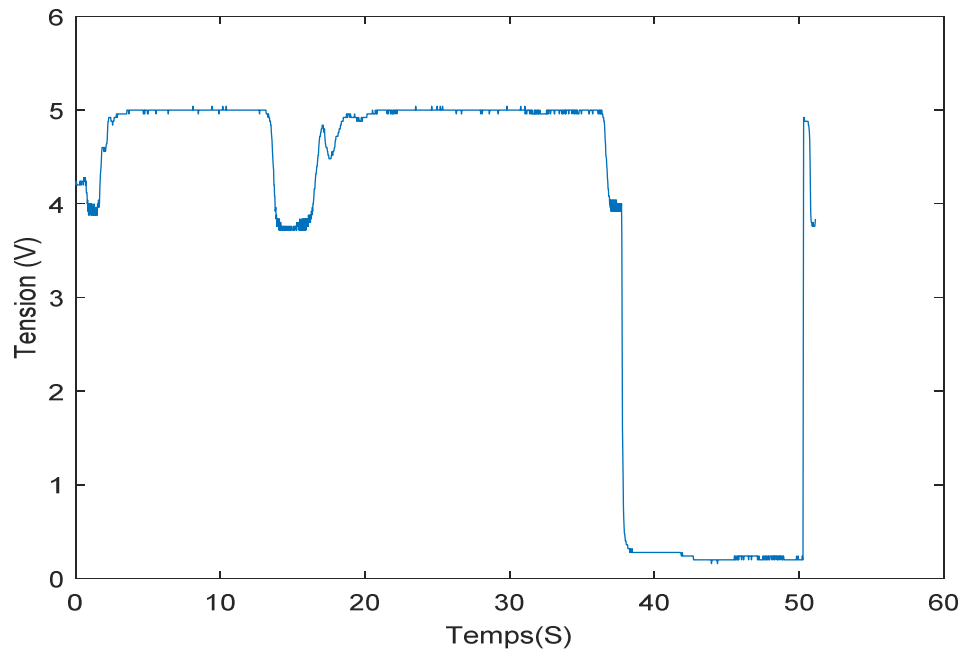
$$T = 0.6182 \ln(620) - 3.5445$$

T=0.430 volt.

II.8.2-Validation expérimental :

Après avoir réaliser le montage des acquisitions sont faite grâce à la carte arduino uno, comme les variables qui nous intéresse sont lentes, donc une carte uno est largement suffisante pour les deux capteurs.

Ainsi les résultats obtenu pour le capteur de lumière sont représentés sur la figure suivante :



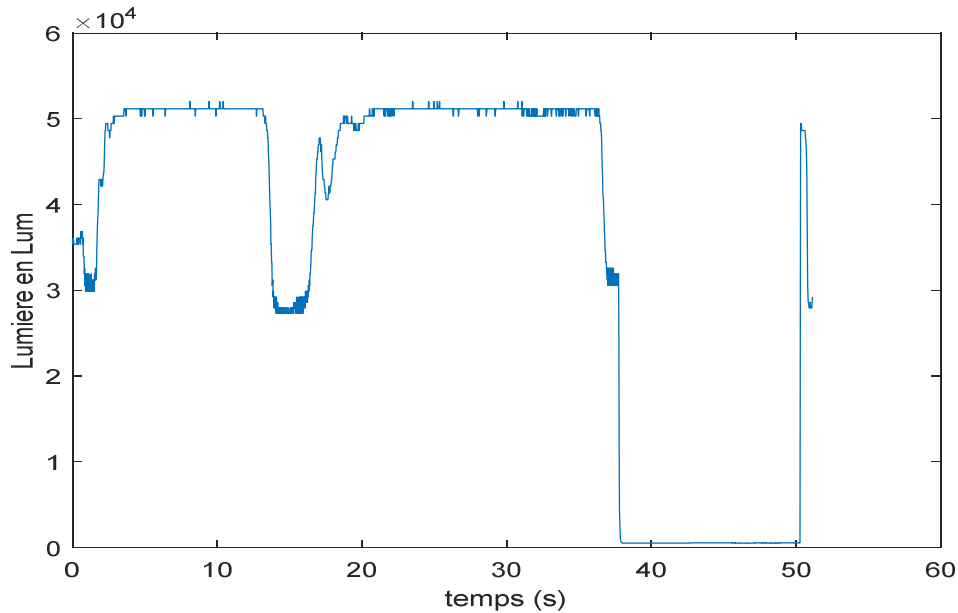
Figure(II.14) : Sortie du capteur de lumière $V=F(s)$

Ce qui nous intéresse, c'est la variation en lumen donc une adaptation des valeurs est nécessaire, la caractéristique de la photodiode utilisée suit une loi parabolique générer par le polynôme suivant, à condition que laphotorésistance soit alimenté avec une tension de 5V :

$$f(enlum) = 2299,2v^2 - 1404v + 725,86$$

v étant la tension fournie par le capteur

L'adaptation de cette tension pour avoir des lumens nous donne le résultat de la figure suivante :



Figure(II.15) : Sortie du capteur de lumière $Lum=F(s)$

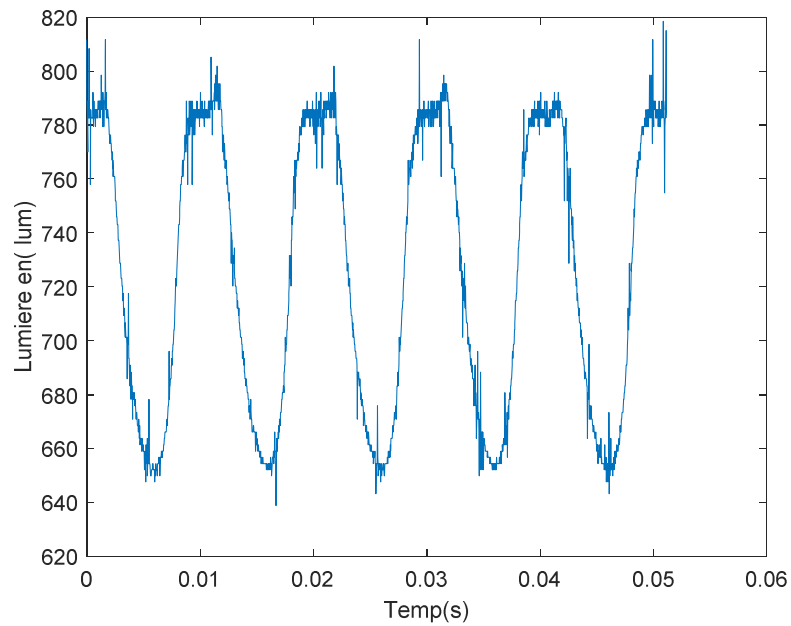
Sur cette figure nous avons effectué des variations de lumière volontaire pour tester notre capteur.

Ainsi la réponse du capteur à la lumière blanche d'un flash d'un appareil photo posé quasiment sur le capteur nous ramène d'un potentiel proche de V_{cc} (tension d'alimentation) saturation de la photorésistance 50000lux.

Le deuxième niveau correspond à la réponse du capteur à la lumière des néons (une matrice de 18 néons (3x6) du laboratoire d'électronique de puissance ce qui nous donne un résultat de 2500lux, il faut signaler que le flash de l'appareil photo n'est pas allumé mais simplement éloigné.

Le troisième à la lumière ambiante du labo, donc la lumière à l'ombre avec rideau fermé donc un jour ombragé ce résultat est de 500lux.

Le résultat suivant correspond à la lumière du laboratoire nous constatons que ce signal est périodique de période 100Hz ce qui correspond parfaitement à la période de la puissance d'un signal sinusoïdal de fréquence 50Hz.



Figure(II.16) : Lum=F(s) sans excitation flash

II.9-Validation expérimental :

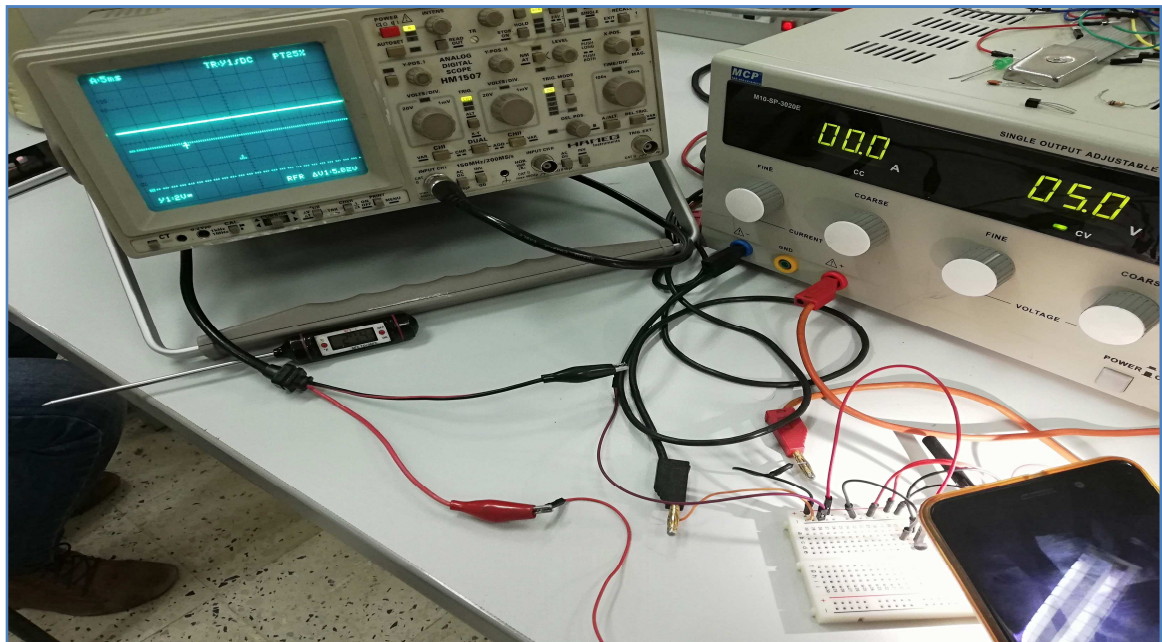


FIGURE (II.17) : image représentante du résultat du capteur photorésistance.

Après la réalisation de notre capteur de lumière au laboratoire on a pu observer les résultats que l'on a obtenu, visualiser sur oscilloscope dans la figure précédente.

On peut voir équivalence en tension des lumens en rayonnement du flash de notre appareil.

5v → 5000 0 lux.

II.10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons bien expliqué c'est quoi un capteur de lumière (photorésistance), et les éléments qui le constituent, et on a bien définie c'est quoi une photorésistance et les différentes caractéristiques constitutions et son fonctionnement.

Ainsi nous avons montré bien l'influence de la lumière et l'éclairement sur le courant passant par la résistance R et depuis la photorésistance.

III.1- Introduction [13]

Qualitativement, la température d'un objet est déterminé par la sensation de chaud ou de froid ressentie par le toucher. Techniquement la température est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules dans un échantillon de matière, exprimé en degrés sur une échelle standard. Il est possible de mesurer la température de plusieurs façons différentes qui se distinguent par le cout des équipements et par la précision qu'elles procurent. Le thermocouple est l'un des captures de température le plus couramment utilisé. c'est, en effet, dispositif peu onéreux et capable de fonctionner dans une large gamme de température tout en permettant une précision acceptable des mesures. avant d'entrer plus profondément dans le sujet qui nous traitons ici, il est utile de parler de manière un peu plus précise de la notion de capteur .

C'est ainsi que nous pouvons définir un capteur comme un dispositif qui nous permet d'apprécier une grandeur physique en la traduisant le plus souvent en signal électrique ; La traduction en signal électrique présente l'avantage d'avoir une grandeur de sortie facile à manipuler. Le fonctionnement d'un capteur est toujours basé sur phénomène physique pouvant renseigner sur les modifications subies par une grandeur physique suite aux modifications de la grandeur à laquelle nous nous intéressons. Dans le langage consacré aux capteurs la grandeur testés s'appelle le mesurande ou grandeur d'entrée ou encore excitation du capteur. Le résultat fourni par le capteur de température sortie ou réponse. Le présent travail étant principalement orienté vers un capteur de température il nous semble judicieux de parler de différents capteurs de température pour ensuite traiter plus longuement le cas du thermocouple.

La température est la grandeur physique dont l'évolution présente un très grand intérêt sur le plan technologique. L'évolution de ce paramètre conditionne de nombreux processus technologique, si bien que la connaissance de la température devient un impératif si l'on veut garantir la qualité de différent produit. Parmi le capteur de température devient un impératif si l'on veut garantir la qualité de différents produits. Parmi les capteurs de température nous pouvons citer les thermistances. Ce genre de capteurs repose sur la propriété de certains semi-conducteurs qui peuvent voir leur résistance électrique augmenter ou diminuer avec la température. Nous parlons alors de thermistance à coefficient positif (CTP) ou de thermistance à coefficient négatif (CTN). Nous pouvons aussi parler des captures basés sur la dilatation de corps solides ou gazeux. D'autres capteurs de température à usage plus

spécifique utilisent les variations de courants dans les diodes et transistors. Nous parlons dans ce cas de capteurs de température à bruit de fond. Cependant le capteur de température le plus courant demeure le thermocouple. L'une des caractéristiques principales de ce capteur actif c'est –à-dire que son fonctionnement n'exige pas une source d'énergie auxiliaire.

Dans le cadre de notre travail nous avons réalisé un capteur de température en utilisant un composant dédié qui est le LM35. L'information ainsi obtenue est transmise à un ordinateur via une carte arduino UNO.

III.2. La thermoélectricité :

La thermoélectricité a été découverte puis comprise au XIX^e siècle grâce aux travaux de Seebeck, Peltier ou encore Thomson (lord Kelvin). L'effet thermoélectrique est un phénomène physique présent dans beaucoup de matériaux surtout les conducteurs caractérisés par la présence d'électrons libres. Il est le résultat du lien entre la température et l'énergie des électrons. Cet effet est à la base de diverses applications, parmi celle-ci la réfrigération voire accessoirement la production d'électricité peuvent être évoquées. On parle alors de thermo pile ou calo pile. L'effet thermoélectrique transforme directement la chaleur en électricité, ou déplace des calories par l'application d'un courant électrique. Un grand nombre de matériaux possédant des propriétés thermoélectriques intéressantes ont été découverts durant la période allant de 1950 à 1960. c'est notamment le cas du tellure de bismuth Bi_2Te_3 utilisé dans les modules Peltier que l'on rencontre dans le commerce, ou des alliages silicium-germanium $Si - Ge$ utilisés pour l'alimentation des sondes spatiales dans des générateurs thermoélectrique à radio-isotope.

L'utilisation de la thermoélectricité en thermométrie connaît un grand succès depuis le début du XX^e siècle alors que son utilisation dans la réfrigération est assez récente (années 2000), par contre le calo pile a du mal à émerger du fait de son rendement peu élevé et de son prix souvent prohibitif, ces considérations que seules quelques applications bien ciblées sont envisagées depuis 2005. Cependant des progrès récents, ainsi que l'apparition d'un nouvel intérêt pour la thermoélectricité dû à la fois à la hausse des coûts de l'énergie et aux exigences environnementales, ont conduit à un renouveau important des recherches scientifiques concernant cette discipline.

III.2.1. La température

Les principes de la thermoélectricité ayant pour objet principal la chaleur c'est-à-dire la température, nous essayons dans ce qui suit de donner une définition de la température et des méthodes pouvant l'apprécier. En physique, la température se définit de plusieurs manières :

Elle peut également être approchée par l'équation régissant les transferts thermiques entre plusieurs systèmes, comme elle peut être abordée par le biais de l'entropie fonction thermodynamique ainsi peut-elle être vue comme une fonction croissante du degré d'agitation thermique des particules, liée au niveau de désordre (thermodynamique et physique statique).

La température est une notion d'une extrême importance dans de nombreux domaines : métrologie et climatologie, médecine et chimie. Il est à noter que la température n'est une grandeur mesurable au sens classique du terme. Cela veut dire qu'il n'existe pas d'étalon qui serait un outil de comparaison. Cela traduit l'erreur que l'on commettrait à dire qu'un corps est deux fois plus chaud ou deux fois plus froid. Pour apprécier les températures on utilise des échelles, nous disons alors que la température est une grandeur repérable et non mesurable.

On exprime cela aussi en disant que la température est une grandeur extensive et non intensive.

III.2.2. Echelles de température

Il existe plusieurs échelles de température utilisées selon des convenances personnelles. L'échelle la plus répandue est l'échelle Celsius ou échelle centigrade. Dans cette échelle on considère deux repères, l'un correspondant à la glace fondante c'est le degré 0 et l'autre correspondant à l'ébullition de l'eau sous pression atmosphérique normale (1013 hPa), ce second repère correspond au degré 100 de l'échelle.

Dans les pays anglo-saxons principalement les états unis d'Amérique on emploie l'échelle Fahrenheit où la glace fond à +32°F et l'eau bout à +212°F. L'unité légale du système international d'unité (SI), d'utilisation scientifique est l'échelle absolue ou l'échelle thermodynamique. L'échelle thermodynamique s'obtient à partir de l'échelle Celsius par simple translation de 273°C.

1. Définition de la chaleur

Dès lors que l'on s'intéresse à la mesure des températures, nous donnons dans ce qui suit une définition succincte de la chaleur. C'est ainsi que pour la physique, la chaleur est l'énergie qui passe d'un corps à un autre ou d'un système à un autre, un transfert lié au mouvement c'est-à-dire l'énergie cinétique d'atomes ou de molécules. L'équivalence entre travail (énergie) et chaleur a été établie par joule nom est donné à l'unité d'énergie. Une calorie est équivalente à environ 4,18 joules. La chaleur peut être générée à partir de réaction chimiques ou nucléaires. On obtient aussi de la chaleur par frottements (friction).

2. Transfert thermiques

La chaleur passe toujours d'un endroit à haute température vers des endroits de températures plus basses. Nous parlons alors de transferts thermiques qui se réalisent de différentes manières telles la conduction, le rayonnement ou la convection.

a. Transfert de chaleur par convection

C'est un transfert qui résulte d'un mouvement d'un fluide chaud (l'air ou l'huile) qui au contact de matériaux à température plus basse leur transmet de la chaleur.

b. Transfert par rayonnement

La matière ayant une certaine température émet un rayonnement infrarouge caractérisé par des ondes électromagnétiques de longueurs d'onde comprise entre le domaine visible ($\approx 0.7 \mu m$) et le domaine des micro-ondes ($\approx 1 mm$).

c. Transfert par conduction

La conduction résulte de « chocs » à l'échelle moléculaire et atomique. Elle dépend très fortement de la structure du matériau et de l'organisation du réseau cristallin, elle est plus importante dans les solides conducteurs possédant des électrons libres.

3. Equilibre thermique

On considère qu'un matériau est l'équilibre thermique si l'état d'excitation des particules qui le composent est uniforme. Cet état d'excitation représente l'énergie cinétique des particules.

4. Diffusion de la chaleur dans les structures solides

Lorsque l'on chauffe un matériau solide, les ions les plus proches de la source de chaleur se mettent à vibrer et communiquent ces vibrations aux ions voisins pas le biais du réseau.

La propagation à l'échelle macroscopique, des vibrations de ces ondes est observable à l'échelle macroscopique, sous forme de diffusion de la chaleur. On associe à cette diffusion un flux de chaleur, qui représente la quantité d'énergie thermique transportée par unité de temps. Le flux de la chaleur et donc comparable à une puissance et il s'exprime en « watts »

5. Les effets thermoélectriques

a. Effet Seebeck

Considérons un circuit composé de deux métaux homogènes A et B, soudés en deux points portés à des températures différentes notées T_A et T_B (Fig.1). Si l'on observe le galvanomètre, on constate qu'un courant est engendré dans le circuit ainsi formé : il est donc le siège d'une force électromotrice V_{AB} , la force électromotrice de Seebeck. L'expérience révèle que celle-ci est une fonction de la différence de température $T_A - T_B$. Cette différence de température notée $V_{Seebeck}$ s'exprime sous la forme :

$$V_{Seebeck} = (S_n - S_p)(T_f - T_c)$$

III.3 : Le thermocouple

1. Le thermocouple :

Comme nous l'avons vu jusqu'à présent, on désigne sous le nom de thermocouple tout ensemble de deux conducteurs ou de deux semi-conducteurs, réunis par deux jonctions.

Cette dénomination désigne également une application industrielle, la première sans doute, de l'effet Seebeck. Les thermocouples servent à la mesure des températures dans un

très grand intervalle et avec une excellente précision. Il est normal que cette application soit très ancienne, elle vient tout de suite à l'esprit car la force électromotrice de Seebeck est fonction de la différence de température des deux jonctions. Il suffit donc de garder l'une des jonctions, en l'occurrence la jonction froide, à une température constante, le plus souvent 0°C, pour pouvoir mesurer aisément la température de seconde jonction, en mesurant la force électromotrice produite.

Si l'on se contente de mesures approximatives, d'une précision de l'ordre de 10% les couples thermoélectriques sont d'un emploi simple, et ne nécessitent pas toutes les précautions que nous verrons par la suite. Il suffit de prendre, par exemple, un fil de cuivre et un fil de fer. Les jonctions peuvent être réalisées en torsadant les fils, la température de la référence sera obtenue à la jonction froide grâce à un récipient contenant de la glace fondante. La mesure la force électromotrice sera faite grâce à un millivoltmètre. Mais, pour obtenir des mesures précises, avec des erreurs inférieures ou égales à 1%, il faut prendre de nombreuses précautions et bien choisir son thermocouple suivant la gamme de température.

Dans ce qui va suivre, nous nous référons le plus souvent au couple Le Châtelier (platine rhodié 10% - platine), qui est le couple de la pyrométrie de précision. Précisions encore que les thermocouples donnent de bons résultats pour des températures allant de quelques centaines de degrés à 1600°C.

2. Le circuit thermoélectrique

a. Les différentes parties du circuit

Le circuit comprend les deux métaux du couple, le système de mesure, les fils de raccordement du couple à l'appareil de mesure et souvent des fils de compensation. Les deux métaux du couple, ici un couple platine/platine rhodié sont d'un prix élevé, et on en utilise la plus petite longueur possible. La longueur est calculée pour les domaines de température allant de température mesurée aux environs de 100°C. Les fils de compensation peuvent être, soit des fils de même nature que le couple, mais de qualité moindre, ou des fils de nature différente qui fournissent la même f.e.m. entre 100°C et 0°C, température habituelle de la soudure froide. On utilise souvent dans le cas des couples Pt-PtRh 10% des fils de compensation Cu-CuNi 2%. Grâce à la loi des métaux intermédiaires faisant que la f.é.m du couple demeure inchangée par l'introduction d'autres métaux, à condition que les soudures de Ceux-ci soient à la même température, on peut connecter un système de mesure sans problème.

b) Les différents couples utilisés :

Le choix des couples se fait suivant le domaine de température auquel nous nous intéressons.

Les couples cuivre-constantan peuvent être utilisés jusqu'à 400°C.

Les couples fer-constantan vont jusqu'à 900°C.

Le couple nickel-chrome-aluminium (ou couple chromel-alumel) peut atteindre 1200°C.

Le couple platine-platine rhodié 10% jusqu'à 1600°C.

Ces résultats se trouvent résumés sur le graphique ci-après .

Le couple Pt-PtRh 10%, ou couple « le Chatelier » , est utilisé en thermométrie de haute précision ; (il est beaucoup plus stable que Chromel-alumel) , très précis jusqu'à 1200°C , son emploi nécessite quelques précautions dans le domaine de température allant de 1200°C à 1600°C (il est sujet à des réactions chimiques avec les isolants et la gaine de protection du couple).

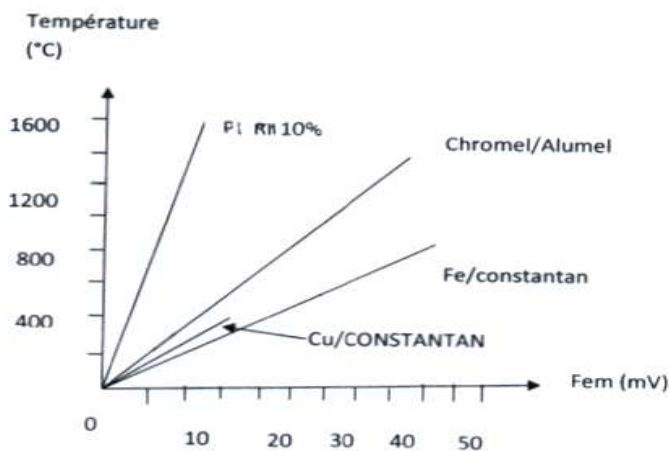


Figure (III.1) : Courbe de température en fonction de la FEM

Ce couple a été découvert et expérimenté à la fin du XIX^{ème} siècle par Henri le chapelier. Il existe également sur le marché un couple Pt-PtRh 13% qui a des caractéristiques semblables, mais non identiques ; il a été fabriqué pour la première fois aux états unis. Les fils du couple sont chinois de manière à assurer une bonne résistance mécanique : les diamètres vont de 0.5mm à 0.2mm. (ces derniers sont naturellement très fragiles).

- b. La jonction froide
- c. La jonction froide

Comme la f.e.m. du couple dépend de la différence de température $T_c - T_f$ des soudures, une condition nécessaire pour une bonne mesure est de connaître exactement T_f . le plus souvent, on utilise de la glace fondante qui donne $T_f = 0^\circ\text{C}$. il faut prendre soin d'isoler les fils du couple, pour qu'il n'y ait pas de contact entre les deux branches.

- d. La jonction chaude :

La jonction chaude est réalisée grâce à une soudure. Celle-ci doit être aussi fine que possible, les fils étant également isolés par du pyrex (500°C), de la stéatite (1100°C), de la mullite (1500°C) ou de l'alumine (1900°C). Par-dessus l'isolateur, se trouve la gaine qui est souvent de même nature que l'isolant, mais comme elle peut être en contact avec des métaux, on prend souvent du graphite, la porcelaine vernissée est indiquée pour des atmosphères gazeuses nocives.

3. Mesure de la force électromotrice

La force électromotrice d'un thermocouple se mesure soit par lecture directe au voltmètre, soit par opposition.

- a. Le voltmètre :

La mesure se fait au millivoltmètre. Très simple à réaliser, elle n'est cependant pas d'une grande précision, en raison de la résistance propre du couple. Soit r_c cette résistance et r_v celle du voltmètre, nous ne mesurerons que la proportion :

$$e(1 - (r_c / r_c + r_v))$$

De la **fém** e de Seebeck

Pour avoir une mesure précise, nous devons avoir :

$$r_v / r_c \gg 1$$

r_c dépend de la nature du thermocouple, de la section des fils et de leur longueur ; il y a également les variations de la résistance propre du millivoltmètre qui souvent en cuivre. Ces variations peuvent entraîner une erreur de 3% aux environs de 1000°C pour une variation de

température ambiante de 10°C . Un bon millivoltmètre étant muni d'une thermistance n'est pas sujet à ces variations.

- Mesure par opposition

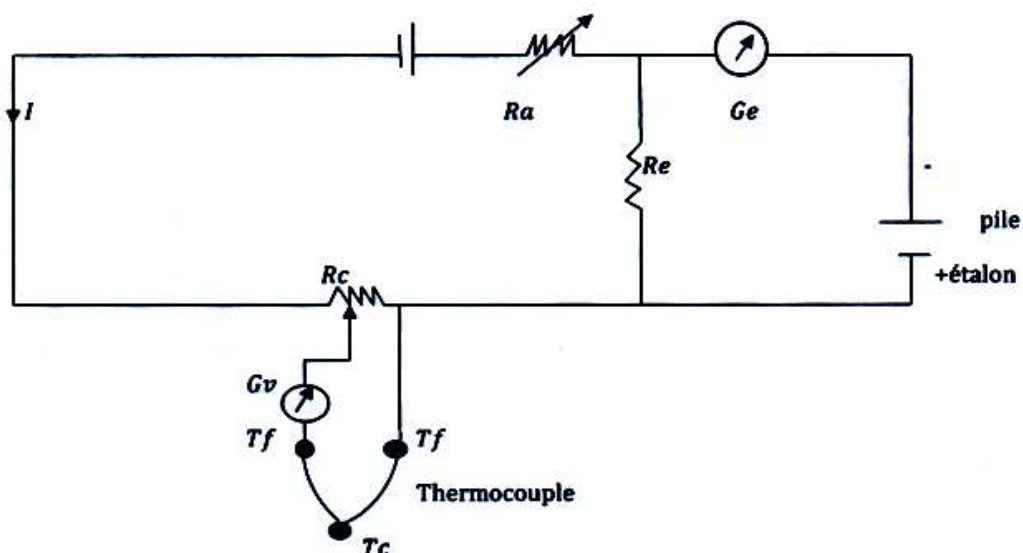
C'est la méthode la plus précise, le T_f ma de principe en est le suivant :



Figure (III.2) : Circuite de la mesure par opposition

La f.é.m. du thermocouple est mise en opposition avec la f.é.m. développée par la source, le galvanomètre nous informe de l'égalité des f.é.m. Lorsqu'il indique qu'il n'est traversé par aucun courant.

Le montage par opposition peut être amélioré par l'usage d'une pile étalon comme montré sur la figure III-2.



Figure(III.3) : Circuit de la mesure par opposition

Le courant reste constant tout au long des mesures : la valeur choisie de I est obtenue grâce à la pile étalon. I est tel que :

$$I R_e = V_{pe} \quad (III.1)$$

V_{pe} étant la f.é.m. aux bornes de la pile étalon. le galvanomètre G_e sert à réaliser cette égalité de façon très précise, grâce à la résistance R_a .

La résistance R_c est un potentiomètre qui varie entre la valeur 0 et R_c . Le galvanomètre G_v permet de réaliser l'égalité entre la f.é.m. du thermocouple et la chute de tension aux bornes de R_c , en réalité, on ne se sert que d'un seul galvanomètre qui est commuté d'un circuit sur l'autre.

En ce qui concerne les mesures effectuées avec le couple Pt-PtRh 10% jusqu'à 1600°C n $I R_c$ ne dépasse guère 17mV, comme nous pouvons le voir sur la figure II-1. Il faut également veiller à ce que la pile étalon débite le moins possible.

- Les mesures :

La précision de la mesure dépendra de la définition de la résistance R_c , et surtout de l'exactitude du galvanomètre. Dans le cas où la soudure froide ne se trouve pas à 0°C, il convient de faire les corrections nécessaires grâce à la loi des températures successives.

- L'étalonnage du couple :

Le couple est étalonné en supposant que f.é.m. e_s suit une loi parabolique :

$$e_s = A + Bt + Ct^2 \quad (III.2)$$

Dès l'instant où A , B , C sont déterminés, on connaît e_s pour toutes les températures, pour lesquelles l'approximation faite au départ est valable.

En pratique, comme on se sert des thermocouples dans un domaine bien plus étendu de température, il suffit de consulter des tables qui donnent toutes les f.é.m. des différents couples à toutes les températures d'utilisations. Si on se trouve en présence d'un couple ne figurant pas dans les tables que l'on possède, il suffit de l'étalonner par comparaison avec un couple connu ; une précaution cependant est nécessaire : il faut veiller à ce que les soudures des deux couples peuvent toutefois être étalonnées grâce à un certain nombre de points fixes bien connus. Entre ces différents points fixes, on est alors obligé de considérer que les variations sont linéaires. Si on utilise les points d'ébullition de certains corps, il faut noter la pression atmosphérique, et faire la correction qui s'impose.

4) Principales sources d'erreur dans la mesure des températures :

a) Erreurs indépendantes de la qualité du thermocouple :

La jonction chaude du thermocouple est abritée par un isolateur et une gaine, on conçoit donc aisément qu'elle ne soit pas exactement à la température que l'on veut mesurer. La température mesurée n'est pas toujours la température réelle. Il faut donc veiller à assurer un très bon contact entre la gaine et l'objet, dont on mesure la température

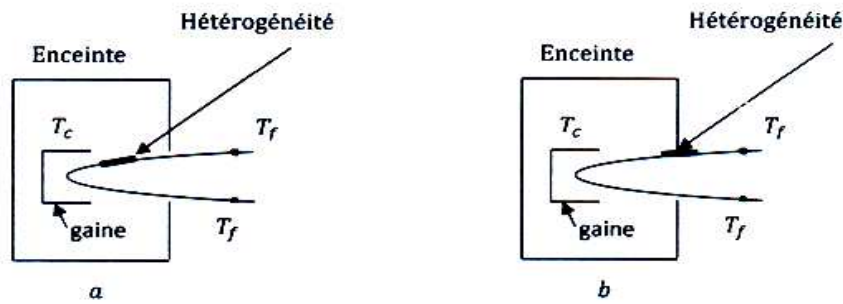
Le flux de chaleur doit être suffisant, pour qu'il n'y ait pas de gradient de température entre la gaine et la jonction chaude. Il faut prolonger le thermocouple le plus loin possible, dans la région chaude ; une bonne vérification consiste à déplacer le couple de quelques centimètres. Si la mesure est bonne, il n'y aura pas de variation de température.

La température de la zone où se trouve le couple n'est pas toujours uniforme, on peut très bien être en présence d'un gradient de température. Ainsi les gaz sont difficiles à définir en température, et sont sujets à de mauvais échanges thermiques, les parois ont une température différente et rayonnante de la chaleur. Pour augmenter les échanges par convection, on a pensé à créer les pyromètres à aspiration qui ont une circulation rapide de gaz autour du couple. On dispose également des écrans contre la chaleur rayonnée. Les liquides ont des températures très variables, s'ils ne sont pas soumis à un brassage régulier. Les corps solides voient leur température varier par le rayonnement et la conduction

b) Erreurs imputable au thermocouple :

La manipulation des thermocouples est très délicate et nécessite un grand nombre de précautions, les fils de platine ou de constantan étant fragile, il faut éviter de les soumettre à des actions mécaniques trop fortes surtout à chaud quand les caractéristiques élastiques et la limite de rupture sont plus faibles. Il est nécessaire également d'observer une propreté méticuleuse, car à température élevée des réactions chimiques non souhaitées peuvent avoir lieu. Tous les couples deviennent hétérogènes au bout d'un temps plus ou moins long. Ces hétérogénéités sont très dangereuses si elles sont très localisées : la loi des métaux intermédiaires nous indique que de nouvelles f.é.m. prennent naissance s'il n'y a pas égalité de températures aux extrémités de l'hétérogénéité.

Les deux schémas suivants nous montrent que l'hétérogénéité peut être plus ou moins nuisible suivant son emplacement.



Figure(III.4) : Divers emplacements d'une hétérogénéité

Dans le cas de la figure III.4 , l'hétérogénéité , entièrement plongé dans l'enceinte , est sans effet ; Dans le cas de la figure II-3 , celle-ci se trouvant à moitié en dehors , elle est soumise à un gradient de température , par conséquent , ses jonction avec le métal du couple sont donc à des températures différentes , et il en résulte une f.é.m. supplémentaire , un moyen simple de mettre ces hétérogénéités en évidence est de chauffer les fils nus, en branchant un millivoltmètre aux extrémités, en avançant une source de chaleur le long du fil , lors du passage devant l'hétérogénéité , elle fera dévier le millivoltmètre .

La correction des fils du thermocouple peut souvent être décelée à l'œil nu ; ils deviennent ternes, grisâtre et très fragiles, mais celle-ci est facile à éviter à condition de les traiter avec précautions, Dans le couple platine-platine rhodié , il faut éviter lorsqu'on manipule les fils de les salir surtout avec des poussières de fer qui sont très nocives . la silice, qui est souvent un composé de l'isolant, est également très nocive.

Un autre danger vient de la volatilité du platine et du rhodium. A 1300°C, le platine est deux fois plus volatil que le rhodium , donc le fil en platine rhodié s'enrichit en rhodium , alors que le fil en platine pur , au contact du rhodium vapeur , fixe une faible quantité de ce dernier on a fabriqué des couples avec des branches alliées différemment qui sont moins sensibles aux altérations que le platine pur : ils permettent deux températures plus élevées ; par exemple France , le couple Pt-Rh (10-30) ou (10-40) .

Ce chapitre qui est une partie expérimentale consiste à réaliser un thermocouple dans le laboratoire des matériaux de notre département, Nous avons différentes jonctions de métaux (fer /constantan) qui correspondent à la lettre J son domaine d'utilisation va de -40 à 800°C sa sensibilité moyenne est de 55 $\mu\text{V}/\text{C}^\circ$, (cuivre/constantan) il correspond à la lettre T son

domaine d'utilisation va de -200 à 370°C sa sensibilité moyenne est de $51\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Dans le cas de notre expérience nous avons choisi une jonction de deux métaux (nickel-chrome-nickel-aluminium) chromel-alumel disponible au laboratoire qui correspond à la lettre K qui a un domaine d'utilisation allant de -270 à 1270°C avec une sensibilité moyenne $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. ce thermocouple est associé à son appareil de mesure qui est un millivoltmètre

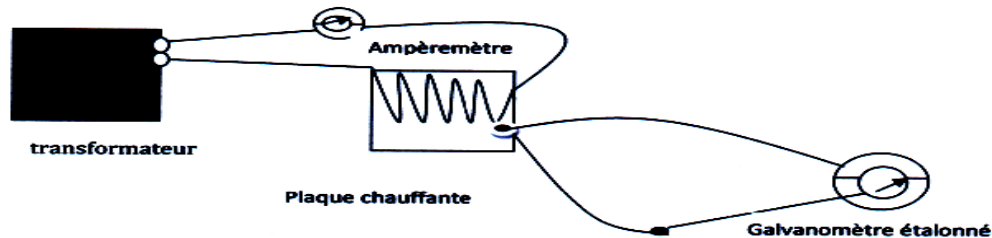


Figure (III.5) : Circuit de réalisation

Dans le but de chauffer la jonction du thermocouple on a réalisé une résistance chauffante à base d'un fil résistif et une plaque de ciment blanc, Mais comme nous avons constaté que les fils conducteurs de la plaque ne peuvent pas supporter la tension et nous avons inséré un ampèremètre dans le circuit pour Controller le courant. Nous avons branché les extrémités de couple un millivoltmètre étalonné et l'autre extrémité constituée par la soudure est placée en dessous de la plaque dans le but de mesurer la température de la plaque, le millivoltmètre a indiqué une f.é.m. de 90 mV qui correspond à 90°C pour vérifier si cette température est correcte nous avons utilisé un autre capteur de température basé sur la pyroélectricité (pyromètre portatif Chauvinarnoux), ce dernier nous a indiqué une température 88°C donc avec différentes erreurs nous pouvons considérer les deux résultats comme étant assez proche

pour les cartes Arduino, mais aussi pour tous autres circuits électroniques fabriqués suivant les standards "grand public" (et non "industriels").

Pour information, les gammes de températures classiques en électronique sont les suivantes :

Grand public : 0°C ~ 70°C

Industrie : -40°C ~ 85°C

Militaire : -55°C ~ 125°C

Une des grandes forces du capteur LM35, qui fait sa popularité, c'est sa précalibration en sortie d'usine. Tous les capteurs LM35 sont calibrés en degré Celsius lors de la fabrication. Cela signifie que vous n'avez absolument rien à faire pour calibrer le capteur, il l'est déjà au moment où vous le sortez de son sachet !

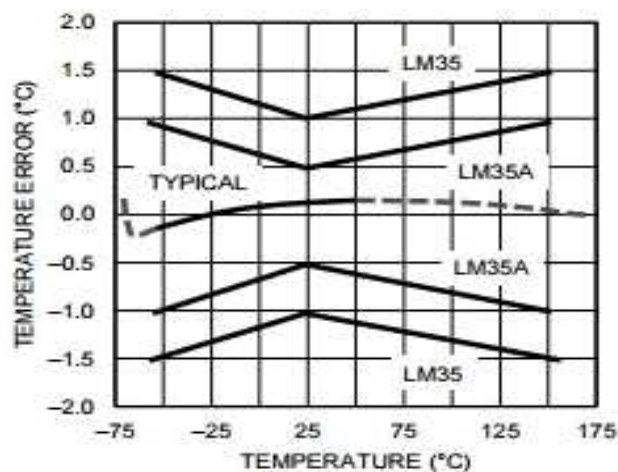


Figure (3.6) : Courbes de précision des différentes versions de LM35

III.4.2-Mesurer une température avec un capteur LM35

Maintenant que vous savez tout sur le capteur LM35, il est grand temps de le mettre à l'œuvre. Pour cela, nous allons faire un petit montage de démonstration très simple.

Le but de ce montage sera de mesurer la température ambiante du lieu où la station photovoltaïque sera implantée, ensuite transmettre l'information vers le processeur qui devra gérer la gestion du rapport cyclique afin de forcé l'ensemble du processus à avoir un comportement comme la véritable station

Le montage de démonstration :

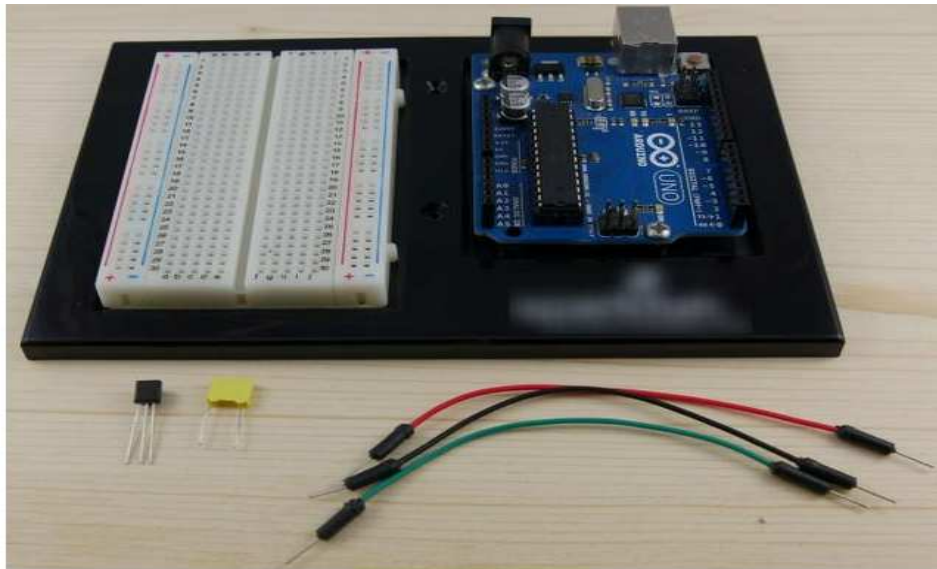


Figure (3.7) : Matériel nécessaire.

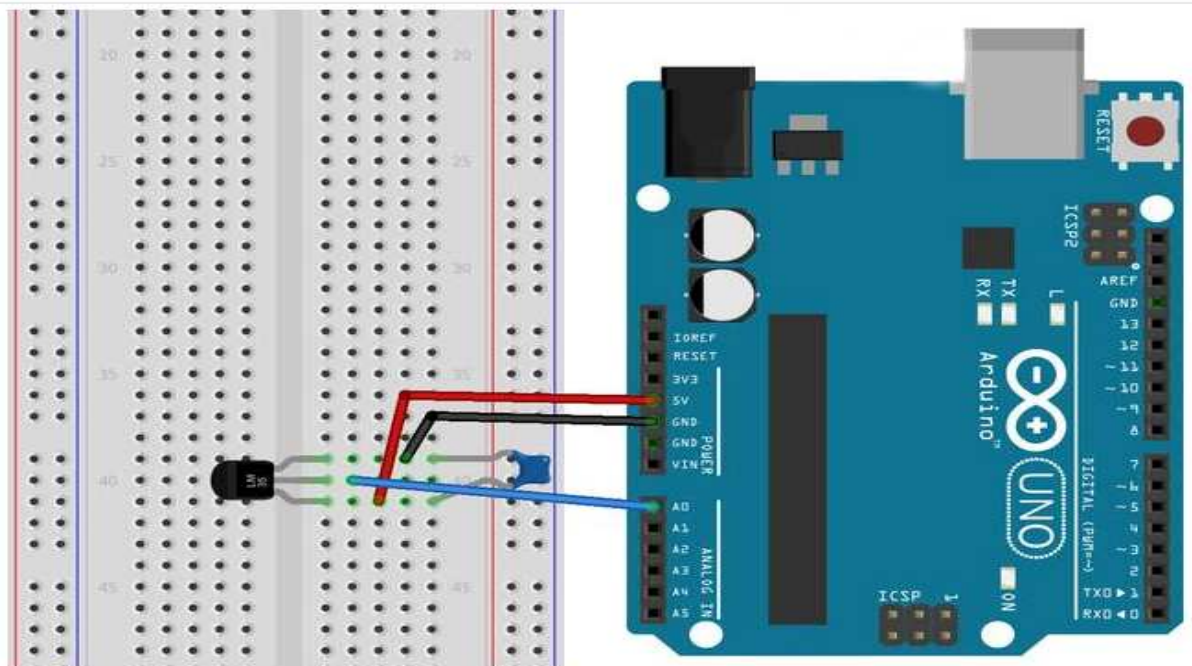


Figure (3.8) : prototypage de montage.

Pour commencer notre montage, nous allons câbler la broche **VCC** du capteur à l'alimentation 5V de la carte Arduino au moyen d'un fil. On fait ensuite de même avec la broche **GND** du capteur qui vient se câbler sur la broche **GND** de la carte Arduino.

Pour faire les choses bien (parce que oui, on aime faire les choses bien), on va venir câbler un condensateur de 100nF (un condensateur de découplage en termes techniques) entre les broches **VCC** et **GND** du capteur. Il faut que le condensateur soit câblé le plus près possible du capteur pour être efficace.

On achève ensuite le circuit en reliant la sortie du capteur à la broche **A0** de la carte Arduino avec un fil.

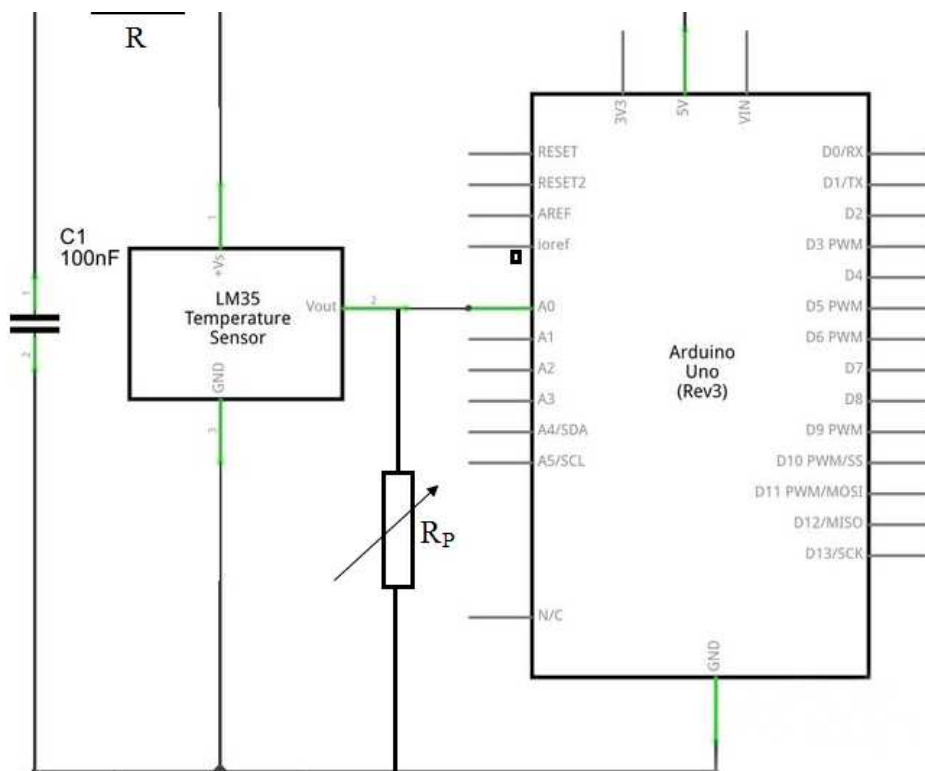
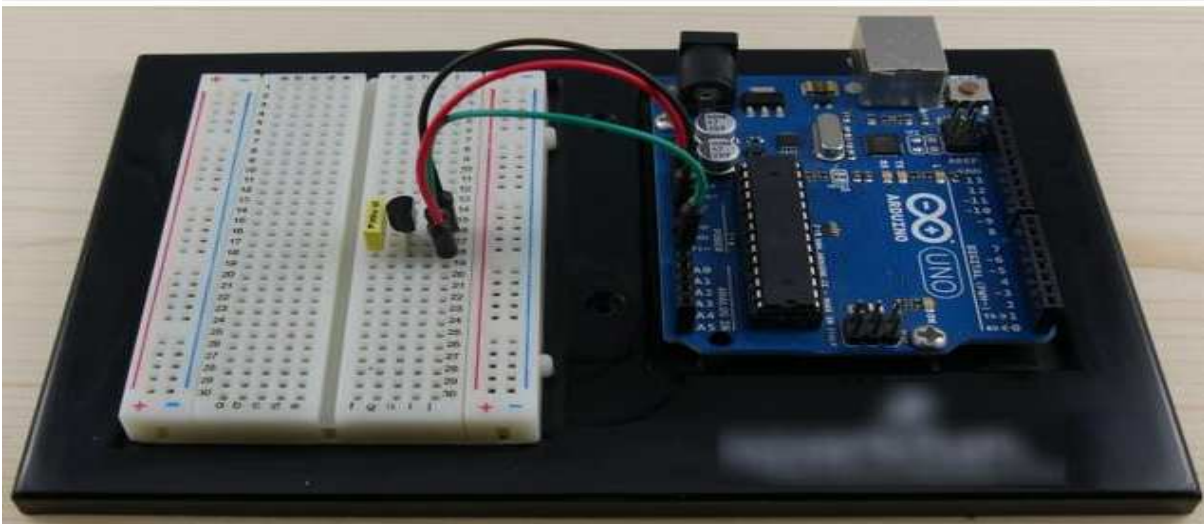


Figure (3.09) : le montage finale



Le code de démonstration :

Maintenant que nous avons notre montage, passons au code !

Le but de notre code va être de :

1. Lire la tension sur la broche **A0**
2. Convertir la valeur mesurée en une température (pour l'affichage)
3. Envoyer la valeur au PC (pour l'affichage)
4. Recommencer au point 1.

Pour réaliser ce morceau de code, nous allons utiliser le logiciel matlab en ayant au préalable ajouté le module arduino via internet.

Resultats experimentaux



Figure (III.10) : Capture d'écran du moniteur série

Après avoir envoyé le programme dans la carte Arduino, en ouvrant le moniteur série (onglet **outils**), puis en sélectionnant la bonne vitesse de communication, on voit apparaître en temps réel la température en sortie du capteur grâce à un afficheur adéquat choisi dans la librairie simulink.

Si votre montage est correct, en plaçant le capteur au congélateur, les valeurs dans le moniteur série doivent changer et descendre en dessous de 0°C.

III.5-Étalonnage d'un capteur de température lm35 : [12]

1. principe et application Comment faire si l'on possède un capteur mais que l'on n'a pas sa caractéristique exacte et faire correspondre une valeur analogique lue avec une donnée physique réelle ? Par exemple, un capteur de température alimenté en 5V sur telle et telle broches, le signal de sortie est une tension en fonction de la température mais on est incapable de dire quelle en est la caractéristique (la courbe de tension en fonction de la température)".

4.1. Prise de mesures :

Voici à titre d'exemple le tableau obtenu :

Température (°C)	Tension (V)
2	0,015
5	0,054
10	0,107
16	0,156
21	0,210
24	0,234
50	0,503

Tableau III.1 : température/tension

4.2. Réalisation de la caractéristique

Lorsque vous avez fini de prendre toutes vos valeurs, vous allez pouvoir passer à l'étape suivante qui est : Calculer la caractéristique de votre courbe

On va en faire deux, une symbolisant les valeurs brutes de la conversion du CAN (entre 0 et 1023) en rouge et l'autre qui sera l'image de la tension en fonction de la température en bleu. Nous pourrions alors déterminer deux caractéristiques, selon ce qui vous arrange le plus.

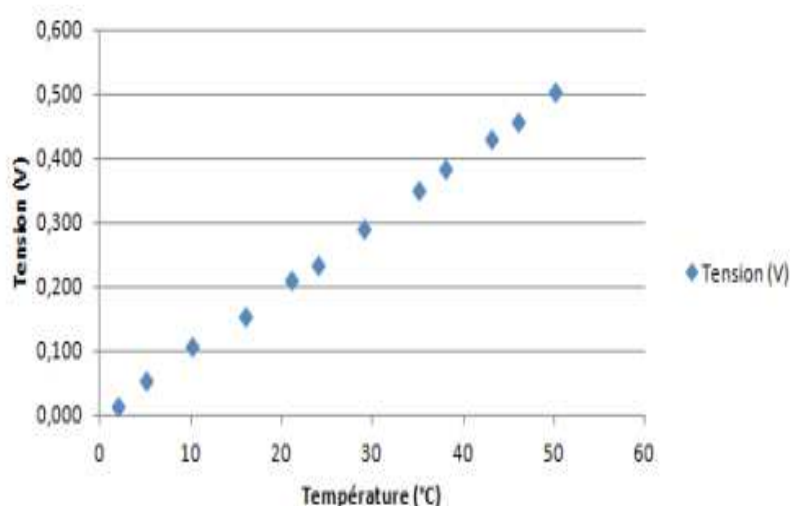
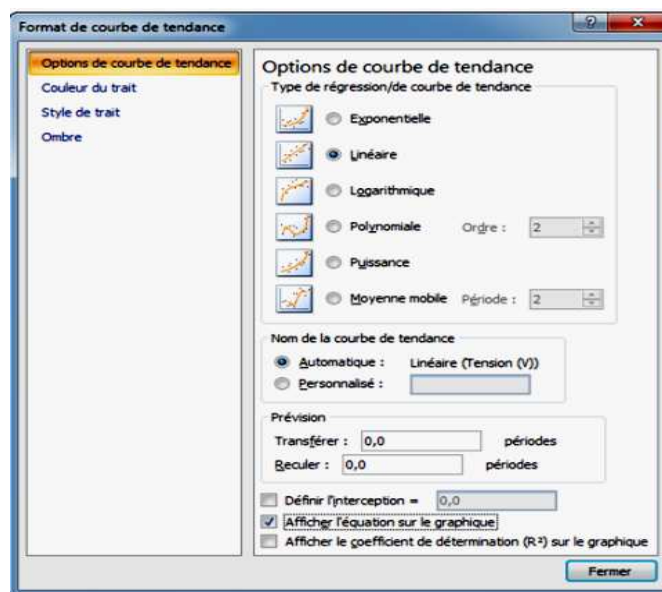


Figure (III.12) : Tension en fonction de la température.

Une fois cela fait, il ne reste plus qu'à demander au logiciel de graphique de nous donner la courbe de tendance réalisée par ces points. Sous LibreOffice calc, il suffit de cliquer sur un des points du graphique et choisir ensuite l'option "Ajouter une courbe de tendance...".

Vous aurez alors le choix entre différents types de courbe (linéaire, exponentielle...). Ici, on voit que les points sont alignés, il s'agit donc d'une équation de courbe linéaire, de type $y=a.x+b$

Cochez la case "Afficher l'équation sur le graphique" pour pouvoir voir et exploiter cette dernière ensuite.



Voici alors ce que l'on obtient lorsque l'on rajoute notre équation :

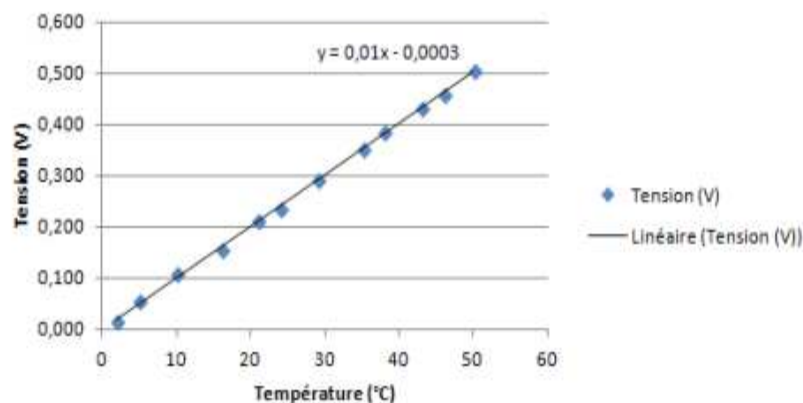


Figure (III.13) : tension en fonction de température

On conclue que la tension en fonction de la température est linéaire

Donc notre gain sera une constante :

$$G=100$$

Par exemple, si nous avons une tension de 300mV, avec la formule trouvée précédemment on déterminera que l'on a $0.3=0.01 \times \text{Température}$, ce qui équivaut à $\text{Température} = 0.3/0.01 = 30^\circ\text{C}$. On peut aisément le confirmer via le graphique.

On effet, pour mesurer une température, nous avons le choix entre de nombreux capteurs : résistances à coefficient de température positif ou négatif, thermocouple, etc.

L'inconvénient de la plupart de ces capteurs est que leur tension de sortie ne varie pas linéairement en fonction de la température, ce qui oblige à une correction pour connaître avec précision la température exacte.

Aujourd'hui, il existe des capteurs à semi-conducteur de grande précision et à sortie linéaire, bon marché et faciles d'emploi. Exemple, le circuit LM335.

A 25°C est avec un courant de 1mA circulant dans le capteur(LM335), la valeur typique de la tension est de 2,98V. La valeur minimum est de 2,92V et la valeur maximum est de 3,04V

La valeur de la résistance R doit être calculée en fonction de +Vcc pour que le capteur soit parcouru par un courant de 1mA. Voici la formule à utilisé pour le calcul de R.

Le potentiomètre $10\text{K}\Omega$ permet de régler le décalage et d'étalonner le capteur.

La relation entre la tension et la température est donnée par la formule suivante :

$$V(T) = v(T) + 0.01(T-T_0)$$

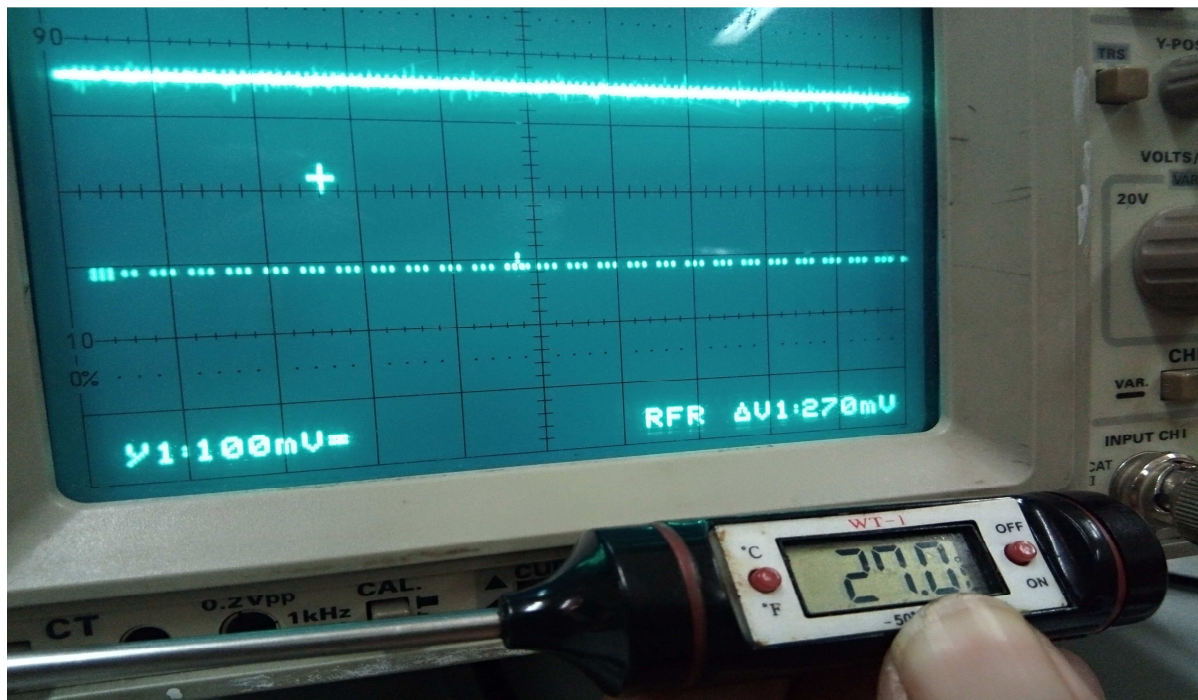
V_T : tension délivrée par le capteur

T : température ambiante

V_{T0} : tension de référence pour une température T_0 . Pour $T_0=25^\circ\text{C}$, $V_{T0}=2,98\text{V}$ on obtient :

$$T (^{\circ}\text{C}) = 100 \times V_T - 273.15$$

III.6-Validation expérimental :



Figure(III.14) : image représentant des résultats du capteur de température.

Après la réalisation de notre capteur de température on a pu observer les résultats donner sur l'image précédente, qui montre la température sentis par ce capteur aux seins du laboratoire. Notre expérience est mener d'unthermomètre externe comme l'onvoit sur l'image, cela nous permet de comparez les résultats de notre capteur de température. En effet on peut bien réaliser que les degré obtenu dans notre laboratoire son identique (sans prendre en considération un ΔC° erreur).

III.7-Conclusion :

En conclusion à notre modeste travail nous pouvons dire que l'expérience que nous avons réalisée nous a été très utile .En effet cela nous a permis de mieux saisir les notions théorique et pratique qui nous ont été dispensées durant le notre travail, cela nous fait a également permis de voir le thermocouple dans sa simplicité mais aussi de manipuler le capteur de température industriel.

IV.1- Introduction :

Pour faire l'étude d'un émulateur photovoltaïque, la première chose est la bonne connaissance du comportement pour le site choisi des panneaux photovoltaïques, exigés par le cahier de charge. Ainsi, pour développer un circuit équivalent précis du comportement d'une cellule PV dans un site définit, il est nécessaire de connaître parfaitement les conditions météorologiques du site. Les paramètres importants sont la température, la lumière et la pression. La majorité des modèles de panneaux photovoltaïque font appel à ces paramètres. La pression est rarement utilisée sauf pour les modèles très précis. Pour nos besoins les modèles faisant appel à la température et la lumière sont largement suffisants.

Ainsi les informations obtenues grâce aux capteurs de température et de lumière du chapitre précédent sont utilisées dans ce chapitre pour simuler en temps réel le comportement d'une station photovoltaïque.

IV.2.Rappels sur la cellule photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir du silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité.

Définition :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière de soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteur comme le silicium ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie externe, l'énergie apportée par les photons qui heurtent les électrons et les libèrent, introduisant un courant électrique c'est l'effet photovoltaïque. Dans ce premier chapitre on commencera par brève

rappelle sur l'énergie photovoltaïque, Nous présenterons ensuite la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque puis décrirons les modèles mathématiques et nous montrerons ensuite l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement.

Une cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques, c'est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire, portée par les photons, en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules porteuses de charge électrique générées dans le dispositif.

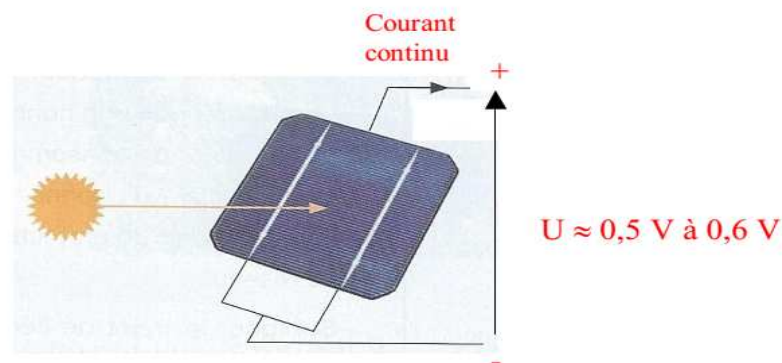


Figure (IV.1) : Cellule photovoltaïque.

IV.3. Cellule photovoltaïque :

IV.3.1. Structure d'une cellule photovoltaïque : La cellule photovoltaïque est une photodiode optimisée pour produire un flux de courant d'électrons en réponse à une irradiation par une lumière utilisant l'effet photovoltaïque. La jonction par laquelle la lumière pénètre dans le semi-conducteur doit être suffisamment mince pour passer la plupart de la lumière sur la région active (région d'appauvrissement) où la lumière est convertie en paires électrons/ trous.

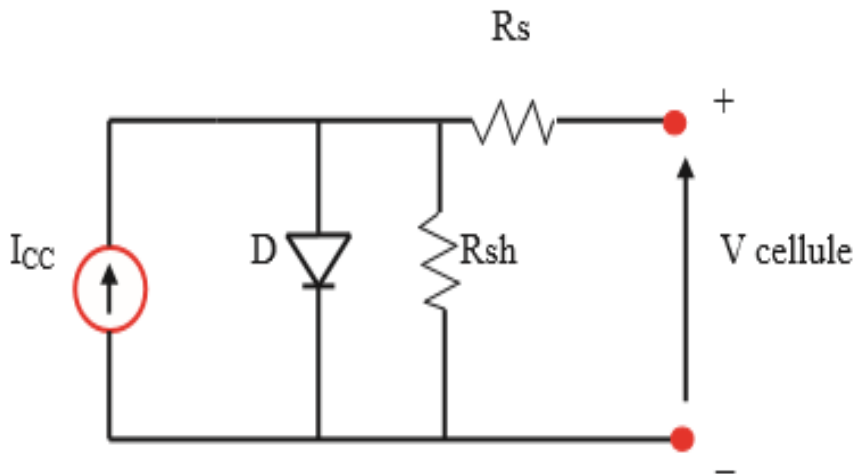


Figure (IV.2) :Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

IV.3. 2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire: Trois phénomènes physiques de base traduisent le fonctionnement d'une cellule solaire :

a- L'Absorption des photons : $h\nu > E_g$

b- La Création de paires électrons/trous : les photons incidents créent des paires électrons-trous dans chacune des régions **N**, **P** et **ZCE**. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création **Figure (IV.3)**:

- **Dans les régions électriquement neutres P et N:** Les photos porteuses minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photo-courant de diffusion.

- **Dans la zone de charge d'espace ZCE:** Les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique ; L'électron est propulsé vers la région de type n, Le trou vers la région de type p. Ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération.

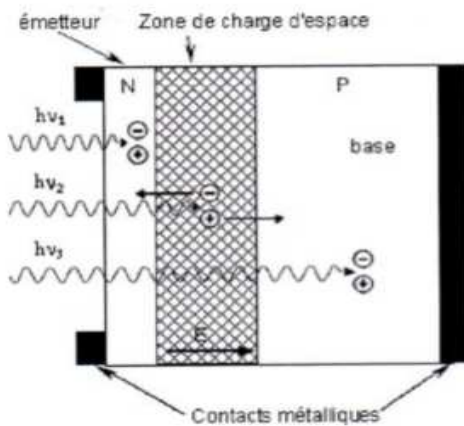


Figure (IV.3)

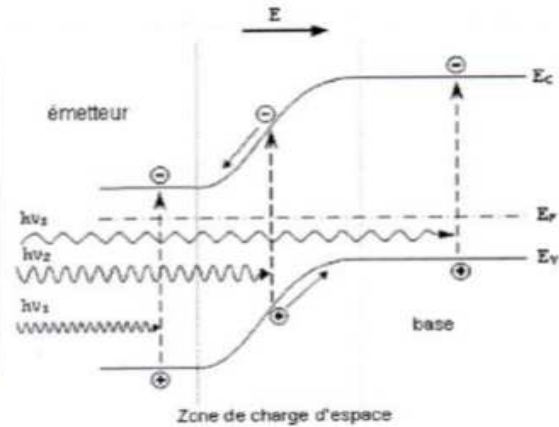


Figure (IV.4)

c- **La Collecte** : sans perte des porteurs créés en le séparant par le champ interne du dispositif (champ jonction ou hétérojonction) dans un circuit électrique extérieur, en reliant les cotés de la jonction à une charge **Rc**, un courant **I** la parcourt et une différence de potentiel apparaît:

$$I = I_{ph} - I_d(v)$$

$$I = I_{ph} - I_s \cdot (e^{\frac{qv}{KT}} - 1) \quad (4.1)$$

Is : Le courant de saturation

I_{ph} : Le courant de court-circuit généré par la lumière

I_d(v) : Courant d'obscurité de la diode

La différence potentielle de contact constitue une barrière d'énergie potentielle donnée par :

$$V_d = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2} \quad (4.2)$$

En l'absence d'une polarisation externe, existe un champ électrique interne qui s'oppose au mouvement des porteurs majoritaires mais qui accélère les minoritaires. Il existe au niveau de la

jonction une barrière de potentiel dont la hauteur est la différence entre les niveaux d'énergie des accepteurs et des donneurs **Figure (IV.4)**.

IV.3.3 Les différents types d'une cellule :

a- Les panneaux PV avec des cellules monocristallines : Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont des 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. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. 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 anti reflet, pose des collecteurs), le wafer devient une cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.

b- Les panneaux PV avec des cellules poly-cristallines : Les panneaux PV avec des cellules poly cristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. 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. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure Poly-cristalline.

c- Les modules photovoltaïques amorphes: Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, Mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. 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. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou

monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grande surface à bas coût en utilisant peu de matière première

IV.3.4 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

a- Cellule photovoltaïque idéal : Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en

Parallèle avec une diode figure (1.6) qui correspondent à l'aire de transition p-n de la cellule PV.

Après la loi de nœuds :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (4.3)$$

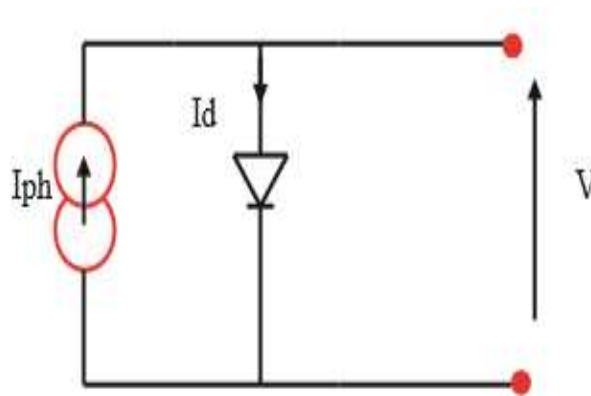


Figure (IV.5) : Modèle de la cellule photovoltaïque idéal

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{v_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (4.4)$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : La tension au borne de diode

$V_t = \frac{KT}{q}$ Potentielle thermique

Donc la relation (4.5) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{v_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (4.5)$$

b- cellule photovoltaïque réel

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p .

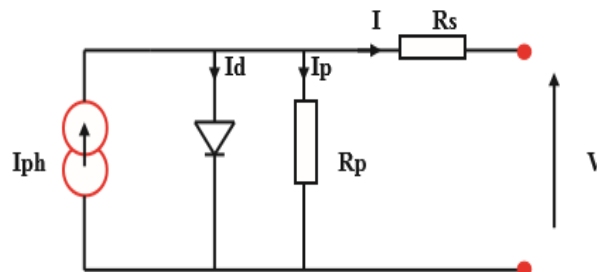


Figure (IV.6) :Modèle de la cellule photovoltaïque réel

Donc on a :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (4.6)$$

$$I_p = \frac{V+R_s.I}{R_p} \quad (4.7)$$

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V+R_s.I}{v}} - 1 \right) \quad (4.8)$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule.

$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{G}{1000} \right)$: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

k : Constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ joule/Kelvin). $e^x = nkqTI$

q : Charge d'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

n : Le facteur de qualité de diode.

T : La température de cellule en kelvin.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+I.R_s}{vt}} - 1 \right) - \left(\frac{V+R_s.I}{R_p} \right) \quad (4.9)$$

IV.3.5 Caractéristique électrique :

IV.3.5 .1 Propriétés :

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique $i = f(v)$ non linéaire **Figure (IV.7)** La caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie 3 quadrants le repère (courant, tension) sur les 4 existants.

Dans le quadrant QII et le quadrant QIV la cellule PV fonctionnent en récepteur. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot) est possible. Dans le quadrant QI, la cellule fonctionne en générateur, c'est le fonctionnement normal, en effet dans ce cas la cellule produit donc de l'énergie. L'objectif est donc de faire travailler la cellule dans le premier quadrant.[19]

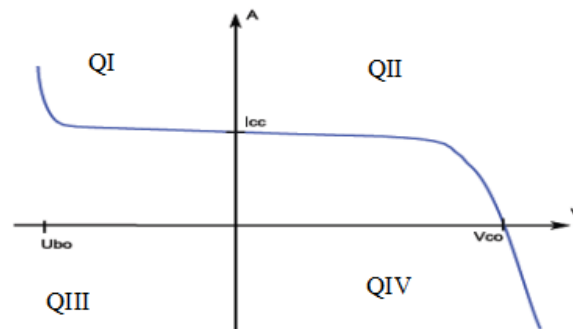


Figure (IV.7) :Caractéristique (I, V) d'une cellule photovoltaïque.

IV.3.5.2 Caractéristique courant-tension et schéma équivalent :

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance continue. On s'aperçoit alors de l'existence d'un point P_m où la puissance est maximale. Il est sans aucun doute intéressant de choisir un récepteur dont l'impédance nous place sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)). La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la **Figure (IV.8)** Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle.

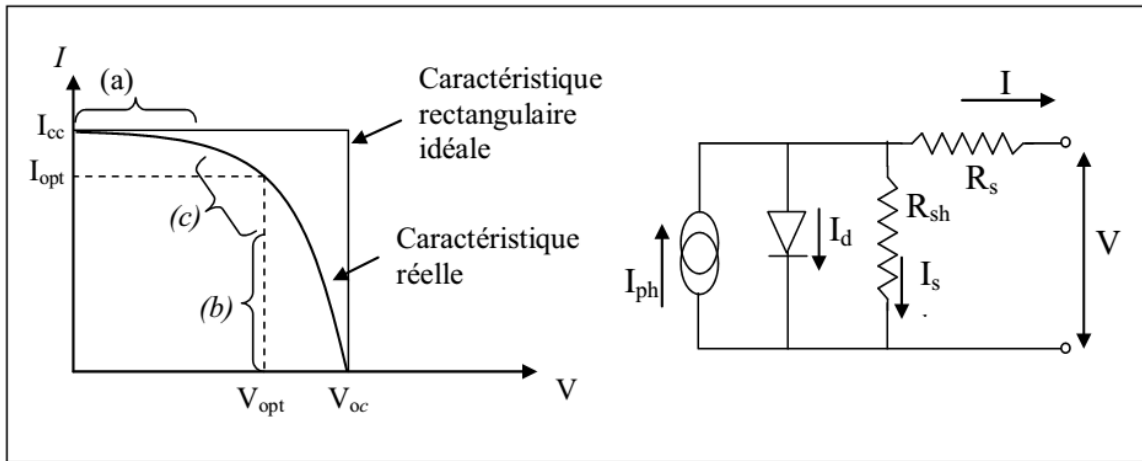


Figure (IV.8) :Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes). Nous pouvons décomposer la caractéristique $I = f(V)$ d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :

- Une zone assimilable à un générateur de courant I_{CC} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$ (Zone a),
- Une zone assimilable à un générateur de tension V_{co} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s (Zone b),
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (zone c). C'est dans la zone c qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple (I_{max}, V_{max}) , et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées.

La caractéristique courant-tension, illustrée dans **Figure (IV.9)**, décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions standard (niveau d'éclairement 1000W/m^2 et température ambiante 25°C).

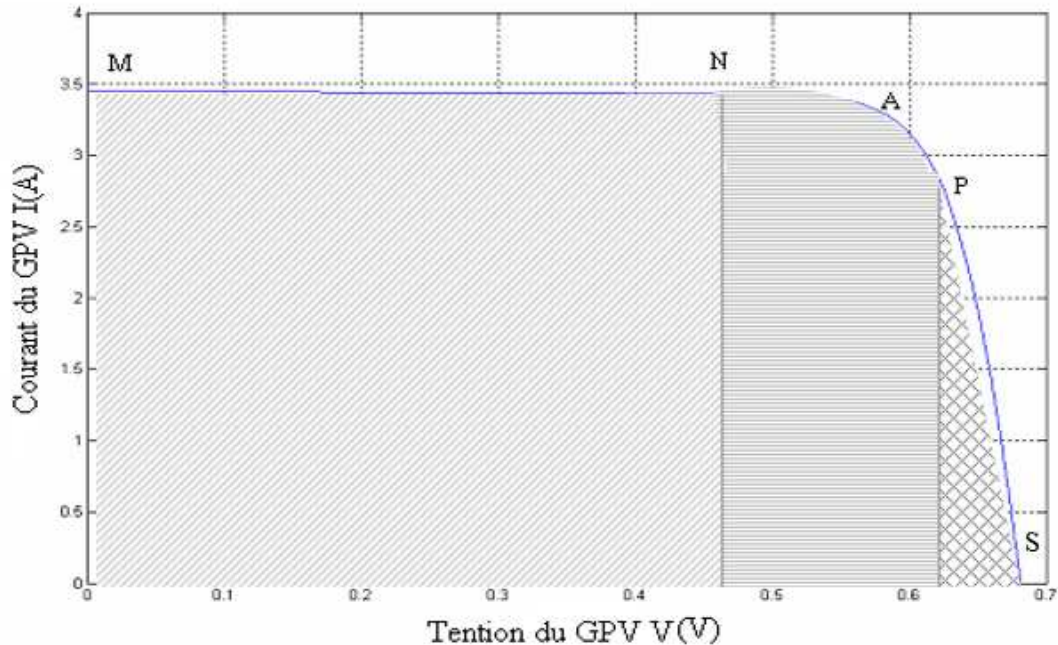


Figure (IV.9) :Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

Avec :

GPV : le générateur photovoltaïque

M : le courant de court-circuit **I_{cc}**

A : la puissance maximale

S : la tension de circuit ouvert **V_{oc}**

La courbe caractéristique d'une cellule PV (**Figure (IV.9)**) représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension à ses bornes, depuis le court-circuit, point M (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert, point S, (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

La courbe de la cellule solaire **I=f(V)** passe par trois points essentiels qui sont (figure 1.8) :

Le courant de court-circuit **I_{cc}** en **M** ;

La tension de circuit ouvert **V_{oc}** en **S** ;

La puissance maximale en **A** ;

En effet, la caractéristique de la cellule solaire $I(V)$, se divise en trois parties :

- La zone (**MN**) se distingue par le courant qui reste constant, quelle que soit la tension. Dans cette zone, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone (**PS**) se distingue par une variation du courant correspondant à une tension presque constante, et c'est dans cette région, que le générateur est assimilable à un générateur de tension.
- La zone (**NP**) correspond au coude de la caractéristique. C'est la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, et elle représente la région préférée pour le fonctionnement (le point optimal peut être déterminé).

Cette caractéristique $I = f(V)$ se met sous la forme mathématique à partir des équations (1.8), (1.9) et (1.10) précédentes comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\left(e^{q \frac{V+R_s I}{A*K*T}} \right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (4.10)$$

Le courant de court-circuit I_{cc} de la cellule photovoltaïque est exprimé par l'expression suivante, lorsque la tension est nulle ($V=0$) :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\left(e^{q \frac{R_s I}{A*K*T}} \right) - 1 \right] - \frac{R_s I}{R_p} \quad (4.11)$$

A un niveau d'éclairement standard (**1 kW/m²**), l'effet de la résistance série est négligeable (point M de la figure (1.8)). Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photo-courant I_{ph} , c'est-à-dire proportionnel à l'éclairement.

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (4.12)$$

Tension de circuit ouvert

Dans le cas du circuit ouvert (point S de la **Figure (IV.11)**), la tension du circuit ouvert peut être exprimée analytiquement selon la formule suivante :

$$V_{oc} = \frac{A*K*T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_s}{I_s} \right) \quad (4.13)$$

IV.3.5.3 Le rendement de conversion :

η définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximal fournie par la cellule et la puissance incidente :

$$\eta = \frac{P_m}{E.S}$$

Avec :

$P_m = I_m.V_m$, est la puissance maximale.

E : l'éclairement en W/m

S : est la surface de ce module

I_m : courant maximal

V_m : tension maximal

IV.3.5.4 La puissance délivrée par une cellule photovoltaïque:

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension pour l'utilisateur c'est celle qui génère de l'énergie, donc ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court-circuit, qui ne génère aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension, donc la puissance maximale génère par la cellule.

- $P_m = I_m \times V_m$
- □ La puissance du panneau constitué des cellules parallèles :
- $P_p = N_p \times I \times V$
- □ La puissance du panneau constitué des cellules série :
- $P_s = N_s \times I \times V$
- □ La puissance du panneau constitué des cellules série et parallèle :
- $P_{ps} = N_p \times I \times V \times N_s$

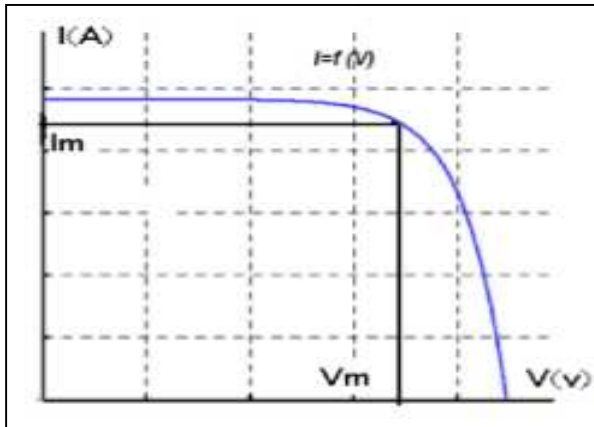


Figure (IV.10) :caractéristique $I=f(v)$.

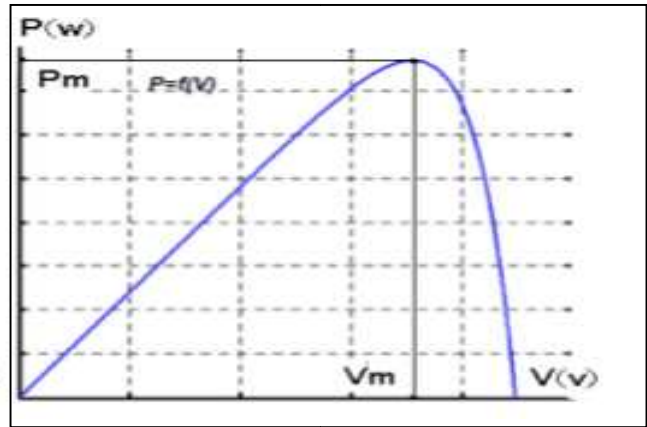


Figure (IV.11) :caractéristique $P=f(v)$

Avec :

- **P_m** : la puissance maximale.
- **I_m** : le courant maximum.
- **V_m** : la tension maximale.
- **N_s** : le nombre des cellules associé en série.
- **N_p** : le nombre des cellules associé en parallèle

IV.4 Paramètres d'un panneau photovoltaïques :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser un panneau solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique

(I , V). **Figure (IV.12)** représente une caractéristique courant-tension (I, V) dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à un bon nombre de paramètres physiques caractérisant le composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) du composant.

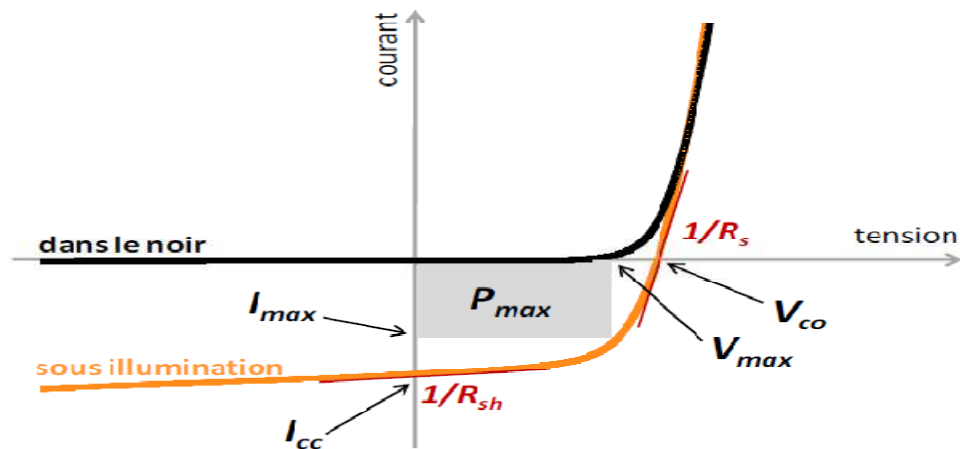


Figure (IV.12) : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

IV.4.1 Courant de court-circuit, I_{CC} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

IV.4.2 Tension à circuit ouvert, V_{Co} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{Co} = \frac{KT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (4.14)$$

Avec :

$\frac{KT_c}{q}$: le potentielle thermodynamique

T_c : La température

q : La constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-19} C$

K : La constante de Boltzmann, $1.38 \cdot 10^{-23} J/k$

I_{ph} : Le courant photonique

I_s : Le courant de saturation

IV.4.3 Point de fonctionnement optimum P_{max} (V_{max} , I_{max}) :

Lorsque la puissance atteint la crête, elle est maximum, cela se produit en plein soleil, pour un maximum de radiation.

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \quad (4.15)$$

IV.4.4 Facteur de forme FF :

Un paramètre important est souvent déduit à partir de la caractéristique (I,V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou *fill factor* (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle de la caractéristique idéale $I_{cc} \cdot V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur tend vers l'unité, plus la puissance exploitable tend vers la puissance maximum idéal. Les meilleures cellules sont celles qui font l'objet de compromis technologiques de tel sorte à approximer au mieux la caractéristique idéale. Ce facteur est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (4.16)$$

IV.4.5 Le rendement

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en énergie. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$H = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (4.17)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

IV.5 Association des cellules photovoltaïques :

IV.5.1 Association en série :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. [16]

$$V_{co} = n_s \cdot V_{co} \quad (4.18)$$

La Figure (IV.13) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques.

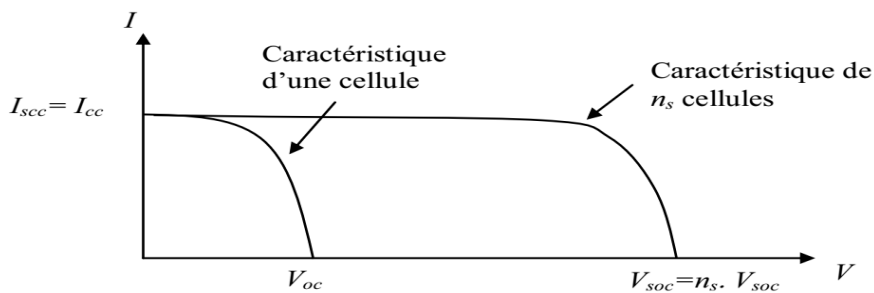


Figure (IV.13) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de nos cellules identiques

IV.5.2 Association en parallèle :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

$$I_{cc} = n_p \cdot I_{cc} \quad (4.19)$$

La Figure(IV.14) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques.

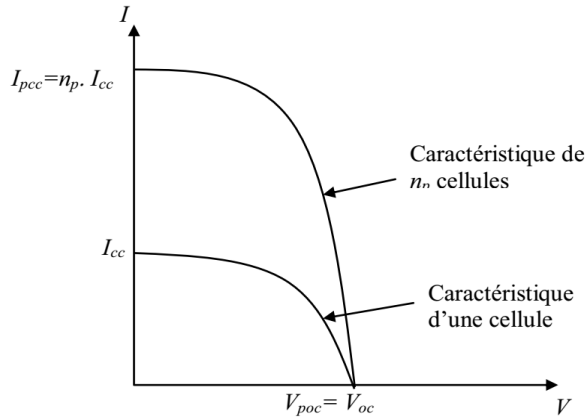


Figure (IV.14) :Caractéristique résultante d’un groupement en parallèle de n_p cellules identiques

IV.6 Modélisation de la cellule photovoltaïque :

IV.6.1 Modèles électriques de la cellule PV :

La modélisation d’une cellule photovoltaïque peut être effectuée selon différents niveaux de complexité. Il s’agit d’obtenir un circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque. Il existe plusieurs

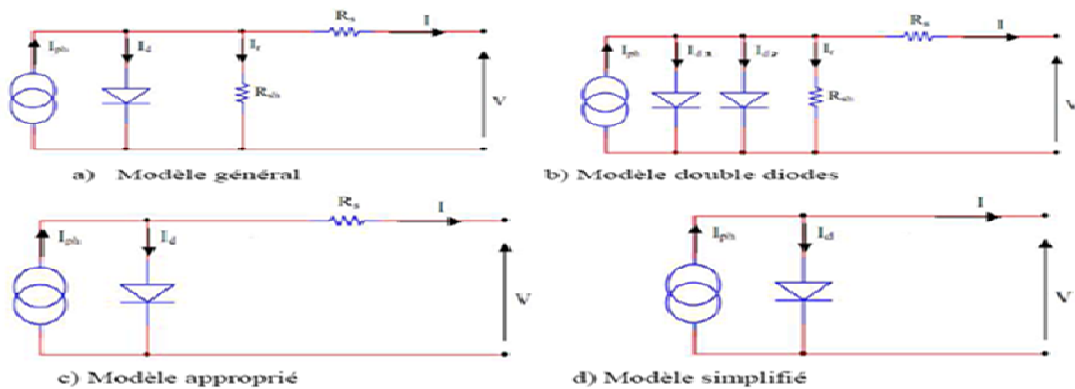


Figure (IV.15) : Modèles électriques de la cellule PV

IV.6.2 Modèles mathématique de la cellule PV :

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque idéale comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN, Figure (IV.16).

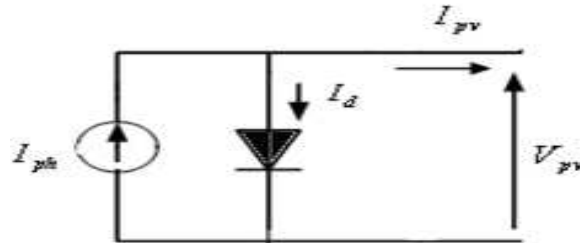


Figure (IV.16) : Schéma équivalent simple d'une cellule photovoltaïque

L'application de la loi de Kirchhoff et de l'expression du courant de la diode mène à l'expression mathématique de ce modèle (IV.16)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (4.20)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique (I,V) est donnée par la relation :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (4.21)$$

Le courant débité équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) \quad (4.22)$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression (4.22):

$$I_s = I_{s_ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c_ref}}\right)^3 \exp\left(\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c_ref}}\right) - \left(\frac{1}{T_c}\right)\right) \quad (4.23)$$

Avec :

I_{PV} : courant fourni par la cellule PV

I_{ph} : courant photo générer

I_d : courant traversant la diode

I_s : courant de saturation de la diode dépendant de la température

V_{PV} : tension de sortie

V_{ph} : tension délivrée par la cellule PV

T: température de la cellule en K

k : constante de Boltzmann ($k=1.38.10^{-23}j/K$)

q : la constante de charge élémentaire ($q = 1.6.10^{-19} C$)

I_{ph_ref} : Le courant photonique sous condition de référence

T_c, T_{c_ref} : La température de cellule, réelle et à la condition de référence

En polarisant électriquement une jonction PN classique à base de Si (Silicium), on obtient les caractéristiques électriques d'une diode. Figure (II.9) La particularité du(Si) est que : lorsque la jonction PN est éclairée, un courant proportionnel à l'éclairement apparaît. C'est cette particularité qui est employée dans les générateurs solaires photovoltaïques. [16]

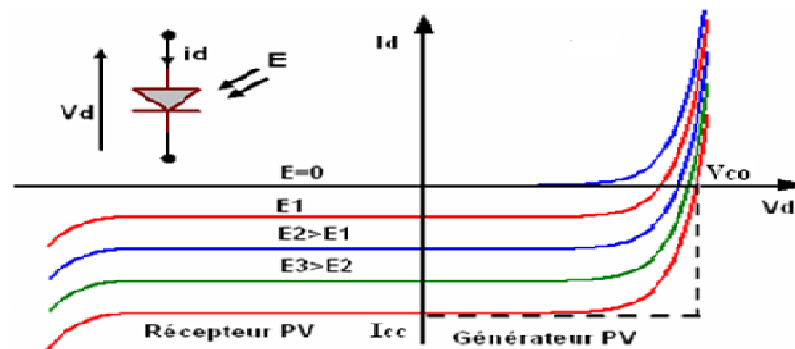


Figure (IV.17) :Caractéristique (I, V) d'une cellule PV sous différents éclairagements E_i

Comme nous pouvons le remarquer sur la caractéristique de la Figure (IV.17)

- Si $V < 0$, la jonction se comporte en photorécepteur.
- Si $V_{co} > V > 0$, elle fonctionne comme un générateur avec un courant de court-circuit I_{CC} proportionnel à l'éclairement.

Les deux modèles mathématiques les plus utilisés sont le modèle à une diode et le modèle à deux diodes, parmi lesquels nous avons choisis celui d'une seule diode.

IV.7 Etudes du modèle à une seule diode (5 paramètres L5P) :

Le modèle fait intervenir les cinq paramètres inconnus suivants: n, I_{ph}, R_s, R_{sh} et I_s . Il est connu sous le nom L5P (Lumped, 1 Mechanism, Parameters).

Ce modèle est désigné aussi par Rp-Model. Il tient compte non seulement des pertes en tension exprimée par la résistance série R_s mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_{sh} . C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data sheet). Il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires.

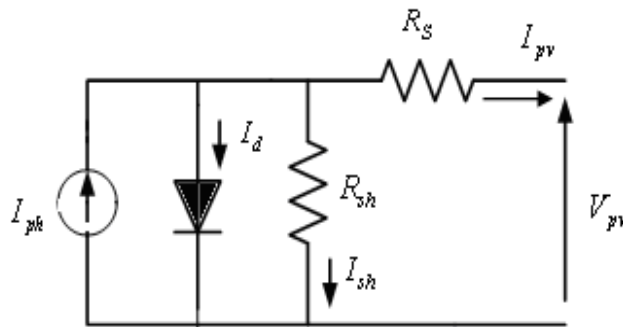


Figure (IV.18) : Schéma équivalent d'un modèle à une diode (L5p) de la cellule [15]

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (4.24)$$

L'expression résultante correspondant à une caractéristique courant-tension pour une température et un éclairage donné s'exprime comme suit :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t n}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \right) \quad (4.25)$$

Avec ;

R_{sh} : Résistance parallèle (shunt)

R_s : $R_s = \frac{K T_c}{q}$: Résistance parallèle représentant le potentiel thermodynamique

T_c : La température absolue

IV.7.1 Simulation du modèle choisi(LSP) :

Une fois le modèle mathématique établi, un programme sous Matlab/Simulink a été réalisé pour simuler notre panneau photovoltaïque. La Figure (IV.19) illustre le modèle de simulation.

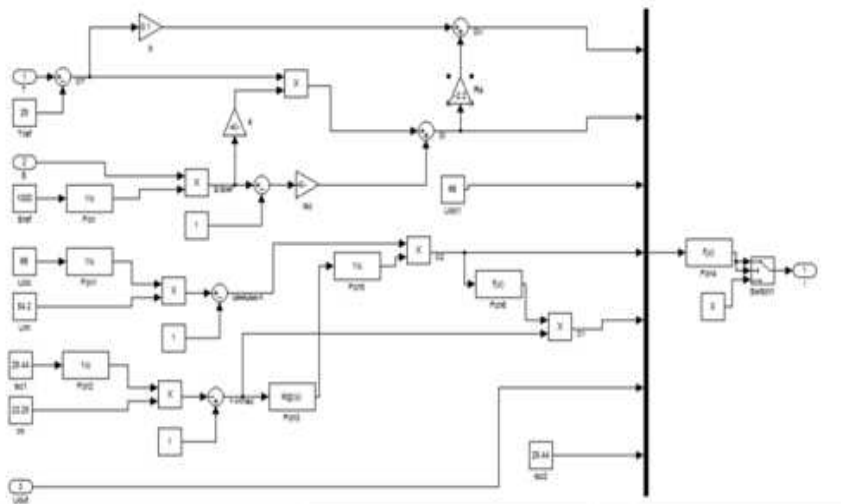


Figure (IV.19) :Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

éclairage standard, G	1000W/m ²
Température standard, T	25°C
Puissance maximale P_{max}	60W
Tension à P_{max} ou tension optimale (V_{opt})	17.1 V
Courant à P_{max} ou courant optimal (I_{opt})	3.5 A
Courant de court-circuit I_{sc}	3.8A
Tension à circuit ouvert V_{CO}	21.1 V
Nombre des cellules en séries	36
Energie de la bande interdite	1.12ev
Coefficient de température de I_{sc}	65 mA/ °C
Coefficient de température de V_{CO}	-80mV/ °C
Coefficient de température de puissance	(0.5±0.05)% /°C
Courant de saturation I_{sat}	20 nA

Tableau (IV-1) : caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX60 Dans les conditions standards «CST».

Dans ce cas, on a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant. [18]

IV.7.2 Résultat de Simulation :

La Figure (IV.20)représente la caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$

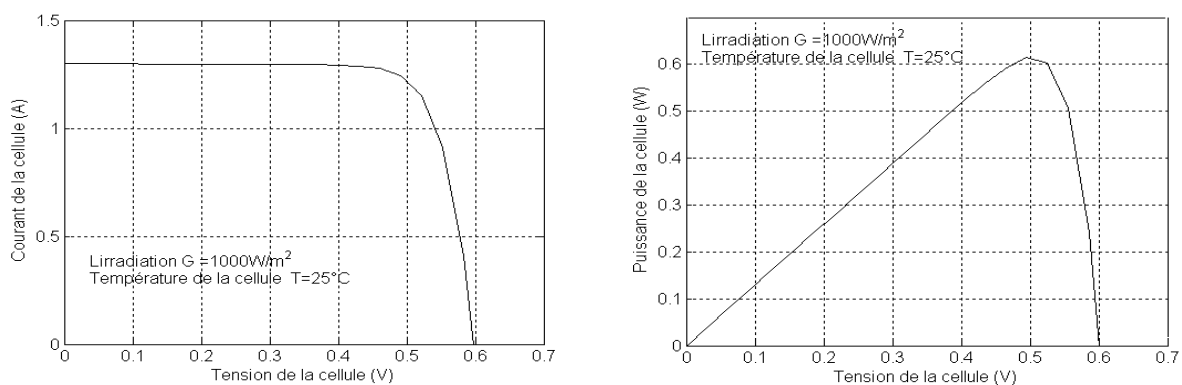


Figure (IV.20) :Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque, L5P.

IV.9 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$:

La figure (II.13-a), montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique

La Figure (IV.23.b) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$.

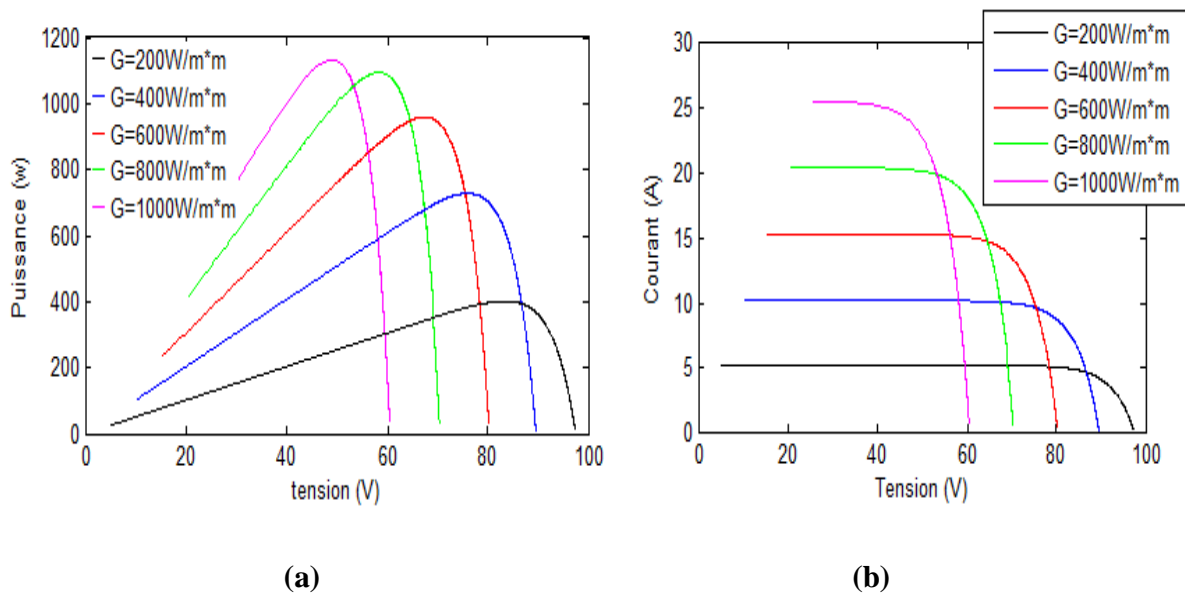


Figure (IV.22) : L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I=f(V)$ (a) et $P=f(V)$ (b)

La figure (II-14-a), montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

La Figure (IV.24.b) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

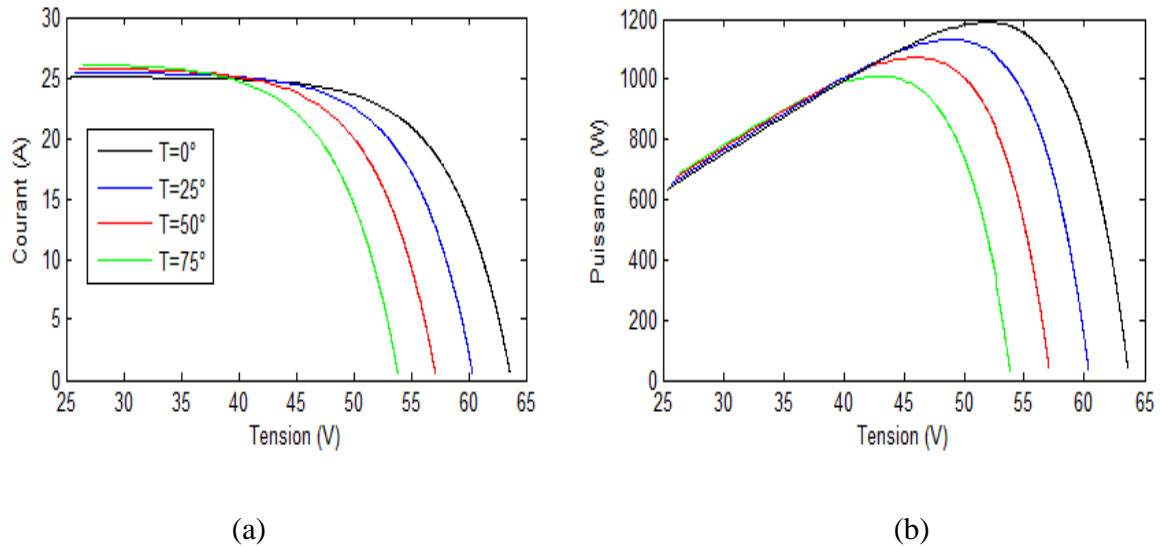


Figure (IV.23) : L'influence de la température sur les caractéristiques $I=f(V)$ (a) et $P=f(V)$ (b)

IV.10 Générateur photovoltaïque :

La cellule PV fait à peu près 150 cm^2 , produit 2,3 Watt-crête (Wc) sous approximativement 0,5V. Cette faible puissance est généralement insuffisante pour la majorité des applications PV domestiques ou industrielles. Afin de fournir au récepteur extérieur une tension et une puissance adéquate, plusieurs cellules PV doivent être connectées entre elles en série, pour former ce qu'on appelle : « un module ». Les modules peuvent être assemblés en série et/ou en parallèle pour former des panneaux (Générateur), eux-mêmes interconnectés pour former un champ PV. [16]

IV.10.1 Fonctionnement d'un Générateur PV à sa Puissance Maximale :

Principe :

La conception globale de systèmes photovoltaïques optimisés est par nature difficile. En effet, côté source, pour un générateur photovoltaïque (PV), la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. Souvent, le comportement de la charge varie brutalement en fonction de la

consommation des utilisateurs, ce qui est souvent difficile à prévoir surtout sur des petits réseaux locaux. Ainsi, pour qu'une connexion source-charge soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des caractéristiques électriques doit exister. Pour mieux comprendre ceci, prenons par exemple le cas d'une connexion directe entre un générateur PV et une charge. Nous regardons l'influence de la nature de la charge qu'elle soit une simple charge résistive R ou bien même une batterie, comme illustré dans la Figure (IV.25) où les points PPM1 et PPM2 correspondent au fonctionnement optimal du générateur PV.

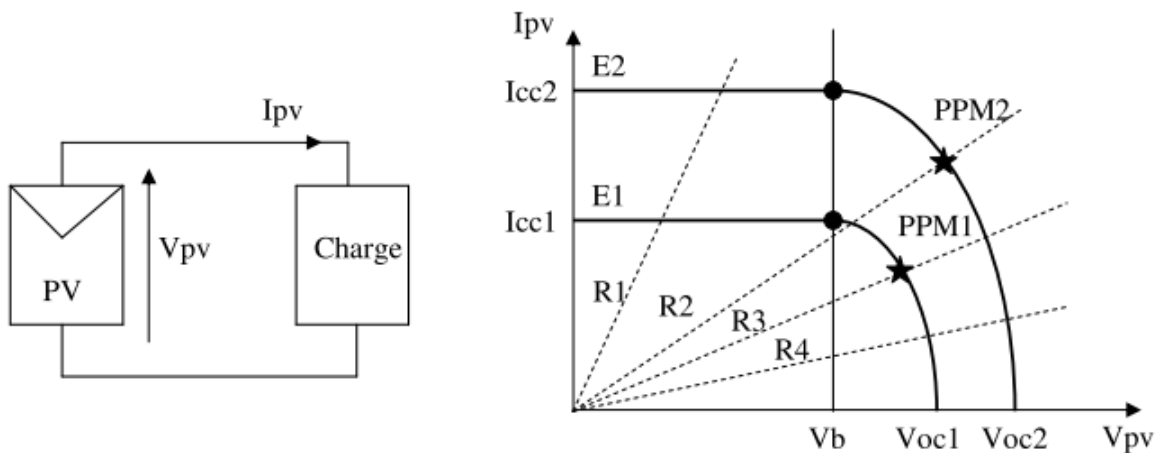


Figure (IV.24) : a) Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge.

b) Points de fonctionnements résultant de l'association du générateur

PV sous deux niveaux d'éclaircements ($E1$, $E2$) avec une charge soit résistive R variable ($R1$, $R2$, $R3$, $R4$) ou bien d'une batterie (Vb).

Comme nous pouvons le constater sur la Figure (IV.25) (b), le fonctionnement du générateur PV dépend fortement des caractéristiques de la charge à laquelle il est associé. En effet, pour la charge résistive de différentes valeurs, l'adaptation optimale ne se produit que pour un seul point de fonctionnement particulier, nommé Point de Puissance Maximal (PPM), il est noté dans notre cas PPM1 et PPM2. Ceux-ci correspondent à la puissance maximale que peut délivrer un générateur PV pour une courbe $I(V)$ donnée. Pour la charge de type batterie, le point de connexion source-charge n'est pas optimal. Ainsi, lorsque l'on réalise une connexion directe source-charge, le rendement de l'ensemble est alors rarement optimal.

IV.10 .2 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge :

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (II-17). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{MAX} disponible.

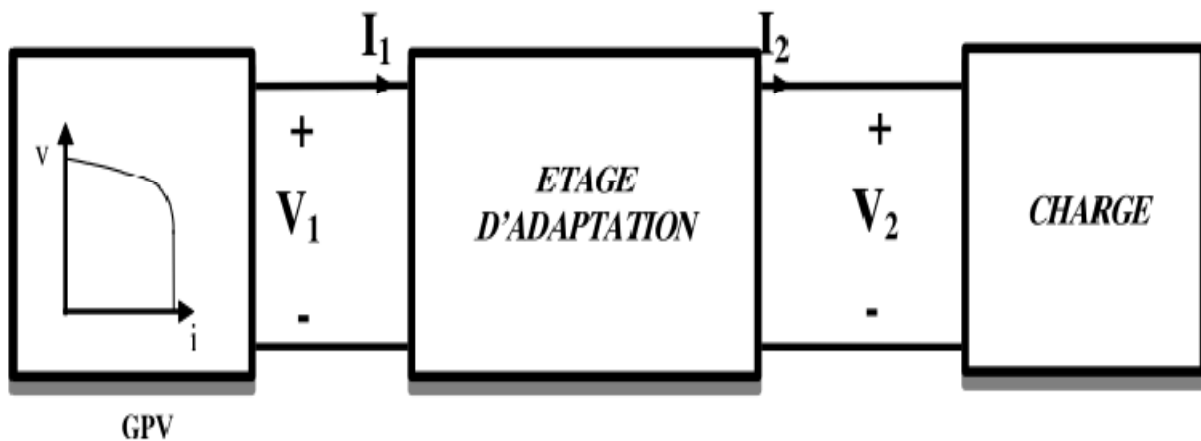


Figure (IV.25) : Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P_{MAX} du GPV.

Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale notée P_{max} ($P_{max} = V_{opt}I_{opt}$, où V_{opt} et I_{opt} représentent respectivement les tensions et courants optimaux du générateur PV pour une courbe $I(V)$ donnée) tout en assurant que la tension ou bien le courant de la charge correspond bien aux caractéristiques de cette dernière.

IV.10 -Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des caractéristiques électriques fondamentales d'une cellule photovoltaïque (module photovoltaïque) et les circuits équivalents ont été décrits. Ainsi nous avons présenté les différents modèles électriques caractérisant les cellules photovoltaïques, comme tous les systèmes physiques, la modélisation d'un système photovoltaïque conduit à l'établissement des équations mathématiques régissant la dynamique de ce dernier, d'où un modèle est la représentation mathématique d'une entité réelle et de son fonctionnement : quand on dispose d'un modèle, on peut simuler le comportement de cette entité. L'objectif de ce chapitre consiste donc à obtenir par simulation, les caractéristiques électriques et le comportement d'un système photovoltaïque en utilisant l'environnement de simulation Matlab .

L'objectif de ce travail était la conception et la réalisation d'un capteur de température et un capteur de lumière pour un émulateur solaire. Ceci était dans le but de disposer d'un outil de laboratoire performant, permettant d'effectuer des travaux de recherche expérimentaux sans avoir besoin d'un module PV, ni entravé par des conditions climatiques défavorables (absence du soleil).

L'usage d'un tel dispositif dans des applications qui concerne l'énergie solaire photovoltaïque comme les algorithmes de recherche du point de puissance maximale permet un gain considérable en temps et en coût.

Avant d'entamer le travail sur les deux capteurs précédant pour l'émulateur on a commencé par une généralité sur l'électronique de puissance en générale, cette dernière est une base essentielle dans notre réalisation. Ensuite Le deuxième chapitre a été consacré pour la réalisation d'un capteur de lumière pour cela on a pris une photorésistance. On trouve aussi un aperçu sur quelques techniques de recherche du point de puissance maximale, tous ceci à été exploité afin de tester le comportement de l'émulateur. Le troisième chapitre est consacré à la réalisation d'un capteur de température pour cela on a pris comme exemple un capteur LM35.

Au dernier chapitre on a présenté les résultats expérimentaux issus des essais effectués dans notre laboratoire sur nos capteurs de l'émulateur. Et afin d'approuver la conformité des caractéristiques de ce dernier avec celles d'un vrai module PV, on a appliqué deux techniques de recherche du point de puissance maximale. Les résultats obtenus ont été, aussi, présentés dans ce chapitre.

Les résultats des essais effectués sur les capteurs précédents de l'émulateur solaire réalisés montrent ses différentes caractéristiques pour différentes conditions météorologiques :

- Les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ pour une température à temps réel.
- La caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ pour un éclairement à temps réel.

Ces résultats nous ont permis de constater que ses caractéristiques sont, dans une large mesure, identiques à celles d'un vrai module photovoltaïque. Afin de valider les résultats de notre réalisation, nous avons appliqué deux techniques qui ont donné des résultats très acceptables, expliqués ci-après :

Un temps permettre extérieur et un tableau de conversion tension /lumen.

- [1] Michel Pinard <<Convertisseurs et électronique de puissance. Commande, Description et Mise en œuvre>>. Edition DUNOD 2007.
- [2] R. Kechenoura, <<étude des pertes dans les convertisseurs statiques>>, Thèse de doctorat juin 2015 UMMTO.
- [3] G.Séguier, F.labrique, Ph.Delarue, électronique de puissance <<Structure, commandes, applications
- [4]<http://www.plexim.com>
- [5] <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE>
- [6] <http://www.powersimtech.com>
- [7] http://www.euedia.tuiasi.ro/lab_ep/ep_files/Lucrarea_6_img.pdf
- [8] http://www.cnes.fr/automne_modules_files/standard/public/p2980_38e881f07a21dc626e945801b66ca69eRapportlyceedoisneau0607.pdf
- [9] http://www.planetesciences.org/espace/pages_clubs/mouisoscope_furobalex_2005.pdf
- [10] http://www.lerepairedessciences.fr/terminale_S/ECE/Photor%C3%A9sistance.pdf
- [11] www.manuel-esteban.com/arduino-capteur-de-luminosite/.
- [12] http://projet.eu.org/pedago/sin/ICN/1ere/6-capteur_etalonnage.pdf
- [13] : LIVRE / George ASCHE ET COLL/ les capteurs en instrumentation INDUSTRIELLE /6eme édition « dunod 2006 ».
- [14]
- [15]Mustapha Elyaqouti& al « Modeling and Simulation of an Emulator of PhotovoltaicGenerator » Communications on AppliedElectronics , Volume 5 – No.8, August 2016
- [16] Takudzwa Benedict Tapfumanei « Solar ArrayEmulator » Master of Science , Faculty of Engineering at StellenboschUniversity 2016
- [17]Belkaid Abdelhakim « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversionphotovoltaïque autonome » Doctorat en sciences, Université de Sétif, 2015
- [18] BENSACI Wafa « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » mémoire de master, UniversitéKasdiMerbah–Ouargla 2012
- [19] HelaliKamelia « modélisation de la cellule photovoltaïque » mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2012

Chapitre II

II.8.1-la loi d'étalonnage du capteur de lumière

$$T = 0.6182 \ln(\text{Lum}) - 3.5445.$$

$$T = 0.6182 \ln(620) - 3.5445$$

$$T = 0.430 \text{ volt.}$$

Chapitre III

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(e^{\frac{qv}{kT}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

I_s : Le courant de saturation

I_{ph} : Le courant de court-circuit généré par la lumière

$I_d(v)$: Courant d'obscurité de la diode

La différence potentielle de contact constitue une barrière d'énergie potentielle donnée par :

$$V_d = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2} \quad (4.2)$$

la loi de nœuds : $I = I_{ph} - I_d$ (4.3)

La caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{v_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (4.4)$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : La tension au borne de diode

$$V_t = \frac{KT}{q} \text{ Potentielle thermique}$$

Donc la relation (4.5) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{v_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (4.5)$$

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (4.6)$$

Annexes

$$I_p = \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (4.7)$$

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V+R_s I}{V}} - 1 \right) \quad (4.8)$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule.

$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{G}{1000} \right)$: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

k : Constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ joule/Kelvin). $e^x = n k q T I$

q : Charge d'électron $= 1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

n : Le facteur de qualité de diode.

T : La température de cellule en kelvin.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+I R_s}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (4.9)$$

Cette caractéristique $I = f(V)$ se met sous la forme mathématique à partir des équations (1.8), (1.9) et (1.10) précédentes comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\left(e^{q \frac{V+R_s I}{A \cdot K \cdot T}} \right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (4.10)$$

Le courant de court-circuit I_{cc} de la cellule photovoltaïque est exprimé par l'expression suivante, lorsque la tension est nulle ($V=0$) :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\left(e^{q \frac{R_s I}{A \cdot K \cdot T}} \right) - 1 \right] - \frac{R_s I}{R_p} \quad (4.11)$$

Dans le cas du circuit ouvert (point S de la **Figure (IV.11)**), la tension du circuit ouvert peut être exprimée analytiquement selon la formule suivante :

$$V_{oc} = \frac{A \cdot K \cdot T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_s}{I_s} \right) \quad (4.13)$$

Annexes

η définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximal fournie par la cellule et la puissance incidente :

$$\eta = \frac{P_m}{E.S}$$

Avec :

$P_m = \mathbf{I}_m \cdot \mathbf{V}_m$, est la puissance maximale.

E : l'éclairement en $\mathbf{W/m}$

S : est la surface de ce module

\mathbf{I}_m : courant maximal

\mathbf{V}_m : tension maximal

L'application de la loi de Kirchhoff et de l'expression du courant de la diode mène à l'expression mathématique de ce modèle (IV.16)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (4.20)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique (I, V) est donnée par la relation :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (4.21)$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression (4.22):

$$I_s = I_{s,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \exp\left(\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c,ref}} \right) - \left(\frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (4.23)$$

Avec :

I_{PV} : courant fourni par la cellule PV

I_{ph} : courant photo générer

I_d : courant traversant la diode

I_s : courant de saturation de la diode dépendant de la température

V_{PV} : tension de sortie

V_{ph} : tension délivrée par la cellule PV

T : température de la cellule en K

k : constante de Boltzmann ($k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)

q : la constante de charge élémentaire ($q=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

$I_{ph,ref}$: Le courant photonique sous condition de référence

$T_c, T_{c,ref}$: La température de cellule, réelle et à la condition de référence