

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI TIZI-OUZOU

FACULTÉ DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

LABORATOIRE DE PHYSIQUE ET CHIMIE QUANTIQUE



Mémoire de Master

SPÉCIALITÉ :

Nanophysique

PRÉSENTÉ PAR :

LIMANE Gaya

Conception d'une chaîne complète capteurs-acquisition pour laboratoire pédagogique de physique.

SOUTENU LE 11/07/2023 DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

LOUNIS AMEL	MAÎTRE DE CONFÉRENCES B	UMMTO	PRÉSIDENT
DJOUDER MADJID	MAÎTRE DE CONFÉRENCES A	UMMTO	RAPPORTEUR
AINOUCHE LYNDA	MAÎTRE DE CONFÉRENCES B	UMMTO	CO-RAPPORTEUR
LAMROUS OMAR	PROFESSEUR	UMMTO	EXAMINATEUR
MITICHE M. DJERDJER	PROFESSEUR	UMMTO	EXAMINATEUR
HAMIDI MAHDI	MAÎTRE DE CONFÉRENCES A	UMMTO	EXAMINATEUR

Année universitaire 2022/2023

Dédicace

Je dédie ce travail

à mes Parents

à mon frère

Remerciements

Les travaux préparatoires de la recherche ont été réalisés au sein du Laboratoire de Physique et Chimie Quantique (LPCQ) de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Je tiens à remercier vivement le Professeur Mezeghrane AbdeLaziz, directeur du laboratoire LPCQ pour son accueil, au sein du Laboratoire (LPCQ).

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers mon directeur de thèse, Monsieur DJOUDER MADJID, ainsi que ma co-promotrice, Madame AINOUCHE LYNDA, pour leur accompagnement généreux tout au long de ce projet. Leur expertise, leur patience et leur soutien constant ont été d'une valeur inestimable pour moi. Leurs conseils avisés et leur dévouement ont grandement contribué à la rédaction de mon mémoire. Je leur suis sincèrement reconnaissant pour leur engagement et leur précieuse contribution tout au long de ce processus.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers tous les enseignants de l'UMMTO qui ont joué un rôle essentiel dans ma formation tout au long de mon parcours au sein de cette université.

Je tiens à remercier sincèrement Mme LOUNIS Amel pour avoir accepté de présider le jury, ainsi qu'à Mr LAMROUS Omar, M. MITICHE Djerdjer et M. HAMIDI Mahdi pour avoir consacré leur temps à examiner ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes mes amies de la promotion pour les merveilleux souvenirs que nous avons partagés ensemble. Sans oublier les doctorants pour leurs conseils et leurs disponibilité à tout moments.

Je souhaite adresser mes derniers remerciements, mais certainement pas les moindres, à mes parents. Leur soutien indéfectible et leur présence ont été essentiels pour que je puisse réaliser ce travail. Je leur suis extrêmement reconnaissant pour leur soutien inconditionnel et leur confiance en moi.

Résumé

Ce mémoire présente le prototype d'un banc de mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, destiné à l'enseignement de la physique au niveau du lycée et de la licence. Le banc est composé de capteurs optiques et thermiques, d'une source de lumière, d'un élément chauffant et d'un mécanisme de déplacement. Il est piloté par un logiciel interactif implémenté en Python, qui permet de contrôler les paramètres expérimentaux et d'acquérir et afficher les données en temps réel. Le document propose également un exemple d'énoncé de travaux pratiques basé sur le banc, qui vise à étudier la relation entre le rendement des cellules photovoltaïques, l'intensité lumineuse et la température.

Mots-clés Banc de mesure, Cellule photovoltaïque, Capteurs optiques et thermiques, Logiciel de commande, Travaux pratiques.

Abstract

This thesis presents the prototype of a measurement bench for the characteristics of a photovoltaic cell, designed for teaching physics at the high school and undergraduate levels. The bench is equipped with optical and thermal sensors, a light source, a heating element, and a movement mechanism. It is controlled by an interactive software implemented in Python, which allows for controlling experimental parameters and acquiring and displaying real-time data. The document also provides an example of a practical work statement based on the bench, aimed at studying the relationship between the efficiency of photovoltaic cells, light intensity, and temperature.

Keywords Measurement bench, Photovoltaic cell, Optical and thermal sensors, Control software, Practical exercises.

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	ii
Liste des tableaux	iv
Introduction générale	1
I Capteurs optiques et thermiques. Photovoltaïque	2
I.1 Introduction	2
I.2 Capteurs de lumière	2
I.2.1 Photodiode	3
I.2.2 Photoresistance :	5
I.2.3 Phototransistor :	5
I.3 Avantages et inconvénients :	6
I.4 Cellules photovoltaïques :	7
I.4.1 Rendement :	7
I.4.2 Paramètres influents sur le rendement :	7
I.4.3 Puissance des cellules photovoltaïque :	8
I.5 Capteurs de température :	11
I.5.1 Thermocouples :	11
I.5.1.1 Principe de fonctionnement :	11
I.5.1.2 Types de thermocouples :	13
I.5.2 Thermistance :	15
I.5.2.1 Utilisation courante :	15
I.5.2.2 Principe :	15
I.5.2.3 Type de Thermistance :	16

I.5.2.4	Comparaison :	17
II	Banc de mesures des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	19
II.1	Description du banc d'essai	19
II.2	Logiciel de commande	22
II.3	Exemple d'un énoncé de TP :	24
II.3.1	Principe et objectif :	25
II.3.2	Aperçu théorique :	25
II.3.3	Manipulations :	28
II.3.3.1	Réglage initial :	28
II.3.3.2	Étude préliminaire : Loi des carrés inverses	28
II.3.3.3	Tension de circuit ouvert et influence de la température	28
II.3.3.4	Tension et courant en charge et influence de la température	29
	Conclusion générale	30
	Bibliographie	31

Table des figures

I.1	représentation de la création de pair électrons-trou dans les 3 régions de la photodiode. [1]	3
I.2	Comportement des photodiode sous différentes intensités d'illumination en fonction du voltage appliqué. [1]	4
I.3	Diagramme de bande d'énergie d'une photodiode en mode photométrique (gauche) et photovoltaïque (droite). [2]	5
I.4	Circuit équivalent pour phototransistor (gauche) et Symbole des phototransistor NPN et PNP (droite).	5
I.5	Courbe courant-tension (gauche), puissance-tension (droite) pour différentes températures, courbe puissance-tension pour différents flux de rayonnement (bas). [6]	10
I.6	Schéma représentant un thermocouple. [7]	12
I.7	Calibration d'un thermocouple dans l'eau à 0°C	12
I.8	Résistance en fonction de la température pour thermistor ctn (gauche) et ctp (droite) [9]	16
II.1	Schéma du banc d'essai.	20
II.2	Images des différents composants du banc d'essai.	21
II.3	Image du logiciel de commande.	23
II.4	Schéma d'étalonnage de la thermistance.	23
II.5	Courbe tension-température de la thermistance.	23
II.6	Extrait d'une partie du code python utiliser pour lire et afficher les données.	24
II.7	Diagramme représentant le fonctionnement de la loi en carré inverse.	25

II.8 Schéma de circuit permettant la mesure de V_{co} et I_{cc} en fonction de la résistance de charge.	26
II.9 Caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule photovoltaïque.	26
II.10 Tensions a appliquer au entrés du dispositif.	27

Liste des tableaux

I.1 Composition des différents types de thermocouples. 13

Introduction générale

La Physique et la Chimie sont des sciences principalement expérimentales. Leur enseignement dans l'éducation nationale et dans les universités doit donc prendre en compte cette particularité. C'est d'autant plus important que l'attrait de ces sciences chez les nouvelles générations tend à se réduire considérablement. C'est le constat amer établi il y a déjà plusieurs années par la communauté universitaire.

Il est certain que cet état de fait n'est pas le résultat d'une seule cause. Ce que nous proposons ici est de rendre, dans l'enseignement de la physique, son aspect expérimental en multipliant les travaux pratiques des élèves et des étudiants. Malheureusement cela reste difficile à réaliser à cause du cout financier que cela peut engendrer.

Notre travail, proposé par M. Djouder et Mme Aïnouche dans le cadre de la promotion des startups, consiste à fabriquer le prototype d'un banc de mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque à l'adresse des lycées et des universités. Un logiciel dédié est conçu pour piloter ce banc par ordinateur. Dans le premier chapitre on donne un aperçu sur les capteurs utilisés dans le prototype, à savoir les capteurs optiques et thermiques. On donne aussi un aperçu du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et ses principales caractéristiques optoélectriques.

Dans le second chapitre on décrit le prototype du banc ainsi qu'une proposition d'un énoncé de travaux pratique.

Chapitre I

Capteurs optiques et thermiques.

Photovoltaïque

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons la définition du phénomène de photoélectricité et de thermoélectricité, ainsi que celle des semi-conducteurs. En outre, nous procéderons à une brève description de certains composants électroniques qui exploitent ces effets pour convertir l'intensité lumineuse et la température en grandeurs électriques, faciles à mesurer, afin de permettre la déduction de leurs valeurs.

I.2 Capteurs de lumière

Les semi-conducteurs sont des matériaux qui ont une conductivité électrique intermédiaire entre les isolants et les conducteurs. Ils sont utilisés pour créer des dispositifs optoélectroniques qui exploitent l'effet photoélectrique tels que les cellules photovoltaïques, les photodiodes, les photorésistances et les phototransistors.

Ces composants sont basés sur des jonctions de semi-conducteurs dopées positivement ou négativement avec des taux différents selon l'utilisation.

I.2.1 Photodiode

La photodiode est un dispositif électronique utilisant l'effet photoélectrique pour détecter la lumière. Elle est composée d'une jonction PN ou PIN (Page 4), constituée de deux matériaux semi-conducteurs de type P (abondance de trous) et de type N (abondance d'électrons). Lorsqu'elle est polarisée en mode inverse, la photodiode génère une paire électron-trou lorsqu'elle est frappée par un photon, augmentant ainsi le courant de fuite inverse proportionnellement à l'intensité lumineuse. Ce principe de fonctionnement repose sur l'absorption des photons par le matériau semi-conducteur, ce qui excite les électrons de la bande de valence à la bande de conduction, créant ainsi une paire électron-trou qui contribue à la conductivité du matériau. Les porteurs de charge ainsi créés peuvent être séparés par le champ électrique présent dans la zone de charge d'espace (ZCE), qui est une région dépourvue de porteurs majoritaires près de la jonction PN. En conséquence, un courant électrique, appelé photo-courant, se crée dans le circuit externe relié à la photodiode.

La photodiode peut fonctionner en mode photovoltaïque ou en mode photo-ampérique en fonction de la polarisation appliquée par une source de tension externe. Elle est largement utilisée dans diverses applications telles que les capteurs de lumière, les systèmes de sécurité, les lecteurs de codes-barres et les caméras. [1]

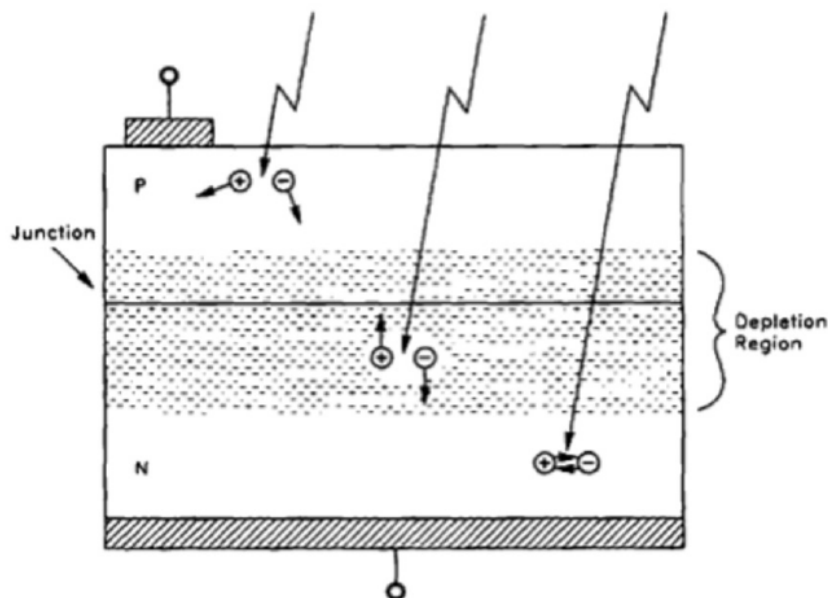


FIGURE I.1 – représentation de la création de pair électrons-trou dans les 3 régions de la photodiode. [1]

Il existe différents types de photodiodes selon leur structure, leur sensibilité spectrale et leur temps de réponse. Les principaux types sont les suivants :

- **Les photodiodes PIN** : elles ont une couche intrinsèque (I) entre les couches P et N, ce qui augmente la largeur de la ZCE et donc le nombre de porteurs générés par les photons. Elles ont une grande sensibilité et un temps de réponse rapide.

- **Les photodiodes avalanche** : elles sont polarisées en inverse au-delà du seuil d'avalanche, ce qui provoque une multiplication des porteurs par effet avalanche dans la ZCE. Elles ont une très grande sensibilité mais un temps de réponse plus lent que les photodiodes PIN.

- **Les photodiodes Schottky** : elles ont une jonction métal-semi-conducteur au lieu d'une jonction PN ou PIN. Elles ont une faible capacité parasite et un temps de réponse très rapide, mais une sensibilité plus faible que les autres types.

- **Les phototransistors** : ils sont constitués d'une photodiode couplée à un transistor bipolaire. Ils ont une très grande amplification du photocourant mais un temps de réponse plus lent que les photodiodes simples.

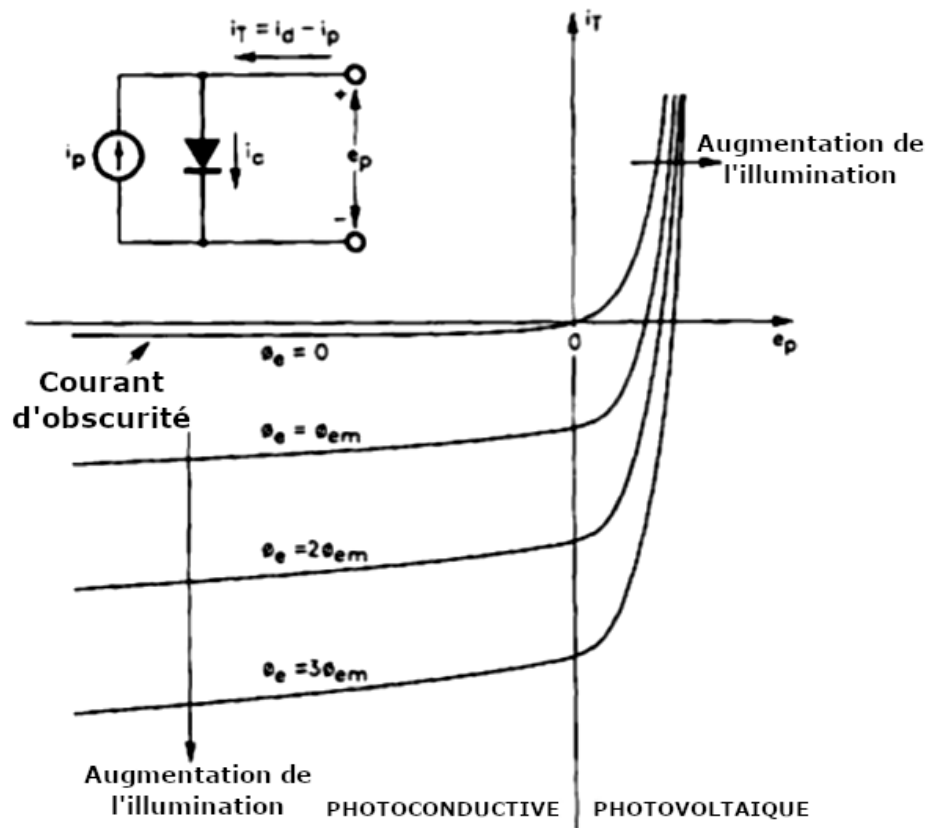


FIGURE I.2 – Comportement des photodiodes sous différentes intensités d'illumination en fonction du voltage appliqué. [1]

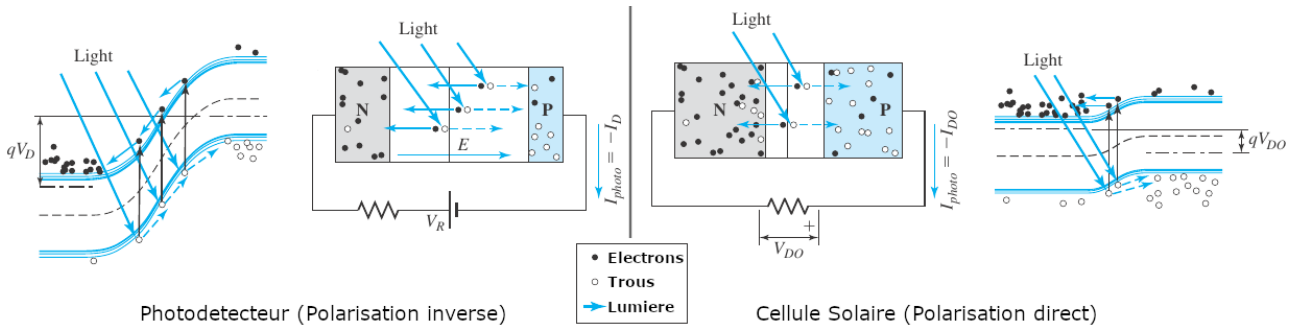


FIGURE I.3 – Diagramme de bande d’énergie d’une photodiode en mode photométrique (gauche) et photovoltaïque (droite). [2]

I.2.2 Photoresistance :

Une photorésistance (ou LDR pour Light Dependent Resistor) est un composant électronique dont la résistivité varie en fonction de son éclaircissement : plus il est éclairé plus sa résistivité baisse. Une photorésistance est composée d’un semi-conducteur à haute résistivité. On peut citer le sulfure de cadmium (CdS) sensible dans le visible et le sulfure de plomb (PbS) dans l’infrarouge. La diminution de la résistivité vient de l’augmentation de la création de paires électrons-trous avec l’éclaircissement. Dans le domaine des faibles intensités, la relation entre la résistance et l’éclaircissement peut être modélisée par la formule $R = R_0/L^g$ où g caractérise le matériau.

I.2.3 Phototransistor :

Un phototransistor est un dispositif qui amplifie le courant généré par une photodiode grâce à l’effet photoélectrique. Il est constitué d’une jonction PN reliée à une base commune d’un transistor bipolaire NPN ou PNP selon le type de polarisation souhaité.

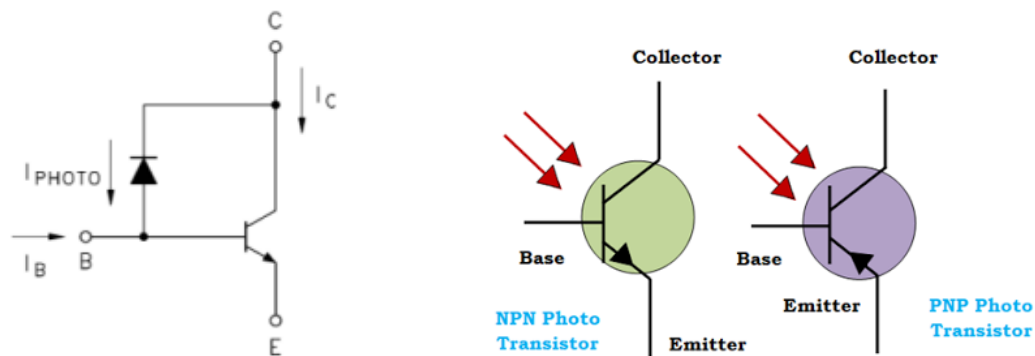


FIGURE I.4 – Circuit équivalent pour phototransistor (gauche) et Symbole des phototransistor NPN et PNP (droite).

I.3 Avantages et inconvénients :

— **Photodiodes :**

— Avantages :

- Grande sensibilité à la lumière, même à faible intensité
- Temps de réponse très court
- Faible niveau de bruit
- Réponse spectrale étroite, ce qui permet une détection sélective de certaines longueurs d'onde

— Inconvénients :

- Coût élevé, en particulier pour les photodiodes haute performance
- Polarisation nécessaire pour atteindre la sensibilité maximale
- Sensibilité limitée aux longueurs d'onde inférieures à la bande interdite du matériau semi-conducteur

— **Phototransistors :**

— Avantages :

- Sensibilité plus élevée que les photodiodes
- Amplification intégrée du signal, ce qui permet une mesure plus précise.
- Faible niveau de bruit.

— Inconvénients :

- Temps de réponse plus long que les photodiodes
- Polarisation nécessaire pour atteindre la sensibilité maximale
- Niveau de bruit supérieur à celui des photodiodes

— **Photorésistances :**

— Avantages :

- Faible coût
- Large plage de mesure de la lumière
- Pas de polarisation nécessaire

— Inconvénients :

- Sensibilité inférieure à celle des photodiodes et phototransistors
- Temps de réponse plus long que les photodiodes et phototransistors
- Niveau de bruit plus élevé que les photodiodes et phototransistors

I.4 Cellules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui convertit la lumière en électricité en exploitant l'effet photoélectrique, similaire aux composants électroniques mentionnés précédemment. Les cellules photovoltaïques sont caractérisées par une surface étendue, ce qui leur permet de capter davantage de lumière solaire. Leur fonction principale est de générer un courant électrique plus élevé, pouvant être utilisé pour alimenter divers dispositifs électroniques, ou être stocké dans des batteries pour utilisations ultérieures.

I.4.1 Rendement :

Le rendement des cellules photovoltaïques est un paramètre important car il détermine la quantité d'énergie électrique produite à partir de la lumière solaire captée. Le rendement est donc un facteur crucial pour améliorer l'efficacité énergétique de ces cellules et réduire leur coût de production.

I.4.2 Paramètres influents sur le rendement :

Il y a plusieurs paramètres qui peuvent influencer le rendement des panneaux photovoltaïques, notamment :

- **L'intensité de la lumière solaire :** Il s'agit de la quantité de lumière solaire qui atteint la cellule photovoltaïque, mesurée en watts par mètre carré (W/m^2).
- **La température :** La température affecte les performances de la cellule photovoltaïque, car elle peut entraîner une diminution de la tension de sortie et une augmentation du courant de court-circuit. La température est mesurée en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
- **La qualité des matériaux :** La qualité des matériaux utilisés pour fabriquer les cellules photovoltaïques affecte leur efficacité. Des matériaux de qualité inférieure peuvent entraîner une réduction de la production d'électricité.
- **La surface de capture de la lumière :** La surface de capture de la lumière est la surface sur laquelle la lumière solaire est collectée pour être convertie en électricité. Une plus grande surface de capture peut augmenter la production d'électricité.

- **L'orientation et l'inclinaison** : L'orientation et l'inclinaison des cellules photovoltaïques ont une incidence sur la quantité de lumière solaire qu'elles reçoivent. Une orientation et une inclinaison optimales peuvent augmenter la production d'électricité.
- **L'ombrage** : L'ombrage, même partiel, peut réduire considérablement la production d'électricité des cellules photovoltaïques. Il est donc important de minimiser l'ombrage sur les panneaux solaires pour obtenir une production d'électricité optimale.

I.4.3 Puissance des cellules photovoltaïque :

La puissance maximale développée par une cellule photovoltaïque est donnée par :

$$P_m = V_m I_m = (FF) V_{oc} I_{sc} \quad (I.1)$$

où V_m et I_m sont la tension et le courant du point de puissance maximal (II.9), V_{oc} tension du circuit ouvert et I_{sc} le courant en court-circuit. FF (Fill factor) est le facteur remplissage ou facteur de forme. Il reflète la qualité de la conversion de la lumière en électricité par la cellule solaire. Il est estimé par la relation [3] :

$$FF = \frac{\frac{eV_{oc}}{kT} - \ln \left(1 + \frac{eV_{oc}}{kT} \right)}{1 + \frac{eV_{oc}}{kT}} \quad (I.2)$$

où k est la constante de Boltzmann, e est la charge élémentaire et T la température en kelvin.

La température réduit considérablement la tension du circuit ouvert et le facteur de forme du fait que les électrons excités par la température dominent les propriétés du semi-conducteur. Le courant en court-circuit augmente légèrement.

L'efficacité de la cellule, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie électrique produite par la cellule et l'énergie solaire reçue, est donnée par :

$$\eta_c = \eta_{T_{ref}} \left[1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref}) + \gamma \log_{10} G_T \right] \quad (I.3)$$

où

- $\eta_{T_{ref}}$ est l'efficacité électrique de la cellule à la température de référence T_{ref} mesurée à un flux référence de rayonnement solaire de 1000 W/m².
- β_{ref} est le coefficient de température.

- G_T est le flux de rayonnement solaire (éclairage) sur le plan de la cellule, exprimé en (W/m²).
- γ est le coefficient de rayonnement solaire.
- T_c température nominale de fonctionnement des cellules.

Les quantités $\eta_{T_{ref}}$ et β_{ref} sont généralement données par le fabricant du panneau photovoltaïque. Toutefois, elles peuvent être obtenues par un test flash où le rendement électrique est mesuré à deux différentes températures, à un flux de radiation solaire constant.

Le coefficient γ est couramment fixé à zéro pour simplifier l'analyse des performances d'une cellule photovoltaïque dans des conditions idéales, ce qui permet de calculer l'efficacité théorique maximale de la cellule tout en négligeant certaines pertes électriques. On obtiens donc l'équation :

$$\eta_c = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref})] \quad (I.4)$$

qui représente l'expression linéaire traditionnelle pour l'efficacité électrique des cellules photovoltaïques.

On peut définir la température T_0 à laquelle le rendement électrique de la cellule est nul. Pour les cellules solaires en silicium cristallin par exemple, cette température est $T_0=270^\circ\text{C}$.

En général on trouve souvent les valeurs suivantes pour les cellules en silicium cristallin : $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$, la moyenne $\eta_{T_{ref}} \approx 0.12$ et la moyenne $\beta_{ref} \approx 0.0045^\circ\text{C}^{-1}$ [4, 5]

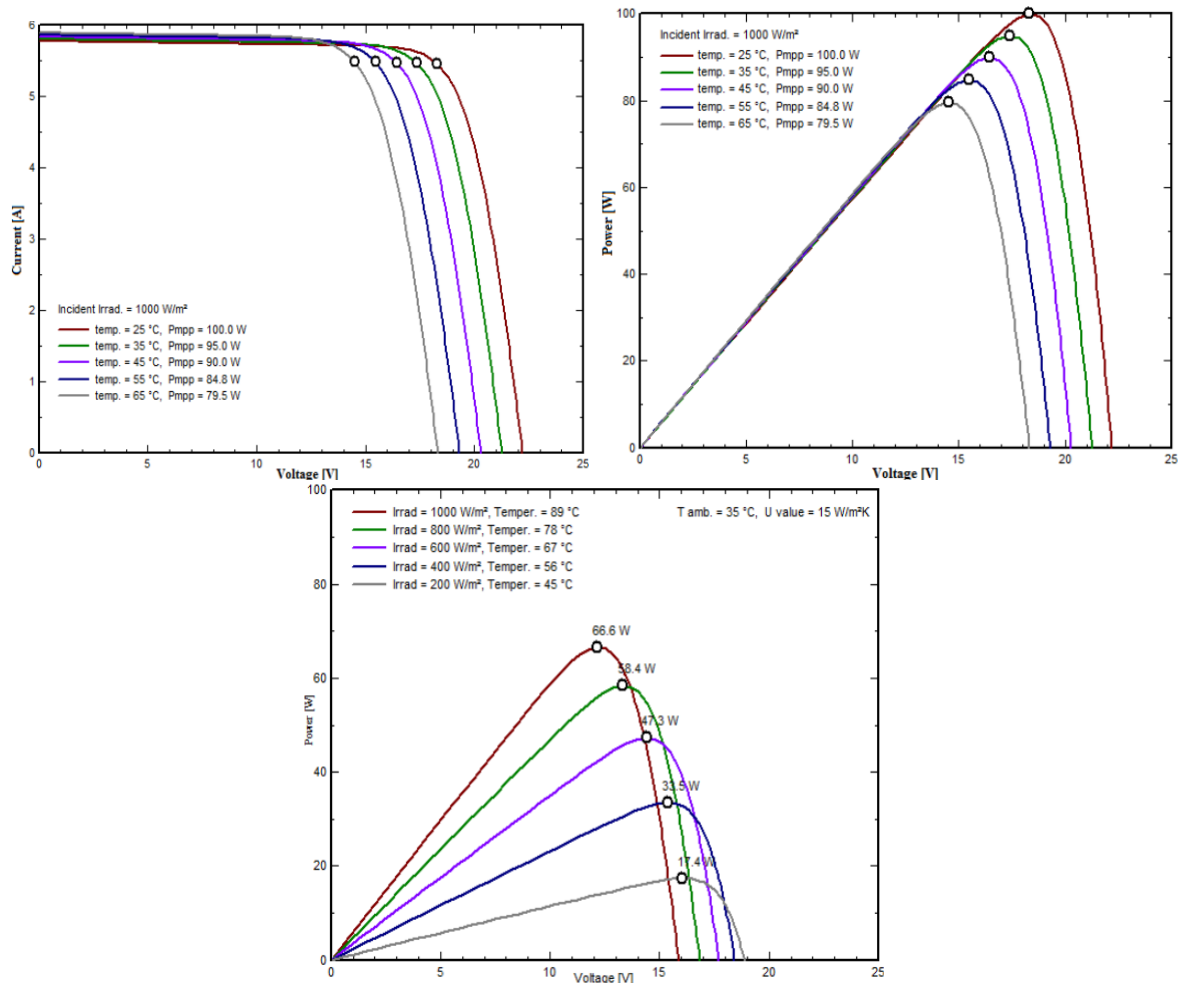


FIGURE I.5 – Courbe courant-tension (gauche), puissance-tension (droite) pour différentes températures, courbe puissance-tension pour différents flux de rayonnement (bas). [6]

La dépendance en température des propriétés des semi-conducteurs est due à l'effet de l'énergie thermique sur le gap énergétique du matériau. Lorsque la température augmente, l'énergie thermique réduit le gap, permettant aux électrons de passer plus facilement de la bande de valence à la bande de conduction. Cela entraîne une augmentation du courant de fuite, qui est la recombinaison des paires électron-trou créées initialement par l'effet photovoltaïque, réduisant ainsi la tension en circuit ouvert. En d'autres termes, l'énergie thermique perturbe les électrons, augmentant leur probabilité de surmonter le gap, ce qui se traduit par une diminution de la tension en circuit ouvert à mesure que la température augmente. [3]

I.5 Capteurs de température :

I.5.1 Thermocouples :

I.5.1.1 Principe de fonctionnement :

La thermométrie à thermocouple est une méthode de mesure de la température basée sur l'effet Seebeck. L'effet Seebeck est la production d'une différence de potentiel électrique entre deux points d'un circuit composé de deux fils métalliques de nature différente, lorsque ces points sont soumis à des températures différentes. Un thermocouple est donc constitué de deux fils métalliques de nature différente, soudés à une extrémité appelée soudure chaude, qui est placée dans le milieu dont on souhaite mesurer la température. L'autre extrémité des fils est reliée à un voltmètre qui mesure la tension électrique générée par le thermocouple.

La tension mesurée dépend de la température de la soudure chaude ainsi que de la température des soudures froides, c'est-à-dire les jonctions entre les fils métalliques et le voltmètre. Pour obtenir une mesure précise de la température, il est nécessaire de connaître la température des soudures froides, par exemple en utilisant un autre capteur de température comme une thermo-résistance. De plus, la relation entre la tension mesurée et la température varie selon le type de thermocouple utilisé, et est généralement donnée par une courbe ou une table appelée force électromotrice (f.e.m) du thermocouple.

Il est important de noter que lors de la mesure de la tension électrique générée par le thermocouple, il faut s'assurer que l'appareil de mesure ait une impédance d'entrée très élevée, afin d'éviter qu'un courant électrique ne circule dans le circuit et n'affecte la mesure de la différence de potentiel. La thermométrie à thermocouple est largement utilisée dans de nombreuses applications industrielles et scientifiques pour mesurer la température avec une grande précision.

[7]

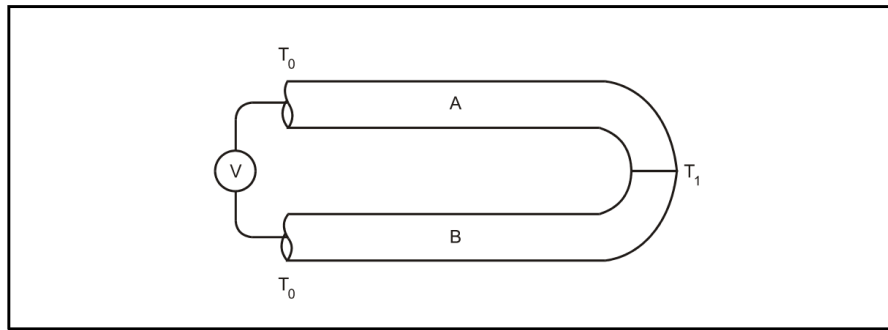


FIGURE I.6 – Schéma représentant un thermocouple. [7]

Le voltage résultant est donné par l'équation suivante :

$$V = S_{AB}(T_1 - T_0) \quad (\text{I.5})$$

S_{AB} Coefficient de Seebeck relatif ($S_A - S_B$)

T_0 et T_1 les températures au deux extrémités. [7]

Pour connaître la f.e.m on doit prendre une température de référence pour calibrer le thermocouple,

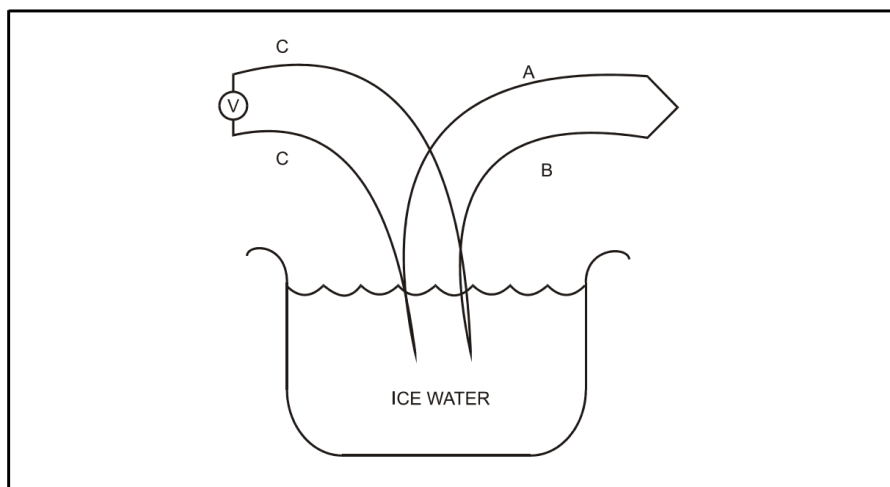


FIGURE I.7 – Calibration d'un thermocouple dans l'eau à 0°C

On peut par exemple prendre de l'eau glacée comme température de référence à 0°C .

L'équation (I.5) n'est cependant qu'une approximation. La relation entre la f.e.m et la température est une relation polynomiale qui est de la forme :

$$T = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + \dots + a_n V^n \quad (\text{I.6})$$

I.5.1.2 Types de thermocouples :

En principe, une paire de matériaux conducteurs quelconques peut constituer un thermocouple, mais pour éviter la complexité qui résulte d'un nombre important de standards, il existe un nombre réduit de types de thermocouples basé sur des coefficients de Seebeck relatif élevés, stabilité chimique, stabilité métallurgique, résistance, prix, plage de température, ...etc.

Un exemple est l'ensemble de types standardisé par l'Institut national des normes américaines (ANSI) : [7]

Types	Constitution
J	Fer et alliage nickel-cuivre
T	Cuivre et alliage nickel-cuivre
K	Alliage nickel-chrome et alliage nickel-manganèse-silicium-aluminium
E	Alliage nickel-chrome et alliage nickel-cuivre
N	Alliage nickel-chrome-silicium et alliage nickel-silicium-magnésium
S	Alliage platine-rhodium et platine
R	Alliage platine-rhodium et platine
B	Alliage platine-rhodium et alliage platine-rhodium

TABLE I.1 – Composition des différents types de thermocouples.

- **Type J** : Peut être utilisé dans des réactions d'oxydo-réduction à des températures entre 0°C et 760°C mais peut être affecté par l'oxydation à des températures supérieures à 540°C. Le fer est susceptible à la rouille dans des environnements humides à des températures inférieures à 0°C.
- **Type T** : Peut être utilisé dans des réactions d'oxydo-réduction à des températures entre -200°C et 370°C, utile dans les basses températures, limité dans les grandes températures à cause de l'oxydation rapide du cuivre
- **Type K** : Peut être utilisé dans des réactions d'oxydation à des températures entre -200°C et 1260°C. Il ne doit pas être exposé à des réactions de réduction ou oxydo-red, et ne doit pas être dans un environnement à basse concentration d'oxygène pour éviter la corrosion du chrome dans l'alliage NiCr. Il n'est pas adapté à l'utilisation dans le vide..

- **Type E** : Il a les mêmes propriétés que le type K et fonctionne dans une plage de température de -200°C à 900°C
- **Type N** : Est conçu comme remplacement du type K et fonctionne sur une plage de température de -200°C à 1260°C . il a les mêmes caractéristiques que le type K. il est cependant moins susceptible à cette corrosion et à moins de transformations métallurgiques.
- **Type R et S** : Peuvent être utilisés dans des réactions d'oxydation dans des températures entre 0°C et 1480°C . Ils ne sont pas adaptés à l'utilisation dans des réactions de réduction. Ces types doivent avoir une protection à base d'oxyde d'aluminium au lieu de métal pour éviter la contamination à cause de la diffusion du métal vers le fil du thermocouple.
- **Type B** : Peut être utilisé dans les réactions d'oxydation dans des températures de 870°C à 1700°C . La limite inférieure est due à un coefficient de Seebeck négligeable aux basses températures. Type B ne doit pas être utilisé dans les réactions de réduction et doit être recouvert avec NiCr au lieu d'un métal à cause de sa réactivité avec les métaux et les non-métaux. Il est mieux adapté aux hautes températures que les types R et S.
- **Tungstène-Rhénium** : Utilisés dans les hautes températures jusqu'à 2320°C , sont adaptés pour les réactions de réduction.

I.5.2 Thermistance :

La thermistance (thermistor), qui est un acronyme pour "résistance thermosensible", est une résistance fabriquée à partir de matériaux semi-conducteurs dont la valeur change en fonction de la température du matériau. Cette température est déterminée à la fois par la température ambiante dans laquelle la thermistance est utilisée et par l'échauffement interne causé par la dissipation d'énergie à l'intérieur de la thermistance elle-même. Contrairement aux résistances classiques bobinées ou à couche métallique, qui ont un coefficient de température positif, les premières thermistances développées avaient un coefficient de température négatif, c'est-à-dire que leur valeur de résistance diminuait lorsque la température augmentait. Par la suite, des thermistances avec un coefficient de température positif ont été développées, offrant l'avantage d'avoir un coefficient de température plus élevé par rapport aux résistances traditionnelles. [8]

I.5.2.1 Utilisation courante :

Les thermistances sont utilisées dans de nombreuses applications telles que les thermostats, les sondes de température et les contrôleurs de température. Ils permettent de mesurer des températures précises dans les circuits électroniques, les automobiles et les systèmes de climatisation. Les thermistances sont également utilisées pour protéger les appareils électroniques et les moteurs contre la surchauffe.

I.5.2.2 Principe :

La résistance électrique d'une thermistance diminue lorsque la température augmente et augmente lorsque la température diminue. Cette variation de la résistance électrique est due à la variation de la conductivité du matériau qui compose la thermistance en fonction de la température.

Cette relation entre la résistance et la température peut être décrite par l'équation empirique de Steinhart-Hart qui relie la résistance d'un thermistor à la température absolue en Kelvin :

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c(\ln(R))^3 \quad (I.7)$$

R est la résistance électrique du thermistor en ohms

a, b et c sont des coefficients qui dépendent du matériau qui compose le thermistor.

La relation peut être simplifiée dans des plage de température autour de T_0 par :

$$R_T = R_0 e^{\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (\text{I.8})$$

T_0 est la température de référence à laquelle R_0 est défini ou mesuré.

Ainsi, en mesurant la résistance électrique d'un thermistor, on peut déterminer la température à laquelle il est soumis en utilisant l'équation de Steinhart-Hart ou une table de conversion résistance-température spécifique au thermistor utilisé.

I.5.2.3 Type de Thermistance :

Il existe deux types de thermistors en fonction de leur coefficient de température : les thermistors à coefficient de température positif (PTC) et les thermistors à coefficient de température négatif (NTC).

Thermistors PTC : La résistance électrique des thermistors PTC augmente lorsque la température augmente. Cela signifie que la résistance électrique du thermistor PTC augmente de façon abrupte à mesure que la température augmente.

Thermistors NTC : La résistance électrique des thermistors NTC diminue lorsque la température augmente. Cela signifie que la résistance électrique du thermistor NTC diminue de façon abrupte à mesure que la température augmente, ce qui le rend utile pour la mesure de la température. Les thermistors NTC sont les plus couramment utilisés en raison de leur sensibilité élevée à la température et de leur capacité à mesurer des températures très basses.

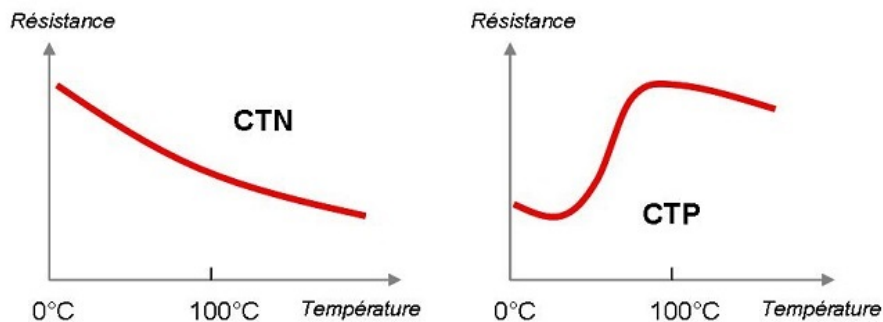


FIGURE I.8 – Résistance en fonction de la température pour thermistor ctn (gauche) et ctp (droite)) [9]

Les deux types de thermistors ont des plages de température de fonctionnement spécifiques et sont utilisés pour différentes applications. Les thermistors PTC sont utilisés pour la détection de

surchauffe ou pour la régulation de la température dans les appareils électriques et électroniques. Les thermistors NTC sont couramment utilisés pour mesurer la température dans une variété d'applications telles que la météorologie, l'industrie alimentaire, l'automobile, la médecine, etc.

I.5.2.4 Comparaison :

— **Thermocouples :**

- **Types :** J, K, T, E, etc.
- **Principe de fonctionnement :** utilisent l'effet Seebeck pour mesurer la différence de tension entre deux métaux différents à des températures différentes.
- **Plage de température :** Large plage de température, de -270C à +2500C en fonction du type de thermocouple.
- **Sensibilité :** Sensibilité élevée et réponse rapide aux changements de température.
- **Avantages :**
 - Large plage de température.
 - Bonne résistance à la corrosion.
 - Grande durabilité.
 - Réponse rapide aux changements de température.
- **Inconvénients :**
 - Besoin d'un circuit de mesure de tension et de conversion pour obtenir une mesure de température.
 - Moins précis que certaines autres méthodes de mesure de température.
 - Sensibilité aux interférences électromagnétiques.

— **Thermistances :**

- **Types :** NTC (Coefficient de Température Négatif), PTC (Coefficient de Température Positif).
- **Principe de fonctionnement :** Utilisent la variation de résistance d'un matériau semi-conducteur en fonction de la température.
- **Plage de température :** Plage de température généralement plus limitée, de -100C à +300C pour les NTC, et de -50C à +150C pour les PTC.
- **Sensibilité :** Sensibilité variable en fonction du type de thermistance et de la plage de température, mais généralement moins sensible que les thermocouples.
- **Avantages :**

- Coût relativement bas.
- Petite taille.
- Peuvent être utilisées pour des mesures de température précises dans des plages de température spécifiques.
- **Inconvénients :**
 - Moins adaptées aux plages de température élevées ou très basses.
 - La résistance peut varier avec le temps.
 - Moins durables que les thermocouples.

Chapitre II

Banc de mesures des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le prototype d'un banc de mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque. Il peut être destiné au niveau terminal pour une étude sommaire ou au niveau de licence pour une étude plus approfondie. On présentera aussi brièvement le logiciel qui permet la gestion et l'acquisition des mesures des capteurs du banc.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons présenter un exemple d'un énoncé d'une séance de TP possible.

II.1 Description du banc d'essai

On donne sur la figure ([II.2a](#)) une image du dispositif. Il est composé d'un phototransistor, d'un élément chauffant, d'une thermistance, d'une lampe à incandescence comme source de lumière, d'une cellule photovoltaïque et d'un mécanisme permettant le mouvement de la lampe.

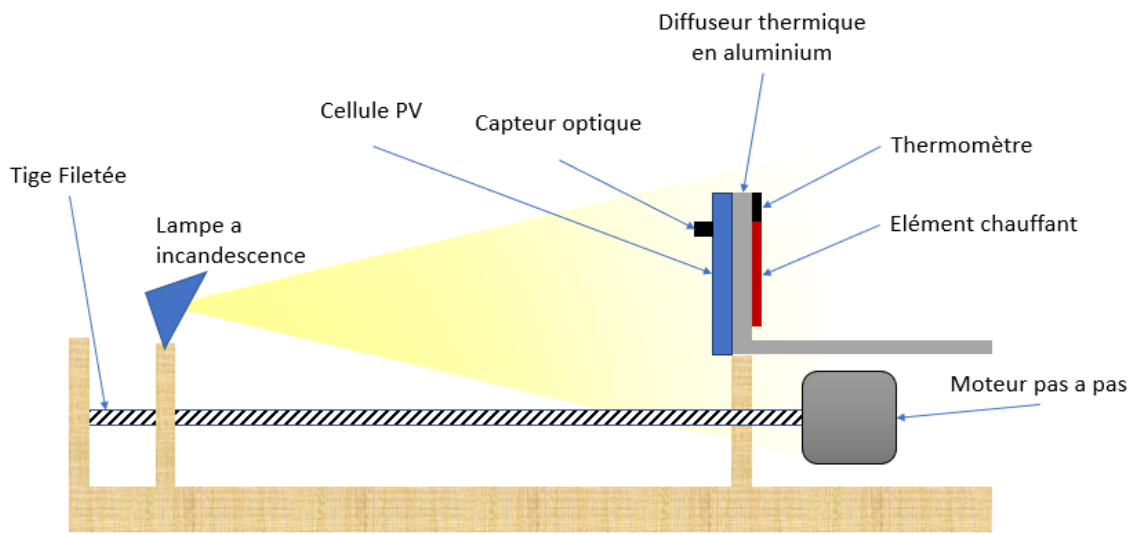
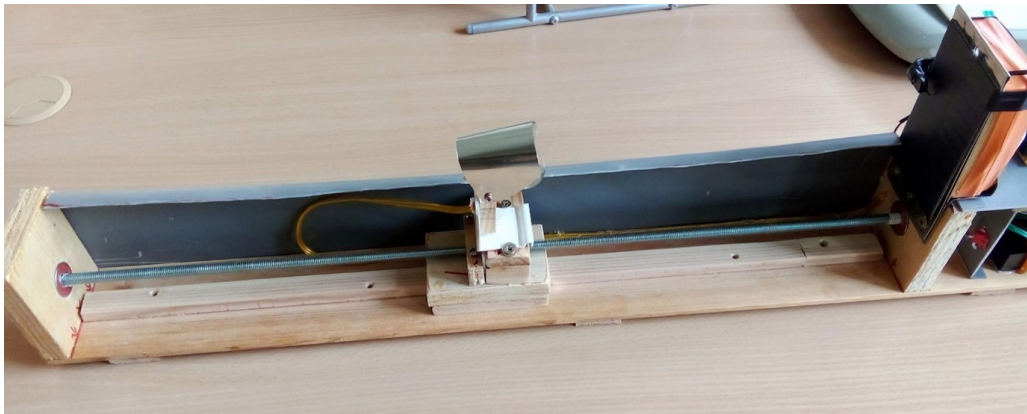
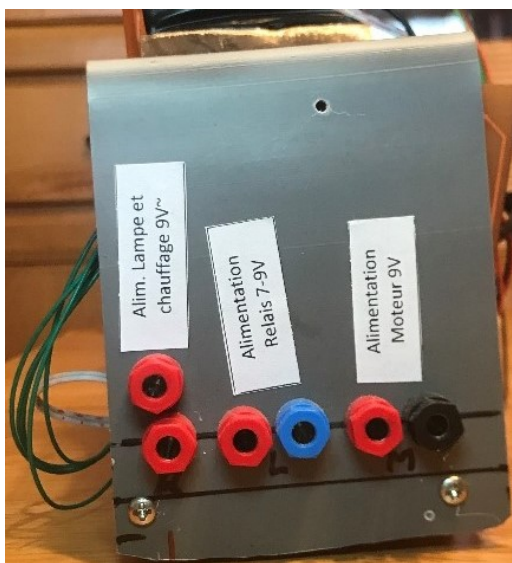


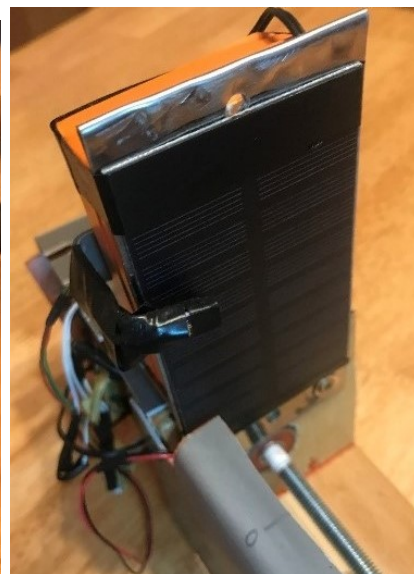
FIGURE II.1 – Schéma du banc d'essai.



(a)



(b)



(c)

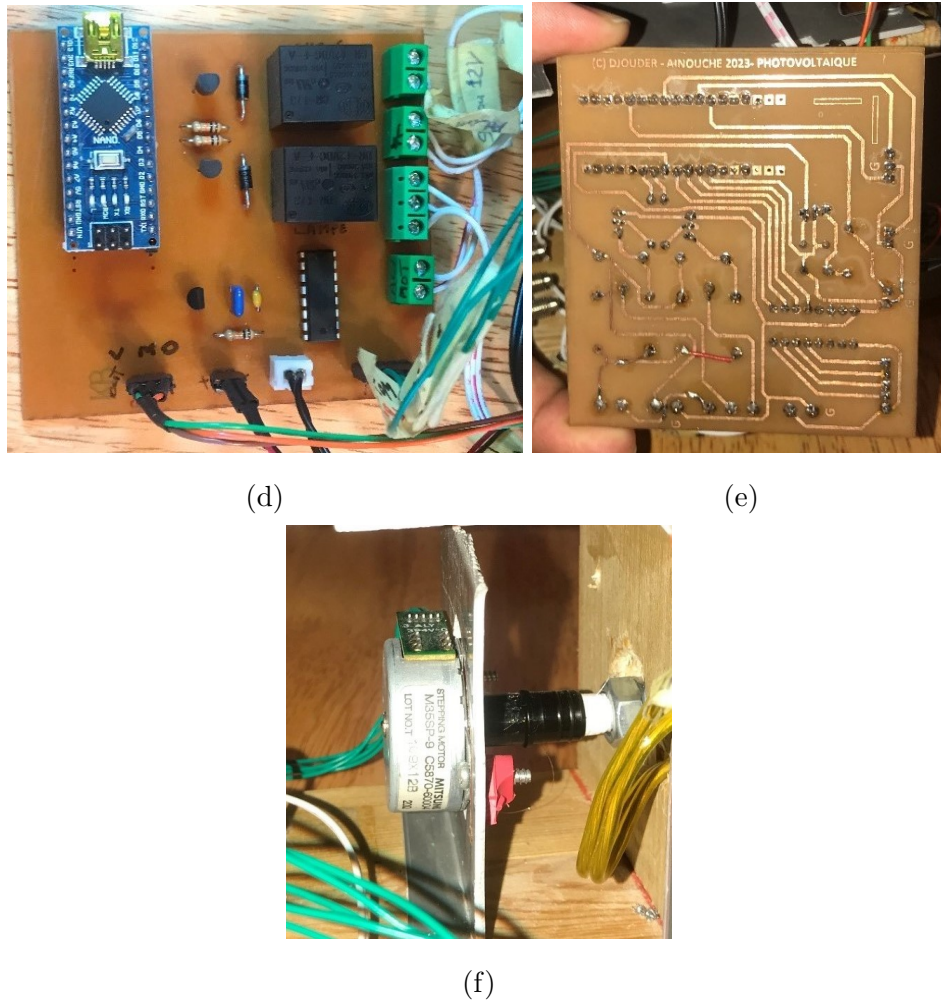


FIGURE II.2 – Images des différents composants du banc d'essai. (a) Image du banc d'essai. (b) Entrées des alimentations. (c) Cellule photovoltaïque et phototransistor au-devant, élément chauffant et thermistance derrière la plaque métallique. (d) Carte d'acquisition côté composants et (e) côté pistes. (f) moteur pas-à-pas.

Le banc a besoin de plusieurs alimentations : une tension de 9V pour le moteur pas à pas, une tension de 12V pour alimenter les relais et tension de 9 à 12V pour l'alimentation de la lampe et de l'éléments chauffant (FigII.2b). La cellule photovoltaïque est fixée sur une plaque métallique qui est elle-même en contact avec l'élément chauffant. Ce dernier est un ensemble de résistances supportant une puissance de 6W chacune. La thermistance est placée aussi au contact de la plaque métallique avec une pate thermique pour améliorer le contacte thermique. La mesure de l'intensité lumineuse est faite par un phototransistor TEMT6000 placé au-devant de la cellule face à la lampe (FigII.2c). Sur (FigII.2d) et (FigII.2e) on trouve la carte d'acquisition qui est basée sur un microcontrôleur ATmega328 sur une plaque Arduino Nano V3. Finalement sur la

figure (FigII.2f), on trouve le moteur pas à pas de type unipolaire M35SP-9 connecté à l'axe fileté qui met en mouvement le chariot portant la lampe (FigII.2).

II.2 Logiciel de commande

La figure (II.3) est une capture d'écran du logiciel dédié à la gestion du banc et à l'acquisitions et l'affichage mesures sous forme de graphe en temps réel. Il est implémenté en Python. Il permet de fixer la température, imposée par l'élément chauffant, et de lancer une série de mesures en faisant varier la distance entre la source, la lampe à incandescence, et la cellule photovoltaïque.

Il est important de faire au préalable une calibration de la position du chariot qui porte la lampe. En effet, nous n'avons pas prévu un mécanisme de fin de parcours mis à part un control logiciel.

Pour la mesure de la température nous avons conçu une manipulation pour l'étalonnage de la thermistance (FigII.4). Avec un thermomètre étalonné, nous avons mesuré la température, à intervalle régulier, d'une eau portée initialement à 60°C que nous avons laissé refroidir lentement. Nous avons par la suite comparé ce que donne le thermomètre avec ce que donne notre thermistance, nous avons obtenu la courbe de la figure (II.5). Qui correspond a la fonction II.1.

$$V = \frac{e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s})}}{1 + ae^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s})}} V_c \quad (\text{II.1})$$

où $\beta = 3379.25$ et $a = 0.9761$ et $V_c = 5$

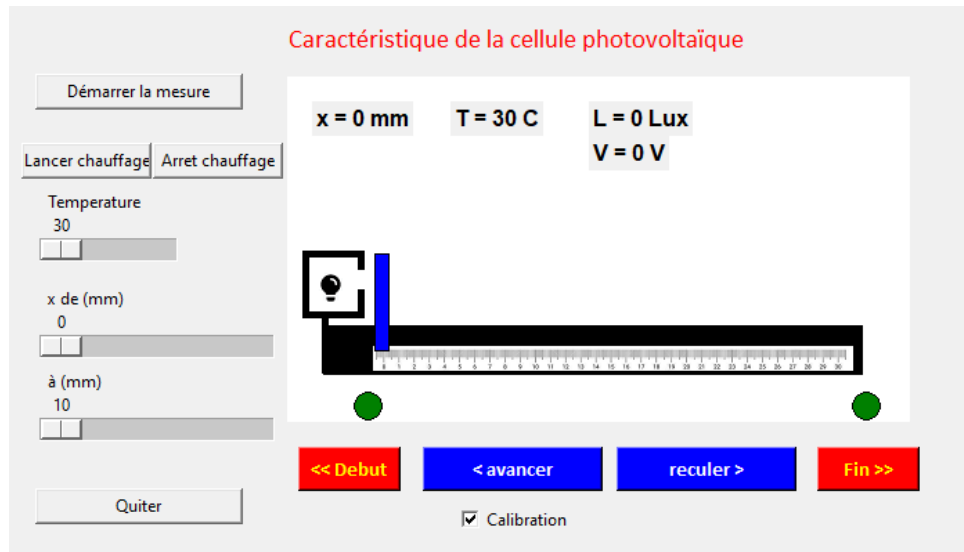


FIGURE II.3 – Image du logiciel de commande.

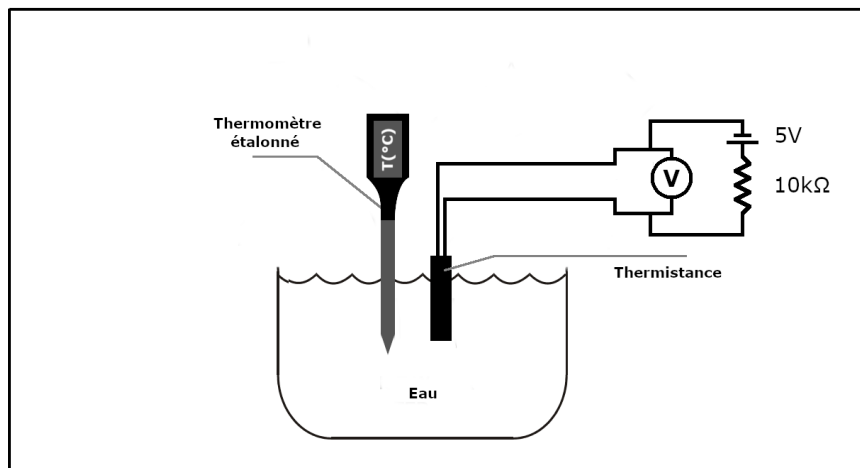


FIGURE II.4 – Schéma d'étalonnage de la thermistance.

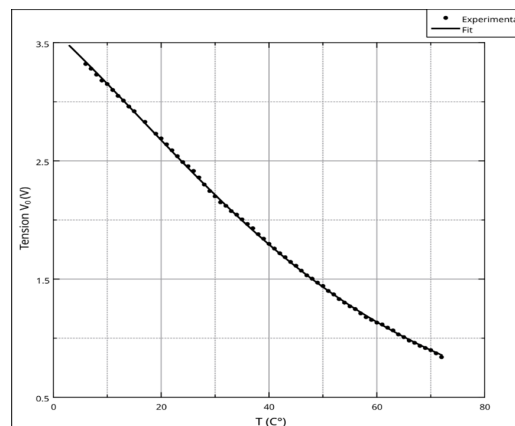


FIGURE II.5 – Courbe tension-température de la thermistance.

Sur la figure II.6 on présente une portion du code que nous avons implémenté en python. C'est la partie qui applique la conversion entre les signaux électriques issues de la carte d'acquisition en leur équivalents en grandeurs physiques (température, tension et éclairement lumineux.)

```
s = arduino.readline().rstrip()
if s.decode() == "L":
    s = arduino.readline().rstrip()    # pour lire la luminescence
    L = float(s.decode()) # il faut multiplier par un facteur
    # L = L * 5/1023      # Valeur en volt
    # L = L / 10000      # Pour trouver I en A
    # L = L * 1000000    # I en µA
    # L = L * 1.851      # Eclairment en lux
    L = L * 925.5/1023   # Operations precedentes en une ligne
    test += 1
    print(test, L, "Lux")

s = arduino.readline().rstrip() # pour lire la totalite du string
if s.decode() == "V":
    s = arduino.readline().rstrip()
    V = float(s.decode()) * 5/1023
    test += 1
    print(test, V, "V")

s = arduino.readline().rstrip() # pour lire la totalite du string
if s.decode() == "T":
    s = arduino.readline()
    T = float(s.decode()) * 5/1023      # En Volt
    # Development de l'equation V0 en fonction de R(T).
    # Correspond au valeurs experimetal prelevé pour le thermistance
    T = 4028066/(13517+1192*math.log(-1000000*T/(976079*T-4880395))) - 273
    test += 1
    print(test, T, "°C")
```

FIGURE II.6 – Extrait d'une partie du code python utiliser pour lire et afficher les donnés.

II.3 Exemple d'un énoncé de TP :

Dans ce qui suit, nous proposons un énoncé de travaux pratiques à remettre aux étudiants avant la séance de TP. On peut cibler plusieurs niveaux de difficultés à ce TP. On peut se contenter de mesurer les caractéristiques des cellules, mesurer les propriétés les plus importantes, I_{cc} et V_{oc} ou proposer de vérifier les relations de rendement que nous avons vu plus haut et les étudier en fonction de la température (le premier niveau correspondrait à la terminale et le second a une licence universitaire par exemple).

II.3.1 Principe et objectif :

Étude de la relation entre le rendement des panneaux photovoltaïques, l'intensité lumineuse et la température de la cellule.

II.3.2 Aperçu théorique :

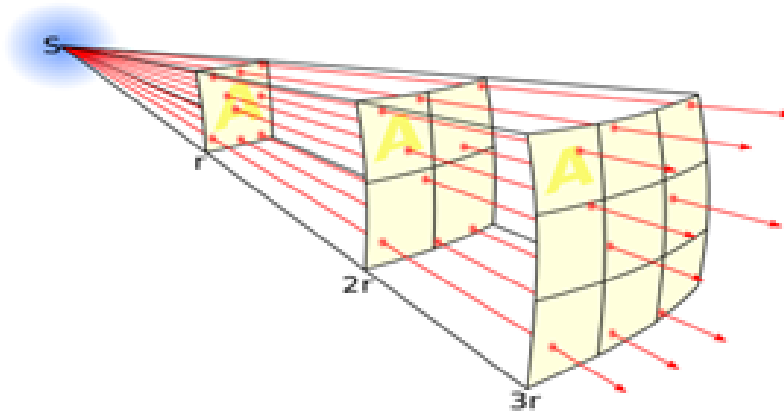


FIGURE II.7 – Diagramme représentant le fonctionnement de la loi en carré inverse.

Le but en premier lieu est de retrouver la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule photovoltaïque qui est défini par 3 grandeurs physiques qui sont :

La tension à vide, également appelée V_{co} , correspond à la tension générée par une cellule photovoltaïque lorsqu'elle est exposée à la lumière mais n'est pas connectée à un circuit externe. C'est essentiellement la tension maximale que la cellule peut produire dans ces conditions.

Le courant court-circuit, ou I_{cc} , représente le courant généré par une cellule photovoltaïque lorsqu'elle est exposée à la lumière et connectée en court-circuit, c'est-à-dire lorsqu'aucune charge externe n'est connectée à la cellule.

Le point de puissance maximale, ou MPP (maximal power point en anglais), est le point de fonctionnement optimal d'une cellule photovoltaïque où la puissance générée est maximale. Cela se produit à une tension et un courant spécifique, connus respectivement sous les noms de V_{opt} et I_{opt} (parfois également appelés V_{mpp} et I_{mpp}).

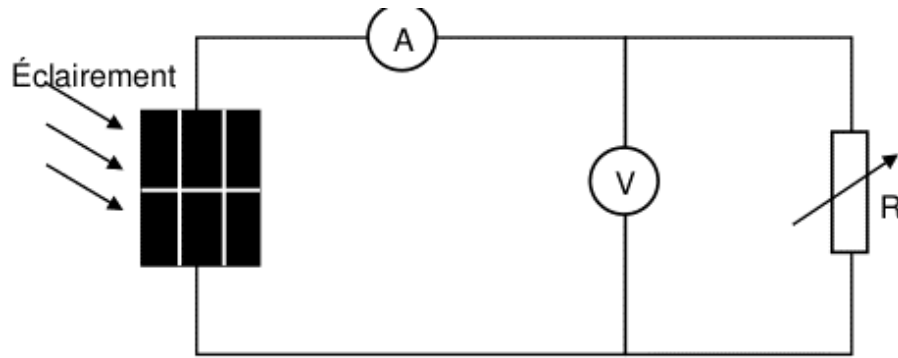


FIGURE II.8 – Schéma de circuit permettant la mesure de V_{co} et I_{cc} en fonction de la résistance de charge.

En faisant varier R on peut retrouver la courbe courant-tension pour avoir une caractéristique qui ressemble à la figure (II.9).

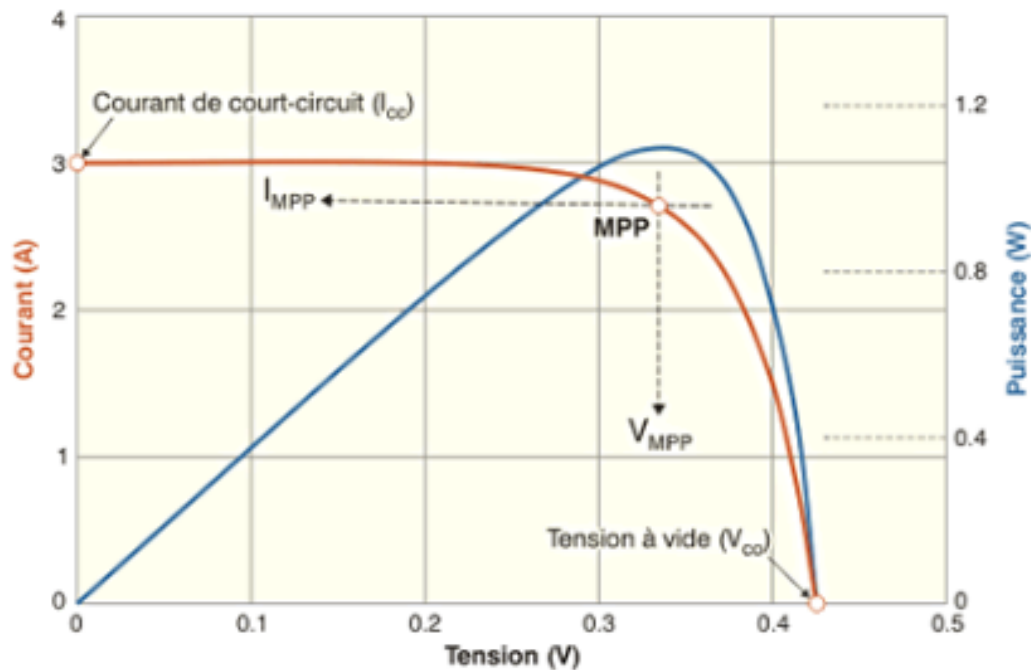


FIGURE II.9 – Caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule photovoltaïque.

On peut par la suite trouver le facteur de forme (FF) ou $FF = P_{max} / (I_{cc} V_{co})$, qui est un paramètre utilisé pour évaluer l'efficacité d'une cellule photovoltaïque, une mesure de la forme de la courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque. Une valeur élevée du facteur de forme indique que la courbe est plus carrée et que la cellule a une bonne capacité de conversion de

l'énergie lumineuse en électricité. Cela signifie également que la cellule a une faible résistance interne et est capable de maintenir une tension élevée même à des niveaux de courant élevés, donc plus le facteur de forme est élevé plus la cellule est efficace.

On va par la suite étudier le comportement de la courbe et du FF en fonction de la température et de l'intensité lumineuse.

Pour faire varier l'éclairement de la cellule, on utilise la loi des carrés inverse, c'est-à-dire en variant la distance entre la source et la cellule. On sait que l'intensité lumineuse se propageant d'une source ponctuelle s'atténue en fonction de la loi en carré inverse, $I = P/(4\pi r^2)$, où P est la puissance de la source de lumière et r la distance entre la source et la cellule.

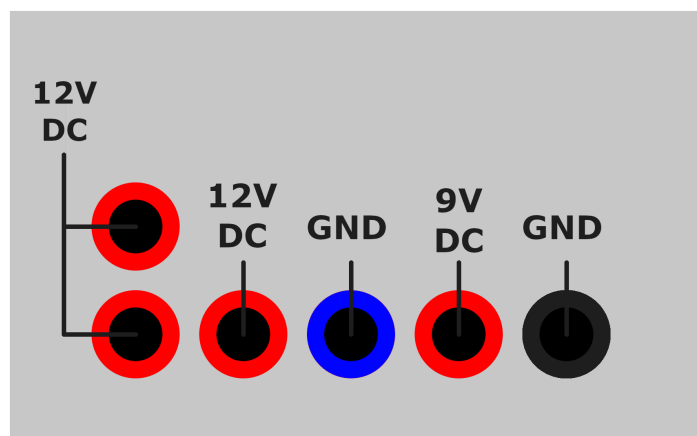


FIGURE II.10 – Tensions à appliquer au entrés du dispositif.

II.3.3 Manipulations :

II.3.3.1 Réglage initial :

1. Brancher les alimentations en respectant les polarités : 9V DC pour alimenter le moteur, 12V DC pour alimenter les relais et 12 V DC pour alimenter l'élément chauffant et la lampe comme illustré dans figure (II.10).
2. Lancer le logiciel de commande.
3. Cocher la case « calibration » et appuyer sur « avancer » et « reculer » jusqu'à ce que la position affichée dans le logiciel correspond à la position réel du chariot.
4. Fixer la température désirée avec la glissière correspondante. Appuyer sur « Lancer chauffage » pour lancer le chauffage et la gestion de la température. Attendre que la température affichée soit stable avant de lancer les mesures.

II.3.3.2 Étude préliminaire : Loi des carrés inverses

1. Sans chauffage (température ambiante).
2. Avec les glissières correspondantes, définir la position initiale $x_1 = 0\text{cm}$ et la position finale $x_2 = 40\text{cm}$.
3. Annuler la charge de la cellule en mettant l'interrupteur sur la position inf.
4. Lancer les mesures puis enregistrer l'éclairement mesuré par le capteur (en Lux) en fonction de la distance à la source.
5. Tracer la courbe $L(x)$ et conclure.

II.3.3.3 Tension de circuit ouvert et influence de la température

1. Sans chauffage (température ambiante).
2. Avec les glissières correspondantes, définir la position initiale $x_1 = 0\text{cm}$ et la position finale $x_2 = 40\text{cm}$.
3. Annuler la charge de la cellule en mettant l'interrupteur sur la position inf.
4. Lancer les mesures puis enregistrer les mesures (Eclairement et tension) dans un fichier.
5. Refaire le même travail pour des températures allant de la température ambiante à 50°C par pas de 5°C .

II.3.3.4 Tension et courant en charge et influence de la température

1. Sans chauffage (température ambiante).
2. Avec les glissières correspondantes, définir la position initiale $x_1 = 0\text{cm}$ et la position finale $x_2 = 40\text{cm}$.
3. Appliquer une charge de 10kW à la cellule.
4. Lancer les mesures puis enregistrer les résultats dans un fichier.
5. Refaire le même travail pour une charge variantes jusqu'à 100kW par pas de 5kW .
6. Enregistrer les données.
7. Refaire le même travail pour les températures 40°C et 50°C .
8. Rassembler toutes les mesures dans un tableur puis tracer les différentes caractéristiques de la cellule photovoltaïque (Puissance, ...). Déduire le MPP de cette cellule.

Conclusion générale

Dans le premier chapitre nous avons revu les aspects théoriques et pratiques de la photovoltaïque, c'est-à-dire la conversion de l'énergie lumineuse en une énergie électrique. Nous avons aussi présenté certains capteurs optiques pour la mesure de l'éclairement et des capteurs de température.

Nous avons utilisé ces capteurs pour la réalisation d'un dispositif complet de mesure des propriétés d'une cellule photovoltaïque. Ce banc de mesure contient une source de chaleur couplée à une thermistance pour appliquer une température régulée à la cellule. Un phototransistor est utilisé pour mesurer l'éclairement produit par une lampe à incandescence. L'intensité lumineuse peut être modifiée en rapprochant ou en éloignant la lampe de la cellule via axe actionné par un moteur pas à pas. La résistance de charge peut être modifiée manuellement et la tension peut être mesurée automatiquement.

Tous ce dispositif est piloté par ordinateur a travers un logiciel interactif implémenté en orienté objet.

Ce dispositif peut être utilisé dans des Travaux Pratiques pédagogiques dans les niveaux allant du lycée à la licence universitaire.

L'amélioration de ce premier prototype est une perspective intéressante de ce travail. On peut citer les pistes suivantes : réduire le nombre d'alimentations, ajouter des fonctionnalités au logiciel comme le tracé de la température, automatiser la variation de la résistance de charge, . . .etc.

Bibliographie

- [1] J. GRAEME, *Photodiode amplifiers : op amp solutions* (McGraw-Hill, Inc., 1995).
- [2] S. DIMITRIJEV, *Principles of semiconductor devices* (Oxford University Press, USA, 2006).
- [3] P. WÜRFEL et U. WÜRFEL, *Physics of solar cells : from basic principles to advanced concepts* (John Wiley & Sons, 2016).
- [4] E. SKOPLAKI et J. A. PALLYVOS, « On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance : A review of efficiency/power correlations », *Solar energy* **83**, 614-624 (2009).
- [5] S. DUBEY, J. N. SARVAIYA et B. SESHADRI, « Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review », *Energy Procedia* **33**, 311-321 (2013).
- [6] A. AMELIA, Y. IRWAN, W. LEOW, M IRWANTO, I SAFWATI et M ZHAFARINA, « Investigation of the effect temperature on photovoltaic (PV) panel output performance », *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol* **6**, 682-688 (2016).
- [7] T. W. KERLIN et M. JOHNSON, *Practical thermocouple thermometry* (Instrument Society of America Research Triangle Park, NC, USA, 1999).
- [8] L. W. TURNER, *Electronics engineer's reference book* (Butterworth-Heinemann, 2013).
- [9] <https://formation.xpair.com/cours/thermistances.htm>.