

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie électrique

Module autonome pour l'évaluation du potentiel photovoltaïque en intérieur

Mémoire de maîtrise

Spécialité : génie électrique et génie informatique

Maxime MANO

Jury : Vincent AIMEZ (directeur)
Abdelatif JAOUAD (codirecteur)
Serge ECOFFEY
Maxime DARNON (rapporteur)

RÉSUMÉ

L'alimentation de dispositifs électroniques à faible consommation énergétique est un sujet qui connaît beaucoup d'intérêt. Dans le contexte de la mise en place de l'Internet des objets, un nombre important de capteurs sans fil de type *Wireless sensor node* (WSN) devront être installés. Ces derniers ne consommant que peu d'énergie, des solutions sont envisagées pour assurer leur alimentation autrement que par une pile. Il est ainsi intéressant d'utiliser les faibles énergies présentes dans un environnement pour les convertir en électricité. Ce principe se retrouve par exemple dans les capteurs piézoélectriques, utilisant les déformations mécaniques de leur environnement, ou dans les capteurs photovoltaïques, utilisant la lumière, afin de générer un signal électrique. Dans le cas des capteurs WSN utilisés en intérieur, la lumière artificielle combinée à un capteur photovoltaïque pourrait être une source d'énergie adaptée. Ce principe se nomme *Indoor Photovoltaic*, ou plus généralement *Energy Harvesting*.

Le courant produit par une cellule photovoltaïque utilisée en intérieur varie selon les types de cellules et d'éclairages utilisés, de l'éclairage lumineux et de sa position spatiale par rapport à la source lumineuse utilisée dans la pièce. Plusieurs montages issus de la littérature ont permis d'évaluer le courant généré selon ces paramètres. À notre connaissance, il n'existe cependant pas de dispositifs commerciaux compacts dédiés à la mesure de ces paramètres en conditions réelles. Un tel outil permettrait de réaliser une mesure du potentiel photovoltaïque en tout lieu. La connaissance précise de la quantité d'énergie disponible dans un environnement permettrait de mieux appréhender l'autonomie énergétique de ces capteurs sans fil.

Le projet de recherche portera sur la conception d'un module de mesure compact et autonome, permettant d'évaluer les performances de plusieurs cellules photovoltaïques dans tous types d'environnements internes. Cet outil de mesure, couplé à une application mobile Android, offre la possibilité d'estimer la quantité d'énergie photovoltaïque disponible. Ce capteur intelligent permettra d'évaluer le potentiel d'utilisation et donc l'installation de capteurs sans fil de type WSN, autonomes en énergie, en intérieur.

Mots-clés : Lumière artificielle, Cellules photovoltaïques, photovoltaïque intérieur, photovoltaïque *indoor*, Module de caractérisation, *Wireless sensor node*, Application Android

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais avant tout remercier Vincent Aimez pour m'avoir donné la chance de réaliser ce projet au sein du 3IT. J'aimerais également remercier Abdelatif Jaouad pour ses précieux conseils et pour l'intérêt sans faille qu'il a porté à mon sujet durant toute la durée du projet. J'aimerais aussi remercier Maïté Volatier qui a été très présente tous le long de ma maîtrise et qui m'a apporté une grande aide durant tout ce temps.

Je tiens à remercier Eloi Lefloch qui a participé pendant 3 mois à ce projet dans le cadre d'un stage. Il a réalisé le design du boîtier de protection, ainsi que le PCB. Il a aussi pu m'apporter un regard extérieur sur l'ensemble du projet et apporter plusieurs critiques pertinentes.

Je remercie également Boussairi Bouzazi, Laurence Convert, ainsi qu'Arthur Turala qui m'ont assisté pour me fournir les locaux, ainsi que les matériaux nécessaires à mes expériences.

J'aimerais également remercier Danielle Gagné, responsable de l'achat des divers matériaux nécessaires au projet, qui a toujours fait en sorte que mes commandes soient faites dans les plus brefs délais.

J'aimerais aussi remercier Félix Lalumière, ainsi que Vincent-Philippe Rhéaume pour leur expertise en informatique et en électronique, et qui m'ont proposé plusieurs idées importantes ayant largement contribué à innover le projet d'origine.

Je voudrais tout autant remercier monsieur Bessam Abdulrazak, professeur à l'Université de Sherbrooke, qui a contribué à orienter mon projet sur une connectivité de type IP Internet, soit une approche Internet des objets.

Finalement, j'aimerais remercier dans son ensemble le laboratoire du 3IT, ainsi que l'Université de Sherbrooke pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet de Maîtrise.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	ix
LEXIQUE.....	xi
LISTE DES SYMBOLES	xiii
LISTE DES ACRONYMES	xv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte et problématique.....	1
1.2 Définition du projet de recherche	3
1.3 Objectifs du projet de recherche.....	3
1.4 Contributions originales.....	4
1.5 Plan du document	4
CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART	7
2.1 Les nœuds de capteurs sans fil	7
2.2 Internet des objets.....	8
2.3 Photovoltaïque dans un milieu interne.....	9
2.4 Méthodes d'optimisation de la récolte de l'énergie photovoltaïque en intérieur	17
2.4.1 Maximum power point tracking	17
2.4.2 Amplification.....	18
2.4.3 Supercondensateurs.....	18
2.4.4 Autres sources de faible énergie	19
2.4.5 Modules de communication et économie d'énergie.....	20
CHAPITRE 3 SIMULATEUR POUR LE PHOTOVOLTAÏQUE EN INTÉRIEUR	21
3.1 Motivations.....	21
3.2 Principe de fonctionnement.....	21
3.3 Montage Physique	22
3.4 Logiciel de contrôle	24

3.5	Limites de la mesure en laboratoire	26
CHAPITRE 4 CONCEPTION D’UN MODULE DE MESURE AUTONOME.....		29
4.1	Cahier des charges.....	29
4.2	Principe de fonctionnement	30
4.3	Élaboration du module de mesure autonome.....	32
4.3.1	Schéma global de fonctionnement du module autonome.....	32
4.3.2	Choix du microcontrôleur MKR ZERO.....	33
4.3.3	Mesures de cellules photovoltaïques.....	34
4.3.3.1	Principe de mesure.....	34
4.3.3.2	Mise en place d’un système de calibre de mesure automatisé.....	37
4.3.3.3	Algorithme et code Arduino des protocoles de tests I-V.....	39
4.3.3.4	Support amovible pour cellule photovoltaïque.....	40
4.3.4	Alimentation du module et gestion de la batterie	41
4.3.5	Capteurs ajoutés au module de mesure	42
4.3.6	Stockage des informations complémentaires	43
4.3.7	Horloge interne du module de mesure	45
4.3.8	Modules de communication de données	46
4.3.8.1	Module Bluetooth.....	46
4.3.8.2	Module Wi-Fi.....	48
4.3.9	Architecture finale	49
4.3.9.1	Architecture Hardware.....	49
4.3.9.2	Architecture Software.....	51
4.4	Application mobile Android	52
4.4.1	Cœur de l’application mobile	52
4.4.2	Structure de l’application mobile.....	54
4.4.3	Fonctionnement de ModuleActivity.java	55
4.4.4	Structure des tests I-V proposée	57
4.4.5	Settings mode	59
4.5	Gestion client-serveur d’envoi de données.....	60
4.5.1	Rôle de l’ESP8266.....	60
4.5.2	Création d’un serveur Web.....	62
4.5.3	Envoi des données	64
4.5.4	Envoi de données en continu.....	65
4.6	Discussions sur l’ensemble de la solution	68

CHAPITRE 5 ÉTUDE DES RÉSULTATS	71
5.1 Résultats obtenus via le banc d'essai en laboratoire.....	71
5.2 Résultats du module de mesure autonome.....	77
5.2.1 Simples tests I-V.....	77
5.2.2 Module de mesure portable vs. banc d'essai en laboratoire	78
5.2.3 Stockage sur une base de données	80
5.3.4 Discussions autour des résultats et perspectives.....	82
CHAPITRE 6 CONCLUSION	87
6.1 Bilan des tâches accomplies.....	87
6.2 Limitations et améliorations possibles.....	89
ANNEXE A SIMULATEUR DE RÉFÉRENCE EN LABORATOIRE	91
ANNEXE B MODULE DE MESURE AUTONOME	93
Liste des références.....	99

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Fonctionnement standard d'un WSN [10]	7
Figure 2.2	Vision de l'Internet des objets selon l'entreprise Cisco [17]	8
Figure 2.3	La luminosité $V(\lambda)$ photopique en noir, et scotopique en vert. (Courbe photopique séparée entre la CIE 1931 standard en ligne continue, la Judd-Vos 1978 en trait discontinu et la Jagla & Jäggle 2005 en pointillés) [27]–[29]	11
Figure 2.4	Domaines des énergies récupérables pour l'utilisation d'un WSN [22].....	15
Figure 2.5	Courbes P-V d'une cellule amorphe sous lumière halogène à 200 Lux pour plusieurs angles d'incidence [35]	16
Figure 3.1	Schéma global du banc d'essai en laboratoire	23
Figure 3.2	Montage sur PCB d'une cellule photovoltaïque.....	23
Figure 3.3	Algorithme de test I-V du programme LabVIEW.....	24
Figure 3.4	Interface Graphique du programme de test I-V en laboratoire	25
Figure 3.5	Banc d'essai en laboratoire de référence	26
Figure 4.1	Schéma global de fonctionnement de la solution proposée	31
Figure 4.2	Schéma bloc du fonctionnement du module SmartLux.....	33
Figure 4.3	Microcontrôleur Arduino MKR ZERO	33
Figure 4.4	Principe de base de la mesure de courant d'une cellule photovoltaïque via un Arduino	35
Figure 4.5	Schéma complet de principe de mesure de la cellule photovoltaïque	38
Figure 4.6	Algorithme implanté dans le code Arduino du module de mesure pour connaître les performances de la cellule photovoltaïque étudiée	39
Figure 4.7	Principe de la monture pour la cellule photovoltaïque	41
Figure 4.8	Courbe de décharge de la batterie LiPo selon la datasheet du produit	42
Figure 4.9	Méthode d'envoi des informations vers l'EEPROM	44
Figure 4.10	Méthode de lecture des données stockées dans l'EEPROM	45
Figure 4.11	Commandes autorisant la réécriture de ports séries sur un Arduino de type MKR ZERO	49
Figure 4.12	Photo du premier prototype SmartLux fonctionnel élaboré	50
Figure 4.13	Gestion des LEDs via l'Arduino.....	50
Figure 4.14	Cycle de vie d'une activité Android [49]	53

Figure 4.15	Diagramme d'état du cycle de vie des activités	55
Figure 4.16	Écran d'accueil de l'application SmartLux	56
Figure 4.17	Interfaces consacrées aux tests I-V	57
Figure 4.18	Interface graphique de l'onglet SETTINGS.....	60
Figure 4.19	Tentatives de connexions sur un réseau Wi-Fi.....	62
Figure 4.20	Interface Web de gestion des données.....	63
Figure 4.21	Code traduisant une requête de type POST via l'ESP8266	64
Figure 4.22	Requête de type SQL adaptée au langage PHP.....	65
Figure 4.23	Code Arduino permettant d'envoyer en une seule trame l'ensemble des informations nécessaires pour la base de données	66
Figure 4.24	Fichier PHP permettant de commuter les données vers la base de données de type MySQL	67
Figure 4.25	Principe de gestion d'envoi de données vers la base de données.....	68
Figure 5.1	Tests I-V de cellule InGaP sous lumière LED en : a) variation de luminosité à angle d'inclinaison nul, b) variation d'angle à luminosité constante de 200 Lux.....	72
Figure 5.2	Résultats issus de la littérature pour une cellule silicium sous lumière incandescente de 200 Lux en variation d'angle [35].....	74
Figure 5.3	Obtention d'une courbe I-V via l'onglet « IV CURVE » de l'application Android	78
Figure 5.4	Comparaison des performances de la cellule PV 3J avec le banc d'essai en laboratoire (Keithley) et avec le module autonome (Arduino).....	79
Figure 5.5	Stockage sur base de données d'un échantillon de plusieurs tests I-V	81
Figure 5.6	Exemple de courbe de l'évolution de la luminosité en Lux au cours d'une journée dans un bureau du 3IT disponible via l'interface Web par lecture de la base de données	82
Figure A.1	Exemples de tests I-V en variation de la luminosité d'une cellule InGaP pour différents types d'éclairages	91
Figure A.2	Résultats obtenus sous simulateur solaire	92
Figure A.3	Cellule PT5 testée sous lumière Fluorescente en test de variation de luminosité... ..	92
Figure B.1	Schéma EDA final du module SmartLux	93

Figure B.2	Module complet assemblé (en haut) et PCB (en bas) modélisés sur SolidWorks ..	94
Figure B.3	Interface d'ouverture de l'application de scanning de modules Bluetooth.....	95
Figure B.4	Interface Web via Smartphone.....	95
Figure B.5	Diagramme de séquence d'un test de type « DUT Test ».....	96
Figure B.6	Tableur récapitulatif du prix total de conception du prototype SmartLux.....	97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Échantillon de résultats obtenus dans la bibliographie a[32] b[33] c[23] d[11]..	14
Tableau 4.1	Cahier des charges du projet de mesure du potentiel photovoltaïque autonome.	29
Tableau 5.1	Comparaison entre les puissances maximales obtenues dans la littérature [35] et avec le banc d'essai de laboratoire	74
Tableau 5.2	Résultats obtenus pour toutes les cellules testées sous différents éclairages à 200 Lux (En rouge valeur maximale, en bleu valeur minimale)	75
Tableau 6.1	Bilan du cahier des charges du projet de mesure du potentiel photovoltaïque autonome	88

LEXIQUE

Terme technique	Définition
Milieu interne	Lieu désignant un espace où l'éclairage est principalement lié aux sources de lumières artificielles
Harvesting	L'action de récupérer un maximum de micro-énergies disponibles dans un environnement donné
Electronic waste	Ensemble des déchets liés à la fin de vie des équipements fonctionnant à l'électricité ou via des champs électromagnétiques

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition
W	Watt
V	Volt
A	Ampère
P_{\max}	Puissance maximale en Watt
I_{sc}	Courant de court-circuit en Ampère
sr	Stéradian. Unité d'angle solide d'un cône dont le sommet est au centre d'une sphère et découpe sur la surface de celle-ci une aire égale à celle d'un carré ayant pour côté une longueur égale au rayon de cette même sphère
cd	Candela. Unité définie par une valeur fixe de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540.10^{12} Hz et devant être égale à 683 lorsqu'elle est exprimée en lm.W^{-1}
lm	Lumen. Unité photométrique basée sur la perception humaine de la lumière à l'aide de la fonction d'efficacité lumineuse spectrale qui est égale à une candela par un stéradian
Lux	Unité de mesure de l'éclairement lumineux, également appelé illuminance
PCE	Efficacité énergétique (Power Conversion Efficiency)
FF	Facteur de remplissage (Fill Factor)
V_{oc}	Tension en circuit ouvert en Volt

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
IoT	Internet des Objets (Internet of Things)
WSN	Réseau de capteurs sans fil (Wireless Sensor Node)
SMU	Unité de source et de mesure (Source Measure Unit)
MPPT	Recherche du point de puissance maximum (Power Point Tracking)
LED	Diode électroluminescente (Light-Emitting Diode)
COB	Chip On Board
PCB	Printed Circuit Board
a-Si	Silicium Amorphe
GaAs	Arsenic de gallium
InGaP	Indium Galium Phosphide
mc-Si	Silicium Monocristallin
Poly-Si	Silicium Polycristallin
I-V	Courant-Tension
DSSC	Dye-Sensitized Solar Cells
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
RTC	Real Time Clock
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
LiPo	Lithium Polymer
REST	Representational State Transfer
SPI	Serial Peripheral Interface
I ² C	Inter-Integrated Circuit

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

Les cellules photovoltaïques, regroupées en panneaux, sont principalement connues pour leur utilisation en extérieur sous la lumière du soleil. Sous angle direct normal, l'irradiance solaire est estimée à $100\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$, à titre de comparaison, entre 0.05 et $5\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ sont disponibles dans un environnement intérieur typique (bureau, maison, etc.) [1]. L'énergie produite par une lampe artificielle représente donc entre 0.05 et 5% de celle produite par le soleil, cependant, l'utilisation de faibles énergies est devenue un sujet d'intérêt dans le contexte du développement de l'Internet des Objets (IoT).

L'Internet des Objets est « une infrastructure pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information » [2]. Il est prévu que 26 milliards de ces objets soient installés d'ici 2020 à travers le monde [3]. L'objectif est de regrouper un maximum de données sur un seul et même serveur global, favorisant le développement d'environnements intelligents. Ce principe intéresse les entreprises et centres de recherche, car ces technologies joueront un rôle majeur en permettant d'innover le traitement des données numériques dans un futur proche, baptisé Web 3.0, ou Web des objets [4]. Les objets connectés peuvent réagir à l'environnement dans lequel ils évoluent grâce à un regroupement de données centralisées sur un seul serveur, ou ordinateur. Par exemple, une maison pourrait gérer elle-même sa consommation en énergie grâce aux différents capteurs qui s'y trouveraient (capteurs thermiques, lumineux, etc.). Les données sont centralisées sur un même serveur, permettant à l'utilisateur de choisir le comportement que la maison doit adopter en fonction de ses besoins énergétiques. Ainsi, il est nécessaire de déployer un maximum de capteurs afin de récolter le plus grand nombre de données possible. La consommation énergétique de ces capteurs est devenue si faible que des sources d'énergie considérées comme mineures peuvent suffire à les alimenter. Ces énergies peuvent être thermiques, mécaniques ou lumineuses.

Le *Wireless sensor node* (WSN) est une technologie de capteur utilisée pour communiquer des informations dans un réseau. Utilisés à plus grande échelle, ils répondent à la problématique

principale de l'Internet des objets, qui est l'interconnexion et la lecture continue de données dans un environnement [5]. Il s'agit d'une technologie apparue dans les années 90 dont le principe est le suivant : les données sont communiquées par radiofréquence puis réceptionnées et stockées sur un ordinateur ou un serveur. Les premiers modèles de WSN requéraient des piles, qui servaient à alimenter le microcontrôleur traitant les données récupérées par les différents capteurs. Si la production de ces WSN devenait importante, l'utilisation d'une pile pour chaque capteur serait peu envisageable au vu du coût de production, du cycle de vie limité ainsi que de l'impact environnemental. De nombreuses solutions ont été proposées pour alimenter les WSN comme : l'utilisation de supercondensateurs [6], la récupération de micro-énergies complémentaires présentes dans l'environnement provenant de sources mécanique, thermique, ou de courants d'air [7]. L'intégration de méthodes de maximisation de l'énergie récupérée via l'utilisation de méthodes *maximum power point tracking* (MPPT) [8] permet d'optimiser davantage les processus de récupération d'énergie. Des capteurs parfaitement autonomes ont ainsi pu voir le jour et remplir les fonctions qu'on leur attribuait [9], [10].

La lumière artificielle est une faible source d'énergie intéressante pour l'alimentation de capteurs sans fil. Cette alimentation est assurée essentiellement par une cellule photovoltaïque dont le comportement peut énormément changer d'un milieu à un autre. Le PV interne (PV indoor) est basé sur ce principe pour alimenter les objets IoT. De nombreux facteurs peuvent influencer sur la performance énergétique d'une cellule photovoltaïque en intérieur comme la nature de la source d'éclairage, l'intensité de lumière, la position, la température, etc...

L'optimisation des solutions PV indoor pour alimenter les objets IoT exige l'introduction d'une méthode de caractérisation de l'environnement, particulièrement pour tenir compte de la nature et de l'emplacement des sources de lumières artificielles utilisées afin de déterminer le type de cellules optimal en fonction de l'emplacement des capteurs WSN. Ce point fait l'objet principal de ce travail de maîtrise.

1.2 Définition du projet de recherche

Les capteurs IoT sont amenés à fonctionner sans interruption de manière autonome dans des lieux tels que des industries, des hôpitaux ou des centres de surveillances. Pour améliorer leur autonomie énergétique et tirer profit au maximum de l'énergie lumineuse disponible, la nécessité de caractériser les performances des cellules PV sous éclairage interne est indispensable.

Des bancs de tests en laboratoire ont été élaborés afin de quantifier la puissance électrique des cellules photovoltaïques sous l'éclairage avec des lampes usuelles (halogènes, néon, LED...) [11]. Cependant, une étude en laboratoire n'est pas suffisante car celle-ci ne donne qu'une estimation du rendement de la cellule photovoltaïque en simulant les conditions du local (principalement : la puissance, la nature de la lampe et sa position relative par rapport à l'objet IoT. La simple présence de la lumière du jour (fenêtre) peut avoir un impact important sur la production énergétique, et doit donc être quantifiée. Les simulateurs pour PV en intérieur ne permettent pas d'évaluer la puissance PV à un point précis du local où sera placé le capteur. Aucun dispositif de caractérisation n'existe actuellement pour assister les installateurs d'objet IoT, et leur permettre d'identifier les emplacements adéquats en termes de potentiel photovoltaïque ou de déterminer la cellule PV qui serait optimale en fonction de la puissance du capteur IoT. La problématique de recherche traitée dans ce travail se fixe comme objectif de répondre à la question suivante: Comment déterminer efficacement le profil énergétique d'un environnement intérieur non contrôlé via l'utilisation d'un module de mesure?

1.3 Objectifs du projet de recherche

L'objectif de ce projet de recherche est de proposer une solution à faible coût qui permet de connaître rapidement l'énergie photovoltaïque disponible en un point quelconque d'un local. Un tel outil pourrait aider les techniciens installateurs de capteurs IoT pour déterminer le type de cellule le mieux adapté et/ou de choisir l'emplacement idéal.

On se propose de concevoir et de fabriquer un appareil de mesure mobile qui peut recevoir des cellules solaires montées sur un support de façon interchangeable. Il s'agit d'un système embarqué qui intégrera un module simplifié de *source measure unit* (SMU) afin de faire des

caractérisations électriques précises basées sur les mesures I-V 4 pointes. Un logiciel ergonomique doit être développé pour contrôler le module, paramétrer les mesures, analyser et transférer les données vers un serveur. En plus de fournir les caractéristiques des cellules PV (courant de court-circuit I_{sc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} , et la puissance maximale P_{max}), le module doit être capable de mesurer la puissance PV produite par la cellule en fonction du temps et de la position du capteur. Ces informations sont suffisantes pour aider à l'installation de capteurs WSN alimenté par des cellules PV.

1.4 Contributions originales

Plusieurs contributions originales sont potentiellement offertes dans ce projet :

- L'appareil que nous proposons sera le premier instrument qui permettra d'évaluer le potentiel photovoltaïque en intérieur en tenant compte des spécificités du local où seront placés les objets IoT.
- Il est également le premier appareil qui permet de cartographier le potentiel PV d'un local. Le fait de pouvoir interchanger facilement la cellule PV sera aussi une innovation et permettra de déterminer la cellule s'adaptant le mieux en fonction de la consommation du capteur IoT.
- En s'appuyant sur le principe de fonctionnement de ce module, il sera possible d'étendre son utilisation en extérieur et d'y effectuer les mêmes types de mesures.

1.5 Plan du document

Le chapitre 2 se concentrera sur l'état de l'art et mettra en lumière l'ensemble des problématiques abordées par le sujet. L'Internet des objets, le rôle de capteurs intelligents autonomes, le rôle du photovoltaïque en intérieur, ainsi que les méthodes d'optimisation de l'énergie y seront détaillés.

Le chapitre 3 détaillera le fonctionnement d'un montage en laboratoire de référence. Ce dernier servira essentiellement à valider les résultats obtenus avec le module portable.

Le chapitre 4 détaillera toutes les étapes ayant permis de mettre au point le module de mesure autonome. La conception informatique et électronique, ainsi que des choix de design purement matériels y seront présentés.

Le chapitre 5 abordera les résultats obtenus par le banc d'essai en laboratoire, les résultats obtenus par le module de mesure autonome, ainsi que leur comparaison seront présentés. De plus, les méthodes de stockage et de lecture en ligne seront détaillées.

Finalement, une conclusion sera donnée sur l'efficacité du module proposé, ses limites, et quelles améliorations peuvent être apportées.

CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART

2.1 Les nœuds de capteurs sans fil

La production des nœuds de capteurs sans fil de type WSN a débuté en 1998 [12]. À l'origine, ce dernier était conçu pour des applications militaires et environnementales. Le but était de pouvoir repérer à une distance importante des variations acoustiques ou mécaniques de l'environnement. Cette installation devait être effectuée rapidement avec le moins de contraintes possible, par exemple en lançant directement les capteurs par voie aérienne dans un environnement donné. Contrairement à des capteurs classiques, ces derniers devaient pouvoir communiquer leur résultat à un ordinateur central, mais également répondre à une demande provenant de l'ordinateur. Ils devaient être accessibles pour plusieurs utilisateurs : ceci constituait le premier réseau de capteurs.

Les WSN sont constitués de plusieurs éléments : (i) un transpondeur pour émettre et recevoir l'information, (ii) un ou plusieurs capteurs selon l'application du WSN, (iii) un microcontrôleur qui lit et traduit l'information provenant des capteurs via un convertisseur analogique numérique (iv) une source d'alimentation telle qu'une pile qui alimente le microcontrôleur. La Figure 2.1 ci-dessous illustre les différents éléments disponibles sur un WSN.

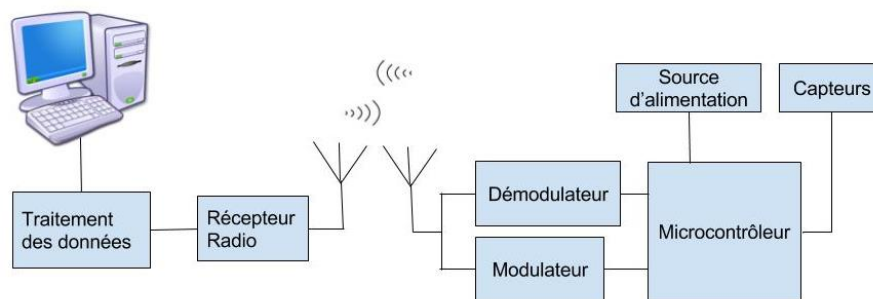


Figure 2.1 Fonctionnement standard d'un WSN [10]

Par la suite, ces capteurs ont été utilisés pour récupérer des données pour des applications telles que la régulation de température, de luminosité ou de pollution. En parallèle, les objets électroniques n'ont cessé de subir une miniaturisation de plus en plus importante. Ce principe est connu sous le nom de la loi de Moore [13]. Cette dernière prévoit une intégration toujours plus importante du nombre de transistors par unité de surface au sein des microprocesseurs. Une

conséquence directe de cette loi est la miniaturisation des systèmes à micro-processeurs. Cela a également induit la réduction du coût énergétique des appareils électroniques à performance égale. Les capteurs WSN ont pu bénéficier de cet avantage et évoluer sous différentes formes telles que les *mm-scale sensor*, un type de WSN de taille millimétrique [14] et le *Body sensor network* (BSNs) spécialisé dans le relevé de données liées aux activités du corps humain [15]. Cette avancée technologique permet au WSN de trouver une place au sein du marché innovant de l'Internet des objets.

2.2 Internet des objets

L'Internet des objets est une association des capteurs modernes, de technologies sans fil et d'Internet [16]. Ce concept favorise l'interconnexion d'ordinateurs de petites tailles, de maisons intelligentes, de cellulaires intelligents sur un réseau commun. Ce réseau peut être accessible via un ordinateur directement relié à Internet, un *Cloud*, etc. L'étude des données récupérées par ce principe permet une meilleure compréhension de phénomènes typiquement statistiques (météorologie, comportements humains, circulation automobile, etc.) par l'utilisation d'algorithmes de traitements. La Figure 2.2 ci-dessous présente un schéma illustrant ce concept.

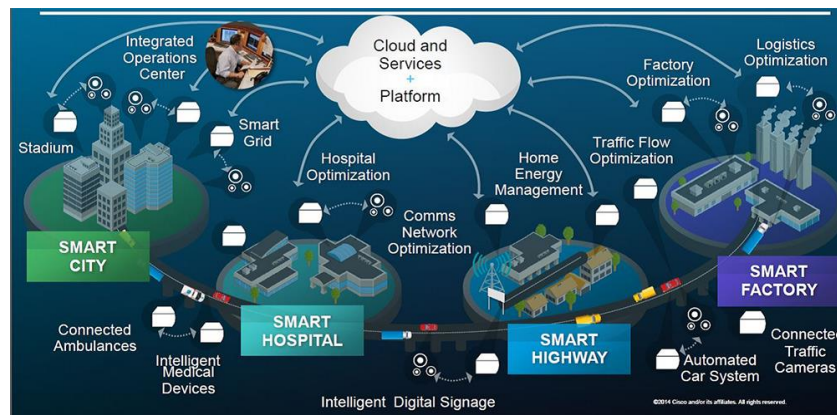


Figure 2.2 Vision de l'Internet des objets selon l'entreprise Cisco [17]

De nombreux défis sont à relever pour aboutir à un tel projet global : (i) le contrôle de l'homme sur les objets, (ii) l'incertitude et l'interprétation des données récoltées, (iii) la sécurité des données transférées. L'exploitation d'un aussi grand nombre de données (*Big Data Treatment*) a le potentiel de résoudre des problématiques majeures d'ordre climatique et économique [18]. Par exemple, elle a permis de mettre en place une agriculture de précision et d'instaurer des méthodes scientifiques en vue d'améliorer la gestion des récoltes [19]. En parallèle, le

déploiement d'un grand nombre de capteurs nécessite de ne pas induire une surproduction en pile d'alimentation pour chaque produit. Le phénomène du *e-waste*, le gaspillage des déchets électroniques, est un problème important qu'il est souhaitable de prendre en compte dès la création d'un produit utilisant de l'électronique [20]. À terme, des projets plus ambitieux tel que le *Zero Energy Building* (ZBE) prévoyant d'ici 2050 la construction de bâtiments parfaitement autonomes, pourrait voir le jour appuyé par ces technologies [21].

Les capteurs intelligents de type WSN ne consomment désormais que très peu d'énergie. Si les WSN pouvaient se passer de piles, et dédiés à la régulation environnementale d'un bâtiment, cela constituerait une étape franchie dans cette volonté de rendre un projet tel que le ZBE réaliste [22]. Afin d'augmenter la production de capteurs tout en limitant la prolifération de déchets électroniques (Electronic waste), plusieurs chercheurs ont étudié la possibilité de rendre ces capteurs énergétiquement autonomes [23]-[24]-[25]. C'est dans ce contexte que l'utilisation de la lumière artificielle en tant que source d'énergie est pertinente. Cette dernière, couplée avec un système de stockage temporaire plus optimisé qu'une pile permettrait d'alimenter efficacement des capteurs sans fil.

2.3 Photovoltaïque dans un milieu interne

L'éclairage artificiel, telle que les sources halogènes, LED, ou fluorescentes, sont une source de faible énergie disponible dans un très grand nombre d'environnements. Un éclairage peut être constitué de plusieurs sources qui interfèrent entre elles, parmi lesquelles la lumière provenant du soleil. Nous souhaitons dans cette étude proposer une approche où la lumière provenant de l'extérieur n'a que peu d'influence sur l'alimentation du capteur de type WSN. On définit ainsi la notion d'environnement interne comme étant tout lieu ayant pour source d'éclairage principale la lumière artificielle (bureau, salle de réunion, supermarché, etc.). Une partie de la lumière disponible peut provenir du soleil, mais ne peut constituer la source d'éclairage principale.

La production d'un courant photovoltaïque en milieu interne est intéressante, car la lumière artificielle constitue l'une des sources d'énergie les plus importantes parmi celles disponibles dans ce type d'environnement. Dans un environnement interne, des systèmes piézoélectriques

ou thermoélectriques condensés produisent en moyenne une énergie de l'ordre de $100 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$, tandis qu'un ensemble de cellules photovoltaïques produit en moyenne une énergie de l'ordre de $5\text{mW}\cdot\text{cm}^{-3}$ [26], soit 50 fois plus. Pour avoir une telle efficacité, il est nécessaire de tenir compte de plusieurs paramètres. Les deux plus importants sont la source lumineuse et la cellule photovoltaïque utilisée. En effet, chaque cellule photovoltaïque possède sa propre capacité d'absorption du spectre lumineux et la quantité d'énergie récupérée par une même cellule sera différente selon la source utilisée. Il est donc nécessaire de comprendre comment quantifier cette puissance issue d'une source lumineuse.

Irradiance ou densité de puissance ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

La densité de puissance totale E émise par la source lumineuse, aussi appelée irradiance totale, s'exprime comme la somme de chaque irradiance E_λ aux longueurs d'onde λ . L'irradiance totale s'exprime en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ et est donnée par l'équation 2.1 ci-dessous :

$$E = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.1)$$

Le choix de la source de lumière artificielle utilisée aura ainsi une grande influence sur le courant produit par la cellule photovoltaïque, au même titre que l'intensité de la source. Quatre types d'éclairage sont répertoriés pour la lumière artificielle : fluorescent, LED, incandescente et halogène. Le domaine du visible se situant entre 400 et 800 nm, un éclairage artificiel est conçu pour rester entre ses valeurs. Les lampes halogènes émettent dans le rouge (autour de 800nm), tandis que les lampes LED et Fluorescentes émettent davantage dans le bleu (autour de 400nm). Les spectres de ces sources sont très différents de celui du soleil qui couvre au-delà du spectre du visible.

Pour relever l'irradiance en extérieur, soit sous rayonnement solaire, l'appareil le plus couramment utilisé est le pyranomètre. Celui-ci permet de récupérer l'irradiance totale, diffuse et directe qui sont exprimées en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Ces données sont celles qui auront la plus grande influence sur la performance d'une cellule photovoltaïque. Cependant, l'irradiance exprimée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ n'est pas la donnée qui sera utilisée pour le photovoltaïque en intérieur pour les raisons présentées dans le paragraphe suivant.

Éclairage lumineux ou illuminance (Lux) et efficacité lumineuse spectrale en intérieur

Dans le cas du photovoltaïque en intérieur, les valeurs en irradiance sont très faibles, c'est-à-dire inférieures à 1 W.m^{-2} par rapport à 1000 W.m^{-2} en extérieur sous le soleil [1]. De plus, un pyranomètre est un appareil calibré sur le spectre solaire, et donc peu adapté aux différents spectres des sources lumineuses en intérieur. Au vu de ces deux observations et du coût des équipements de mesures extérieur, il est peu judicieux que ces derniers soient utilisés en intérieur et plus précisément dans le cadre de ce projet.

Ainsi, la mesure de l'éclairage lumineux en Lux est une solution alternative permettant de comparer les performances des cellules photovoltaïques autrement que par la mesure de l'irradiance en W.m^{-2} . L'éclairage lumineux en Lux est plus intuitif à concevoir car découle directement de comment l'œil humain perçoit son environnement. L'équation 2.1 est alors étendue au domaine du visible en intérieur via l'utilisation de l'efficacité lumineuse spectrale $V(\lambda)$ illustrée en Figure 2.3. Cette dernière est une courbe modélisée par la commission internationale de l'illumination (CIE) permettant le calcul de l'irradiance E (en W.m^{-2}) via la connaissance de l'éclairage lumineux (en Lux), aussi appelé illuminance [27]–[29].

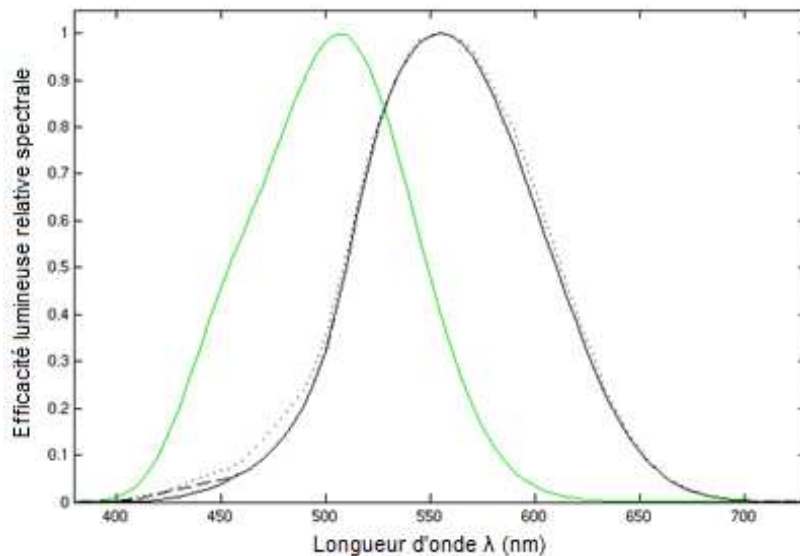


Figure 2.3 La luminosité $V(\lambda)$ photopique en noir, et scotopique en vert. (Courbe photopique séparée entre la CIE 1931 standard en ligne continue, la Judd-Vos 1978 en trait discontinu et la Jägle & Jägle 2005 en pointillés) [27]–[29]

Il existe deux types de courbes d'efficacité lumineuse spectrale. La courbe de luminosité photopique noire est basée sur la vision de l'être humain sous un éclairage standard, tandis que la courbe de luminosité scotopique verte se base sur une très faible luminosité. La courbe la plus couramment utilisée est la courbe photopique. Cette dernière permet d'obtenir la relation (2.2) :

$$E = \int_0^{\infty} E(\lambda) \cdot d\lambda = K_m \int_0^{\infty} E_{phot}(\lambda) V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.2)$$

où $E_{phot}(\lambda)$ est la mesure de l'illuminance en Lux, et K_m une constante dérivant de l'expression empirique du lumen, avec $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$.

L'utilisation de l'éclairage lumineux en Lux facilite la comparaison des performances des cellules photovoltaïques en intérieur. En effet, celui-ci est plus adapté aux sources de lumières artificielles peu intenses en énergie. Cependant, la mesure de l'éclairage lumineux pose un certain nombre de problèmes dont il est important d'avoir conscience avant d'effectuer des tests utilisant cette information. Comme expliqué précédemment, la valeur de l'intensité lumineuse exprimée en Lux se base essentiellement sur la vision humaine. Le résultat de la valeur en Lux va ainsi dépendre de 4 facteurs : la source de lumière, le filtre optique utilisé, la photo diode de mesure et le facteur de correction spectrale. Les trois derniers éléments font partie de la composition d'un luxmètre. Ils servent à reproduire la vision humaine sous une intensité lumineuse moyenne. Cependant, selon la qualité de l'appareil utilisé, les résultats peuvent être très différents. L'article *Extraordinary measures: the role of the lux meter* montre ainsi que la valeur en éclairage lumineux peut varier d'un luxmètre à un autre [30]. Cette erreur entre deux appareils peut être de plus de 50 Lux dans le cas de la lumière LED dont le spectre d'émission ne possède pas de standards universels. Ici, l'ajustement sur la vision humaine implique des erreurs plus ou moins importantes en fonction des mesures effectuées et des capteurs utilisés.

Ainsi, dans le cas de la mesure en Lux pour la caractérisation des cellules photovoltaïques, cette erreur sera forcément présente. Il sera donc primordial de réaliser des comparaisons de mesures entre des capteurs qui soient strictement identiques. Si deux capteurs de luminosité différents sont utilisés, la probabilité que les deux mesures ne soient pas les mêmes deviendrait très

élevées. Ce problème de référence peut être majeur, il faut en être conscient avant de débiter tout type de mesure.

Propriétés des cellules PV

Puisque l'on peut comparer les différentes valeurs d'éclairement lumineux, il faut maintenant relever la puissance émise par la cellule photovoltaïque sous un type d'éclairage donné. Il existe deux méthodes pour connaître les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque. La première s'appuie sur l'utilisation d'un calcul théorique : La relation (2.1) est utilisée essentiellement lors d'un calcul lié à une cellule solaire en extérieur, où la source de lumière est référée au rayonnement électromagnétique solaire. Le soleil est alors exprimé comme une valeur de puissance en $W.m^{-2}$ (à midi solaire, on considère le rayonnement à $1000 W.m^{-2}$). La deuxième donnée que l'on cherche à obtenir est le courant de court-circuit I_{sc} . Si l'efficacité quantique de la cellule est connue, le courant I_{sc} s'écrit alors selon la formule (2.3) :

$$I_{sc} = \int_0^{\infty} \frac{q \cdot E(\lambda) \cdot QE(\lambda)}{h \cdot c / \lambda} \quad (2.3)$$

où h est la constante de Planck et c la vitesse de la lumière dans le vide. Les données nécessaires pour réaliser ces calculs sont l'efficacité quantique d'une cellule et le spectre de la source étudiée.

La deuxième méthode permettant de connaître la puissance délivrée par une cellule photovoltaïque est l'utilisation d'une *Source Measure Unit* (SMU). Un voltage est injecté dans le semi-conducteur induisant un courant. Cette méthode permet d'obtenir une courbe courant-tension et de déduire 3 données : le courant de court-circuit I_{sc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} , et la puissance maximale P_{max} . De ces données, il est possible de déduire le facteur de remplissage FF, ainsi que la puissance convertie efficace PCE selon les formules (2.4) et (2.5).

$$FF = \frac{I_{Pmax} \cdot V_{Pmax}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2.4)$$

$$PCE = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P} \quad (2.5)$$

La comparaison entre les modèles théorique et expérimental montre des résultats proches et exploitables [1]. Ce type de travaux a fait l'objet de plusieurs articles, et le Tableau 2.1 répertorie les différentes valeurs relevées dans le cas de l'étude du photovoltaïque en intérieur. Les valeurs d'illuminance choisies sont similaires à celles en situations réelles. Par exemple, une pièce en entreprise est en moyenne éclairée à 500 Lux, selon les normes internationales imposées lors de l'installation d'un éclairage [31].

Les résultats obtenus sont de l'ordre du $\mu\text{W.cm}^{-2}$ pour les deux types de méthodes. La différence essentielle entre les deux méthodes est le matériel utilisé. Dans la méthode théorique, un spectromètre est nécessaire pour connaître le spectre de la source étudiée, ainsi qu'une station de mesure de l'efficacité quantique de la cellule photovoltaïque. Dans le cas de la méthode pratique, un SMU est nécessaire, ainsi qu'une méthode de câblage permettant de relier le SMU à la cellule photovoltaïque.

Tableau 2.1 Échantillon de résultats obtenus dans la bibliographie a[32] b[33] c[23] d[11]

Type	Source	Éclairage Lumineux (Lux)	P_{\max} ($\mu\text{W.cm}^{-2}$)
m-Si			4 ^a
Thick GaAs	LED Lamp	400	13 ^a
Thin GaAs			17 ^a
a-Si	Fluorescent Lamp		10 ^b
	LED Lamp	400	9 ^b
poly-Si	Fluorescent Lamp		7 ^b
	LED Lamp		6 ^b
m-Si	AM 1,5	300	12 ^c
		400	15 ^c
	Fluorescent Lamp	300	9 ^c
		400	13 ^c
a-Si	AM 1,5	300	15 ^c
		400	17 ^c
	Fluorescent Lamp	300	15 ^c
		400	17 ^c
DSSC	Fluorescent Lamp		6,6 ^d
	LED Lamp		7,7 ^d
a-Si	Fluorescent Lamp		8,1 ^d
	LED Lamp	200	9,4 ^d
GaAs	Fluorescent Lamp		13,8 ^d
	LED Lamp		16,6 ^d
InGaP	Fluorescent Lamp		15,6 ^d
	LED Lamp		17,6 ^d

Selon les puissances présentées au Tableau 2.1, on attend en moyenne des résultats de l'ordre de la dizaine de $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Les capteurs WSN peuvent être alimentés avec une puissance de l'ordre du mW grâce à l'énergie provenant des sources de lumière artificielle [23]. En effet, le fonctionnement de la plupart des WSN actuels s'effectue en mode *wake up*. Dans ce dernier, le capteur reste en mode *sleep* tant qu'aucune instruction n'est donnée. L'ordre de grandeur d'énergie récupérable par la lumière artificielle est dans un premier temps suffisante pour alimenter un capteur lorsqu'il est en mode *sleep* [22]. Nous verrons par la suite en section 2.4 des méthodes d'optimisation pour accroître cette énergie disponible. La Figure 2.4 illustre le concept du *sleep mode* utilisé par les WSN.

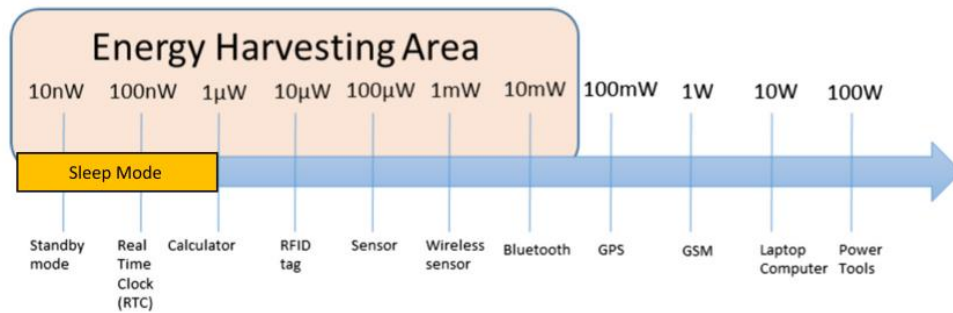


Figure 2.4 Domaines des énergies récupérables pour l'utilisation d'un WSN [22]

Simulateur PV Indoor

Les approches proposées pour obtenir les résultats répertoriés dans le Tableau 2.1 varient selon les articles. Il n'existe en effet pas de normes permettant de prévoir avec précision l'apport énergétique de la lumière en intérieur sur une cellule photovoltaïque. L'illuminance d'une lumière artificielle est connue pour décroître selon la relation (2.6) :

$$I_r = \frac{I}{r^2} \quad (2.6)$$

où I est l'illuminance exprimée en Lux au niveau de la source et I_r l'illuminance à la distance r entre la source et le point éclairé. Cependant, il est à noter que cette loi ne fonctionne pas pour les lampes à tubes fluorescents, considérées comme des sources de lumière linéaires. Pour simplifier la modélisation et obtenir des résultats reproductibles, il est suggéré de considérer la source de lumière comme un point lumineux ne se déplaçant que dans une direction. Pour

obtenir de meilleurs résultats, l'ensemble des instruments de mesure sont placés dans un caisson imperméable à la lumière extérieure dont les parois internes sont peintes en noir. La cellule est alors placée face à une seule et unique source, par exemple une lampe halogène [34]-[35]-[36]. Il est également possible de considérer une pièce comme un environnement d'étude, et de placer le module de mesure à différents endroits de celle-ci pour observer les variations en puissance [23]. Un SMU est utilisé pour caractériser la cellule photovoltaïque en traçant une courbe I-V. L'éclairement lumineux est le paramètre de variation principale, et est exprimé en Lux. Ce dernier peut être ajusté à l'aide de commandes numériques, ou d'un gradateur. Un éclairement lumineux important induit un photocourant plus important. D'autres paramètres doivent également être considérés, tels que la température, le spectre de la source, l'angle d'incidence ou bien la distance entre la source et la cellule [35]. En construisant ce type de station de test, il est possible d'obtenir une courbe telle que proposée en Figure 2.5. Ici, la station de test proposée est un caisson dans lequel sont intégrés un SMU de type Keithley, un gradateur pour faire varier l'éclairement lumineux ainsi qu'une plaque rotative. Grâce à cette dernière, l'inclinaison entre la cellule photovoltaïque et la source lumineuse en conditions réelles peut être simulée.

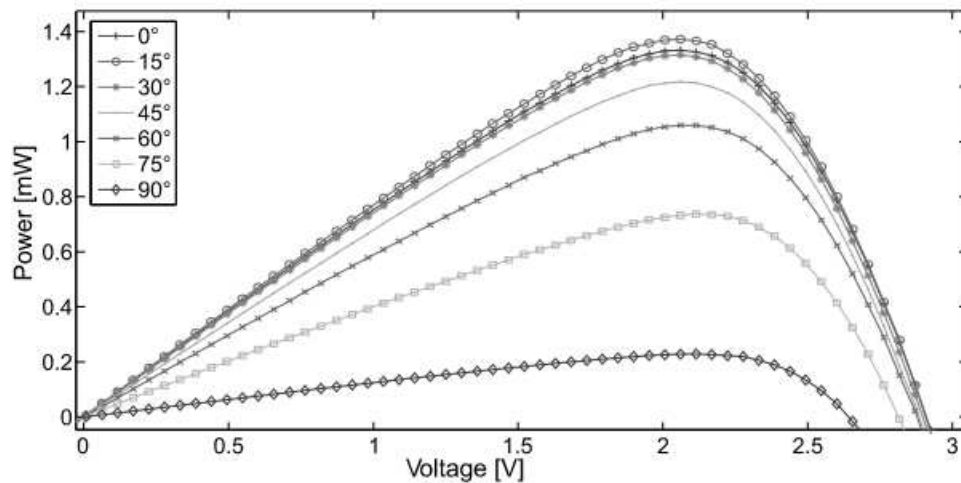


Figure 2.5 Courbes P-V d'une cellule amorphe sous lumière halogène à 200 Lux pour plusieurs angles d'incidence [35]

Plusieurs tests ont été réalisés pour différents types de cellules (InGaP, GaAs, Triple-Jonction, etc.), sources de lumière, angles d'incidence et distances entre la source et la cellule. Pour de si faibles sources d'énergies, la valeur de puissance maximale P_{\max} chute rapidement si les

conditions ne sont pas optimales. La Figure 2.5 montre que pour un angle incident de 75° , la puissance maximale est réduite de moitié par rapport à un angle d'incidence direct.

Dans les conditions réelles, c'est-à-dire dans un environnement inconnu, la seule mesure de l'éclairement lumineux, à l'aide d'un luxmètre, n'est pas suffisante pour prévoir le rendement d'une cellule. Le spectre de la lumière reçue par la cellule influence la production en courant électrique, et celui-ci peut être très différent d'un lieu à un autre. L'influence de la lumière extérieure en journée (si celle-ci est disponible), la lumière diffuse et la lumière réfléchie sont autant de paramètres difficiles à évaluer en laboratoire. Des simulateurs par ordinateurs prévoient l'éclairement lumineux d'une pièce, mais ne permettent pas de connaître exactement ce que la cellule photovoltaïque produit comme quantité d'énergie. L'absence de normes assurant le fonctionnement d'une cellule en toute autonomie dans un lieu inconnu est un manque important dans l'étude de l'autonomie de capteurs de type WSN par la récupération de l'énergie lumineuse. Ces données étant manquantes, les industries ont principalement mis en place des méthodes d'optimisation complémentaires afin de collecter de la manière la plus efficace possible l'énergie photovoltaïque disponible. Ces méthodes sont décrites dans le paragraphe suivant. Ces solutions sont pensées pour être directement intégrées dans le capteur WSN utilisant des cellules photovoltaïques.

2.4 Méthodes d'optimisation de la récolte de l'énergie photovoltaïque en intérieur

Plusieurs méthodes d'optimisation complémentaires de récupération de l'énergie photovoltaïque ont été développées pour améliorer l'autonomie en énergie des capteurs de type WSN. Les problématiques purement algorithmiques (traitement des données, communication sur le serveur, etc.) ou les domaines d'applications des WSN ne seront pas abordés. Il s'agira de s'intéresser aux sujets directement liés à la récupération d'énergies faibles et leur utilisation.

2.4.1 Maximum power point tracking

Lors d'une mesure I-V, il est possible de récupérer le paramètre P_{\max} , défini comme étant le point de puissance maximale. Cependant, cela ne signifie pas qu'il s'agisse de la puissance réelle

délivrée par la cellule. Un système photovoltaïque est un système dont le courant et la tension de sortie varient en fonction de plusieurs paramètres dont l'éclairement, mais aussi la température. Pour s'assurer que la puissance soit toujours maximale, le système de *Maximum power point tracking* (MPPT) agit comme un convertisseur de puissance qui crée une perturbation du système. Une des techniques les plus courantes utilisant ce principe est la méthode *Perturb and Observe* (P&O). Elle consiste à augmenter, ou diminuer la tension au sein de la cellule photovoltaïque et d'en observer la puissance. Cette même tension est modifiée jusqu'à ce que la puissance n'augmente plus. Ceci permet de toujours avoir la puissance maximale disponible, et est d'ailleurs très utilisée dans le photovoltaïque en extérieur [37]. L'utilisation des MPPT trouve donc une place importante pour la récupération de très faibles énergies. Plusieurs modèles ont été proposés dans le cadre du photovoltaïque en intérieur, garantissant une meilleure stabilisation et un meilleur rendement de l'énergie disponible, utilisant toujours la méthode P&O [8], [38], [39].

2.4.2 Amplification

Une autre méthode d'optimisation du courant récupérée est l'utilisation d'un convertisseur de Buck tri-mode. Un convertisseur de Buck est à l'origine un convertisseur de puissance donnant en sortie une tension plus basse. Ici, le principe est utilisé pour augmenter le courant de sortie jusqu'à une valeur de 20 mA [40]. La seule condition requise est une entrée minimum en voltage de 0.55V. Le convertisseur intègre trois principes : la modulation de largeur d'impulsions (PWM), la modulation de fréquence d'impulsions (PFM) et un mode asynchrone (AM). D'autres techniques, utilisant les principes de l'électronique de puissance, permettent d'obtenir un courant plus important. Un circuit combinant un convertisseur de Buck et un système MPPT, permettent d'obtenir des puissances en sortie de l'ordre du mW [41].

2.4.3 Supercondensateurs

Les supercondensateurs sont une solution alternative possible à l'utilisation de piles. Ils sont utilisés comme des batteries de stockage d'énergie, afin d'éviter le gaspillage de l'énergie emmagasiné au cours d'une journée. Contrairement à une batterie qui se recharge par effet électrochimique, le supercondensateur stocke l'énergie sous forme d'un champ électrostatique. Son temps de charge est plus rapide, et permet de délivrer des courants bien plus importants. Enfin, un supercondensateur peut se décharger et se recharger plus d'un million de fois,

contrairement à une batterie classique qui ne peut le faire que quelques milliers de fois. L'utilisation d'un supercondensateur est d'autant plus intéressante dans le cas des WSN, du fait de son mode de fonctionnement. Un WSN standard fonctionne sur 4 modes : (i) transmission, (ii) réception, (iii) Idle, (iv) Sleep. Le mode Sleep est le mode dans lequel se met un capteur intelligent lorsqu'il est en attente de données entrantes. Afin de ne pas gaspiller inutilement d'énergie, ce mode où aucune instruction n'est exécuté ne demande que quelques μW pour fonctionner, tandis que le mode de réception et d'envoi de données demande une puissance de l'ordre du mW [22], [42]. Ce principe a été présenté à la Figure 2.4. Le supercondensateur permet de délivrer le courant nécessaire au moment où le capteur est sollicité. Si la fréquence de fonctionnement du capteur est connue, il est même possible d'adapter le condensateur en fonction de l'énergie demandée. Plusieurs articles exposent le design de ce type de circuit, permettant d'utiliser le supercondensateur comme un amplificateur d'énergie pendant un court instant [43]-[44]-[45]-[46]. La miniaturisation toujours plus importante des appareils électroniques a également permis d'intégrer l'ensemble de ces matériaux dans des modules de très petites tailles [10].

2.4.4 Autres sources de faible énergie

L'utilisation du photovoltaïque en intérieur n'est pas la seule source disponible pour alimenter un WSN. D'autres catégories présentes dans un environnement standard sont les vibrations mécaniques et les pertes thermiques [26]. La récupération des vibrations mécaniques est réalisée à l'aide de capteurs piézoélectriques, ou bien par induction électromagnétique. Un générateur thermoélectrique fonctionne sur le même principe en récupérant les énergies thermiques gaspillées. Ces sources d'énergie peuvent être utilisées en complément. C'est ainsi que des bracelets près du corps humain peuvent être alimentés [47]. Les ondes RF (fréquences radio) peuvent également être récupérées sous forme d'énergie électrique [7]. Lors de l'envoi d'une information, le WSN peut avoir deux modes distincts : un mode de réception de données et un mode de conversion de l'énergie. L'utilisation d'un maximum d'éléments pour l'alimentation de capteurs est nécessaire pour assurer l'efficacité de ces derniers.

2.4.5 Modules de communication et économie d'énergie

Pour communiquer entre eux, les WSN utilisent différents types de signaux. Comme mentionné ci-dessus, la communication par fréquence radio est ce qui est le plus répandu. C'est lors de la réception et de l'envoi des données que le capteur nécessite le plus d'énergie. Pendant longtemps, les modules les plus populaires ont été les modules *ZigBee*. Ces derniers ont l'avantage de ne consommer que peu d'énergie et d'être peu onéreux à produire. En revanche, leur distance de communication est faible (10-75 m) et les ondes de communication éprouvent beaucoup de difficultés à traverser les murs. L'utilisation d'un module de communication Wi-Fi semble ainsi plus intéressante. Le problème principal de cette méthode est qu'elle consomme beaucoup d'énergie [19]. Pour contrer ce problème, un *Sleep mode* a dû être mis en place, permettant au capteur de rester inactif. Il s'agit d'un fonctionnement sur un mode de communication de type *Wake-Up mode*, où il est nécessaire de sortir le WSN de son état de sommeil avant de pouvoir l'utiliser. Dans son état de sommeil, le capteur est en attente d'un bit de fin de cycle. Une adresse d'état est attribuée au récepteur, et n'envoie un signal de *Wake-Up* que si celui-ci est identique. Cependant, ce mode de fonctionnement est peu utilisable avec un mode de communication RF parce qu'il existe de nombreuses ondes parasites pouvant perturber le signal d'entrée reçu par l'antenne. Plusieurs modèles alternatifs ont ainsi été proposés : (i) mode de communication infrarouge, (ii) ultrason, (iii) lumière visible. Dans le cas de la lumière visible (*visible light wake-up mode communication*), le principe est appliqué en utilisant une lampe LED pour communiquer, et présente un bon fonctionnement, en plus de pouvoir stocker davantage d'énergie lumineuse. Le modèle reste pour l'instant limité, du fait de la courte distance qu'il peut couvrir (14 m) et des conditions particulières d'éclairage demandées [48].

CHAPITRE 3 SIMULATEUR POUR LE PHOTOVOLTAÏQUE EN INTÉRIEUR

3.1 Motivations

Le but principal du projet étant de proposer un module de mesure autonome et mobile du potentiel photovoltaïque en intérieur, une station de test en laboratoire fixe a été réalisée au préalable. Cette dernière servira de référence et permettra de comparer les résultats obtenus avec le module autonome dont la conception sera présentée dans le chapitre 4. Cette solution permettra aussi d'étudier le comportement des cellules photovoltaïques testées selon l'éclairage utilisé. Ces résultats pourront être comparés avec ceux cités dans l'état de l'art.

3.2 Principe de fonctionnement

La solution proposée est largement inspirée de l'article *A measurement platform for photovoltaic performance analysis in environments with ultra-low energy harvesting potential* [35]. Ce dernier propose une station de mesure placée dans un caisson qui ne laisse pas pénétrer la lumière provenant de l'extérieur. Au sein de ce caisson, une cellule photovoltaïque est branchée à un Source Measure Unit (SMU) de référence afin de réaliser différents types de tests courant-tension (I-V). Plusieurs paramètres sont étudiés durant chaque test : (i) le type de source lumineuse, (ii) le type de cellule photovoltaïque, (iii) le spectre de la source lumineuse, (iv) la valeur de l'éclairement lumineux en Lux, (v) la température en °C au sein du caisson, (vi) la distance entre la source lumineuse et la cellule photovoltaïque, (vii) l'angle d'inclinaison de la cellule photovoltaïque avec la source lumineuse. La variation de l'angle d'inclinaison, ainsi que de la distance entre source et cellule est entièrement automatisée via un ordinateur de contrôle. En effet, d'après l'état de l'art, nous savons que tous ces paramètres ont une influence importante sur la performance de la cellule photovoltaïque.

Mesurer l'angle entre la source lumineuse et la cellule photovoltaïque permet de simuler les différentes positions d'une cellule en situation réelle. En effet, il est peu probable qu'une cellule photovoltaïque soit toujours en face de la source lumineuse. Il existera toujours un écart angulaire entre ces deux entités, ce qui inévitablement fera baisser la performance de la cellule.

Des tests comparants la différence en intensité lumineuse, ainsi qu'en variation d'angle sont donc tout à fait pertinents.

Dans le cadre de la station que l'on souhaite bâtir, les mesures seront effectuées dans une salle sombre pour éviter la construction d'un caisson supplémentaire. La distance entre la cellule et la source lumineuse ne sera pas automatisée via l'aide de moteurs. L'utilisateur devra directement renseigner lui-même ce paramètre dans le logiciel. En revanche, l'angle d'inclinaison nécessite d'être automatisé afin de conserver la précision de la mesure. Mis à part ces quelques variations, la solution proposée pour bâtir le banc d'essai de référence sera très proche de la solution présentée dans l'article précédemment cité.

3.3 Montage Physique

L'élément central permettant de gérer l'inclinaison de la cellule par rapport à la source, ainsi que la lecture de différents capteurs est un microcontrôleur de type Arduino UNO. Il s'agit d'un microcontrôleur simple d'utilisation et adapté à ce type de projet. Ce dernier est directement branché sur le port USB d'un ordinateur, mais est aussi couplé avec un double contrôleur moteur pas à pas de IteadStudio. Ce système permet de contrôler une plaque tournante sur laquelle est installée la cellule photovoltaïque. Le microcontrôleur est également utilisé pour lire les différents capteurs nécessaires au système. Un capteur luminométrique de type PDV-P7002-ND calibré est utilisé pour mesurer l'éclairement lumineux, tandis qu'un capteur DS18B20 est utilisé pour mesurer la température. La source lumineuse provient d'une lampe installée au-dessus du montage, dont la hauteur peut être réglée par l'utilisateur, et l'intensité lumineuse de celle-ci est ajustée via le gradateur. Le capteur luminométrique renvoie alors le niveau de luminosité à l'utilisateur via la lecture de l'Arduino et est affiché sur le logiciel.

Un autre élément nécessaire pour ce montage est un spectromètre. Celui qui est utilisé dans ce montage est un spectromètre compact CCD de la compagnie Thorlabs. Il s'agit d'un module connecté directement sur un port USB d'un ordinateur. Le schéma présenté en Figure 3.1 illustre le fonctionnement global du montage.

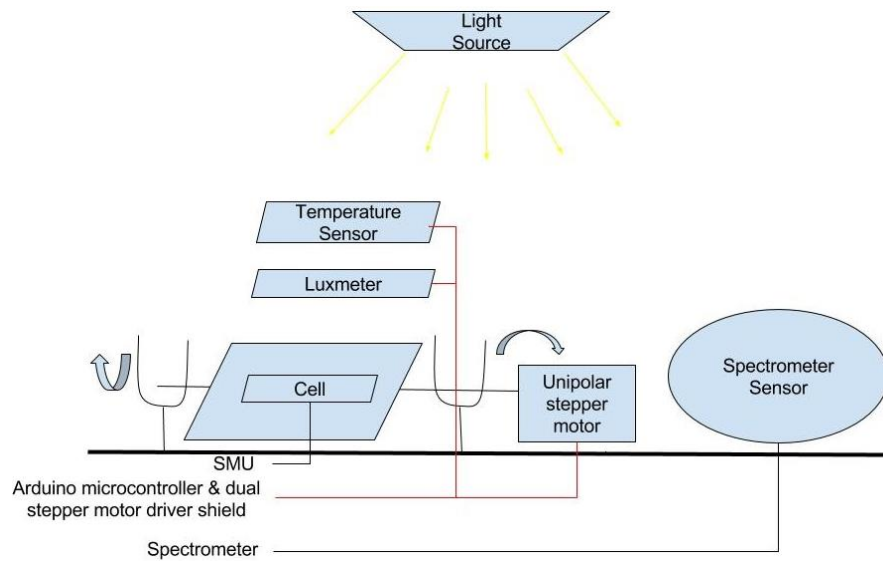


Figure 3.1 Schéma global du banc d'essai en laboratoire

Pour fixer une cellule photovoltaïque sur un support soumis à l'inclinaison, il est nécessaire de combiner au préalable cette dernière avec un PCB. La technique utilisée pour cela combine du wirebonding et un collage à base de laque d'argent. Le wirebonding est une technique permettant de souder des composants avec des fils de seulement quelques μm de diamètre. En collant la face arrière de la cellule avec de la laque d'argent, et en reliant la face avant à une surface conductrice via le wirebonding, on peut créer un support intermédiaire fixable sur la plaque de rotation. Un schéma de ce montage sur PCB est présenté à la Figure 3.2.

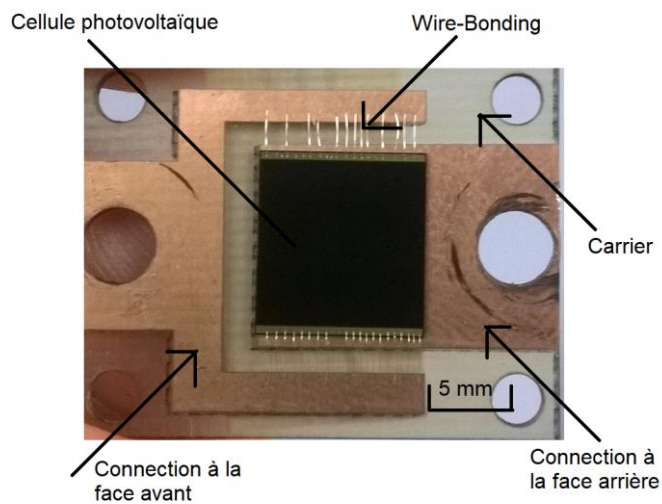


Figure 3.2 Montage sur PCB d'une cellule photovoltaïque

La cellule est ensuite reliée à un Source Measure Unit (SMU) pour tracer les différentes courbes courant-tension via la méthode des 4 pointes. Deux câbles relient le PCB au SMU, où le « high » est connecté à la face arrière et le « low » à la face avant de la cellule. Le SMU utilisé pour ce montage est un Keithley Multimeter 2602A. La cellule peut alors être caractérisée en balayant sa plage de fonctionnement pour différents couples de courants et de tensions. Le contrôle de ce système est assuré par le système informatique mis en place sur un ordinateur dédié.

3.4 Logiciel de contrôle

Pour obtenir les différentes valeurs des paramètres électriques d'une cellule, un programme informatique a été développé dans ce travail de maîtrise pour automatiser chacune des étapes de mesures. Ce dernier a été codé via l'environnement de développement LabVIEW. Il s'agit de la solution la plus simple pour combiner un module Arduino avec un appareil de mesure Keithley ainsi qu'un spectromètre de la compagnie Thorlabs. Les paragraphes suivants détaillent comment fonctionne le programme de test I-V dédié pour le photovoltaïque en intérieur.

La fonction première de cette station de test est de pouvoir réaliser des tests courant-tension. L'algorithme implémenté pour gérer chaque test est présenté en Figure 3.3.

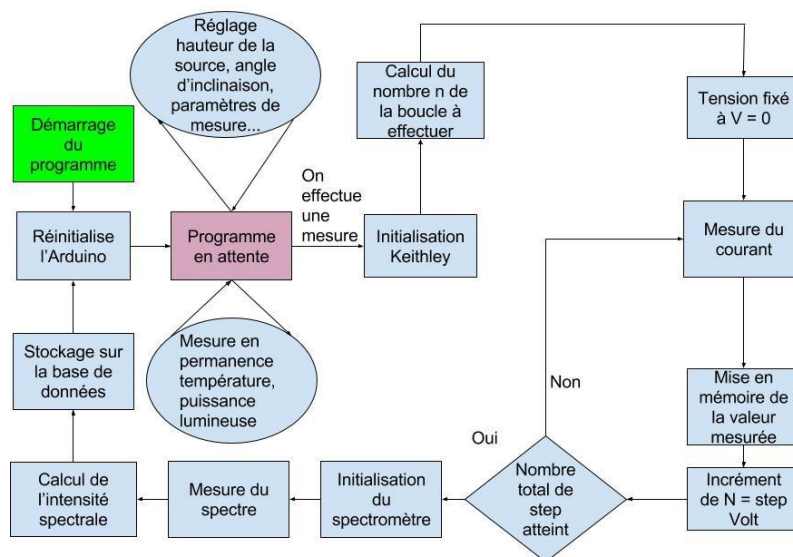


Figure 3.3 Algorithme de test I-V du programme LabVIEW

L'idée est de proposer un programme où il est possible de relever les différents paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque et de pouvoir renseigner soi-même les différents paramètres tels que la distance entre la cellule et la source lumineuse. Il y a ainsi une phase d'attente, et une phase d'initialisation de test. Lorsqu'un test est lancé, l'appareil Keithley balaye en tension la cellule photovoltaïque. Celui-ci récupère durant ce test les valeurs en V_{oc} , I_{sc} et P_{max} . Le SMU balaye en tension jusqu'à ce que la cellule ne produise plus de courant. Ceci permet de récupérer une courbe I-V qui s'affiche sur l'interface graphique. À la fin de ce test, le programme demande une mesure du spectre qui s'étale sur 10 secondes. Toutes ces informations peuvent ensuite être affichées sur l'interface graphique.

Cette interface graphique est présentée en Figure 3.4. Via celle-ci, il est possible de modifier l'angle d'inclinaison de la cellule, d'initier le début d'un test I-V ou de donner la précision du balayage en tension. Les différents paramètres tels que le type de cellule utilisé, le type de source lumineuse ou bien l'aire de la cellule peuvent être modifiés à tout moment en dehors des phases de tests.

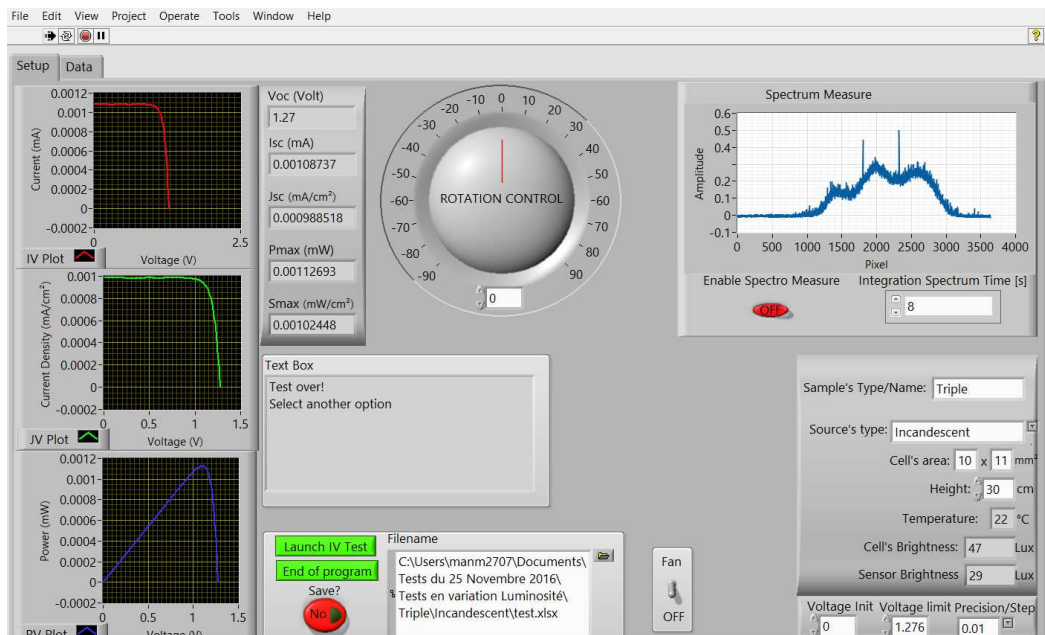


Figure 3.4 Interface Graphique du programme de test I-V en laboratoire

Les données sont alors envoyées dans un fichier Excel. Ce dernier peut ensuite être traité via Origin pour en tirer des courbes I-V. Les résultats de ces tests sont donnés dans le chapitre 5 et sont comparés avec les mesures du module autonome développé dans le cadre de ce projet.

3.5 Limites de la mesure en laboratoire

La mesure en laboratoire présente des résultats cohérents. Ces derniers sont présentés en section 5.1. Cependant, cette méthode est peu adaptée à l'étude en cas réels. Elle nécessite un Source Measure Unit, un ordinateur ainsi que d'un support permettant de créer une rotation de la cellule. Ce système est trop encombrant, comme peut le montrer une photo du montage en Figure 3.5, et ne permet pas de mesurer à un point précis d'un environnement.

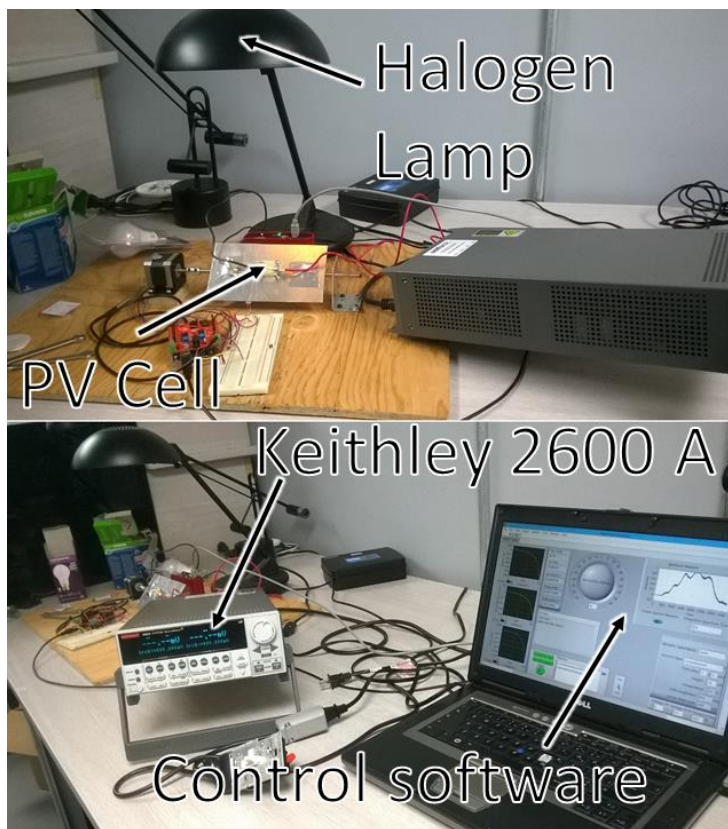


Figure 3.5 Banc d'essai en laboratoire de référence

Dans le cadre de ce projet, on désire une solution qui puisse mesurer directement en un point d'une pièce l'énergie que peut produire une cellule PV. Le chapitre suivant va développer toutes les étapes qui ont permis de construire ce module de mesure portable.

CHAPITRE 4 CONCEPTION D'UN MODULE DE MESURE AUTONOME

Au travers de ce chapitre, toutes les étapes nécessaires à la conception du module de mesure portable seront développées. Une première étape nécessaire est la mise en place d'un cahier des charges qui va permettre de définir les fonctions principales du module.

4.1 Cahier des charges

Avec les différents résultats obtenus via la littérature et le simulateur de référence en laboratoire, un cahier des charges du module autonome peut être dressé. Le cahier des charges en question est résumé via le Tableau 4.1 ci-dessous.

Tableau 4.1 Cahier des charges du projet de mesure du potentiel photovoltaïque autonome

Le module doit fonctionner pour au moins une journée complète de mesure. Il peut cependant être branché au secteur si besoin, et être rechargeable. La consommation énergétique doit être en adéquation avec la batterie utilisée
Le module doit pouvoir tenir dans la main et être facile à transporter. Le poids ne doit pas être excessif
Le coût de production ne doit pas dépasser 200\$ pour un seul module. La cellule photovoltaïque n'est pas prise en compte
Réaliser un test I-V dans un temps raisonnable, soit moins d'une minute
Pouvoir travailler avec différentes cellules photovoltaïques moyennant un support amovible
La précision de mesure doit être de l'ordre du μA
La plage de mesure du module ne doit pas être limitante et respecter l'ordre de grandeur de précision donnée précédemment
Intégrer un capteur de luminosité et un capteur de température
Connaître l'heure et la date de chaque mesure effectuée
Permettre à l'utilisateur d'indiquer manuellement le lieu de la mesure, le type de lumière utilisée, l'ID de la cellule photovoltaïque utilisée ou bien le nom du module de mesure
Pouvoir stocker une partie des données récoltées ainsi que les paramètres entrés par l'utilisateur
Proposer une interface graphique intuitive permettant à l'utilisateur de communiquer avec le module
Via cette même interface, pouvoir se connecter simultanément sur plusieurs modules
Mettre en place des tests qui permettent à l'utilisateur de laisser le module travailler en autonomie sur une journée
Afficher les informations d'un test I-V, ainsi qu'une courbe
Permettre à l'utilisateur de renseigner au module des informations propres au type de mesure via l'interface graphique
Mettre en place un système de récupération des données efficace et automatique
Créer une interface qui permet de réunir et lire les différentes données récupérées facilement

La première partie essentielle de ce projet repose ainsi sur la mise en place d'un test I-V de la cellule photovoltaïque, et constitue l'objectif principal de ce projet. Ceci peut être décrit comme étant la partie test électrique, qui doit entièrement être gérée par le microcontrôleur qui sera choisi. Cette partie sera largement inspirée de ce qui a déjà été fait pour le banc de caractérisation en laboratoire. Chaque test étant associé à une cellule photovoltaïque propre, un support amovible standard doit être conçu. Celui-ci permettra de changer de cellule photovoltaïque à volonté selon le test effectué.

La deuxième partie consiste à la gestion et l'utilisation des différents blocs secondaires. Ces derniers seront sélectionnés grâce aux études faites via l'état de l'art et les résultats donnés dans l'élaboration du banc d'essai de laboratoire. Certains de ces blocs sont nés de contraintes imposées par le microcontrôleur, tandis que d'autres seront liés aux différents capteurs nécessaires pour une mesure complète.

La troisième partie est consacrée à l'échange des données, ainsi que la communication avec l'utilisateur. Le module proposé doit pouvoir communiquer et échanger des données à tout moment. Au sein de cette partie, deux sous-parties peuvent se dessiner. La première consiste à la représentation graphique immédiate des données pour un utilisateur, et la deuxième en l'envoi de données vers un lieu de stockage.

Finalement, la dernière partie concernera le stockage des données et leur interprétation. Les données récupérées devront être faciles à lire, utiliser et trier. Une solution doit être proposée pour que cela soit fait le plus simplement possible.

Du fait de ces différentes contraintes, le module de mesure autonome, que l'on nommera par la suite SmartLux, a pu être élaboré. La partie suivante présente le principe de fonctionnement global de ce dernier.

4.2 Principe de fonctionnement

La logique de fonctionnement de ce produit s'articule autour de 3 éléments principaux :

- Le module autonome SmartLux équipé d'un microcontrôleur central de type Arduino. Le choix de ce type de microcontrôleur sera explicité dans la section 4.4. Le module sera

équipé des capteurs, ainsi que des modules nécessaires pour la communication globale entre l'utilisateur et le lieu de stockage des données.

- Un téléphone doté du système d'exploitation Android. Ce dernier communiquera avec l'Arduino via une communication Bluetooth. Grâce à cela, l'utilisateur peut se connecter à tout moment avec chaque module simultanément. Tout comme pour l'Arduino, le choix de cette solution sera explicité.
- La mise en place d'un serveur permettant de récolter les données envoyées par le module SmartLux. Une communication Wi-Fi est alors initiée entre le module et le serveur afin de réaliser cet envoi. Cette partie aura pour but de recevoir et stocker les données récoltées.

La Figure 4.1 résume comment la communication s'effectue entre les différentes parties citées précédemment. Ce chapitre va ainsi détailler chacune de ces trois parties.

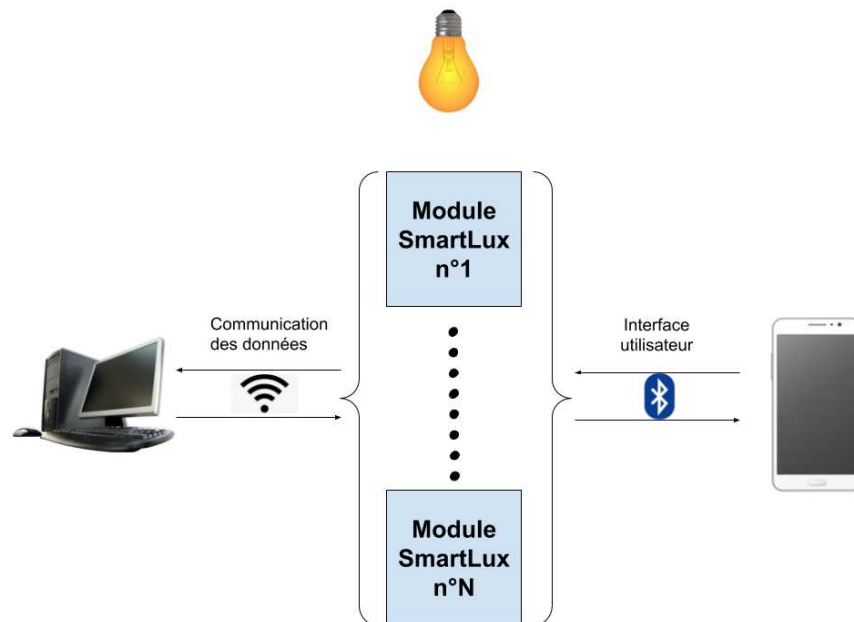


Figure 4.1 Schéma global de fonctionnement de la solution proposée

4.3 Élaboration du module de mesure autonome

Cette partie sera centralisée sur le module SmartLux, ainsi que son interaction avec les autres éléments. Après avoir présenté le fonctionnement général du module autonome, nous détaillerons le choix de chaque partie hardware, le fonctionnement software, ainsi que le principe des différentes mesures réalisées.

4.3.1 Schéma global de fonctionnement du module autonome

Le module SmartLux peut être divisé en 10 blocs de fonctionnements distincts résumés via la Figure 4.2 :

- Le microcontrôleur Arduino qui est l'élément central qui gère l'ensemble des modules. Ce dernier est codé en langage C Arduino et communique au travers de deux ports série, trois liaisons I₂C et différents ports Analog Digital Converter avec les autres modules.
- La cellule solaire accompagnée de son support amovible qui génère le courant que l'on souhaite mesurer.
- L'étage de mesure électrique qui est composé des circuits amplificateurs et de sélection du *range* de mesure optimale.
- Le capteur de température de type TMP36GT9Z pour observer l'impact de cette dernière sur la performance d'une cellule.
- La batterie d'alimentation de type LiPo pour approvisionner le module en énergie électrique.
- Le capteur de luminosité de type BH1750 qui permet à plusieurs mesures de comparer la différence d'éclairement lumineux en Lux.
- La mémoire additionnelle EEPROM de type 24LC256 pour stocker des données en interne.
- Une Real Time Clock de type DS323.
- Un module Bluetooth Adafruit Bluefruit LE UART Friend qui assure la communication entre l'utilisateur et le module.
- Une carte Wi-Fi ESP8266 qui assure la communication entre le module et un réseau Internet.

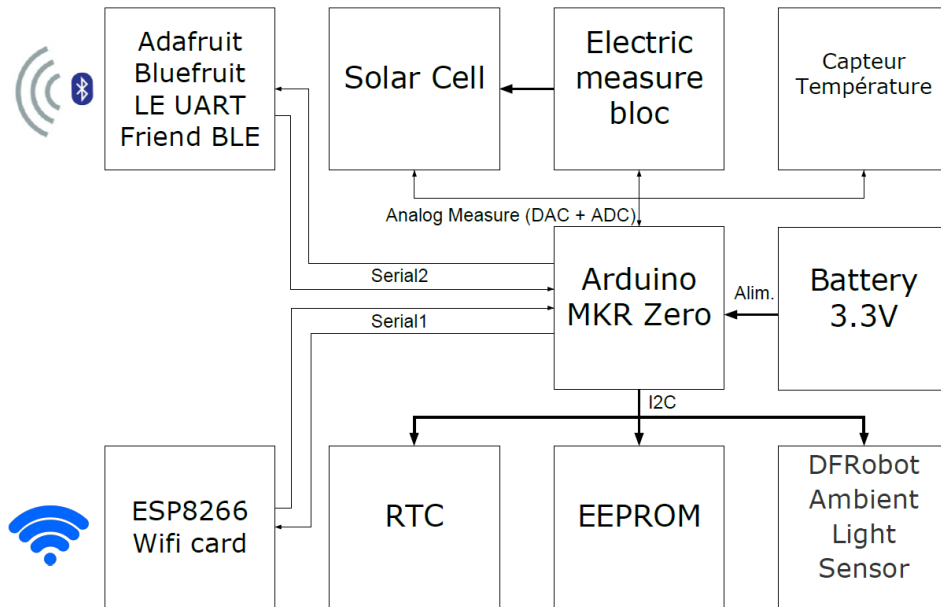


Figure 4.2 Schéma bloc du fonctionnement du module SmartLux

4.3.2 Choix du microcontrôleur MKR ZERO

Lors du commencement du projet, l'objectif le plus important était la réalisation de tests I-V sur des cellules photovoltaïques via un module autonome et compact. Cependant, plusieurs aspects tels que la communication de données, l'interfaçage avec l'utilisateur ainsi que les différents types de tests à réaliser pouvaient être sujets à de nombreux changements au cours du projet. Il était donc impératif que le cœur central du module de mesure puisse lui-même évoluer au fur et à mesure pour permettre cette liberté de programmation. Les microcontrôleurs Arduino possédant cette capacité d'intégration, un choix a dû être fait sur le modèle qui correspondait le mieux à ce projet. Le MKR ZERO, tel que montré en Figure 4.3, est finalement le choix qui paraissait le plus intéressant.



Figure 4.3 Microcontrôleur Arduino MKR ZERO

Ce microcontrôleur a été utilisé dans ce projet pour plusieurs raisons. Premièrement, pour que les tests électriques puissent être possibles, un DAC (Digital Analog Converter), ainsi que des ADC (Analogic Digital Converter) sont nécessaires. Le MKR ZERO propose un DAC de 10 bits de précisions, ainsi que des ADC pouvant aller jusqu'à 12 bits de précisions. Dans le cadre des mesures effectuées, ces précisions étaient largement suffisantes. Deuxièmement, le MKR ZERO possède déjà un port SD. Grâce à ce dernier, une solution de stockage des données après chaque test était d'ores et déjà prête. Troisièmement, il s'agit d'un Arduino qui se couple très facilement avec des batteries de types Lithium Polymère (LiPo). Le fait de brancher le microcontrôleur sur une prise de courant, via câble micro USB, permet de recharger la batterie connectée à ce dernier. Le problème de l'alimentation était ainsi résolu. Finalement, ce microcontrôleur est également doté d'une RTC permettant le datage des données à la fin d'un test, ce qui était un argument important dans le cadre de ce projet.

Ce type de microcontrôleur étant peu coûteux avec une valeur d'achat de 30\$, il est idéal pour le développement logiciel de ce type de projet. De plus, une fois le projet figé définitivement, il est possible de remplacer l'Arduino par un microcontrôleur basique couplé aux seuls éléments nécessaires tels qu'un DAC, ADC, port série, etc.

4.3.3 Mesures de cellules photovoltaïques

Cette partie s'intéresse à l'ensemble **Electric Measure Bloc** de la Figure 4.2. Nous détaillerons les différentes étapes qui ont permis d'arriver au montage complet permettant la mesure I-V.

4.3.3.1 Principe de mesure

Tout comme il a été montré pour le banc d'essai en laboratoire, le principe de la mesure I-V est de faire varier la tension aux bornes d'une cellule solaire, tout en mesurant le courant en parallèle. Ici, on cherche à reproduire ce que le SMU réalisait en laboratoire, mais avec l'Arduino. Le premier élément indispensable est le Digital Analog Converter (DAC). Il s'agit d'un composant qui réalise une conversion de valeurs digitales en valeurs analogiques. Un tel système est la combinaison d'un réseau de résistance avec un montage suiveur de tension. Dans le cas du MKR ZERO, il est possible de générer une tension analogique variant de 0 Volt jusqu'au V_{cc} , ici 3.3V. Le DAC ayant une précision de 10 bits, on a théoriquement une précision de variation en tension de $800\mu V$ soit de l'ordre du mV, tout comme le montage en laboratoire.

Lorsque la cellule photovoltaïque est placée sous un flux lumineux, celle-ci génère un courant. Ce courant généré dépend de l'intensité de ce flux lumineux, ainsi que de la tension à laquelle elle est soumise. Une résistance est alors utilisée pour lire ce courant émis par la cellule photovoltaïque. En couplant cette résistance avec un amplificateur de mesure relié à un ADC de l'Arduino la lecture du courant est possible. Le schéma de la Figure 4.4 illustre ce principe.

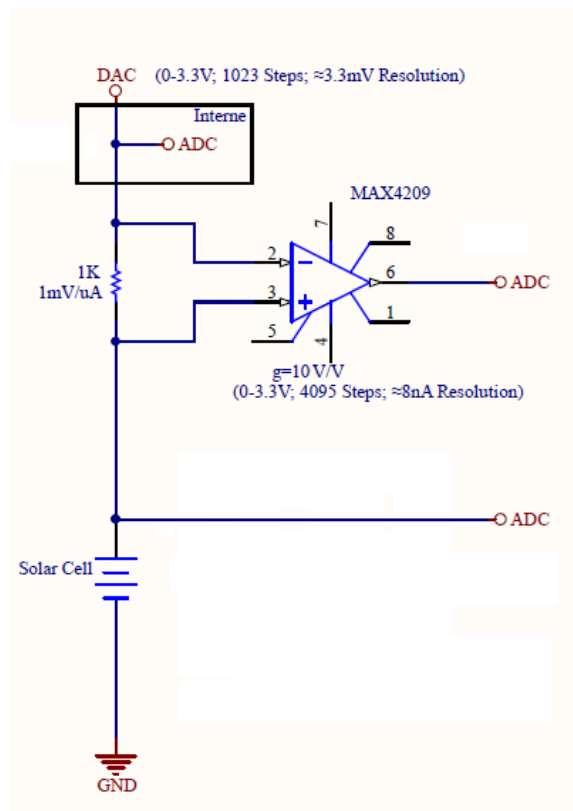


Figure 4.4 Principe de base de la mesure de courant d'une cellule photovoltaïque via un Arduino

L'amplificateur de mesure choisi est le MAX4208. Il s'agit d'un amplificateur de mesure dédié à la mesure de courant très faible, et donc parfaitement adapté à ce type d'application. Il permet de choisir le gain que l'on souhaite appliquer, et garantit une erreur maximale de 0.25 % sur le gain de tension en sortie. Le choix de la résistance et du gain de l'amplificateur sont directement en lien avec les observations faites avec les résultats donnés par la littérature et les expériences en laboratoires. En effet, nous avons pu voir dans le chapitre 3 qu'en intérieur, une cellule photovoltaïque de moins de 100 mm² produisait généralement un courant de l'ordre de la centaine du μA . Il faut donc proposer des valeurs permettant de mesurer dans un premier temps

sur une échelle d'au moins 0 à 300 μA , tout en ayant une précision de 1 μA . Nous verrons dans le paragraphe suivant comment étendre cette échelle de mesure.

La valeur de résistance ne peut pas être trop faible, sinon elle risquerait d'induire une saturation de lecture en tension à l'entrée de l'ADC. On choisit ainsi une valeur de 1000 Ohm, donnant alors une conversion de 1mV pour 1 μA . Avec des impédances de 2 M Ω en entrées et de 20 Ω en sortie de l'amplificateur, ainsi que de 100 M Ω pour l'ADC de l'Arduino, ces dernières n'ont que peu d'influences sur la mesure finale du courant. D'après la datasheet du MAX4208, celui-ci ne peut fonctionner efficacement pour des résistances dont la somme est inférieure à 10 k Ω et dont la résistance la plus faible ne peut être supérieure à 1 k Ω . Les résistances choisies (1076 Ω et 10720 Ω) donnent un gain de 10.96. Dans cette configuration, la valeur théorique de la précision de mesure en μA est de 0.0731 μA , soit quasiment 0.1 μA . On aurait ainsi des valeurs qui oscillent entre +/- 0.2 μA . Dans ces conditions, le courant maximal mesurable est de 299.36 μA .

Cependant, deux autres facteurs importants peuvent influencer sur cette précision, il s'agit de la précision de la résistance et de l'amplificateur de mesure. Les précisions des résistances standards se situent aux alentours de 5 % d'erreur. L'erreur du gain peut quant à elle varier de 0.05 % jusqu'à 0.25 %. Avec de tels valeurs, notre précision de mesure serait beaucoup trop incertaine. En effet, des facteurs tels que le bruit numérique, la température de l'air ambiant ou bien les fluctuations de la lumière sont autant de paramètres à ne pas négliger dans le résultat final d'une mesure. Après calcul, avec une résistance moyenne d'une tolérance de 5 %, la marge d'erreur peut devenir égale à 4 μA pour une mesure supérieure à 300 μA , ce qui est inacceptable selon le cahier des charges. Une résistance de précision à 0.05 % a ainsi été sélectionnée pour parvenir à une marge d'erreur de 1 μA . Il s'agit de résistances standards dans le domaine des mesures de précision.

Avec un tel montage et le code approprié, des mesures I-V sont possibles. Cependant, avant de détailler l'algorithme Arduino permettant de réaliser ce type de mesure, une problématique supplémentaire liée à la saturation de courant se pose.

4.3.3.2 Mise en place d'un système de calibre de mesure automatisé

Si le système décrit précédemment permet en effet de réaliser des mesures de courbe I-V, ce dernier n'est cependant pas à l'abri d'une saturation. En effet, d'après les précédentes valeurs, le courant maximal mesurable est de $299.36\mu\text{A}$. Même si la plupart des valeurs jusqu'à maintenant se situent en deçà de cette dernière, il est toujours préférable un choix de plage de valeurs plus élevé. L'idée est alors de proposer un système de fourchette de valeurs. Ce dernier s'inspire largement de ce qui est réalisé lors d'une mesure avec un multimètre, où l'utilisateur change manuellement le calibre.

Comme le système doit être entièrement automatisé, l'idée de laisser l'utilisateur régler le calibre lui-même fut immédiatement rejetée. Comme chaque mesure est unique et demande une réinitialisation, il est en effet possible d'automatiser la calibration. Pour cela, deux résistances supplémentaires vont être utilisées, une de 500 Ohm et une de 1500 Ohm . Ceci permettra d'atteindre un maximum de $598.72\mu\text{A}$ pour la valeur maximale, et de proposer un champ de mesure encore plus précis pour les valeurs en dessous de $199.57\mu\text{A}$. L'idée est de pouvoir organiser un système de commande automatisé qui laissera passer le courant uniquement pour une seule des trois résistances, en fonction des valeurs de limites de courant. Dans le cas de la résistance de 500 Ohm permettant de mesurer un maximum de $598.72\mu\text{A}$, l'erreur estimée est d'environ $4\mu\text{A}$. Cela reste acceptable puisque les valeurs mesurées sont de plusieurs centaines de μA , donnant un pourcentage d'erreur variant de 0.6 à 1.3% .

Pour réaliser ce système, des transistors BSH105 MOS à canal N ont été utilisés. Il s'agit de transistors adaptés pour laisser passer des courants très faibles avec une résistance proche de 10 Ohm . Étant relié en série avec la résistance de mesure largement supérieure à cette valeur, l'impact sur la valeur mesurée est négligeable. Le transistor MOS à canal N fonctionne pour laisser passer du courant lorsque la tension drain-source est supérieure à la tension grille-source. En combinant deux transistors, ainsi qu'une tension supérieure à la tension V_{cc} de l'Arduino, il est possible de créer un système de relais adapté au problème et pouvant être commandés par l'Arduino. En reproduisant ce schéma pour chacune des résistances, on peut ainsi créer un système de switch s'adaptant au calibre de mesure automatiquement. Pour créer une tension supérieure au V_{cc} de l'Arduino, un circuit de type convertisseur à pompe de charge est utilisé.

Ce dernier produit une tension de 6V, ce qui est suffisant pour réaliser le circuit. La Figure 4.5 montre le schéma complet du principe de mesure de la cellule photovoltaïque. Ce schéma est divisé en 5 étapes principales : l'amplification, la sélection de calibre, la cellule photovoltaïque, le *charge pumper*, et le microcontrôleur. On a ainsi un courant préliminaire partant de la cellule qui est préamplifié via le bloc amplificateur. Selon le courant de base, le bloc *range selector* aidé par le circuit *charge pumper* va effectuer un basculement vers le calibre le plus adéquat afin que la mesure effectuée par le microcontrôleur soit la plus précise possible.

Lors de chaque test, une étape préliminaire consiste alors à tester le courant généré par la cellule pour une tension provenant du DAC de 0V. Il s'agit de la valeur I_{sc} de la cellule photovoltaïque. En fonction du résultat, deux transistors sont bloquants, et seul un transistor laisse passer le courant dans la résistance de mesure. Ces valeurs ont été adaptées avec les cellules photovoltaïques à disposition, mais ce système peut accueillir davantage de résistances avec des valeurs facilement interchangeables selon le système voulu.

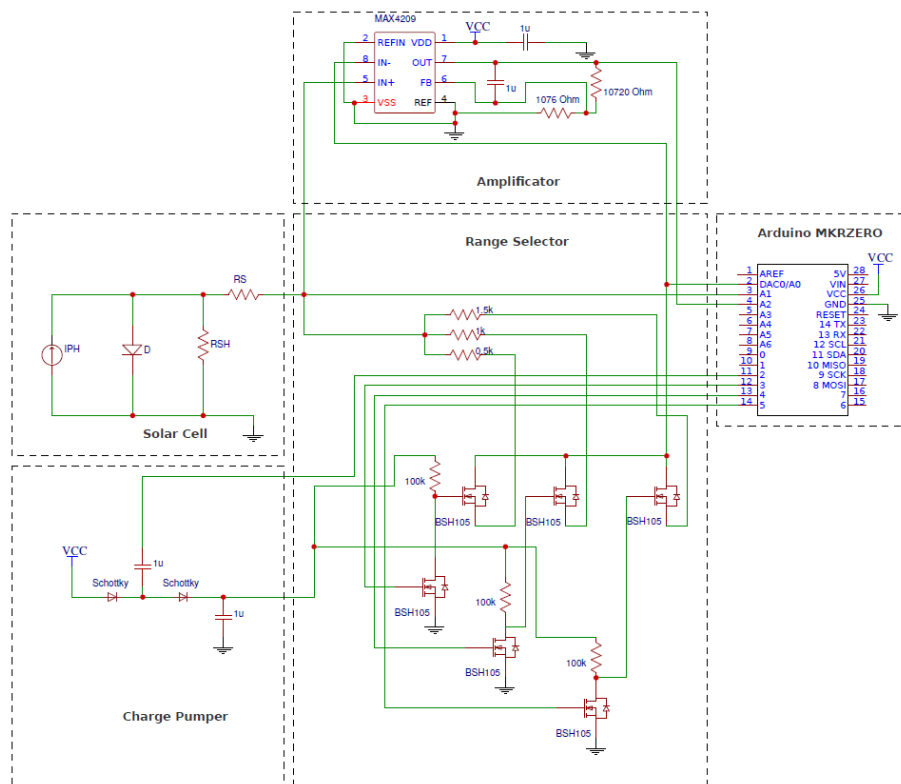


Figure 4.5 Schéma complet de principe de mesure de la cellule photovoltaïque

4.3.3.3 Algorithme et code Arduino des protocoles de tests I-V

Dans le cas des tests en laboratoire du chapitre 3, le protocole proposé consistait simplement à relever chaque valeur de courant associée à la valeur de tension imposée par le Keithley. Dans le cas de ce module autonome, la mise en place d'un système similaire est également possible. Cependant, proposer uniquement ce mode de mesure n'est pas judicieux. Le but de ce module est de pouvoir être autonome sur une journée au minimum. Une méthode consistant à récupérer tous les points de la courbe I-V est très énergivore et peut contribuer à vider trop rapidement la batterie.

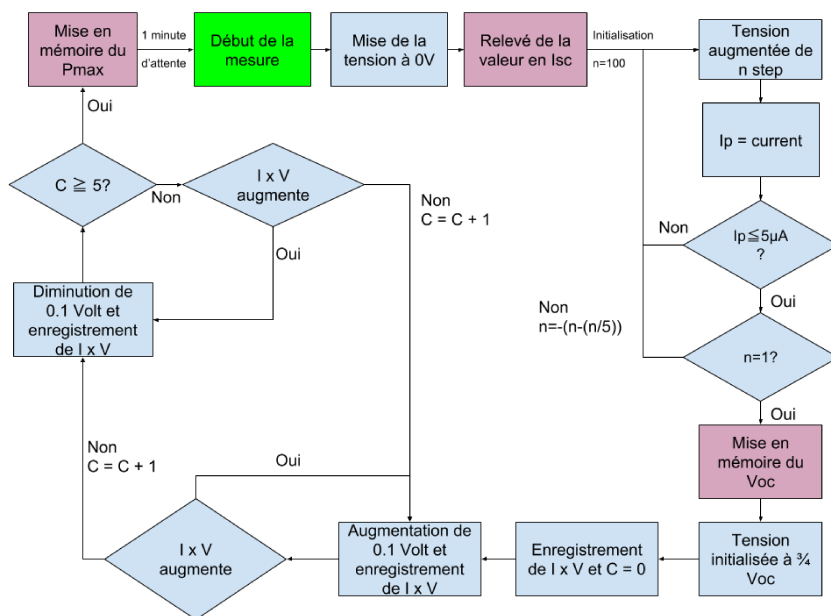


Figure 4.6 Algorithme implanté dans le code Arduino du module de mesure pour connaître les performances de la cellule photovoltaïque étudiée

Dans le cadre d'un test I-V, les trois valeurs que l'on souhaite récupérer sont : la tension en circuit ouvert V_{oc} , le courant de court-circuit I_{sc} et la puissance maximale P_{max} . Ces valeurs peuvent être récupérées via un simple algorithme de dichotomie. Le principe de cet algorithme est montré via la Figure 4.6. Le microcontrôleur commence par appliquer une tension nulle aux bornes de la cellule, puis relève le courant I_{sc} . Une fois celui-ci connu, un premier step en tension est réalisé. Celui-ci s'accroît jusqu'à obtenir une valeur seuil en courant inférieur à $5\mu A$. Cette valeur est la plus proche du courant nul réalistiquement mesurable via ce dispositif si l'on prend

en compte les marges d'erreurs évoquées dans le paragraphe 4.3.3.2 précédent. Cependant, afin de s'assurer que la tension utilisée n'est pas largement supérieure à la tension V_{oc} réelle, l'opération est répétée jusqu'au plus petit step en tension disponible via le microcontrôleur Arduino, soit $3.281V$ divisé par 2^{12} bytes, ce qui revient à un step minimal théorique de $805,86\mu V$. Finalement, une opération similaire est répétée pour trouver le P_{max} . Ici, la valeur de tension V_{oc} est récupérée et permet d'initialiser le même algorithme à $\frac{3}{4}$ de cette même tension. Il s'agit de la zone où la valeur de tension associée à P_{max} est la plus proche. Une opération de dichotomie similaire est effectuée 5 fois, permettant de déduire la valeur de la puissance maximale.

Cet algorithme possède également un autre avantage au niveau de la rapidité d'exécution. Il y a en effet beaucoup moins de points à récupérer comparé à un simple test consistant à relever toutes les valeurs de la courbe I-V. Par conséquent, cet algorithme est bien moins énergivore et correspond davantage aux besoins de l'application. Cet algorithme a été nommé « Quick », tandis que l'algorithme de mesure classique se nommerait « Full I-V ». En moyenne, un test de type « Full-I-V » de précision 0.01 Volt met 30 secondes avant d'être complété, tandis qu'un test de type « Quick » met seulement 10 secondes. Pour ce qui est de la décharge de la batterie, dont le sujet est plus détaillé dans le paragraphe 4.3.4, on constate que celle-ci atteint 80 % en seulement 2h de fonctionnement en mode « Full I-V », tandis que pour le même laps de temps le mode « Quick » ne fera descendre la batterie qu'à 90 % de sa charge. Sur le long terme, ces deux algorithmes font ainsi une grande différence de consommation énergétique.

L'algorithme « Quick » possède cependant le désavantage de ne pas pouvoir proposer une vue d'ensemble de la courbe I-V. Une vue d'ensemble de la courbe est une information également intéressante. Ainsi, les deux algorithmes sont laissés à disposition de l'utilisateur pour lui laisser le choix du mode à utiliser.

4.3.3.4 Support amovible pour cellule photovoltaïque

Pour faciliter le test de plusieurs types de cellules photovoltaïques, il est nécessaire que le support accueillant cette dernière soit facile à enlever. La monture pour accueillir la cellule photovoltaïque s'inspire largement de la technique utilisée pour l'étude en laboratoire telle que présentée dans le paragraphe 3.3 du chapitre 3. La seule différence notable est au niveau des trous placés de telle sorte à pouvoir insérer des headers mâles. L'idée est d'insérer la cellule

photovoltaïque interchangeable à l'aide d'headers mâles et femelles. La partie femelle est celle liée à la cellule photovoltaïque, tandis que la partie mâle est celle présente sur le boîtier. Ce choix permet d'éviter une usure plus rapide des headers. En effet, on ne peut retirer en moyenne un header seulement qu'une centaine de fois. Avec ce choix, chaque cellule photovoltaïque a un cycle de vie de cet ordre, et non le module lui-même. La monture permettant de changer de cellule photovoltaïque a également été assemblée et est présentée en Figure 4.7.

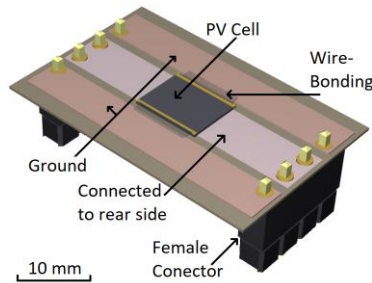


Figure 4.7 Principe de la monture pour la cellule photovoltaïque

4.3.4 Alimentation du module et gestion de la batterie

Comme cité précédemment, le module SmartLux fonctionne avec un microcontrôleur MKR ZERO. Ce dernier a été sélectionné en partie, car il est déjà compatible avec des batteries lithium polymères (LiPo). Ces batteries ont l'avantage principal de toujours proposer une tension de sortie qui soit stable jusqu'à la décharge complète. Le MKR ZERO est ainsi capable de fonctionner en permanence sans observer des coupures ou des chutes de tensions dangereuses. Cette même tension varie ainsi de 4.2V jusqu'à 3.4V en fin de cycle. Le module a ainsi été testé sur une journée entière en effectuant l'algorithme de mesure « Quick » à intervalles de 2 minutes, et a pu fonctionner sans subir aucune coupure subite de tension. La même chose a été effectuée pour l'algorithme « Full » et il n'y a également eu aucun problème de ce type.

La connaissance de cette valeur de tension de la batterie est directement récupérable par l'Arduino. Cette même information permet de connaître l'état de la batterie et d'en informer l'utilisateur. Ainsi, ce dernier pourra recharger le module lorsque celui-ci est proche de 3.4V. Une conversion en pourcentage a ainsi été réalisée pour l'afficher directement sur l'application Android, mais doit être prise avec précaution. En effet, la courbe de décharge d'une batterie

LiPo n'est pas linéaire. La Figure 4.8 montre le comportement de décharge de la batterie LiPo utilisée. Ces batteries sont souvent utilisées pour des téléphones portables, mais sont couplées avec des algorithmes de calcul complexes permettant une estimation de la vitesse de décharge du téléphone. La simple lecture de la tension de la batterie ne peut être considérée comme fiable, mais sera suffisante dans le cadre de notre application. Comme la tension émise par la batterie peut fluctuer, et ainsi créer un affichage du niveau de batterie qui soit instable, il a été préféré de n'afficher le niveau de batterie par pallier de 10 %. De plus, l'Arduino ne met à jour cette valeur uniquement si l'écart entre la précédente valeur est suffisamment grand, c'est-à-dire 0.1V. La zone située entre 40 et 60 % est celle qui est la plus fluctuante, mais reste lisible pour un utilisateur. Cet affichage du niveau de la batterie reste avant tout un indicatif, avant d'être une valeur exacte sur l'état de la batterie.

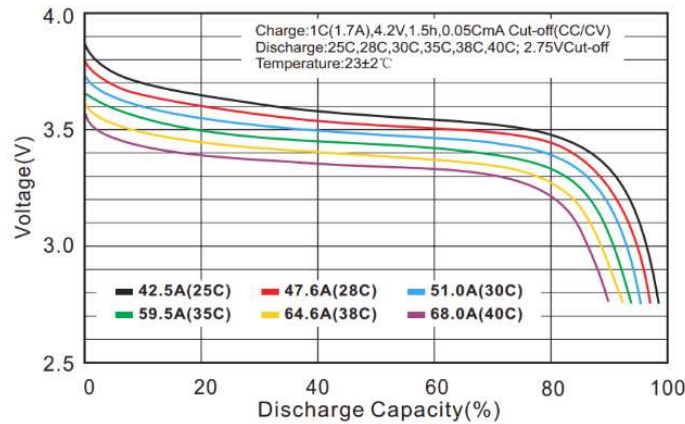


Figure 4.8 Courbe de décharge de la batterie LiPo selon la datasheet du produit

Une fois le module complètement initialisé, l'Arduino rentre dans sa phase de **loop()**. Ce dernier est programmé pour n'effectuer aucune action si aucune demande n'a été faite par un utilisateur. Ainsi, aucune énergie inutile n'est consommée en dehors des demandes.

4.3.5 Capteurs ajoutés au module de mesure

Tout comme pour le banc d'essai en laboratoire, deux composants sont nécessaires pour proposer des mesures complètes : l'éclairement lumineux en Lux et la température en °C. Il s'agit de deux paramètres influençant la performance finale de la cellule photovoltaïque. La mesure de l'éclairement lumineux est assurée par le module BH1750 branché sur l'Arduino en liaison I₂C. La température est quant à elle lue par un capteur de température TMP35

directement lue via un port ADC de l'Arduino. Ces deux informations, comme mentionné dans le paragraphe précédent, ne sont pas lues en permanence. Seule une demande de l'utilisateur permet d'en autoriser la lecture.

Contrairement au banc d'essai en laboratoire, un élément n'a pas été ajouté sur ce montage. Il s'agit de l'élément qui permettrait de connaître le spectre de la lumière ambiante. Plusieurs raisons ont emmené à ne pas utiliser un tel élément. Il existe bien des capteurs de petites tailles proposant des mesures simples via des microcontrôleurs, mais leur prix était trop élevé pour le cahier des charges. Un capteur intéressant qui propose ce type de service est le C12666MA, mais coûte presque le même prix que le module SmartLux lui-même. Il existe également de nombreuses façons de fabriquer soi-même un spectromètre, mais la plupart de ces solutions nécessitent de recréer des boîtes incluant un réseau CCD ainsi qu'un disque ayant pour rôle de décomposer la lumière. Le but premier du module de mesure étant d'être à la fois peu coûteux et mobile, ce type de solution n'est pas envisageable.

Pour contrer ce problème, il suffit de demander à l'utilisateur qu'il écrive lui-même cette information. En effet, un spectre lumineux est une information intéressante lorsque la source lumineuse étudiée est unique. Dans le cas d'une mesure en intérieur, de nombreuses sources de lumières sont présentes. La lumière du soleil peut également intervenir durant la journée sur la cellule, dépendamment de sa position dans la pièce. L'utilisateur doit pouvoir indiquer lui-même ces informations. Il peut ainsi choisir dans les options proposées si la source lumineuse principale est issue de lumières LED, halogène, incandescentes ou bien fluorescentes. Ces données seront utiles lors d'un traitement ultérieur des différentes informations récoltées et doivent ainsi être enregistrées par le module de mesure. Une partie du montage électronique est consacrée au stockage de ces informations.

4.3.6 Stockage des informations complémentaires

D'après les observations précédentes, plusieurs informations complémentaires sont manquantes pour qu'un test soit complet : le nom du module associé au test, le type de cellule photovoltaïque testé, les dimensions de cette même cellule, un numéro d'identification de la cellule, le type de lumière utilisé pour éclairer la pièce, le lieu où la mesure est effectuée et l'influence que le soleil

a sur l'éclairage. Toutes ces informations, mis à part l'éclairage utilisé et l'influence du soleil, peuvent être facilement renseignées par l'utilisateur.

Comme il était expliqué dans la section 4.3.5, l'utilisateur doit indiquer au module le type de lumière utilisé dans la pièce. Pour ce qui est de l'influence du soleil, on peut donner à l'utilisateur quatre choix : une influence nulle, mineure, majeure ou totale. Par exemple, si la mesure est effectuée dans une pièce où de nombreuses fenêtres donnent sur l'extérieur, l'utilisateur pourra indiquer une influence majeure. Si le module est en extérieur, l'influence serait alors totale. En revanche, si la pièce est totalement isolée de la lumière extérieure, il suffit d'indiquer que l'influence est nulle. Cette solution permet d'éviter l'achat de modules supplémentaires qui ne seraient pas forcément utiles.

Finalement, toutes ses informations peuvent être mises sous la forme de **String**. Elles doivent être gardées en mémoire par le module, même si ce dernier est éteint. Le module qui répond le mieux à cette problématique est une mémoire morte effaçable électriquement et programmable, plus simplement appelé EEPROM. Ce type de mémoire, contrairement aux mémoires flash qui ont pour but de stocker le code source du programme software, permet de lire et d'écrire des valeurs de type **String**. La mémoire qui a été choisie est le 24LC256, une mémoire EEPROM de 256Kb. Il s'agit de la taille de mémoire minimale disponible, et est amplement suffisante pour stocker les données mentionnées précédemment. La lecture des données écrites dans cette mémoire est illimitée, tandis que l'écriture peut être effectuée entre 100 000 et 1 000 000 fois. Pour que l'écriture soit possible, il est nécessaire d'allouer l'espace mémoire une première fois. Le code ci-dessous initialise ceci en indiquant les différents renseignements évoqués précédemment. Ici, il s'agit d'un module nommé SmartLux, effectuant un test pour une cellule Triple jonction de 42mm² sous lumière halogène dans une pièce nommée P2002 qui est complètement coupée de la lumière du soleil.

```
char str_data[]={"MySmartLux/Triple/42/id/Halogen/P2002/None"};
char str_len=0;
do{ str_len++; } while(str_data[str_len]);
for(i=0;i<5;i++) writeEEPROM(0x50,i*str_len,str_data);
```

Figure 4.9 Méthode d'envoi des informations vers l'EEPROM

La balise utilisée pour séparer chaque information est le caractère /. Lors de la lecture effectuée par l'Arduino, ce dernier sépare l'information grâce à ce caractère. Le programme récupère simplement chaque bit de la variable `str_data` comme montré en Figure 4.9 et écrit ce dernier à une adresse définie de l'EEPROM. Une fois celle-ci écrite, le programme Arduino peut lire les différentes variables en lisant chaque adresse de l'EEPROM contenant un caractère différent de la valeur NULL. La ligne de code ci-dessous en Figure 4.10 est celle qui réalise cette opération.

```
data = "";
for(i=0;i<10;i++) {
  readEEPROM(0x50, (i*28), rdata, 28);
  data += (char*)rdata;
}
```

Figure 4.10 Méthode de lecture des données stockées dans l'EEPROM

Avec ce système, il est désormais possible de stocker de nouvelles informations complémentaires à chaque test. Il est à noter que ceci aurait pu être réalisé avec une carte SD couplé au port SD du MKR ZERO. Cependant, la lecture de ces informations est primordiale pour le fonctionnement d'un test. Or, la carte SD peut être retirée à tout moment par l'utilisateur. Il est donc préférable de proposer un espace de stockage fixe, non amovible pour éviter des problèmes de lecture de ce type d'informations importantes. Une dernière information importante pour qu'un test soit complet est le datage dans le temps.

4.3.7 Horloge interne du module de mesure

L'Arduino MKR ZERO possède sa propre horloge temps réel, nommée simplement RTC. Grâce à cette dernière, il est possible de référencer chaque fin de test à une heure, ainsi qu'une date, permettant ainsi en complément des nombreuses autres informations citées précédemment d'obtenir des valeurs uniques de tests. Cependant, le RTC proposé par le MKR ZERO possédait trois défauts majeurs. Premièrement, le RTC subissait un décalage important dans le temps. Au bout de seulement une journée, un décalage de plusieurs minutes pouvait être observé. Deuxièmement, le RTC ne possède pas son propre système d'alimentation. De ce fait, le simple arrêt du MKR ZERO réinitialisait la RTC à sa valeur d'initialisation. Enfin, le fait d'insérer la carte SD dans sa fente réinitialisait le module Arduino. À ce moment précis, l'Arduino relit ce

que la mémoire flash contenait. La RTC ne possédant pas son propre système d'alimentation, cela revenait à réinitialiser le RTC à sa valeur d'origine.

À cause de ces contraintes, un module supplémentaire RTC a été ajouté. Celui-ci possède son propre système d'alimentation et communique via liaison I₂C. Il s'agit du module DS3231 de la compagnie Adafruit. Ce RTC garantit au module SmartLux un datage continu de chacune des mesures effectuées. Cependant, dans le cadre des tests temporels détaillés plus tard dans ce document, la RTC de l'Arduino sera préférée. En effet, les instructions temporelles utilisées sont des répétitions de tâches telles que le relevé de plusieurs courbes I-V dans une même journée à intervalle de temps régulier. La répétition de cet intervalle est activée par la clock de l'Arduino via les commandes `millis()`, tandis que le datage des informations est assuré par le RTC dont l'horloge interne est bien plus précise sur le long terme.

4.3.8 Modules de communication de données

Comme cité en début de section 4.3, le cahier des charges nécessite l'intégration d'un moyen de communication avec l'utilisateur, et un moyen de stockage automatisé des données. Cette partie va développer le fonctionnement de chacun de ces modules.

4.3.8.1 Module Bluetooth

Afin de communiquer avec un utilisateur les opérations réalisées par le module SmartLux, une interface graphique est nécessaire. La solution la plus intuitive est de recourir à un Smartphone pouvant se connecter directement sur le module de mesure. En effet, il est très courant à l'heure des objets connectés de considérer le Smartphone comme un moyen de communication trivial. C'est également une solution bien moins complexe et coûteuse que l'implémentation d'une interface graphique au cœur même du module de mesure. De plus, cette même solution aurait été encore plus coûteuse en énergie.

Dans le domaine des communications sans fil, plusieurs protocoles ont été spécialement créés dans cette optique de limiter la consommation énergétique. Les modules ZigBee, déjà abordés dans l'état de l'art, sont nés de cette volonté de proposer des appareils de petites tailles sans fil pouvant avoir une forte autonomie énergétique. C'est d'ailleurs dans le cadre de l'Internet des objets que de telles solutions existent. Dans le cadre du module SmartLux, la connexion la plus intéressante est la connexion Bluetooth. Ce mode de communication d'échange bidirectionnelle

est parfaitement adapté au problème de l’affichage graphique local pour un utilisateur. L’utilisateur ne voulant qu’interagir brièvement avec le module n’aura alors besoin que de se connecter au module avec son téléphone, puis de fermer cette connexion. De plus, un protocole très utilisé dans le cadre de l’Internet des objets répond encore mieux à la problématique. Il s’agit du modèle de transmission Bluetooth Low Energy (BLE).

Il s’agit d’un modèle de communication très proche du Bluetooth classique, mais dont la consommation énergétique est très basse. Le seul désavantage est sa bande passante, qui est plus limitée. Ainsi, si peu de données nécessitent d’être communiquées, le BLE est une solution très intéressante. Il ne pourrait en revanche pas faire transiter des données importantes à grande vitesse, tels que des fichiers audios. Un module qui répond parfaitement à tous ces critères est le Bluefruit LE UART Friendly BLE de la compagnie Adafruit. Ce module est utilisé pour permettre à de nombreux projets d’ajouter une connexion Bluetooth ne moyennant qu’un seul port série. Ce dernier fonctionne en deux modes : le mode de commande AT qui permet de donner des commandes basiques au module Bluetooth, et le mode UART qui émet les données envoyées par le port série vers le point de demande de la connexion.

De plus, la compagnie Adafruit propose une application mobile en open source du nom de Bluefruit LE Connect for Android. Cette partie sera davantage développée en section 4.4. Ceci permet de faciliter grandement le travail de mise en place d’une application dédiée au projet. Le module nécessite seulement un port série, qui est toujours disponible sur le MKR ZERO. L’Arduino n’a ainsi besoin que d’ouvrir ce dernier, et d’attendre de recevoir une donnée par ce même port. Ceci est possible grâce à la commande `available()`, qui met en attente dans un buffer toutes les données reçues par le module Bluetooth, et ainsi être interprétés simultanément par le programme. Combinée à l’application mobile, la communication entre l’utilisateur et le module devient possible. Le fonctionnement du code Arduino de gestion de la liaison sera explicité en section 4.3.9.2.

Cependant, une liaison Bluetooth est idéale pour communiquer des données, mais est moins utile lorsqu’il s’agit de stocker automatiquement ces dernières. En effet, une connexion Bluetooth nécessite une connexion directe initiée par un individu. Ainsi, si l’on souhaite récolter

les données de plusieurs modules SmartLux présents dans une pièce, il faudrait se connecter sur chaque module un à un. Il ne s'agit pas d'une solution de stockage de données élégante. Le problème ne vient pas de l'architecture du code, mais bien du mode de communication, qui n'est pas adapté au problème posé. Un protocole plus adapté est celui qui permet la redirection vers un réseau d'utilisateur, tout comme peut le proposer la communication Wi-Fi.

4.3.8.2 Module Wi-Fi

Contrairement à la communication Bluetooth, la communication Wi-Fi est parfaitement adaptée à la mise en réseau de plusieurs modules. En effet, le protocole de communication Wi-Fi obéit aux normes du groupe IEEE 802.11, attribuant une adresse IP à chaque appareil. Grâce à cette dernière, le module peut être relié à Internet via l'Internet Protocol. Si plusieurs modules possèdent individuellement une adresse IP, il est possible de relier tous ces modules à un serveur commun. Cela ne nécessite seulement qu'un gateway pour organiser la connexion. Le moyen le plus simple est la connexion à un réseau Wi-Fi prédéfini avec son propre Service Set Identifier (SSID) et mot de passe.

Le module le plus adapté pour cela est l'ESP8266. Ce dernier est une simple carte Wi-Fi communiquant via liaison série. Tout comme le module Bluetooth, celui-ci communique via les commandes AT, et permet de fournir au module sa propre adresse IP. Si on fournit les identifiants SSID et mot de passe, le module pourra être connecté à un réseau Wi-Fi et être relié à Internet. Grâce à cela, les données peuvent automatiquement être stockées sur un serveur dédié. Lors de son démarrage, le module scanne automatiquement l'ensemble des réseaux disponibles, et force la connexion avec les identifiants SSID et mot de passe qu'il contient. Lorsque cela fonctionne, le module se dote alors de sa propre adresse IP, récupérable via liaison série. Ainsi, le MKR ZERO peut communiquer cette information à l'utilisateur. Ce dernier pourra également fournir les identifiants de connexion au même titre que les informations supplémentaires données en section 4.3.6.

Il est à noter que le MKR ZERO ne possède qu'un seul port série, déjà occupé par le module Bluetooth. Une version I²C (permettant la connexion simultanée de plusieurs modules référencés par leur adresse) était disponible, mais aurait rendu la gestion des interruptions beaucoup trop complexe. En effet, le port série est idéal pour stocker dans un buffer les données entrantes via la commande Arduino `available()`, ce qui est beaucoup moins intuitif via la liaison

I₂C. Le MKR ZERO, doté d'un microprocesseur de type SAMD, autorise des manipulations de type SERCOM permettant de créer son propre mapping de ports. Le SERCOM 3 étant disponible, et la liaison SPI du MKR ZERO étant inutilisée dans le cadre de ce projet, les ports 8 et 9 de l'Arduino ont été convertis en port série via la commande montrée sur la Figure 4.11 ci-dessous.

```
Uart serialWIFI (&sercom3, 9, 8, SERCOM_RX_PAD_1, UART_TX_PAD_0);

void SERCOM3_Handler() {
    serialWIFI.IrqHandler();
}

void setup() {
    serialWIFI.begin(115200);

    // Assign pins 8 & 9 SERCOM functionality
    pinPeripheral(8, PIO_SERCOM_ALT);
    pinPeripheral(9, PIO_SERCOM_ALT);
}
```

Figure 4.11 Commandes autorisant la réécriture de ports séries sur un Arduino de type MKR ZERO

Grâce à cela, les deux ports Bluetooth et Wi-Fi peuvent coexister en toute indépendance, c'est-à-dire qu'ils possèdent chacun leurs propres liaisons séries via le microcontrôleur. Le principe du code permettant de gérer ces deux entités sera détaillé en section 4.3.9.2.

4.3.9 Architecture finale

Pour finaliser la partie traitant de la conception du module de mesure, nous détaillerons le résultat final du module au niveau hardware et software. Nous présenterons ainsi le design final du module, et le principe général du code Arduino.

4.3.9.1 Architecture Hardware

L'ensemble des éléments constituant le module ont été détaillés dans les parties précédentes et mis en évidence par la Figure 4.2. Le schéma EDA (Electronic Design Automation) en Figure B.1 en annexe B montre l'assemblage final de tous les éléments du montage. La monture permettant de changer de cellule photovoltaïque a également été assemblée et est présentée via la Figure 4.7. Ces éléments ont ensuite été assemblés sur un PCB, puis dans un boîtier comme présenté en Figure B.2 de l'annexe B et en Figure 4.12 ci-dessous.

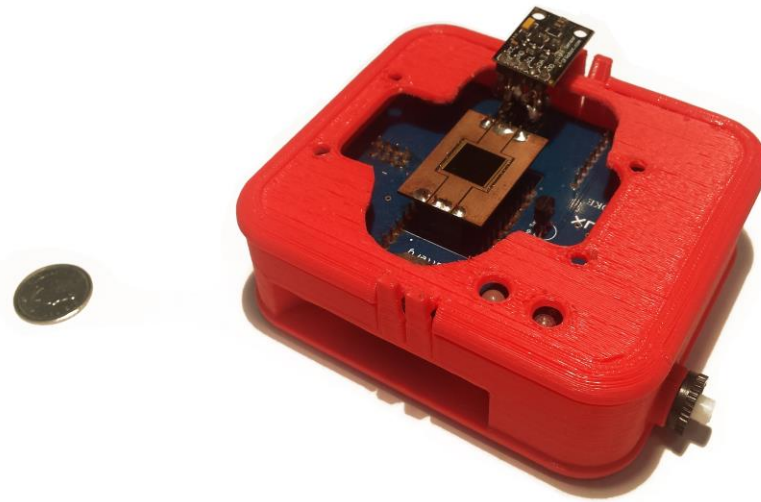


Figure 4.12 Photo du premier prototype SmartLux fonctionnel élaboré

Le PCB a été réalisé avec pour ambition de réduire la taille du boîtier autant que possible. Celui-ci est inséré dans le boîtier à l'aide de vis. Le boîtier a un design très simple, réalisé sous SolidWorks, qui permet d'avoir accès aux différents ports de communications tels que le port micro USB pour le rechargement de la batterie et le port SD pour interagir avec la carte mémoire dédiée. Mis à part cela, le dessus du boîtier ne laisse seulement visible que la cellule photovoltaïque ainsi que le capteur luminométrique. Deux LEDs sont également placées pour indiquer les différents états du module. Ceci est résumé au travers de la Figure 4.13 ci-dessous. De manière générale, une LED indique l'état de la batterie au travers des couleurs verts, orange ou rouge, tandis que la deuxième LED de couleur bleue indique si un test est en cours.

State1	& State 2	& State 3	Multicolor LED	Blue LED	PIN 1	PIN 6	PIN 7
Device ON			Green	Blue	FALSE	FALSE	TRUE
Device ON	Charge en cours		Orange	Blue	FALSE	TRUE	TRUE
Device ON	Batterie faible		Red	Blue	FALSE	TRUE	FALSE
Device ON	Mesure en cours		Green	Blue	TRUE	FALSE	TRUE
Device ON	Charge en cours	Mesure en cours	Orange	Blue	TRUE	TRUE	TRUE
Device ON	Batterie faible	Mesure en cours	Red	Blue	TRUE	TRUE	FALSE
Device OFF			Green	Blue	FALSE	FALSE	FALSE

Figure 4.13 Gestion des LEDs via l'Arduino

4.3.9.2 Architecture Software

Dans cette partie, nous allons détailler le fonctionnement du code Arduino permettant de gérer l'ensemble du module de mesure. Un code Arduino est en général un fichier dont l'extension est en .ino. Cependant, étant largement inspiré du langage C++, il est possible de créer plusieurs fichiers en .cpp et .h pour simplifier la lecture du code pour un programmeur. Ainsi, les différents fichiers en .cpp et .h complémentaires proposés sont : **ConnectWifi** qui gère toutes les opérations de connexions de l'ESP8266, **EEPROMFiles** qui gère l'ensemble des opérations de lecture et d'écriture de la mémoire morte, **ElecMeasure** qui gère l'ensemble du code de la mesure électrique de la cellule photovoltaïque, **TimeManager** qui répertorie les fonctions de gestion du temps et **WifiCommand** qui gère les opérations d'envoi de données sur un serveur dédié.

Lors de l'initialisation du module, l'Arduino effectue plusieurs tâches avant de rentrer dans sa routine de **loop()**. Premièrement, il récupère les informations contenues dans l'EEPROM et les sauvegarde sur des variables **constant String**. Ainsi, ces variables **String** peuvent être à tous moments lus, ou modifiées selon le besoin de l'utilisateur. Ensuite, l'Arduino ouvre les deux ports série, et configure chacune de ces entrées et de ces sorties. Les différents capteurs sont alors initialisés via la liaison I₂C. Par la suite, les transistors responsables de la calibration de la mesure sont initiés tel que la résistance de 1500 Ohm soit la première testée. Finalement, le module tente une première connexion Wi-Fi. En fonction du résultat de cette tentative, un booléen est renvoyé. Celui-ci indique si le module est connecté ou non. Cette information pourra être exploitée par l'application mobile Android.

Par la suite, le module entre son **loop()**. Tant qu'aucune interruption n'est donnée, ce dernier n'effectue aucune opération. Au sein même de la **loop()**, plusieurs interruptions sont possibles via l'utilisation de la commande **available()**. Selon le bit reçu par l'un des deux ports série, un certain type d'action sera effectué. Ainsi, un test I-V peut être réalisé de cette manière. Lorsque le port Bluetooth reçoit le bit 'm', celui-ci exécute la séquence de code permettant d'obtenir les 14 informations propres à un seul test. En fin de celui-ci, le programme va renvoyer ces informations sur le port Bluetooth, et enregistrer ces dernières sur la carte si l'instruction a été demandée. Si l'on souhaite effectuer un test dans le temps, un booléen change de valeur pour

autoriser le programme à répéter en boucle cette même opération. Le détail des commandes liées à l'application mobile et l'envoi de données sur un serveur seront détaillés dans les sections 4.4 et 4.5. Le code fonctionne de manière séquentielle. Aucune tâche parallèle ne peut être initiée afin de garantir la stabilité du système.

4.4 Application mobile Android

Dans cette partie, nous détaillerons le fonctionnement de l'application mobile, et les choix qui ont poussé à son architecture. Cette partie est purement logicielle, mais traitera également grandement de l'interaction avec le module de mesure.

4.4.1 Cœur de l'application mobile

L'application proposée par la compagnie Adafruit pour gérer le module Bluetooth a son code source disponible en ligne. La compagnie qui a développé ce logiciel est Nordic SemiConductors, et a soumis cette dernière sous une licence MIT. Ceci signifie que le logiciel peut totalement être modifié à des fins commerciales ou de développement, la seule condition étant de mentionner le travail de la compagnie sur l'application d'origine. L'application finale proposée dans ce projet fait entière mention de cette licence et du travail effectué par la compagnie Nordic SemiConductors. Cette application d'origine propose de nombreuses options permettant de tester le module Bluetooth associé, ainsi que différents produits de la compagnie Adafruit proposant des connexions Bluetooth intégrées. Un protocole Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) y est également implémenté pour faciliter la transmission de données sur un serveur central. Ce protocole est de type publish/subscribe, c'est-à-dire qu'il fonctionne selon un principe d'abonnement où le serveur reçoit en continu des données de plusieurs objets.

Dans le cadre de ce projet, le code source a été grandement simplifié pour ne garder seulement que deux composantes essentielles. La première est la possibilité de scanner l'environnement pour trouver des appareils Bluetooth. Lors de l'initialisation de l'appli, celle-ci commence par réaliser ce scan. La deuxième fonctionnalité que l'on garde pour ce projet est la communication Bluetooth de données **String**. Grâce à cette fonctionnalité, le Smartphone est capable d'envoyer, mais également de recevoir des données de types bit ou **String**. C'est avec cette fonctionnalité que les données vont pouvoir s'échanger entre la machine et son utilisateur. Une première partie

du travail a donc consisté à modifier entièrement le code pour n'en garder que ces deux fonctionnalités.

La plateforme de travail utilisée pour cela fut Android Studio. Il s'agit d'un compilateur directement destiné au développement mobile. Le langage utilisé pour cette application est Java, qui est un des langages les plus populaires pour développer une application Android. Les applications Android fonctionnent selon un système d'activités. Il s'agit d'un ensemble gérant à la fois l'interface graphique ainsi que le contexte de l'application. Le système est représenté au travers de la Figure 4.14. Grâce à cela, un smartphone peut gérer simultanément un grand nombre d'applications. Chaque activité a un cycle d'arrêt, d'attente, de run et de fin, à utiliser en fonction de l'application souhaitée. L'architecture proposée devra ainsi respecter ce principe.

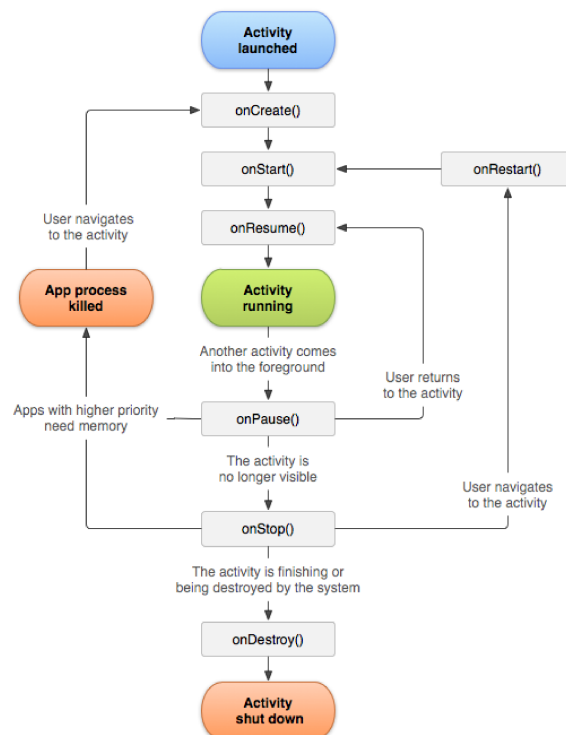


Figure 4.14 Cycle de vie d'une activité Android [49]

Le principal concurrent aux applications Android est IOS de la compagnie Apple. Pour les besoins du projet, il n'est pas prévu qu'une telle application voit le jour. Si cela doit être le cas, il faudrait entièrement refaire le code Java en code objective C, un langage de programmation

orienté objet réflexif. Cependant, l'interface graphique peut être récupérée pour gagner du temps sur la conversion d'une plateforme sur une autre.

4.4.2 Structure de l'application mobile

Comme toute application mobile Android, l'ensemble des activités gravite autour d'une activité centrale nommée `MainActivity.java`. Cette activité est celle initiée lors du lancement de l'application via le Smartphone. Son but principal est d'être le liant entre les différentes activités. L'architecture doit donc prévoir le nombre d'activités en fonction du projet à bâtir. L'application de base propose une architecture initiant un scan des différents modules Bluetooth existants. Ce scan peut être filtré de différentes manières pour ne voir que les modules d'un certain type. Une fois un module sélectionné une dizaine d'activités sont disponibles pour réaliser différents tests. Pour transiter d'une activité à une autre, il est nécessaire d'en abandonner une auparavant.

Dans le cas de notre application, la structure est grandement simplifiée. En effet, une activité est la combinaison d'un contexte et d'une interface graphique. Ici, le contexte est la communication avec le module SmartLux, soit le module Bluetooth UART Friendly. Une seule activité est donc nécessaire pour réaliser cette communication. Cette activité peut être lancée après avoir réalisé le scan Bluetooth. Ce dernier peut être modifié pour afficher seulement les modules de type SmartLux. Finalement, 6 activités principales, et quelques activités secondaires sont nécessaires. Ces dernières sont explicitées dans un diagramme d'état en Figure 4.15 généré par le logiciel PlantUML. Les 6 activités principales sont :

- Le **MainActivity** qui est le pivot central gérant l'ensemble des activités
- Le **BleDevicesScanner** qui gère le scan des différents modules
- Le **BleManager** qui gère la connexion avec un module
- Le Module **InterfaceActivity** qui gère l'interface entre la fenêtre de test et le **BleManager**
- Le **ModuleActivity** qui est l'application centrale développée pour ce projet
- Le **UartDataChunk** qui est l'activité gérant l'envoi de données **Srting** via la connexion Bluetooth

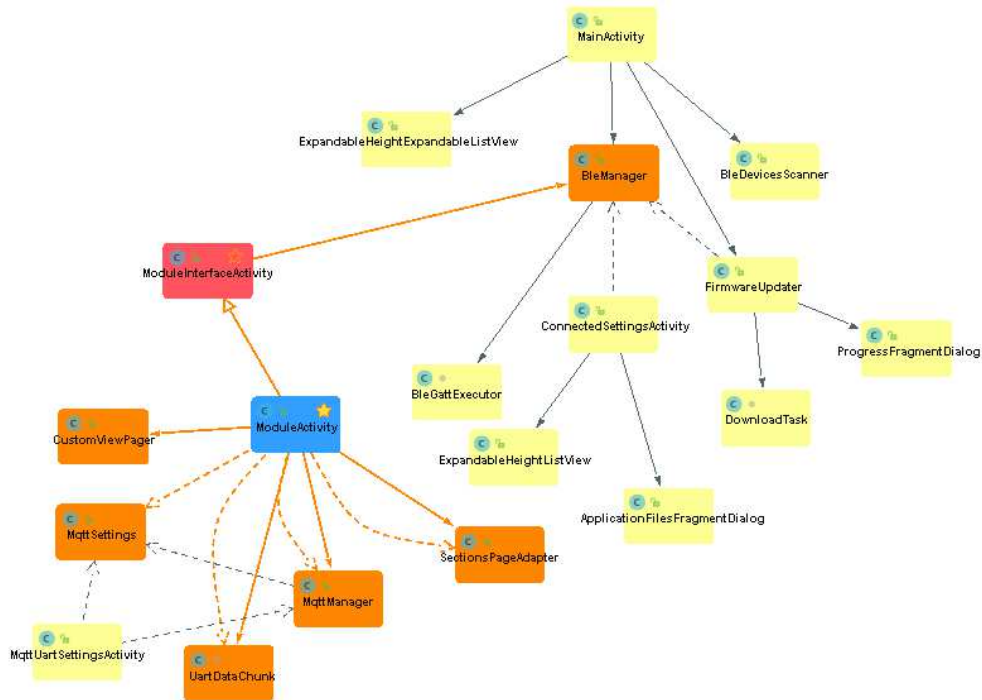


Figure 4.15 Diagramme d'état du cycle de vie des activités

ModuleActivity.java est le principal fichier développé dans ce projet. Celui-ci utilise la structure de base du programme de base gérant l'activité UartDataChunk, permettant l'envoi de données String via Bluetooth. Son fonctionnement est développé dans la section suivante. Avant de lancer cette activité, l'application scanne l'ensemble des devices disponibles comme montré sur la Figure B.3 en annexe B. Une fois un device sélectionné, un écran de chargement avertit l'utilisateur du succès de la connexion. Après quelques secondes, le programme se lance.

4.4.3 Fonctionnement de ModuleActivity.java

Cette activité est celle qui gère l'ensemble des interactions entre module et utilisateur. Lors de son lancement, il propose une interface d'accueil illustrée en Figure 4.16. Celle-ci affiche la luminosité, la température, le nom du module auquel on est connecté ainsi que le pourcentage de batterie restant. Les icônes concernant la connectique Wi-Fi seront développées dans la section 4.5.



Figure 4.16 Écran d'accueil de l'application SmartLux

Lors de son démarrage, l'activité envoie en continu un bit via la commande `uartSendData()`. Ce bit reçu par le module Bluetooth est lu par le MKR ZERO. Une interruption se crée alors donnant l'ordre au MKR ZERO de renvoyer un bit via la liaison série. Au sein de l'application Android, la méthode `mUIRefreshTimerRunnable` tourne en permanence et détecte la provenance d'informations entrante sur la liaison Bluetooth du Smartphone. Si une information est détectée, celle-ci attribue sa valeur à la variable `String rawData`. Cette même variable est vérifiée en permanence via la méthode `mUIRefreshTimerRunnable`. Si elle possède une valeur, plusieurs actions seront effectuées selon un `case` global. Cette solution est très proche de celle proposée pour le code Arduino. De cette manière, le taux de refresh de la luminosité, de la température ainsi que de l'état de la batterie est proche de la seconde. Il faut cependant vider régulièrement la mémoire buffer du téléphone via la commande `mDataBuffer.clear()`. En effet, la mémoire buffer du téléphone emmagasine toutes les valeurs reçues selon un système de pile, et cette dernière nécessite d'être vidée pour éviter une saturation de données.

Un des problèmes les plus importants lors de l'écriture d'un code pour application mobile est l'affichage de l'interface selon l'appareil utilisé. Pour organiser ses informations, un affichage de type onglet a été utilisé. Celui-ci peut être généré via l'utilisation d'une entité de type `TabLayout`. Ainsi, `ModuleActivity.java` est une fenêtre contenant des informations fixes telles

que la luminosité, ainsi qu'un **ViewPager** qui affichera des informations selon l'onglet sélectionné. De cette manière, les différents Layouts contenant le code d'affichage de l'interface peuvent s'adapter, quelle que soit la taille de l'écran. Dans ce document, les différentes captures d'écran ont ainsi pu être prises sur une tablette, mais également sur un téléphone mobile de plus petite taille. C'est de cette façon que le premier onglet se nommant « LUXMETER » s'affiche lors du démarrage de l'application.

Cette interface d'accueil a uniquement pour but de communiquer à l'utilisateur la luminosité de la pièce dans laquelle il se situe. Les autres menus « DUT TEST », « IV CURVE » et « SETTINGS » sont accessibles grâce au système d'onglet en place. Les sections suivantes vont détailler chacun de ces menus.

4.4.4 Structure des tests I-V proposée

Tout comme il a été détaillé en section 4.3.3.3, deux algorithmes sont disponibles pour tester une cellule photovoltaïque : l'algorithme dit « Quick » et l'algorithme dit « Full I-V ». Les deux onglets « DUT TEST » et « IV CURVE » proposent respectivement l'utilisation de chacun de ces algorithmes. La Figure 4.17 présente l'interface graphique proposée.

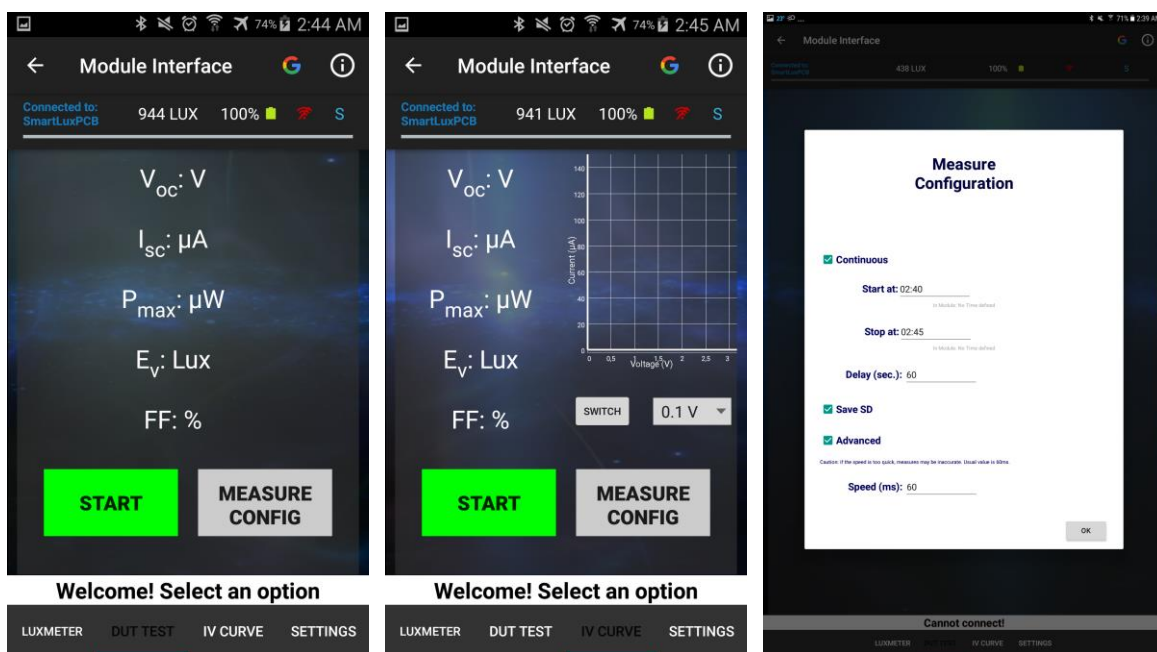


Figure 4.17 Interfaces consacrées aux tests I-V

Les deux tests sont très similaires en termes de fonctionnement. La seule différence s'effectue au niveau de la récupération des données provenant de la carte Bluetooth. Dans le cas de « DUT TEST », l'application Android n'est en attente que de seulement trois données qui sont l' I_{sc} , le V_{oc} et le P_{max} . Pour signaler que ces données ont été calculées par le MKR ZERO, ce dernier envoie un bit lu par l'application. Chaque bit est envoyé à la fin de la prise de ces points, et permet également d'indiquer à l'utilisateur l'avancée du test via une barre de chargement située en haut de l'écran. Durant le test, il est impossible pour l'utilisateur d'interagir avec n'importe quel bouton, pour éviter qu'il ne donne une instruction supplémentaire durant un calcul en cours. Lorsque l'application réceptionne les 3 bits mentionnés précédemment, l'application considère le test terminé. La carte Bluetooth envoie alors en une seule trame les points mentionnés précédemment, ainsi que le niveau de luminosité. Le Fill Factor (FF) est simplement calculé en fonction de l' I_{sc} , le V_{oc} et le P_{max} . La Figure B.5 en annexe B montre le fonctionnement de ce test au travers d'un diagramme de séquence.

Dans le cas d'un test « IV CURVE », la démarche est quasiment identique. La seule différence est au niveau de la récupération des données. Dans ce test, l'application récupère chaque point calculé par l'algorithme au fur et à mesure. Ceci permet à l'application de tracer elle-même son graphique I-V. Le test s'arrête lorsque le courant relevé est inférieur à $4\mu A$. Une option est également disponible pour choisir le pas en voltage du graphique. Il est possible de le tracer avec un pas de 0.1V et de 0.01V.

Le bouton MEASURE CONFIG permet de régler le type de test voulu. Par défaut, le test lancé est unique et n'est pas sauvegardé. Au travers de la fenêtre invoquée par MEASURE CONFIG, l'utilisateur peut choisir une plage horaire de travail, le délai entre chaque mesure et s'il est nécessaire de sauvegarder les données sur la carte SD. La fonctionnalité de sauvegarde sur carte SD sera développée en section 4.5.4. Si l'on sélectionne une plage horaire, le module va répéter plusieurs fois son opération à un intervalle de temps égal à celui choisi dans le champ « Delay ». À ce moment-ci, le bouton START devient un bouton STOP. Ce dernier permet à l'utilisateur d'arrêter un test en continu si besoin. Une fonction « Advanced » est également disponible. Via celle-ci, il est possible de modifier la vitesse de traitement des données du microcontrôleur. Lors du calcul des différentes données, un temps de delay est utilisé pour s'assurer de la fiabilité de ces dernières. Généralement, il faut un peu moins que 10 ms pour qu'un microcontrôleur de type

Arduino puisse communiquer sans risque d'erreurs les données qu'il calcule. Ce temps est modifiable si l'utilisateur souhaite opérer des tests plus rapides, mais qui peuvent éventuellement être moins fiables. C'est également pour cela que ce paramètre est nommé speed avec un symbole **ms** entre parenthèses indiquant un nombre en milliseconde. La valeur préconisée est de 50ms.

Les différents tests proposés permettent à un utilisateur d'effectuer des tests rapides de vérification ou des tests continus le long d'une journée. Cependant, plusieurs paramètres sont manquants pour renseigner complètement un test. L'onglet « SETTINGS » permet de compléter ceci.

4.4.5 Settings mode

Le dernier onglet « SETTINGS » est celui qui va permettre de saisir les informations complémentaires à un test I-V. Ces paramètres manquants ont déjà été abordés en section 4.3.6. Lors de la sélection de cet onglet, l'application fait une demande auprès du MKR ZERO pour récupérer les valeurs déjà existantes de ces différents paramètres. Tout comme les autres commandes déjà citées, un bit va être envoyé pour faire une demande de lecture de l'EEPROM de l'Arduino. Une fois la lecture terminée, celui-ci renvoie directement à l'application une trame contenant l'ensemble de ces informations. Cet échange s'effectue en moins de quelques secondes. Par la suite, l'utilisateur peut modifier chacun de ces paramètres dans le but de personnaliser son test. On y retrouve les mêmes paramètres déjà évoqués. La Figure 4.18 montre l'interface graphique de cet onglet. Il est à noter que l'utilité de la présence des champs « SSID » et « Password » ne sera détaillée qu'à partir de la section 4.5.1.

Lors de l'appui sur le bouton UPDATE, une trame contenant toutes les informations est envoyée au module Bluetooth. Finalement, le MKR ZERO écrit de nouveau la mémoire de l'EEPROM, définissant ainsi les nouveaux paramètres de mesure. Cette option permet ainsi de personnaliser chacun des tests et de pouvoir référencer les données beaucoup plus facilement lors de la phase de traitement et d'envoi de ces dernières. Cependant, l'option « Device Name » a un comportement légèrement différent. En effet, lors du démarrage de l'application, un scan est effectué pour détecter les modules Bluetooth compatibles. Le nom alors affiché est celui qui est

contenu dans la carte Bluetooth, et non directement celui écrit dans l'EEPROM. Ainsi, lorsqu'une mise à jour est effectuée et que le nom du module est concerné, une trame va effectuer cette mise à jour directement dans la carte Bluetooth. Cette mise à jour nécessite forcément 5 secondes, et ne peut être modifiée. Il s'agit du temps qu'il faut pour effectuer un reset sur la carte, et envoyer le nouveau nom du module. Il s'agit de la procédure standard pour nommer manuellement une carte Bluetooth de ce type. Ainsi, un écran d'attente apparaîtra pour indiquer ceci à l'utilisateur. Si jamais le nom n'est pas modifié, ces ajustements n'apparaîtront pas à l'écran. Aussi, le nom est également envoyé à l'EEPROM, tout comme les autres informations citées précédemment.

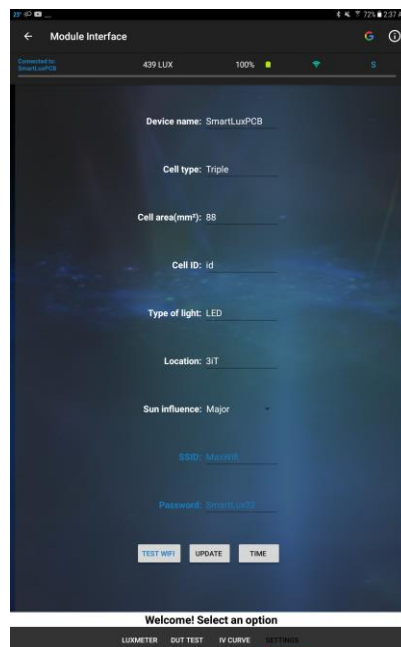


Figure 4.18 Interface graphique de l'onglet SETTINGS

4.5 Gestion client-serveur d'envoi de données

Cette partie est consacrée à la mise en réseaux de plusieurs modules SmartLux dans le but de récolter plus facilement les données. Cette partie évoque le rôle de la carte Wi-Fi ESP8266, ainsi que des techniques mises en place pour récupérer efficacement les données.

4.5.1 Rôle de l'ESP8266

L'ESP8266 est un module Wi-Fi permettant de connecter des appareils autonomes à des réseaux acceptant un protocole IP. Grâce à ce principe, les données peuvent être communiquées à un

serveur stockant l'intégralité des données qu'il reçoit. De plus, cela peut provenir d'un grand nombre de modules à la fois, ce qui est le principe voulu pour le module SmartLux. Cependant, pour que cela soit possible, il faut fournir au module les identifiants de connexion d'un réseau Wi-Fi existant. C'est dans ce cas précis que l'onglet « SETTINGS » de l'application mobile Android est utilisé.

Cet onglet permet de transmettre au module SmartLux des variables **String**. En fournissant les identifiants de connexion d'un réseau, on peut connecter le module à un réseau. Ainsi, via la connexion Bluetooth directe, on connecte le module à un réseau Wi-Fi. Ce principe est très utilisé dans le domaine de l'Internet des Objets. En effet, le principe est d'effectuer cette configuration réseau de manière unique. Une fois le réseau configuré, celui-ci ne peut être interrompu, contrairement à la connexion Bluetooth qui demande une connexion manuelle d'un utilisateur.

Le bouton UPDATE WIFI a deux fonctions. Sa fonction première est de tester les identifiants de connexions données. Si celle-ci échoue, un message d'erreur est renvoyé. L'icône WIFI située en haut à droite de l'écran permet également de signaler cette information à l'utilisateur. Dans le cas où la connexion réussie, l'icône WIFI affichera une couleur bleue pour signaler ceci. De plus, l'adresse IP est générée et affichée à l'écran. Ces deux tests sont illustrés au travers de la Figure 4.19. La figure de gauche montre un cas de réussite de connexion, tandis que la figure de droite est le cas où celle-ci a échoué.

Cette adresse IP aura une utilité qui sera développée durant la section suivante. L'avantage de l'ESP8266 est qu'il garde toujours en mémoire le dernier réseau sur lequel il a réussi à se connecter. Ainsi, même si le module SmartLux est éteint, celui-ci pourra toujours se connecter au réseau lors de l'initialisation. Il s'agit en effet d'une partie du protocole d'initialisation du module SmartLux qui était présenté au travers de la section 4.3.9.2. Cependant, une connexion vers un réseau Wi-Fi n'est pas suffisante pour communiquer les données mesurées par le module SmartLux. Un serveur Web doit être créé pour communiquer des ordres au module ESP8266.

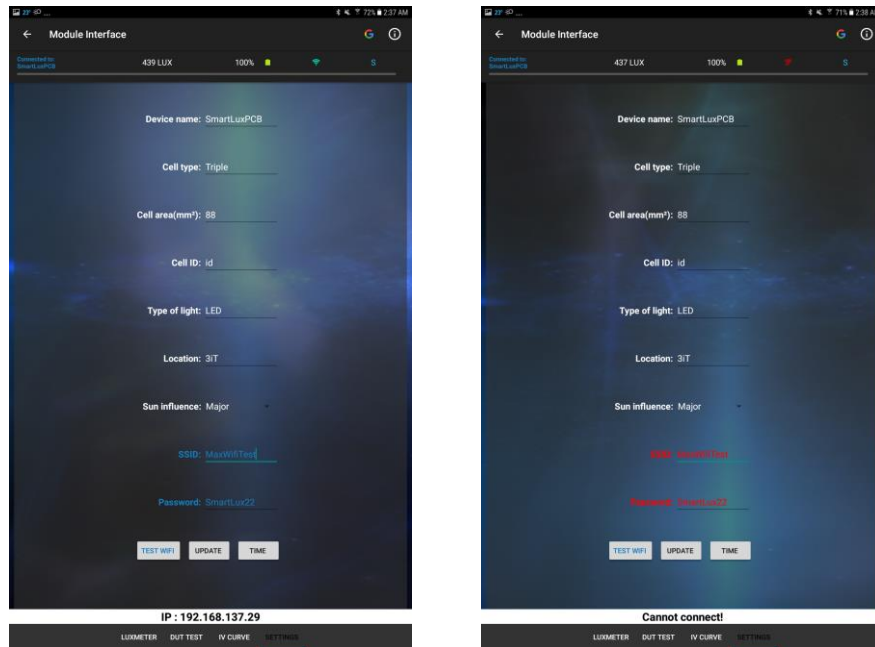


Figure 4.19 Tentatives de connexions sur un réseau Wi-Fi

4.5.2 Création d'un serveur Web

Seul, l'ESP8266 ne peut communiquer les données recueillies par le module de mesure. Ce module a l'avantage de pouvoir jouer le rôle de client et de serveur. Dans ce cas, l'ESP8266 est un client nécessitant la communication avec un serveur. La solution la plus simple est de créer un serveur Web communiquant avec le module SmartLux via des requêtes de types POST. Ces requêtes ne nécessitent uniquement l'adresse IP d'un module présent sur un même réseau pour qu'un échange de données puisse s'organiser. Le serveur Web sert alors d'interface permettant de donner un ordre de test et d'en récolter les résultats. Ce résultat peut ensuite être redirigé vers une base de données via un script PHP. Nous avons ainsi : une interface HTML sur laquelle l'utilisateur peut se connecter, un script PHP qui gère les données qui transitent via des requêtes POST, et une base de données qui accueille les données envoyées par le script PHP. Pour que cela fonctionne, il faut renseigner à l'interface Web l'adresse IP du module. Cette dernière est récupérable via la manipulation présentée en section 4.5.1 sur l'onglet SETTINGS. L'interface graphique de cette page web est présentée en Figure 4.20.

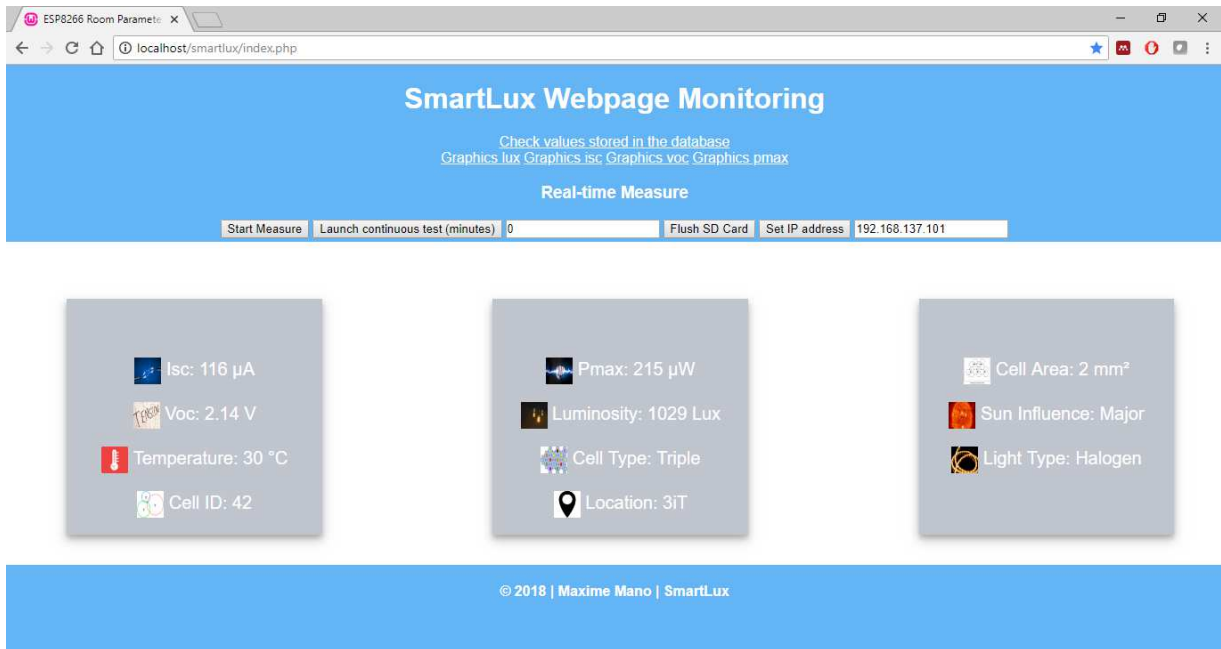



Figure 4.20 Interface Web de gestion des données

La manipulation demandant l'entrée d'une adresse IP peut sembler superflue, mais elle est nécessaire dans ce cas de figure. Dans un contexte plus industriel, il est possible de distribuer une adresse IP fixe à chaque appareil. À ce moment-là, il ne serait plus nécessaire d'entrer une nouvelle adresse IP à chaque fois, mais de directement sélectionner le module avec lequel on souhaite travailler. Une adresse IP fixe peut alors être associée à l'ID de chaque module SmartLux. Cependant, dans le cadre des tests de ce projet, les adresses IP fixes dépendent complètement du réseau utilisé. Il n'y a pas de réelles alternatives possibles dans de telles conditions.

Il est à noter que cette interface est également via l'application mobile. Si le téléphone est connecté sur le même réseau local, ce dernier est redirigé vers une page html dont la forme est adaptée à l'affichage. Elle propose exactement des mêmes options que celle proposée sur la Figure 4.20. Cette page web mobile est accessible en cliquant sur le logo  disponible en haut à droite de l'interface mobile. Une connexion s'ensuit alors vers la page HTML mobile, si la connexion le permet. Un aperçu du design de cette page web pour mobile est montré en Figure B.4 de l'annexe B.

Via cette page web, nous pourrions opérer plusieurs tests. Les requêtes POSTS envoyées depuis cette page serviront à mettre en place le protocole global d'envoi de données en continu du module SmartLux.

4.5.3 Envoi des données

Via la commande « Start Measure », une requête POST est envoyée du serveur vers le module. Dans ce cas-ci, l'ESP8266 a un rôle de serveur. La requête que ce dernier reçoit permet de débiter un simple test I-V. Ce test ne sera pas enregistré sur la carte SD, mais directement renvoyé sur le serveur via une requête POST. Le code implémenté dans le MKR ZERO pour l'envoi de requête de type POST est présenté en Figure 4.21. Cette requête récupère toutes les données principales du programme (courant I_{sc} , tension V_{oc} , température, etc.). La variable `m_server` est l'adresse IP du réseau vers lequel on souhaite envoyer l'information.

```
m_data = "isc=" + String(m_Isc) + "&voc=" + String(m_Voc) + "&temp=" + String(m_Temperature)
+ "&pmax=" + String(m_Pmax) + "&lum=" + String(m_Luminosite) + "&cell_type=" + "\"
+ m_typeOfCell + "\" + "&cell_area=" + "\" + m_cellArea + "\" + "&hour=" + "\"
+ m_module_time + "\" + "&date=" + "\" + m_module_date + "\" + "&cell_id=" + "\"
+ m_cellID + "\" + "&light_type=" + "\" + m_typeLight + "\" + "&location=" + "\"
+ m_location + "\" + "&sun_influence=" + "\" + m_sunInfluence + "\" + "&module_name="
+ "\" + m_moduleName + "\"\r\n\r\n";
String postRequest = "POST " + addOne + " HTTP/1.1\r\n" +
"Host: " + m_server + "\r\n" +
"Accept: */*/" + "*,*" + ":" + "*,*" + "-" + "*,*" + "." + "*/\r\n" +
"Content-Length: " + m_data.length() + "\r\n" +
"Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\r\n" +
"\r\n" + m_data;
```

Figure 4.21 Code traduisant une requête de type POST via l'ESP8266

La variable `String postRequest` est de la forme d'une requête POST. Si l'ESP8266 est connecté sur le même réseau local que celui-ci contient le fichier PHP `addOne.php`, ce dernier pourra traiter la requête. `addOne.php` est le fichier responsable de la gestion d'envoi vers la base de données d'un test I-V unique. Ce type d'architecture est très classique dans la gestion des requêtes POST. La trame envoyée par le module Wi-Fi a pour balise de séparation le caractère '&'. Ce dernier est directement lu par le script PHP qui envoie alors la requête SQL. Cette solution est la plus simple à mettre en place pour stocker en ligne les paramètres liés à un seul test I-V. Le code que contient le fichier `addOne.php` est également présenté en Figure 4.22. Par exemple, la variable `$isc` est associée à la valeur I_{sc} envoyée via la précédente commande implémentée dans le code Arduino. L'opération est répétée pour les autres valeurs, puis traduite sous forme de requête SQL via la commande `INSERT INTO` envoyée vers le serveur SQL.

```

<?php
$servername = "localhost";
$username = "root";
$password = "";
$dbname = "gestion_lux";
$conn = new mysqli($servername, $username, $password, $dbname);
if ($conn->connect_error) {
    die("Connection failed: " . $conn->connect_error);
}
$isc          =!empty($_POST['isc'])?$_POST['isc']:NULL;
$voc          =!empty($_POST['voc'])?$_POST['voc']:NULL;
//...Même chose répétée de pour les autres paramètres...
$module_name =!empty($_POST['module_name'])?$_POST['module_name']:NULL;

$sql = "INSERT INTO
room(isc,voc,temp,pmax,lum,cell_type,cell_area,hour,date,cell_id,light_type,location,sun_influence,module_name) VALUES ($isc,$voc,$temp,$pmax,$lum,$cell_type,$cell_area,$hour,$date,$cell_id,$light_type,$location,$sun_influence,$module_name)";
$conn->query($sql);
$conn->close();
?>

```

Figure 4.22 Requête de type SQL adaptée au langage PHP

Le type d'architecture proposé ici est de type REST (Representational State Transfer). Dans une telle architecture, le HTTP, PHP et les méthodes type GET/POST sont utilisées. Elles nécessitent des objets qui n'ont pas un état défini, qui possèdent une mémoire, qui puissent être à la fois clients et serveurs ainsi qu'une interface uniforme. Toutes les conditions de cette architecture sont respectées. L'autre modèle qui aurait pu être adapté par l'application mobile est le modèle MQTT. Cependant, celui-ci est utile pour un débit important d'envoi de données, ce qui ne sera pas le cas de ce module.

En effet, dans le cadre de ce projet, un envoi continu durant une journée est préféré. Cependant, le code tel que présenté ici ne peut pleinement satisfaire le cahier des charges pour plusieurs raisons développées dans la section suivante.

4.5.4 Envoi de données en continu

Comme dit précédemment, la connexion Wi-Fi est idéale pour la mise en réseau de plusieurs objets autonomes, mais est bien plus coûteuse en énergie. Pour un système autonome tel que proposé avec le module SmartLux, il n'est pas réaliste d'effectuer une requête POST pour chaque fin de test. Ceci réduirait drastiquement la durée de vie de la batterie. Un plus gros modèle de batterie peut être utilisé, mais il existe une solution permettant de réduire l'énergie consommée en modifiant seulement le mode d'envoi des données. Pour cela, il suffit de stocker

en mémoire l'ensemble des données récoltées durant chaque test I-V pendant une certaine période de temps. Ceci est possible grâce à la carte SD, qui peut accueillir un très grand nombre de données.

L'idée est d'effectuer une requête POST qui envoie en une seule fois toutes les données récoltées sur plusieurs tests I-V. Comme chaque test est référencé dans le temps via la RTC, ce ne pose pas de problème pour classer les données une fois sur la base de données. Cependant, une requête POST est limitée en taille et ne peut qu'envoyer un maximum de 2048 bytes. Il faut ainsi créer un format d'envoi de données qui soit le plus court possible pour éviter un gaspillage d'énergie. Le format proposé est d'utiliser le caractère '<' comme caractère d'initialisation, puis de séparer chaque variable par le caractère '/'. Un script PHP approprié peut ainsi lire la trame de données au complet. Ainsi, lors de l'enregistrement sur la carte SD, ce format de données sera toujours appliqué. Le code Arduino du format de ce code est présenté en Figure 4.23.

```
dataStringSD =
"<" + String((int)Isc) + "/" + String(Voc) + "/" + String((int)Temperature) + "/" +
String((int)Pmax) + "/" + String((int)Luminosite) + "/" + "\""
+ typeOfCell + "\"" + "/" + "\"" + cellArea + "\"" + "/" + "\""
+ module_time + "\"" + "/" + "\"" + module_date + "\"" + "/" + "\""
+ cellID + "\"" + "/" + "\"" + typeLight + "\"" + "/" + "\"" + location
+ "\"" + "/" + "\"" + sunInfluence + "\"" + "/" + "\"" + moduleName + "\"";
```

Figure 4.23 Code Arduino permettant d'envoyer en une seule trame l'ensemble des informations nécessaires pour la base de données

Parmi les paramètres envoyés via cette requête, certains d'entre eux sont modifiables via l'application mobile, tel que le nom du module représenté dans le code ci-dessus par la variable `moduleName`. Pour éviter tout conflit de lecture par le script PHP, les caractères '/' et '<' ne peuvent être utilisés dans l'application Android. Cela garantit que la lecture puisse s'effectuer avec n'importe quel type d'information donnée par l'utilisateur lors du choix de configurations dans l'onglet « SETTINGS » de l'application mobile. Le script PHP nommé `addAll.php`, est celui qui gère la lecture de la trame contenant toutes les informations des différents tests. Il s'agit d'une simple boucle récupérant chaque paramètre repéré par les balises '/' et les bytes primaires '<'. De cette manière, l'envoi en continu de données est assuré en tout temps. Un timer peut ainsi être initiée pour que le module vide régulièrement le contenu de la carte SD. Ainsi, à l'initialisation du module SmartLux, un compteur débute pour savoir quand envoyer l'ensemble des données vers la base de données. Ce compteur est réglé sur 30 minutes. Lorsque ce temps

est écoulé, le module tente un envoi des données vers la base de données. Si c'est un succès, le fichier contenant toutes les données emmagasinées est effacé. Si cela échoue, une autre tentative sera faite au bout des 45 prochaines minutes. Le code utilisé pour le fichier addAll.php est présenté en Figure 4.24.

```
<?php
$tot = !empty($_POST['tot']) ? $_POST['tot'] : NULL;
$count = substr_count ( $tot , '<' ) - 1;
$indInt = 0;
for ( $i = 0; $i < $count; $i++ ) {
    $tot = substr ( $tot , $indInt + 1 );
    $indInt = strpos ( $tot , "/" );
    $vall = substr ( $tot , 0, $indInt ); //isc
    //...Même chose répétée de $val2 à $vall3...
    $tot = substr ( $tot , $indInt + 1 );
    $indInt = strpos ( $tot , "<" );
    $vall4 = substr ( $tot , 0, $indInt ); //module_name
    $sql = "INSERT INTO
room(isc,voc,temp,pmax,lum,cell_type,cell_area,hour,date,cell_id,light_type,location,sun_influence,module_name)VALUES($vall,$val2,$val3,$val4,$val5,$val6,$val7,$val8,$val9,$val10,$vall11,$vall12,$vall13,$vall14)";
    $conn->query($sql);
}
$conn->close();
?>
```

Figure 4.24 Fichier PHP permettant de commuter les données vers la base de données de type MySQL

Un autre avantage important de cette méthode est qu'elle permet de toujours garder les données récoltées dans un espace tel que la carte SD. Si l'on veut vider celle-ci, il n'est pas forcément nécessaire d'attendre 45 minutes. La Figure 4.20 de la section 4.5.2 indique un bouton « Flush SD Card » remplissant cette fonction. Si un utilisateur souhaite envoyer l'ensemble des données récoltées par le module sur une base de données, il n'a besoin que d'appuyer ce bouton. La requête utilisant le fichier addAll.php est initiée vidant ainsi la carte SD.

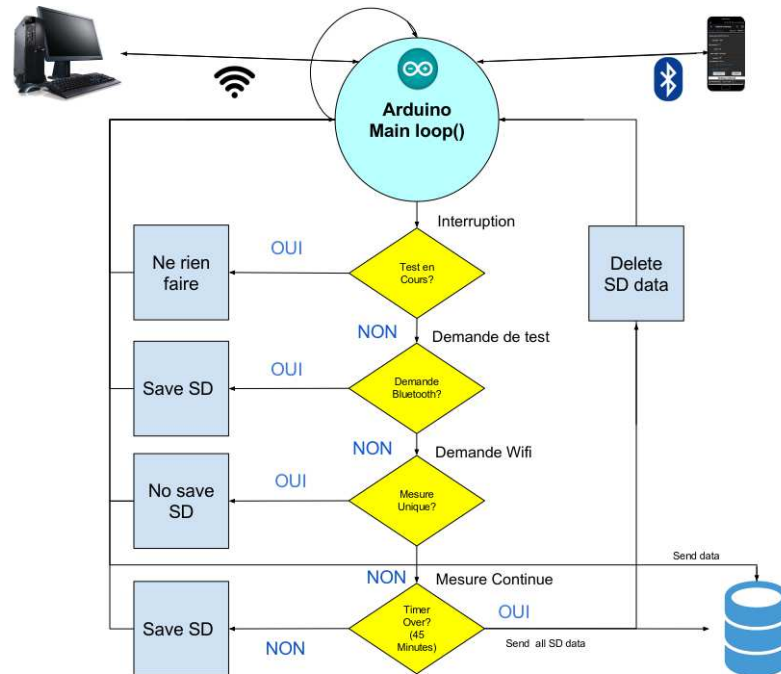


Figure 4.25 Principe de gestion d'envoi de données vers la base de données

Afin de gérer l'ensemble des procédures de tests possibles, des précautions logicielles ont été prises pour éviter qu'il n'y ait un conflit entre chacune de ces instructions. La Figure 4.25 montre comment cela est géré. L'idée est de créer un ordre de priorité selon le test effectué. Si un test est en cours, il est impossible d'intervenir. Il faut toujours attendre la fin d'un test pour effectuer une nouvelle opération.

4.6 Discussions sur l'ensemble de la solution

Finalement, le module de mesure remplit l'ensemble des points abordés dans le cahier des charges. Même s'il s'agit d'un prototype, ce dernier est entièrement fonctionnel, sans fil et de taille raisonnable. Ces conditions étaient les plus importantes à remplir. L'autonomie de la batterie, ainsi que la gestion de la base de données sont les principaux points sujets à amélioration.

Le coût total de production actuel avoisine les 150 \$. Ce prix ne prend pas en compte la cellule photovoltaïque utilisée. Ce prix peut être réduit si l'Arduino est remplacé par les pièces électroniques essentielles du projet telles que les ADC et modules de communications séries. De plus, plusieurs achats ont été effectués en petites quantités, on peut alors imaginer que le

prix total peut au moins baisser de 50 \$. La Figure B.6 présente en ANNEXE B indique l'ensemble des pièces utilisées ainsi que leur prix.

La dernière étape nécessaire est le test des performances de ce module de mesure. Pour cela, les résultats obtenus avec celui-ci doivent être comparé avec les différents résultats obtenus via le banc d'essai en laboratoire présenté en CHAPITRE 3. Ceci est effectué dans le CHAPITRE 5 suivant et constitue la dernière étape avant de pouvoir valider définitivement les performances de ce module de mesure portable.

CHAPITRE 5 ÉTUDE DES RÉSULTATS

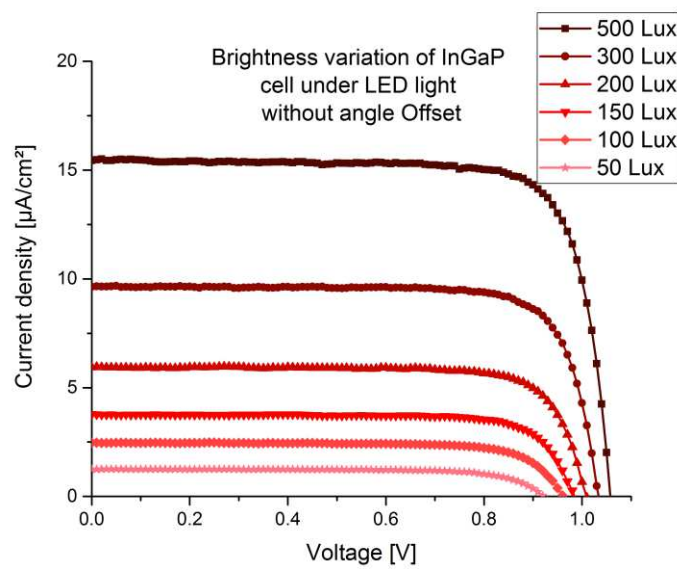
Dans ce chapitre, nous présenterons les différents résultats obtenus via la station de laboratoire développée durant le chapitre 3, ainsi que les résultats obtenus avec le module SmartLux développé durant le chapitre 4. Nous observerons la cohérence de chacun d'entre eux, puis nous les comparerons. Finalement, plusieurs tests ont été réalisés pour tester la mise en ligne des données. Nous détaillerons comment ces tests ont été réalisés, et quels résultats ont été obtenus.

5.1 Résultats obtenus via le banc d'essai en laboratoire

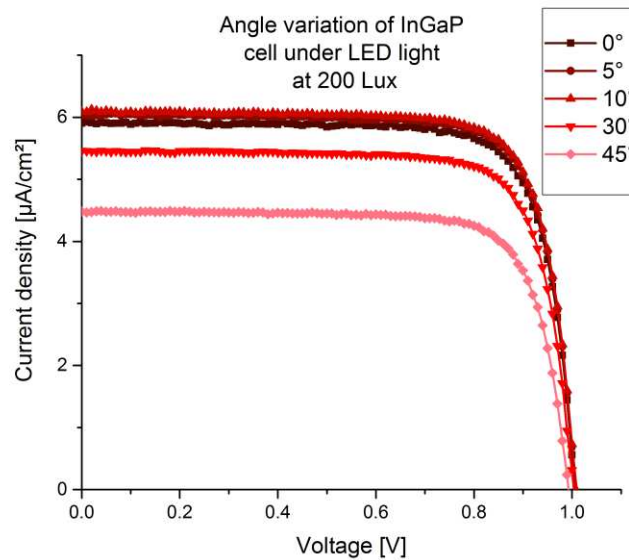
Cette section ne s'intéressera qu'aux résultats produits par le banc d'essai en laboratoire. Le but est de montrer dans un premier temps que le comportement des cellules testées est cohérent avec les données issues de la littérature, puis il s'agira d'utiliser ce banc d'essai comme référence après validation des différents tests effectués. Pour attester du fonctionnement de chacune des cellules photovoltaïques montées sur le support en PCB, ces dernières ont été testées au préalable via un SMU placé sous 1 soleil. Ceci est possible via une station de mesure disponible au 3IT qui est calibré et qui permet de tester le comportement de différentes cellules photovoltaïques. Le résultat d'un de ces tests est donné en Figure A.2 de l'annexe A. Toutes les cellules PV utilisées dans la suite de ce document sont fonctionnelles et utilisables dans le cadre des tests en laboratoire.

Les résultats obtenus en utilisant ces cellules dans le banc d'essai en laboratoire développé au début de ce projet de maîtrise sont cohérents avec la littérature. Les cellules PV produisent toujours une puissance de l'ordre de la dizaine de $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ lorsque celles-ci reçoivent un éclairage lumineux d'un minimum de 200 Lux. Plusieurs types de cellules ont pu être testés pour observer la différence en fonction des sources de lumières disponibles : LED, Halogène, incandescent et fluorescent. Les cellules disponibles étaient des cellules InGaP, GaAs, Triple Jonction et une cellule spécifique sensible à l'infrarouge nommée PT. Cette dernière possède plusieurs déclinaisons de modèles : PT5, PT6, PT8 et PT10. Deux tests principaux ont été effectués. Le premier étudie la variation en éclairage lumineux, tandis que le deuxième s'intéresse à la variation de l'angle entre la source lumineuse et la cellule photovoltaïque par rapport à la normale. La Figure 5.1 présente les résultats de plusieurs tests I-V en variation

d'intensité lumineuse en Lux, et en variation d'angle réalisés avec une cellule InGaP sous lumière LED.



a)



b)

Figure 5.1 Tests I-V de cellule InGaP sous lumière LED en : a) variation de luminosité à angle d'inclinaison nul, b) variation d'angle à luminosité constante de 200 Lux

Les valeurs choisies pour la variation de l'intensité lumineuse sont 50, 100, 150, 200, 300 et 500 Lux. Ce sont des valeurs standards que l'on peut mesurer par exemple dans un bureau normalement éclairé. En effet, une pièce correctement éclairée se situe entre 200 et 500 Lux, tandis qu'un lieu plus sombre verra sa luminosité plus basse que 200 Lux. Cette variation en luminosité cherche à reproduire ces conditions en laboratoire afin d'estimer les performances de chaque cellule selon le type d'éclairage utilisé. La figure b) présente un test en variation d'angle avec la même lampe LED à un éclairement lumineux de 200 Lux. Les résultats sont également cohérents puisque l'on retrouve des valeurs de courant similaires à celles obtenues en variation de luminosité. On constate que pour un angle incident de 45° , le courant I_{sc} est supérieur à la moitié du courant I_{sc} pour un angle d'offset nul. Également, la cellule sous un angle d'incidence de 10° génère un courant légèrement supérieur au cas où l'offset est de 0° . Ceci peut être expliqué par un défaut lors du collage de la surface inférieure de la cellule sur le support, créant ainsi un léger décalage angulaire. Aussi, l'environnement de laboratoire est un environnement où la lumière peut subir plusieurs phénomènes de réflexion, pouvant influencer les résultats selon l'angle utilisé.

Dans un deuxième temps, on cherche à comparer ces résultats avec ceux trouvés dans la littérature. Pour cela, la Figure 2.5 [35], (voir section 2.3) va être comparé aux résultats obtenus avec le banc d'essai pour une cellule triple jonction sous lumière halogène à 200 Lux dont on fait varier l'angle par rapport à la source incidente. La cellule testée dans la littérature est de type silicium, les résultats ne peuvent ainsi être identiques en utilisant des cellules multi-jonctions. Cependant, les résultats obtenus avec le banc d'essai doivent être du même ordre de grandeur que ceux donnés par la littérature, c'est ce que l'on cherche à montrer dans ce paragraphe. On peut comparer les valeurs de densité de puissance obtenues pour chaque angle avec les deux cellules, les valeurs de puissances maximales étant facilement lisibles sur le graphique de la Figure 5.2. D'après l'article dont les résultats proviennent, on sait que le modèle de cellule utilisé Sanyo/AM-1464 possédait une surface de $58.1 \times 48.6 \text{ mm}^2$, soit 28 cm^2 [35]. De plus, quatre de ces cellules sont branchées en parallèle, ce qui donne une surface de 112 cm^2 et un rapport de surface de 112 par rapport à la cellule triple jonction dont la surface est de

1 cm². On peut ainsi facilement comparer les différentes valeurs de densité de puissance via le Tableau 5.1.

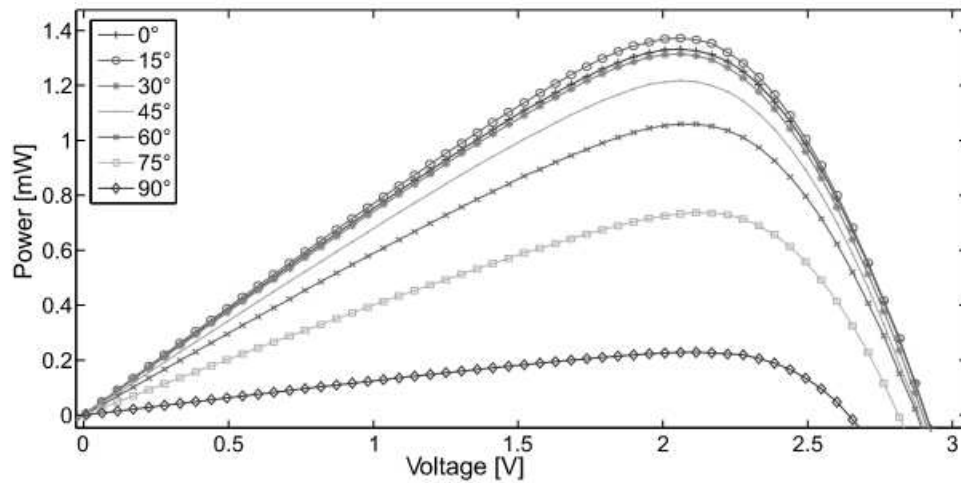


Figure 5.2 Résultats issus de la littérature pour une cellule silicium sous lumière incandescente de 200 Lux en variation d'angle [35]

On constate ainsi que les résultats obtenus sont bien du même ordre de grandeur, soit la dizaine de $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Ces résultats restent cohérents avec le Tableau 2.1 dressé dans l'état de l'art qui présentait les différentes valeurs obtenues dans la littérature. Il est à noter que les valeurs obtenues en densité de puissance pour 45° d'angle d'incidence montrent une chute de puissance plus importante pour la cellule triple jonction que pour la cellule de silicium. Ceci peut être dû au collage de la cellule, à la présence de couches antireflets, mais également à l'environnement de test pouvant modifier le comportement de la cellule sous cet angle. Mis à part cette valeur, le reste est bien du même ordre de grandeur en puissance.

Tableau 5.1 Comparaison entre les puissances maximales obtenues dans la littérature [35] et avec le banc d'essai de laboratoire

	Densité de puissance maximale en $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ pour un angle d'inclinaison donné sous lampe halogène à 200 Lux			
	0°	15°	30°	45°
Cellule Triple jonction testée avec le banc d'essai	15.17	15.09	12.2	8.85
Cellule Sanyo/AM-1464 de silicium issu de la littérature	12.5	11.6	10.71	9.82

En complément à ces courbes, un test complet d'une cellule InGaP sous plusieurs types d'éclairages en variation de luminosité est présenté en Figure A.1 de l'annexe A. Finalement, le Tableau 5.2 est un récapitulatif des différentes valeurs de V_{oc} et I_{sc} obtenues durant ces tests. Il s'agit de tests réalisés sous 200 Lux pour les 4 types de lampes disponibles, et ce pour chaque cellule photovoltaïque. Ce tableau est comparé au Tableau 2.1 présenté dans l'état de l'art.

Tableau 5.2 Résultats obtenus pour toutes les cellules testées sous différents éclairages à 200 Lux (En rouge valeur maximale, en bleu valeur minimale)

	Domaine infrarouge						Domaine ultraviolet					
	Lampe Incandescente (200 Lux)			Lampe Halogène (200 Lux)			Lampe LED (200 Lux)			Lampe Fluorescente (200 Lux)		
	V_{oc} (Volt)	I_{sc} ($\mu A.cm^{-2}$)	P_{max} ($\mu W.cm^{-2}$)	V_{oc} (Volt)	I_{sc} ($\mu A.cm^{-2}$)	P_{max} ($\mu W.cm^{-2}$)	V_{oc} (Volt)	I_{sc} ($\mu A.cm^{-2}$)	P_{max} ($\mu W.cm^{-2}$)	V_{oc} (Volt)	I_{sc} ($\mu A.cm^{-2}$)	P_{max} ($\mu W.cm^{-2}$)
GaAs	0,2	38,19	2.76	0,1	19,80	0.7	0,05	6,41	0.1	0,05	6,30	0.1
InGaP	0,9	3,90	3	0,9	2,78	2	1	5,93	4.67	1	5,47	4.25
Triple	1,8	10,34	16.6	1,7	7,55	10.8	1	11,47	8.79	1	6,63	5.32
PT5	2,5	13,19	21.9	2,4	9,79	15.8	0,6	0,16	0.1	1	0,21	0.1
PT6	0,7	12,72	0.1	0,4	6,47	0.1	0,01	0,18	0.1	1	0,20	0.1
PT8	0,7	8,72	0.1	0,4	4,51	0.1	0,01	0,20	0.1	0,4	0,50	0.1
PT10	0,6	6,71	0.1	0,3	3,43	0.1	0,01	0,20	0.1	0,9	0,10	0.1

Les valeurs présentées sont bien du même ordre de grandeur que celles données dans la littérature, soit une dizaine de $\mu A.cm^{-2}$ pour 200 Lux d'éclairage lumineux si la cellule photovoltaïque est adaptée au spectre d'émission de la source lumineuse. Cette luminosité correspond à celui d'une salle moyennement éclairée. Il s'agit donc d'un type de milieu standard où ce type de test peut être effectué. On constate dans un premier temps que certaines cellules ont des performances globalement très mauvaises. Ces performances peuvent être comparées via les valeurs de P_{max} qui permettent d'estimer la puissance réelle disponible. Les cellules ayant des performances médiocres sont les cellules de GaAs, PT6, PT8 et PT10. La cellule de GaAs a pu montrer des performances acceptables, mais uniquement pour des éclairages lumineux supérieurs à 400 Lux non présentés dans le tableau. Pour ce qui est des cellules PT, hormis la PT5, celles-ci ne semblent pas du tout réceptives aux faibles éclairages. Les autres tests menés à des éclairages supérieurs à 500 Lux ont donné des performances tout aussi mauvaises. Nous

ne pourrons donc observer au travers de ce tableau que les performances des cellules de InGaP, Triple Jonction et PT5.

On peut constater également que les performances des cellules sont bien meilleures dans le cas des sources lumineuses émettant dans l'infrarouge, c'est-à-dire les sources halogènes et incandescentes, que dans le cas des lumières émettant dans l'ultraviolet, c'est-à-dire les lampes LED et Fluorescentes. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce phénomène. L'intensité spectrale des sources infrarouges utilisées dans cette expérience est bien plus importante que dans le cas de lampes LED et fluorescente dont l'intensité spectrale dans le domaine de l'ultraviolet est plus faible. Ceci se voit d'autant plus dans le cas de la cellule PT5, qui est une cellule photovoltaïque utilisée principalement dans la détection des sources infrarouges. Cette dernière offre d'excellentes performances sous lampe halogène, mais médiocres sous lampes LED. Un exemple de ce type de performance médiocre est donné en Figure A.3 de l'annexe A. Cela est dû à son procédé de fabrication, qui cherche à capter au maximum les sources infrarouges. Dans le cas d'une cellule triple jonction, l'idée est de capter un spectre de lumière le plus large possible. Ceci se remarque dans le Tableau 5.2 des résultats, où cette dernière présente des résultats moyens, quelle que soit la source lumineuse. Cependant, ce type de cellule coûte plus cher à la fabrication. On comprend ainsi que chaque cellule a ses forces et faiblesses, selon le milieu étudié. La cellule InGaP simple jonction a un comportement similaire, mais est bien moins performante que la cellule triple jonction.

Une autre raison pouvant expliquer les mauvaises performances des différentes cellules sous lampes LED et fluorescentes est le principe même de la mesure en Lux. Comme il a pu être évoqué dans la section 2.5 du chapitre 2 sur l'état de l'art, la mesure de l'éclairement lumineux possède plusieurs approximations. Dans le cas de ce montage, le capteur PDV-P7002-ND a dû être calibré pour son utilisation. Or, cette calibration a de légères différences selon la source de lumière utilisée. Pour s'assurer de la véracité des résultats, un luxmètre industriel a été utilisé pour compléter le Tableau 5.2. Malgré cela, il est très probable que la mesure donnée par l'appareil ait donné des résultats très différents par rapport à la lumière halogène ou incandescente. Des appareils de haute calibration sont nécessaires pour évaluer l'éclairement lumineux dans un cas comme celui-ci, et non des appareils de première main. Cependant, ce type de setup n'était pas disponible et n'a pas permis de s'assurer entièrement de cette

hypothèse. Malgré tout, les résultats restent cohérents par rapport à la nature même des cellules utilisées. Cependant la mesure en Lux nécessite une plus grande précision si l'on souhaite comparer correctement différents types de sources lumineuses entre elles.

5.2 Résultats du module de mesure autonome

Dans un premier temps, nous nous intéresserons seulement aux résultats obtenus avec l'application mobile seule. Par la suite, nous comparerons ces derniers avec les mesures effectuées en laboratoire afin de valider la pertinence ainsi que le bon fonctionnement du module de mesure. Enfin, nous développerons la méthode qui a permis d'envoyer les données sur un serveur local et étudierons les résultats de celle-ci.

5.2.1 Simples tests I-V

Nous rappelons qu'il existe deux modes de mesure. Le premier se nomme DUT Test, et utilise l'algorithme « Quick » implémenté dans le MKR ZERO. Cet algorithme est adapté à la répétition en continu de tests I-V sur une journée complète, car celui-ci ne récolte seulement que les points nécessaires pour caractériser une cellule photovoltaïque, c'est-à-dire le V_{oc} , l' I_{sc} et le P_{max} . Cet algorithme a l'avantage d'être rapide et de ne consommer ainsi que peu de ressources pour le module SmartLux. Le deuxième mode de mesure se nomme Full I-V et cherche simplement à tracer une courbe I-V en récupérant tous les points disponibles. Il s'agit donc d'un mode plus énergivore, mais qui a l'avantage de pouvoir directement tracer une courbe I-V et de la visualiser. Il est cependant fortement déconseillé de lancer une journée complète de mesures dans ce mode, cela peut être néfaste à long terme pour la batterie.

Dans le cas du mode de mesure DUT Test, les résultats ont été concluants. Les tests s'effectuent en seulement une dizaine de secondes, et présentent des données identiques aux tests en laboratoire. Cet aspect de comparaison est développé dans le prochain paragraphe de ce document. Ce fût également le cas du mode de mesure Full I-V. Selon le step voltage sélectionné, les tests demandent entre 20 et 30 secondes de calcul. Ils permettent d'afficher des courbes I-V comparables aux résultats en laboratoire comme le montre la Figure 5.3 ci-dessous.

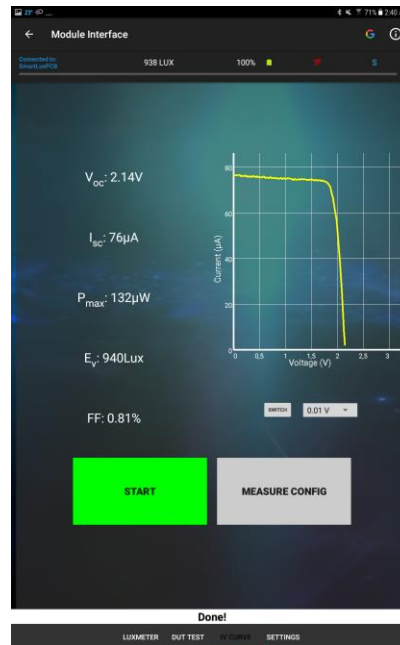


Figure 5.3 Obtention d'une courbe I-V via l'onglet « IV CURVE » de l'application Android

Cependant, du fait que la méthode de transit de données soit asynchrone, afin de favoriser la rapidité d'échange de l'information, il a déjà pu être noté que certains points pouvaient être manquants lors de la réception de données. Ceci se remarque surtout pour les premières et dernières valeurs sur la courbe affichée par le téléphone. Cependant, cela ne perturbe en rien le stockage final des données. En effet, les données affichées sur la base de données proviennent avant tout des données enregistrées sur la carte et n'ont aucun lien avec ce qui est affiché sur le téléphone. On peut donc qualifier ce problème de problème d'affichage, ou de bug graphique. Il ne vient en rien perturber l'interprétation des données ou l'appréciation de la courbe affichée par l'application mobile.

5.2.2 Module de mesure portable vs. banc d'essai en laboratoire

Une fois le module autonome prêt, des tests ont été réalisés pour comparer les deux applications. Ici, on cherche à comparer les données pour des variations d'éclairement lumineux qui vont de 0 à 1385 Lux. La cellule choisie pour ce test est la cellule triple jonction. Dans ce cas-ci, selon le système de transistors mis en place, seules deux résistances participent aux mesures, celles de 1500 Ohm et celle de 1000 Ohm. Les valeurs en éclairement lumineux correspondent aux différentes intensités proposées par une lampe halogène et directement mesurées par le capteur

présent sur le module Smart Lux. Les tests sont réalisés en même temps pour s’assurer de l’unicité des résultats. Les données correspondant à la mesure réalisée par le module SmartLux ont simplement été enregistrées au préalable sur la carte SD, puis traités sous le logiciel Origin. Si l’on trace les graphes correspondant à chacun des modules de mesure, on obtient les courbes présentées à la Figure 5.4 ci-dessous.

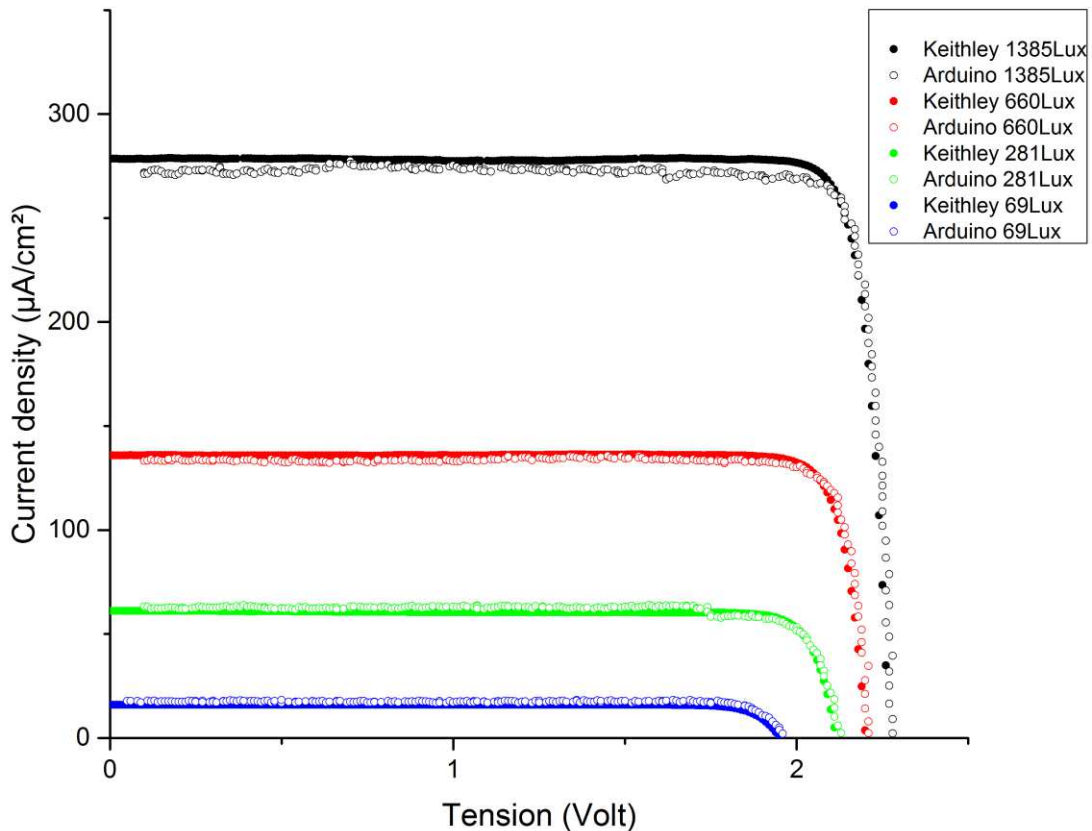


Figure 5.4 Comparaison des performances de la cellule PV 3J avec le banc d’essai en laboratoire (Keithley) et avec le module autonome (Arduino)

On constate que les courbes sont très proches en termes de résultat. L’écart relatif maximum en courant obtenu est de 2% pour les valeurs en éclairnement lumineux inférieures ou égales à 660 Lux. Cependant, on peut remarquer que le fait de monter la valeur de l’éclairnement lumineux semble amener une certaine imprécision dont l’écart relatif maximum peut atteindre jusqu’à 5%. Celle-ci a déjà été évoquée dans la section 4.3.3.2 du chapitre 4. Plus la valeur en intensité mesurée par le module SmartLux est grande, plus l’incertitude sur la valeur réelle est élevée.

Ceci est dû à l'erreur induite par la résistance de conversion courant-tension, à l'incertitude liée à l'amplificateur d'instrumentation de mesure, mais également à la fluctuation de l'éclairage lui-même. Tous ces facteurs font que la mesure est incertaine à quelques μA près. Cependant, ceci est amoindri grâce au système de transistor mis en place, et il est également difficile pour toutes les cellules photovoltaïques disponibles sur le marché de dépasser cette valeur. La cellule triple jonction a été choisie, car il s'agissait de celle qui donnait la valeur en μA la plus élevée. Cependant, si de nombreux modèles de cellules dépassant cette valeur doivent être testés, il sera nécessaire d'implanter de nouveaux étages de transistor avec les résistances appropriées. Dans le cas des tests effectués en laboratoire pour confirmer le fonctionnement et la fiabilité du modèle SmartLux, cette éventualité n'a pas été abordée.

Finalement, les tests effectués sont concluants et ont permis de montrer une précision satisfaisante du module SmartLux. Il reste à pouvoir récupérer les données de ces tests et à les envoyer sur un serveur.

5.2.3 Stockage sur une base de données

Afin de simuler la mise en place d'un serveur, ainsi que d'un point de connexion commun, le logiciel WampServer a été utilisé. Ce dernier est capable de générer un serveur sur un ordinateur. Ce dernier abrite ainsi les scripts PHP, HTML ainsi que la base de données MySQL. En connaissant le gateway de l'ordinateur, il est possible de simuler la création d'un serveur. Pour que cela fonctionne, il faut également que l'ordinateur et le module SmartLux soient connectés sur un réseau commun. La solution la plus simple est de configurer l'ordinateur comme une antenne pour que l'ensemble des SmartLux soient connectées dessus. Il faut également surveiller que le pare feu autorise ce type de connexion en désactivant le port 55, qui est le port de communication sans fil par défaut.

Pour réaliser ce test, nous laissons le module SmartLux récupérer un certain nombre de données provenant de tests I-V pendant 30 minutes. À la suite de cela, la carte SD doit être remplie d'un grand nombre de données. Via l'interface Web présentée plus tôt, abritée par le programme WampServer créé plus tôt, on donne l'ordre « Flush SD Card ». Comme déjà détaillé dans la section 4.5.4, ceci permet au module de mesure de réaliser une requête POST contenant l'intégralité des données stockées dans la carte SD. Cette commande est automatiquement

réalisée chaque 30 minutes, mais pour les besoins du test, nous réalisons celle-ci manuellement. Une fois ceci fait, on peut constater que les données ont bien été renseignées, comme le montre la Figure 5.5 ci-dessous qui est une capture d'écran d'un exemple de données disponibles sur le serveur mySQL.

Affichage des lignes 0 - 24 (total de 645, traité en 0.0000 seconde(s)) [id: 857... - 833...]

```
SELECT * FROM 'room' ORDER BY 'room'. 'id' DESC
```

Profilage [Éditer en ligne] [Éditer] [Expliquer SQL] [Créer le code source PHP] [Actualiser]

1 > >> Nombre de lignes : 25 Filtrer les lignes : Chercher dans cette table Trier sur l'index : Aucun(e)

+ Options		id	isc	voc	temp	pmax	lum	cell_type	cell_area	hour	date	cell_id	light_type	location	sun_influence	module_name	
Éditer	Copier	Supprimer	856	60	2.2	26	110	330	Triple	5	14.25.13	2018-04-07	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Éditer	Copier	Supprimer	855	60	2.2	26	110	332	Triple	5	14.25.02	2018-04-07	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Éditer	Copier	Supprimer	854	60	2.2	26	110	333	Triple	5	14.24.51	2018-04-07	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Éditer	Copier	Supprimer	853	60	2.2	26	110	335	Triple	5	14.24.39	2018-04-07	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Éditer	Copier	Supprimer	852	60	2.2	27	110	339	Triple	5	14.24.28	2018-04-07	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Éditer	Copier	Supprimer	851	60	2.2	26	110	342	Triple	5	14.24.16	2018-04-07	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Éditer	Copier	Supprimer	850	60	2.2	26	110	341	Triple	5	14.24.05	2018-04-07	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Éditer	Copier	Supprimer	849	60	2.2	26	110	368	Triple	5	14.23.53	2018-04-07	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Éditer	Copier	Supprimer	848	60	2.2	26	110	375	Triple	5	14.23.42	2018-04-07	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Éditer	Copier	Supprimer	847	60	2.2	26	110	371	Triple	5	14.23.30	2018-04-07	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Éditer	Copier	Supprimer	846	60	2.2	26	110	370	Triple	5	14.23.19	2018-04-07	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Éditer	Copier	Supprimer	845	60	2.2	26.2	110	330	Triple	5	14.22.06	2018-04-07	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Éditer	Copier	Supprimer	843	60	2.2	24	110	98	Triple	5	17.22.55	2018-04-05	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux
Console de requêtes SQL	Supprimer	842	60	2.2	23	110	97	Triple	5	17.22.34	2018-04-05	55	Halogen	3IT	Minor	MySmartLux	

Figure 5.5 Stockage sur base de données d'un échantillon de plusieurs tests I-V

Les données stockées en une seule fois sont bien répertoriées selon l'heure à laquelle le test a été fini. Avec 14 informations propres à chaque test réalisé, l'unicité de chacun de ces tests est garantie. Grâce à ces données, il est également possible de tracer des courbes d'évolution de différents paramètres en fonction du temps. La Figure 5.6 ci-dessous présente l'évolution en Lux du module étudiée au cours de ces derniers jours. Ces tests ont été réalisés dans les locaux du bâtiment du 3IT avec le module posé sur un bureau avec une lumière halogène comme source lumineuse principale.

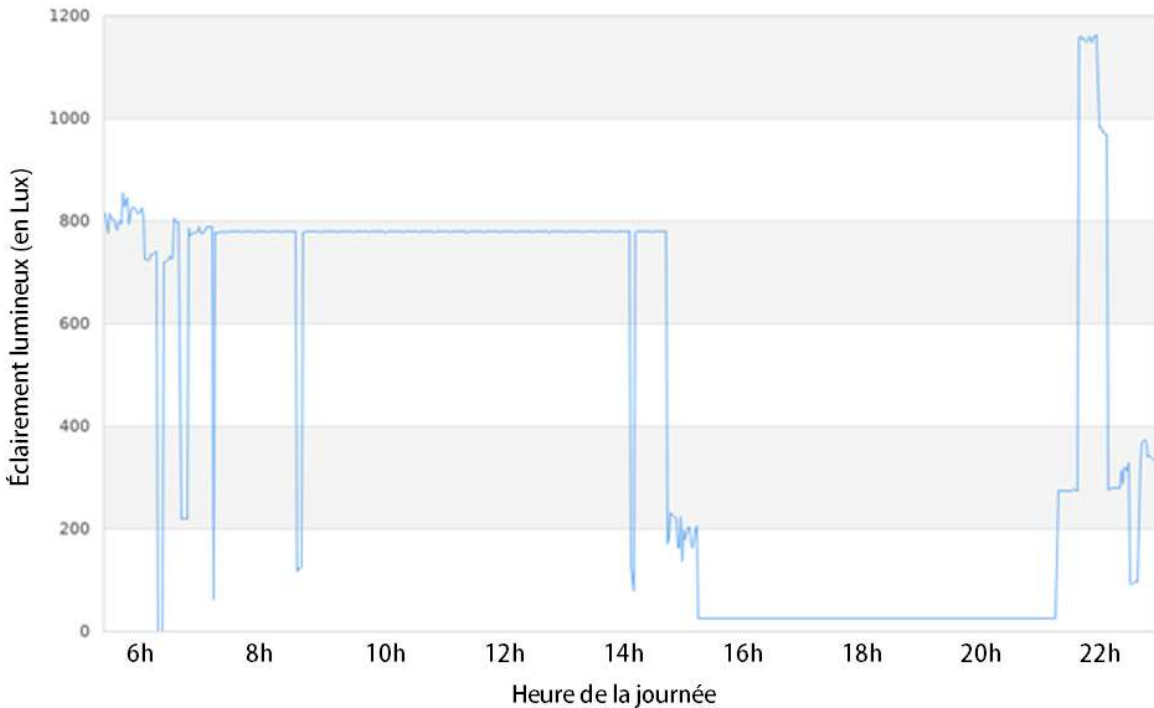


Figure 5.6 Exemple de courbe de l'évolution de la luminosité en Lux au cours d'une journée dans un bureau du 3IT disponible via l'interface Web par lecture de la base de données

5.3.4 Discussions autour des résultats et perspectives

Dans l'ensemble, les tests effectués ont montré des résultats similaires à ceux effectués en laboratoire. Cependant, plus la luminosité augmente, moins la précision est bonne. Comme expliqué dans la section 4.3.3.2, le choix des résistances de calibrage et de la plage de mesure ont nécessité de faire des concessions entre précision et la valeur maximale de la mesure du courant. Ceci s'observe particulièrement sur la Figure 5.4. Cependant, comme l'éclairage standard d'un bureau avoisine généralement les 500 Lux, l'erreur est amoindrie et permet d'avoir une précision au μV près dans la majorité des situations que le module est susceptible de rencontrer. Il est cependant possible de reprendre le même type d'architecture et de proposer des produits ayant des gammes de mesures complémentaires. Il suffit de changer les valeurs d'amplification, les valeurs de résistances, et d'avoir une meilleure résolution de lecture via le microcontrôleur. Ce projet peut ainsi aboutir à long terme à des modules permettant d'effectuer des mesures adaptées à toute situation.

Aussi, la sauvegarde de données en ligne fonctionne correctement, mais souffre de deux défauts importants. Le premier, déjà évoqué dans la section 4.5, est la nécessité d'implémenter

manuellement l'adresse IP de chaque module. Ce problème peut être écarté si une adresse IP est directement allouée à la carte Wi-Fi, mais cela ne change pas le fait que le processus ne peut être entièrement automatisé. Une intervention humaine est nécessaire afin d'effectuer la configuration réseau. Le deuxième problème est le cas de l'absence de réseau Internet. En effet, le module est automatiquement réglé pour diffuser les informations sur un réseau local pour simplifier son utilisation, mais requiert l'existence d'un tel réseau. Une mesure avec le module SmartLux peut tout à fait être réalisée dans un bâtiment où un réseau n'est pas disponible. À ce moment précis, la carte SD révèle une seconde utilité. Il est en effet possible de coder une routine permettant de réaliser la même opération en connectant la carte SD directement sur un ordinateur. Une routine d'arrière-plan peut tourner en fond de tâche et vérifier si la carte SD associée au module est insérée dans un port USB de l'ordinateur. Si tel est le cas, les données que cette carte SD contient sont directement envoyées sur un serveur. Cette routine serait codée en C++ et vérifierait sur un intervalle régulier de 1 minute si cette carte SD est insérée. Cependant, la connectivité en ligne reste plus conviviale, et cette dernière a donc été bien plus travaillée et mise en avant pour ce projet.

Les résultats des différents tests sont ainsi suffisamment précis selon les exigences du cahier des charges, et peuvent être facilement stockés sur une base de données, ou bien directement sur une carte SD pour être récupérées ultérieurement. Si le module est bien opérationnel, un certain nombre de tâches non critiques peuvent encore être implémentées. Les différents points évoqués ci-dessous ne sont que des suggestions d'améliorations, et ne sont pas primordiales pour que le module rentre dans les exigences du cahier des charges.

Une première amélioration possible concerne l'autonomie en énergie. Comme cela a déjà été abordé dans la section 4.3.4, le module est alimenté par une batterie de type LiPo. Ce type de batterie a été sélectionné, car il s'agit du modèle le plus courant pour être couplé avec un Arduino MKR ZERO. Il s'agit également du type de batterie le plus utilisé pour les appareils mobiles tels que les téléphones portables. Cependant, comme déjà montré en Figure 4.8, la décharge de cette batterie n'est pas linéaire. Dans le cas des appareils mobiles standards, des algorithmes sophistiqués tournent en trame de fond pour estimer, avec une précision propre à chaque constructeur, le pourcentage de batterie restant. Cette donnée est ainsi liée à de

nombreuses expérimentations, ainsi que des calculs de probabilité complexes. Ce produit étant complètement nouveau, un tel algorithme ne peut être élaboré aussi rapidement. Nous ne pouvons renvoyer ainsi qu'une information approximative de l'état de la batterie. Un utilisateur doit en être conscient lorsqu'il se sert du module de mesure. Typiquement, les valeurs situées entre 40 et 60 % de niveaux de charge de la batterie sont des valeurs approximatives de l'état de la charge réel. Cependant, l'autonomie de la batterie est suffisante pour une journée complète de mesure en utilisant le mode DUT Test de l'application mobile Android. Il s'agit simplement d'une option qu'il serait intéressant de coder sur le long terme, mais celui-ci n'est pas indispensable au bon fonctionnement du produit.

Il serait également intéressant de rajouter une mesure du spectre de la source lumineuse. Pour éviter des coûts trop importants ainsi qu'un encombrement de l'espace supplémentaire, son intégration n'a pas été effectuée. Pour contrer ce problème, l'utilisateur indique lui-même la source de lumière majeure utilisée pour éclairer la pièce dans laquelle se situe le module de mesure. Les spectres des différentes sources lumineuses étant pour la plupart connus, la seule connaissance du type de lumière utilisée lors d'une mesure reste pertinente. Le module SmartLux aurait à gagner en simplicité avec ce type de capteurs, mais ceci n'était pas la priorité pour le projet actuel. Une solution devait avant tout être trouvée pour que ce capteur soit de petite taille, efficace et à moindre coût.

Le procédé de référencement par adresse IP d'un module SmartLux via l'interface Web est simple à effectuer. Il faut dans un premier temps connecter le module sur Internet via une manipulation s'effectuant avec l'application Android Bluetooth. Cette manipulation-ci est assez utilisée dans le domaine de l'IoT. Une fois ceci fait, on récupère l'adresse IP affichée à l'écran, et c'est seulement avec cette adresse que l'on renseigne sur l'interface web que l'on peut finalement communiquer à distance avec le module. Dans un cadre industriel, ce problème ne se poserait pas. En effet, il est possible d'attribuer des adresses IP fixes moyennant un partenariat avec un réseau téléphonique. À ce moment-ci, un module est également référencé par rapport à sa propre adresse IP. Dans le cas présent, cette manipulation reste encore lourde et difficile à mettre en place.

En l'état actuel des choses, le module a moyenné un coût total matériel avoisinant les 210 \$. Le détail complet des dépenses effectués pour la réalisation de ce module est donné en annexe B,

Figure B.6 de l'annexe B. Ceci reste encore trop cher si l'on veut déployer un grand nombre de capteurs dans une pièce. Il existe cependant de nombreuses possibilités pour réduire ce coût. Premièrement, le module MKR ZERO reste avant tout un module de développement machine utilisateur. Si le microcontrôleur n'a plus besoin d'évoluer, ce dernier peut être remplacé par un modèle beaucoup moins coûteux, mais également plus compact. Finalement, l'Arduino n'utilise que quelques port séries, ADC, DAC et I²C. Une architecture similaire peut être reproduite avec un bon nombre de modèles de microcontrôleurs. L'architecture du PCB serait alors à revoir, mais ce travail ne devrait pas demander beaucoup de modifications ni de conceptions. On peut estimer ce nouveau prix à une valeur inférieure à 100 \$.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

L'IoT est un domaine en plein essor où la recherche et l'industrie ont un rôle important à jouer, notamment dans le développement de capteurs intelligents autonomes en énergies. En vue d'une société ayant pour but de limiter le gaspillage des matériaux électroniques, il est primordial de favoriser l'utilisation de capteurs intelligents, autonomes et sans piles. Dans ce projet, nous avons vu que la quantification de l'énergie lumineuse disponible dans un environnement donné est une donnée importante en vue de favoriser cet objectif. Nous allons dans cette dernière partie dresser un bilan sur ce qui a été réalisé.

6.1 Bilan des tâches accomplies

L'ensemble des objectifs fixés par le cahier des charges ont été remplis. Chaque point abordé dans le cahier des charges de la section 4.1 a été validé et est détaillé dans le Tableau 6.1 ci-dessous.

Le module est fonctionnel, donne des résultats avec une précision satisfaisante, et est facilement configurable via un appareil mobile Bluetooth de type smartphone. Les performances de ce module ont pu être comparées avec succès aux résultats issus de la littérature et d'un banc d'essai en laboratoire. L'autonomie de l'appareil est suffisante pour qu'il puisse travailler une journée entière selon l'intervalle de temps d'activité et de fréquence de mesure qui sont définis par l'utilisateur. Aussi, il est aisé de connecter le module à un réseau de type Wi-Fi afin de téléverser automatiquement sur une base de données les informations collectées tout au long de la journée. L'interface web mise à disposition pour l'utilisateur permet ainsi de visualiser sur plusieurs courbes les performances de chaque cellule déployée.

Même si l'ensemble des objectifs principaux ont été réalisés, quelques points peuvent être sujets à amélioration. C'est ce dont il sera question dans la section suivante.

Tableau 6.1 Bilan du cahier des charges du projet de mesure du potentiel photovoltaïque autonome

<p>Le module doit être autonome pour au moins une journée complète de mesure. Il peut être branché au secteur et doit être rechargeable</p> <p>Le module est autonome et peut fonctionner sur une journée entière de mesure avec le module DUT Test. La batterie est également rechargeable en brochant le module sur un port micro USB dédié</p>
<p>Réaliser un test I-V dans un temps raisonnable, soit moins d'une minute</p> <p>Les tests I-V sont effectués dans un laps de temps de 2 à 15 secondes</p>
<p>Pouvoir travailler avec différentes cellules photovoltaïques moyennant un support amovible</p> <p>Un support amovible a été créé pour pouvoir changer aisément de cellule photovoltaïque à tester</p>
<p>La précision de mesure doit être de l'ordre du μA</p> <p>La précision de mesure est de l'ordre du μA. Cette dernière peut cependant être remise en cause lorsque la valeur de I_{sc} dépasse $300\mu\text{A}$</p>
<p>La plage de mesure du module ne doit pas être limitante, tout en respectant l'ordre de grandeur de la précision donné précédemment</p> <p>Le système mis en place à base de transistor à canal N permet d'avoir plusieurs plages de mesures du courant émis par la cellule photovoltaïque</p>
<p>Proposer un capteur de luminosité et un capteur de température</p> <p>Deux capteurs de température et de luminosité calibrés sont installés et renvoient le résultat de leur mesure à la fin de chaque test</p>
<p>Dater dans le temps chaque mesure effectuée</p> <p>Le datage dans le temps est assuré par une RTC indépendante possédant sa propre source d'alimentation</p>
<p>Renseigner le lieu de la mesure</p> <p>Le lieu de la mesure peut être renseigné via l'application mobile. D'autres informations complémentaires peuvent être ajoutées selon les besoins</p>
<p>Connaitre l'influence de la lumière du soleil</p> <p>L'influence du soleil étant une donnée importante, mais difficile à évaluer, on laisse l'utilisateur renseigner ce paramètre via l'application mobile. Il a le choix entre les quatre options suivantes : aucune, mineure, majeure et totale</p>
<p>Donner des informations complémentaires données par l'utilisateur, telles que le type de lumière utilisée, l'ID de la cellule photovoltaïque utilisée ou bien le nom personnel du module de mesure</p> <p>Ces mêmes informations peuvent être renseignées par l'utilisateur, tout comme l'influence de la lumière du soleil</p>
<p>Faire en sorte que ces informations soient enregistrées définitivement, n'obligeant pas l'utilisateur à les renseigner à chaque fois</p> <p>Les informations sont automatiquement enregistrées sur une mémoire morte de type EEPROM. Elles sont également lues à chaque demande réalisée par l'application mobile Android pour renseigner l'utilisateur</p>
<p>Proposer une interface graphique qui permette la communication entre l'utilisateur et le module</p> <p>L'interface graphique proposée est une application mobile Android communiquant via Bluetooth, basée sur l'application mobile Bluefruit BLE de la compagnie Adafruit développée par la compagnie Nordic Semiconductors</p>
<p>Via cette même interface, pouvoir se connecter simultanément sur plusieurs modules</p> <p>Le scan Bluetooth permet de sélectionner simultanément quel module doit être configuré</p>
<p>Mettre en place des tests qui permettent à l'utilisateur de laisser le module travailler en autonomie sur une journée</p> <p>Deux types de tests sont proposés : « DUT Test » et « IV Curve ». Le premier protocole est adapté pour la prise de mesure sur une journée</p>
<p>Afficher les informations d'un test I-V, ainsi qu'une courbe</p> <p>Les informations sont renseignées via l'application mobile. Selon le test utilisé, il est possible d'afficher la courbe I-V complète</p>
<p>Permettre à l'utilisateur de renseigner au module des informations propres au type de mesure via l'interface graphique</p> <p>Il est possible de définir si l'on souhaite enregistrer les données en ligne, l'heure d'activité du module et le délai entre chacune d'elles</p>
<p>Mettre en place un système de récupération des données efficace et automatique</p> <p>La carte Wi-Fi ESP8266 permet de relier directement le module à Internet via un système de configuration accessible via l'application Android</p>
<p>Créer une interface qui permet de réunir et lire les différentes données récupérées facilement</p> <p>Une interface web affiche ce qui est stockée sur la base de données, de contrôler à distance le module et de visualiser des courbes en fonction des données</p>

6.2 Limitations et améliorations possibles

Plusieurs éléments optionnels peuvent être rajoutés dans le but d'améliorer ce module. Ces éléments seront utiles si le sujet est repris ultérieurement. Comme précisé auparavant, ce ne sont pas des éléments cruciaux liés aux cahiers des charges, mais des pistes de réflexion pour rendre le module de mesure encore plus ergonomique et pratique.

Dans un premier temps, il serait intéressant de pouvoir développer un algorithme de calcul permettant d'être bien plus précis sur l'état de la batterie. Cet algorithme doit obligatoirement être implémenté au sein du microcontrôleur, et non de l'application mobile. En effet, seul le microcontrôleur est capable de mesurer en permanence l'état de la batterie, et non l'application mobile. Cela ne nécessiterait a priori que d'effectuer un grand nombre de cycles de mesures et de répertorier l'état du voltage de la sortie de la batterie pendant plusieurs semaines. Une tendance devrait se dégager sur la courbe de décharge moyenne de la batterie, ce qui permettrait de bâtir un algorithme dédié. Il faut cependant emmagasiner un grand nombre de données pour être capable de ressortir une tendance.

Une étude sur l'intégration d'un module dédié à la spectroscopie spécialement adaptée pour le module SmartLux serait également intéressante. Le problème principal n'est pas la construction, mais la taille que cela prendrait sur le module. Il faudrait qu'une étude soit faite pour en connaître le prix, et également le comparer avec un modèle de référence.

Il faudrait également qu'une évaluation du prix final du module soit faite. Si un tel produit est commercialisé, il est nécessaire de lui donner un prix fixe, surtout après intégration d'un module de mesure spectrométrique supplémentaire. Si chaque module Arduino, Bluetooth et Wi-Fi est remplacé par une solution entièrement hardware, le coût final devrait être bien plus bas que celui qui serait proposé actuellement.

La plateforme Web développée pour ce projet n'est qu'une plateforme de tests. Plusieurs paramètres sont manquants pour rendre celui-ci encore plus complet : une interface login qui redirigerait chaque utilisateur vers un espace personnel contenant ses propres modules SmartLux, des options permettant d'afficher les courbes selon tous les paramètres possibles, un

référencement IP selon une adresse IP fixe. Cela reste les options les plus évidentes à modifier, mais il est totalement possible de revoir entièrement l'interface en la confiant à un développeur HTML. Il y a suffisamment d'éléments pour en faire un sujet d'étude complet.

Finalement, avec ce module de mesure, il est désormais possible de cartographier efficacement une pièce selon tous les éléments cités précédemment. Des protocoles de mesures peuvent être élaborés pour réaliser ce type de cartographie en combinant l'expertise d'un utilisateur recueillant les données et d'un développeur web. Ceci permettrait de connaître en peu de temps les meilleures cellules photovoltaïques à utiliser selon le lieu étudié. La connaissance du fonctionnement du module en profondeur ne serait à priori plus nécessaire et rendrait bien plus simple l'acquisition de données. On obtient ainsi une version optimale destinée à une utilisation par un utilisateur tier qui n'a à priori aucune connaissance du fonctionnement de l'appareil de mesure.

ANNEXE A SIMULATEUR DE RÉFÉRENCE

EN LABORATOIRE

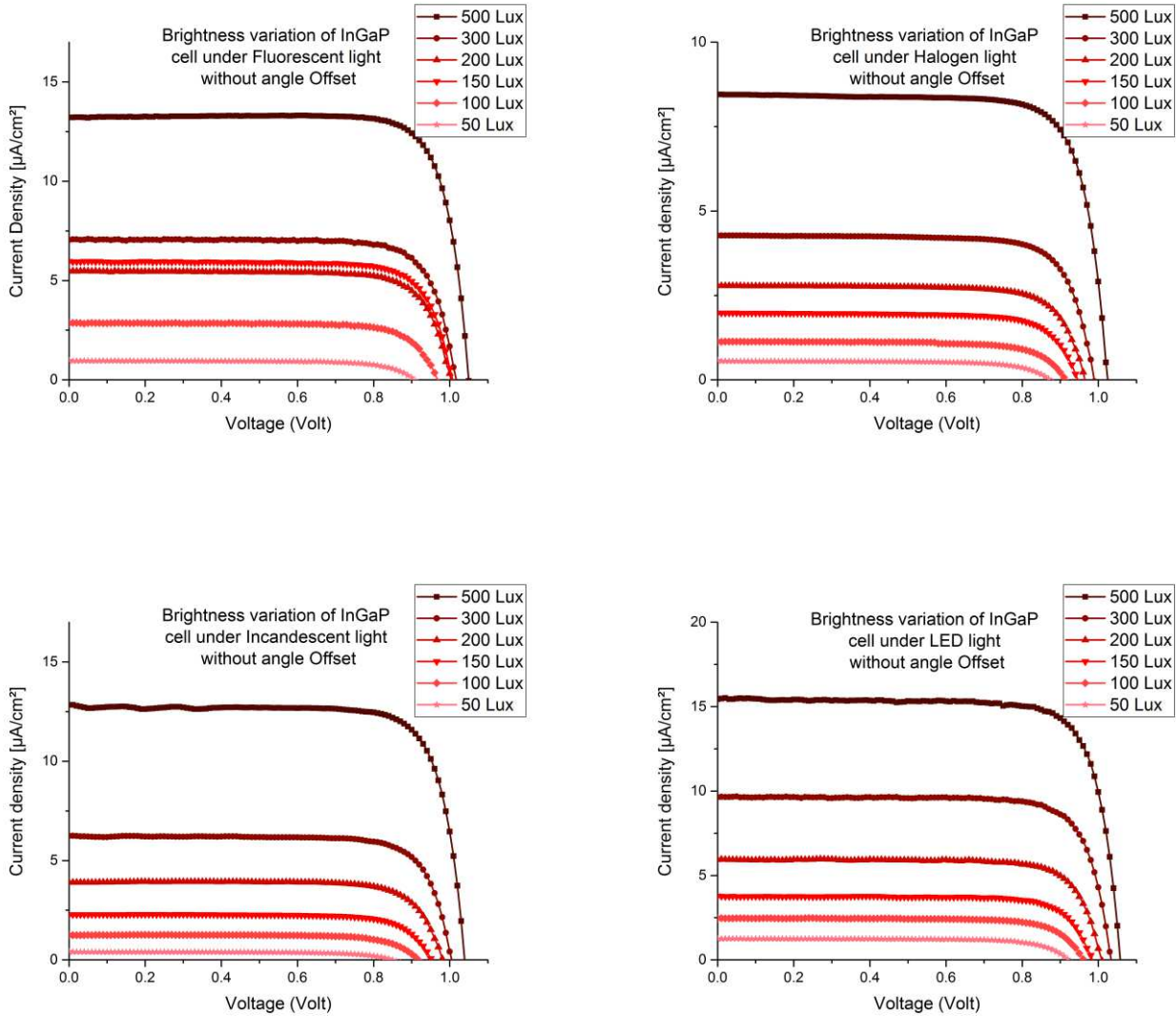


Figure A.1 Exemples de tests I-V en variation de la luminosité d'une cellule InGaP pour différents types d'éclairages

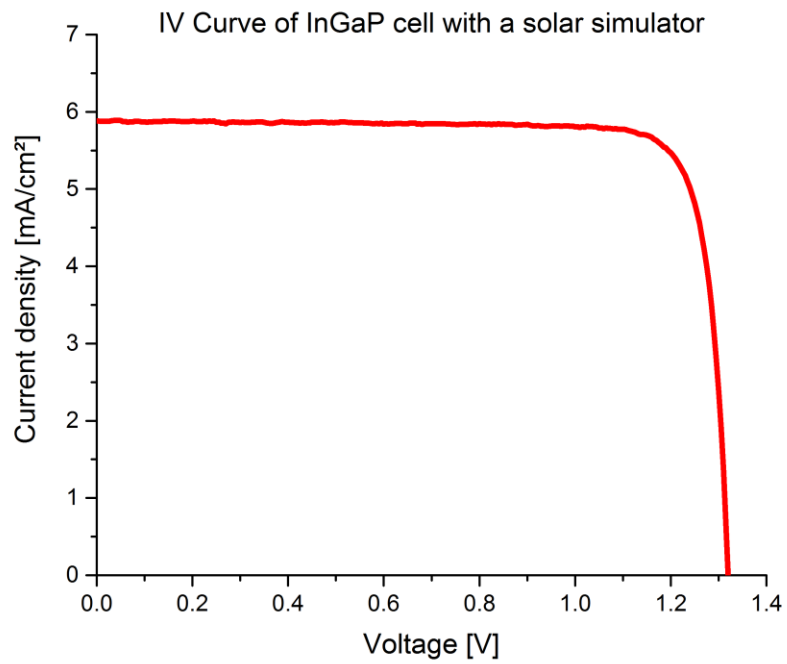


Figure A.2 Résultats obtenus sous simulateur solaire

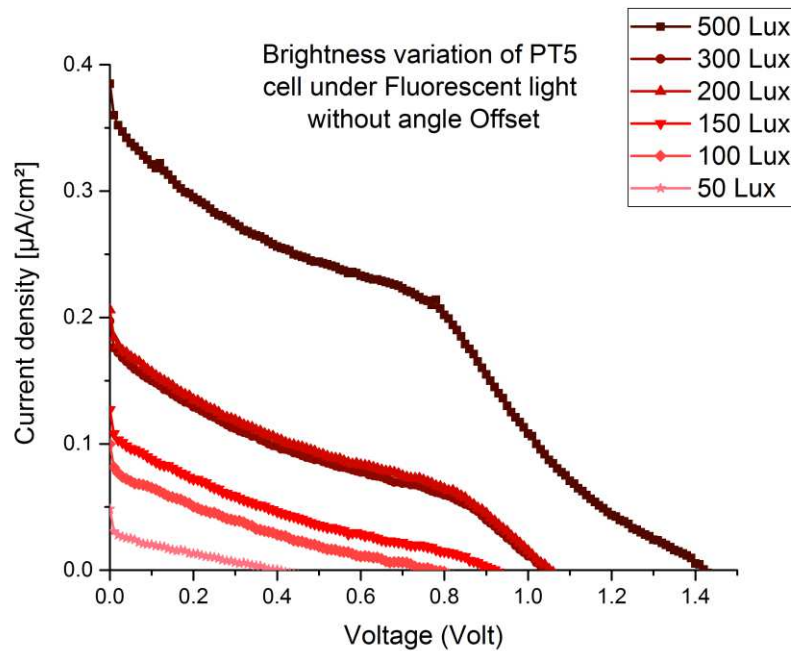


Figure A.3 Cellule PT5 testée sous lumière Fluorescente en test de variation de luminosité

ANNEXE B MODULE DE MESURE AUTONOME

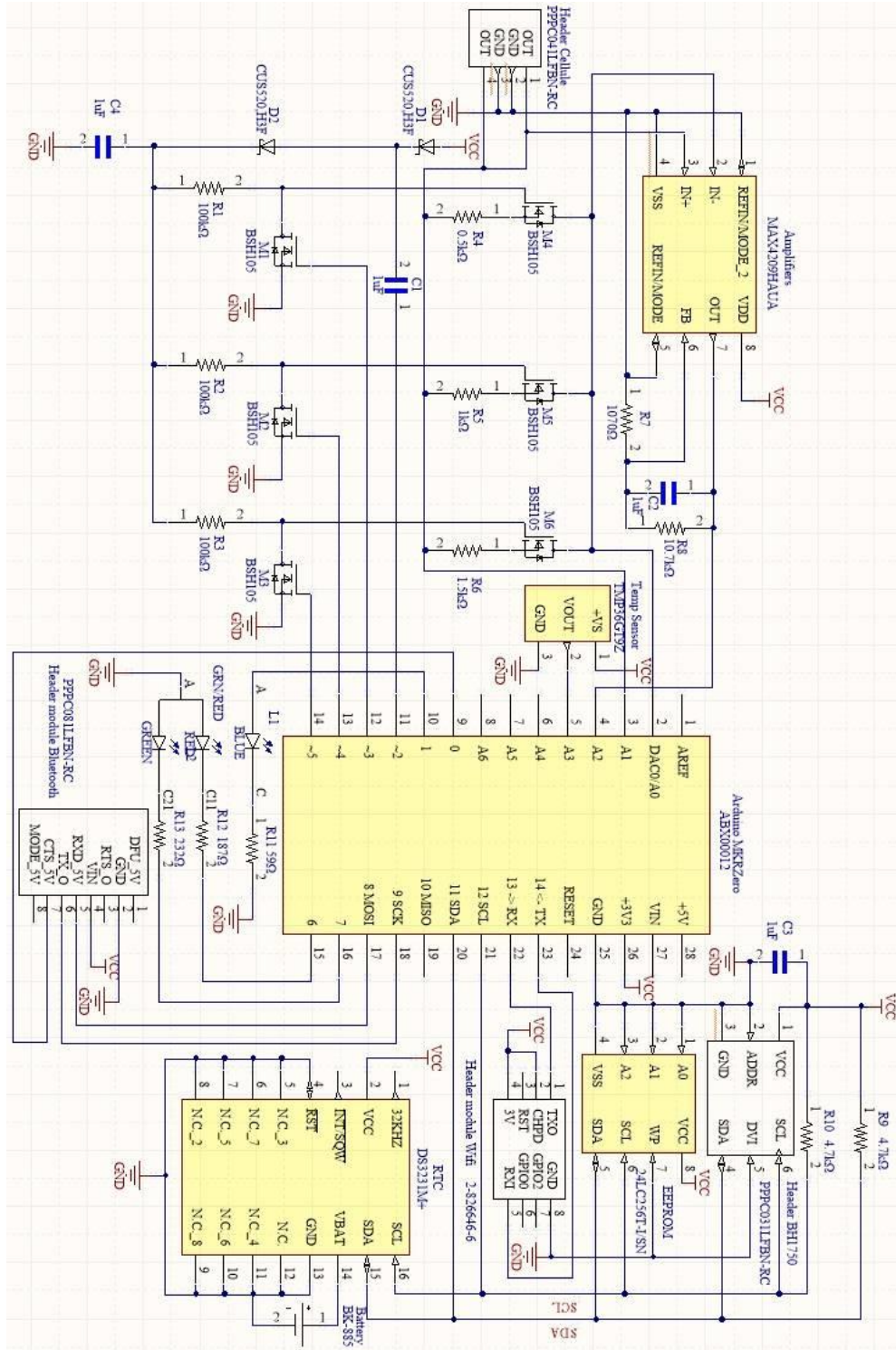


Figure B.1 Schéma EDA final du module SmartLux

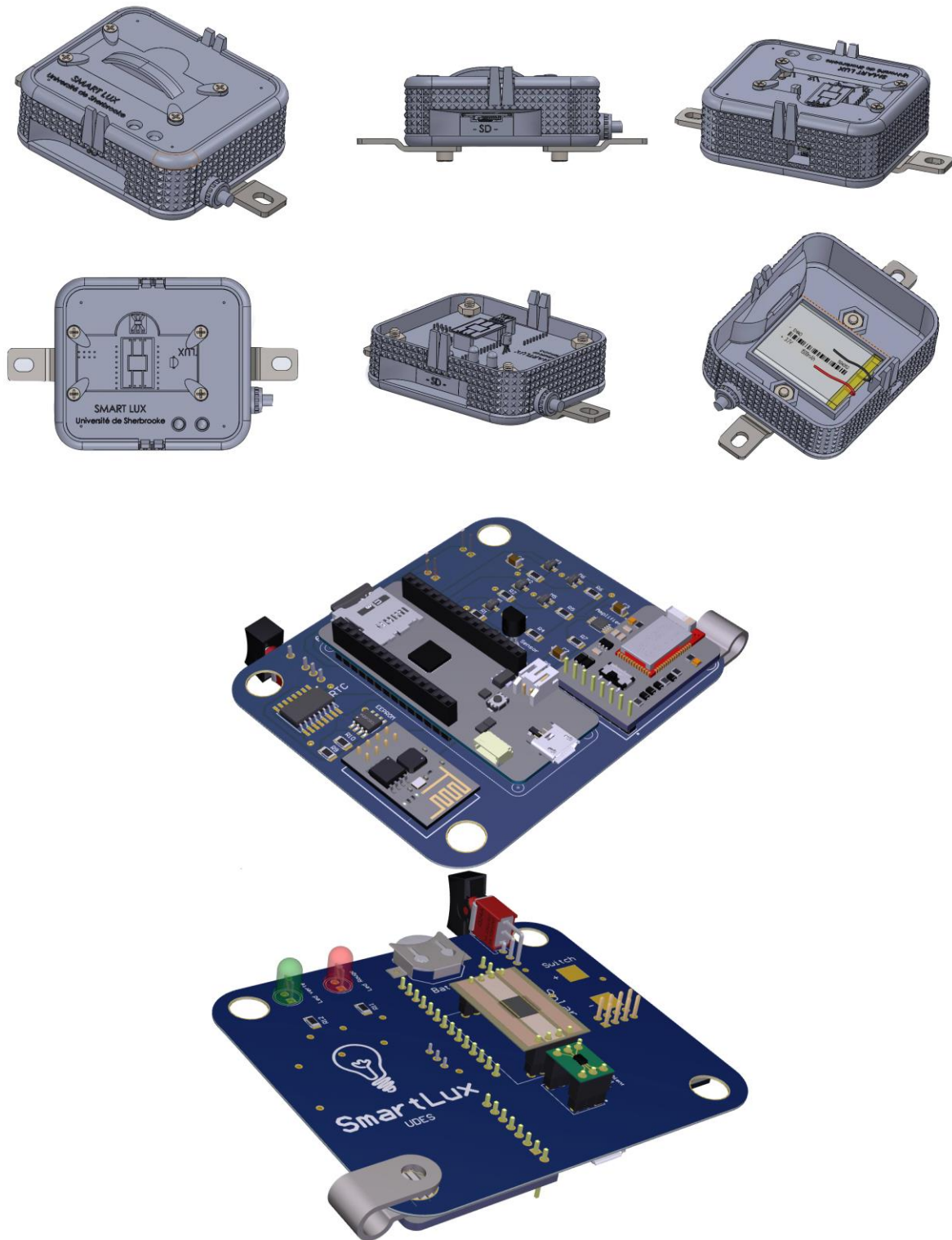


Figure B.2 Module complet assemblé (en haut) et PCB (en bas) modélisés sur SolidWorks

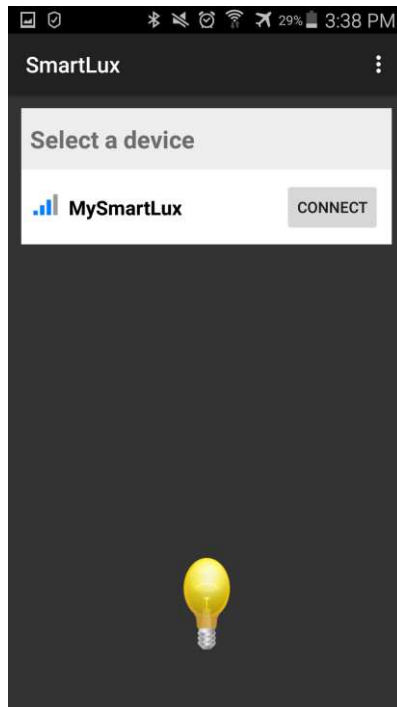


Figure B.3 Interface d'ouverture de l'application de scanning de modules Bluetooth

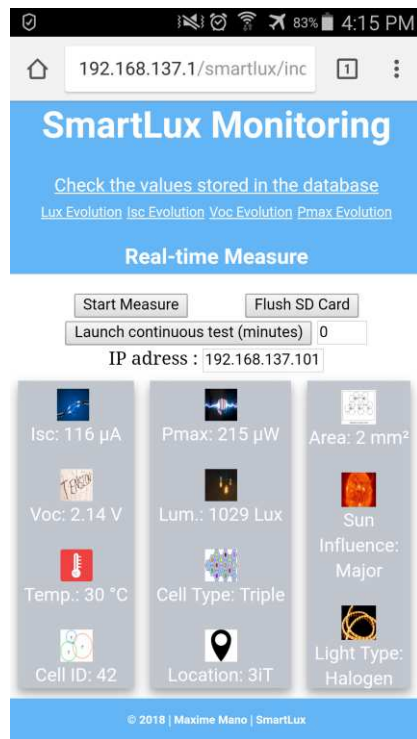


Figure B.4 Interface Web via Smartphone

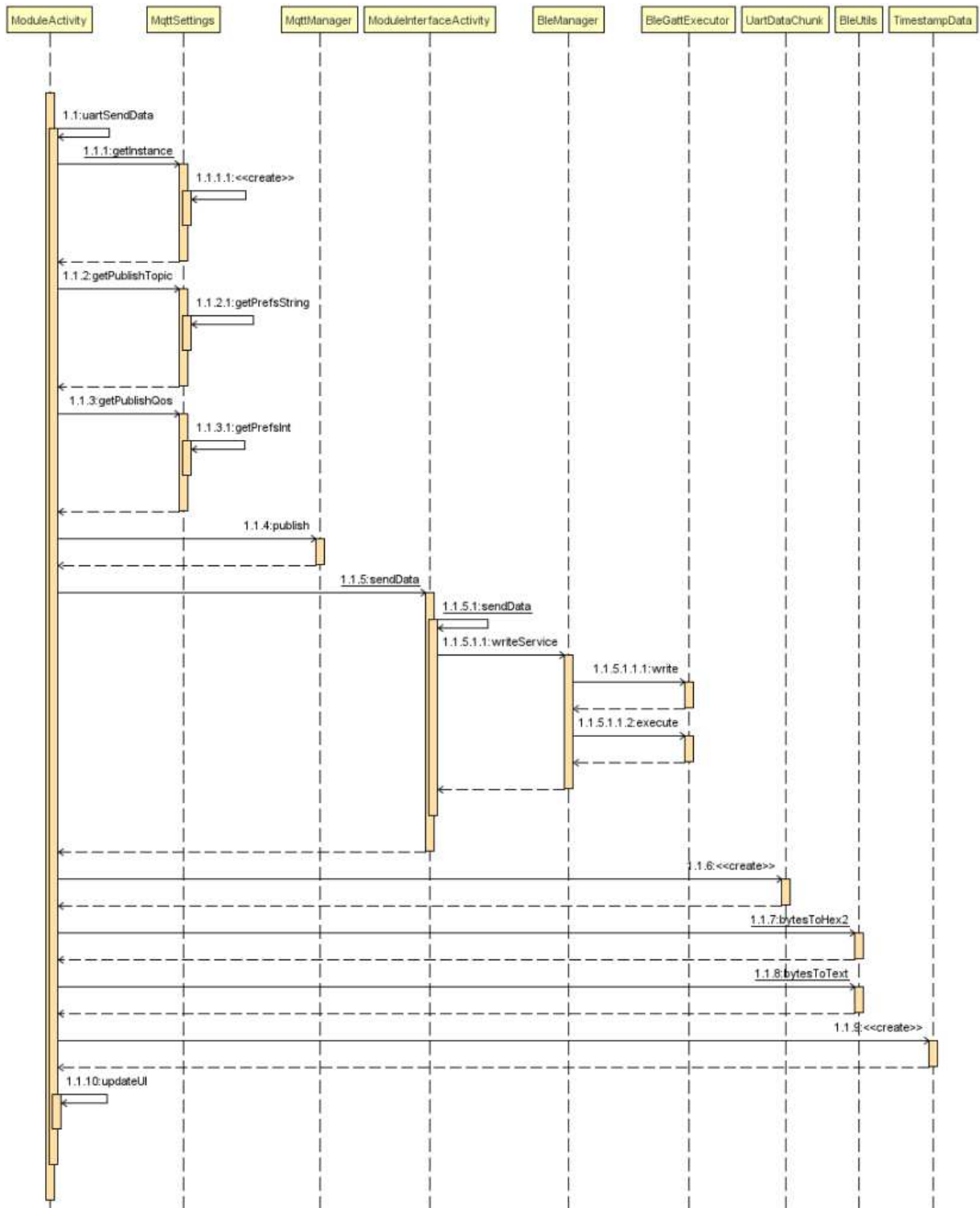


Figure B.5 Diagramme de séquence d'un test de type « DUT Test »

Liste des composants						
Catégorie	Composant	Valeur / Description	Reference	Quantité	Prix unitaire (\$)	Prix total (\$)
Solar Cell	Headers	Femelle - 4x1 - 4.50mm - 3mm	PPPC041LFBN-RC	2	0.65000	1.3
Charge Pumper	Diode Schottky	DIODE SCHOTTKY 30V 200MA	CUS520	2	0.31000	0.62
	Condensateur	1uF - 16V - 1206	885012208036	2	0.21000	0.42
Amplificateur	Résistances	1070Ω - 1% - 1/4W - 1206	AC1206FR-071K07L	1	0.15000	0.15
		10.7KΩ - 1% - 1/4W - 1206	RC1206FR-0710K7L	1	0.15000	0.15
	Condensateur	1uF - 16V - 1206	885012208036	1	0.21000	0.21
	Amplificateur	IC OPAMP INSTR 7.5KHZ	MAX4209	1	2.79000	2.79
Range Selector	Résistances	1.5kΩ - 0.05% - 1/4W - 1206	ERA-8ARW152V	1	2.61000	2.61
		1kΩ - 0.05% - 1/4W - 1206	ERA-8ARW102V	1	2.61000	2.61
		0.5kΩ - 0.05% - 1/4W - 1206	TNPU1206500RAZEN00	1	5.79000	5.79
		100kΩ - 0.1% - 1/4W - 1206	RT1206BRD07100KL	3	0.92000	2.76
	Transistor MOS	MOSFET N-CH - 20V - 1.05A	BSH105	6	0.79000	4.74
Microcontrôleur	Arduino	MKRZERO	ABX00012	1	34.18000	34.18
	Headers	Femelle - 14x1 - 2.54mm - Gold	PPPC141LFBN-RC	2	1.32000	2.64
Power Supply	Interrupteur	Switch Rocker	110-P	1	11.38000	11.38
	Batterie	3.7V - 700mAh - Rechargeable	702050	1	8.99000	8.99
	LED	LED BLUE CLEAR 5MM ROUND T/H	WP7113LVBC/D	1	0.63000	0.63
		LED GRN/RED DIFF 5MM ROUND T/H	MT6224-AHRG-A	1	0.77000	0.77
	Résistances	RES SMD 59 OHM 1% 1/4W 1206	RC1206FR-0759RL	1	0.15000	0.15
		RES SMD 232 OHM 1% 1/4W 1206	RC1206FR-07232RL	1	0.15000	0.15
		RES 187 OHM 1% 1/4W 1206	RMC1206FT187R	1	0.15000	0.15
	Connecteur	CONN HOUSING PH 2POS 2MM WHITE	PHR-2	1	0.14000	0.14
	EEPROM	256Kbit - 400KHz	24LC256T-I/SN	1	1.20000	1.2
Modules	Capteur de température	Sensor Temp Analog	TMP36GT9Z	1	2.19000	2.19
	Module Bluetooth	Bluefruit LE UART Friendly BLE	LLC 2479	1	17.50000	17.5
	Bluetooth headers mâle	Mâle - 8x1 - 2.54mm - Gold	PBC08SAAN	1	1.23000	1.23
	Bluetooth headers femelle	Female - 8x1 - 4.50mm - 3mm	PPPC081LFBN-RC	1	0.93000	0.93
	Module Wi-Fi	TXRX ESP8266	ESP8266	1	6.95000	6.95
	Wi-Fi headers mâle	Femelle - 4x2 - 3mm - 2.3mm	PPPC042LFBN-RC	1	0.96000	0.96
	Wi-Fi headers femelle	Mâle - 4x2 - 4.50mm - 3mm	PBC04DAAN	1	1.63000	1.63
	RTC (DS3231SN)	Condensateur	1uF - 16V - 1206	885012208036	1	0.2100
RTC		IC RTC CLK/CALENDAR I2C	DS3231	1	11.7900	11.79
Supports de pile		HOLDER COIN CELL 12mm	BK-885	1	0.5000	0.50
Capteur optique (SEN0097)	Resistance	4.7KΩ - 0.1 % - 1/4W - 1206	RG3216P-4701-B-T1	2	0.9200	1.84
	Capteur luminosité	IC AMBIENT LIGHT SENSOR	BH1750FVI-TR	1	6.6000	6.60
	Adaptateur	MLP/DFN-6 TO DIP-6 SMT ADAPTER	PA0049	1	4.4400	4.44
	Headers	Femelle - 3x1 - 4.50mm - 3mm	PPPC031LFBN-RC	2	0.5200	1.04
Quantité :				2	Prix total (CAD) :	284.68

Liste des composants - PCB cellule						
Module	Composant	Valeur / Description	Reference	Quantité	Prix unitaire (\$)	Prix total (\$)
PCB cellule	Headers mâle	Mâle - 4x1 - 4.50mm - 3mm	PBC04SAAN	2	0.9100	1.82
Quantité :				10	Prix total (CAD) :	18.20

Liste des composants - Accessoires						
Module	Composant	Valeur / Description	Reference	Quantité	Prix unitaire (\$)	Prix total (\$)
RTC	Batterie	3V Lithium Coin Cell Battery	CR1220	1	0.9500	0.95
Prix total (CAD) :						0.95

Figure B.6 Tableau récapitulatif du prix total de conception du prototype SmartLux

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] A. Sacco, L. Rolle, L. Scaltrito, E. Tresso, and C. F. Pirri, “Characterization of photovoltaic modules for low-power indoor application,” *Applied Energy*, vol. 102, pp. 1295–1302, 2013.
- [2] R. D. E. P. Génération, “UIT-T,” 2012.
- [3] C. Fernandez-Gago, F. Moyano, and J. Lopez, “Modelling trust dynamics in the Internet of Things,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 396, pp. 72–82, 2017.
- [4] J. Zhang, J. Hou, L. Mei, N. Song, and X. Li, “The implementation of the Internet of Things technology in Henan smart distribution network demonstration project,” *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, vol. 2016-Sept, no. Ciced, pp. 10–13, 2016.
- [5] X. Liu and E. Sanchez-Sinencio, “An 86% Efficiency 12 μ W Self-Sustaining PV Energy Harvesting System With Hysteresis Regulation and Time-Domain MPPT for IOT Smart Nodes,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 50, no. 6, pp. 1424–1437, 2015.
- [6] B. Synkiewicz, P. Guzdek, J. Piekarski, and K. Zaraska, “Designing and Testing Energy Harvesters Suitable for Renewable Power Sources,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 104, p. 012004, 2016.
- [7] F. K. Shaikh and S. Zeadally, “Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 1041–1054, 2016.
- [8] X. Liu and E. Sanchez-Sinencio, “A Highly Efficient Ultralow Photovoltaic Power Harvesting System with MPPT for Internet of Things Smart Nodes,” *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst.*, vol. 23, no. 12, pp. 3065–3075, 2015.
- [9] C. Botteron *et al.*, “A low-cost UWB sensor node powered by a piezoelectric harvester or solar cells,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 239, pp. 127–136, 2016.
- [10] Q. H. Dao *et al.*, “Novel Design Concept of an Optoelectronic Integrated RF Communication Module,” *Procedia Technol.*, vol. 26, pp. 245–251, 2016.
- [11] I. Mathews, P. J. King, F. Stafford, and R. Frizzell, “Performance of III – V Solar Cells as Indoor Light Energy Harvesters,” vol. 6, no. 1, pp. 230–235, 2016.
- [12] V. S. Hsu, J. M. Kahn, and K. S. J. Pister, “Wireless Communications for Smart Dust,” 1998.
- [13] Y. Lee *et al.*, “A Modular 1 mm³ Die-Stacked Sensing Platform With Low Power I²C Inter-Die Communication and Multi-Modal Energy Ha,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 48, no. 1, pp. 229–243, 2013.
- [14] Y. Lee, Y. Kuo, P. Pannuto, R. Dreslinski, P. Dutta, and D. Blaauw, “Architectural Challenges for mm-scale Sensor Nodes mm-Scale Sensor Nodes,” pp. 1–12, 2013.
- [15] R. Gravina, P. Alinia, H. Ghasemzadeh, and G. Fortino, “Multi-sensor fusion in body sensor networks: State-of-the-art and research challenges,” *Inf. Fusion*, vol. 35, pp. 68–80, 2016.
- [16] B. Guo, D. Zhang, and Z. Wang, “Living with Internet of Things: The Emergence of Embedded Intelligence,” 2012.

- [17] “Internet of Things (IoT): More than Smart ‘Things.’” [Online]. Available: <https://datafloq.com/read/internet-of-things-more-than-smart-things/1060>. [Accessed: 29-Mar-2017].
- [18] D. Helbing and E. Pournaras, “Society: Build digital democracy,” *Nature*, vol. 527, no. 7576, pp. 33–34, Nov. 2015.
- [19] L. Li, X. Hu, K. Chen, and K. He, “The applications of WiFi-based Wireless Sensor Network in Internet of Things and Smart Grid,” *Proc. 2011 6th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2011*, pp. 789–793, 2011.
- [20] Bonnie Gardiner, “The hidden environmental cost of the Internet of Things,” *ComputerWorld*, 2014. [Online]. Available: <http://www.computerworld.com.au/article/561064/hidden-environmental-cost-internet-things/>. [Accessed: 26-Mar-2017].
- [21] A. J. Marszal *et al.*, “Zero Energy Building“ A review of definitions and calculation methodologies,” *Energy Build.*, vol. 43, pp. 971–979, 2011.
- [22] J. Russo, W. R. Ii, and M. S. Litz, “Low light illumination study on commercially available homojunction photovoltaic cells,” 2017.
- [23] C. Carvalho and N. Paulino, “On the Feasibility of Indoor Light Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks,” *Procedia Technol.*, vol. 17, pp. 343–350, 2014.
- [24] M. F. Müller, M. Freunek, and L. M. Reindl, “Maximum efficiencies of indoor photovoltaic devices,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 3, no. 1, pp. 59–64, 2013.
- [25] B. Minnaert and P. Veelaert, “A proposal for typical artificial light sources for the characterization of indoor photovoltaic applications,” *Energies*, vol. 7, no. 3, pp. 1500–1516, 2014.
- [26] S. Chalasani and J. M. Conrad, “A survey of energy harvesting sources for embedded systems,” *Conf. Proc. - IEEE SOUTHEASTCON*, pp. 442–447, 2008.
- [27] *CIE, 2-deg color matching functions*. 1931.
- [28] “CIE, Commission internationale de l’Eclairage proceedings,” *Cambridge Univ. Press. Cambridge*, 1926.
- [29] “CIE, Scotopic luminosity curve,” 1951.
- [30] “Extraordinary measures: the role of the lux meter - EE Publishers.” [Online]. Available: <http://www.ee.co.za/article/extraordinary-measures-role-lux-meter.html>. [Accessed: 08-May-2018].
- [31] Zumtobel, “The Lighting Handbook,” p. 294, 2013.
- [32] A. S. Teran *et al.*, “AlGaAs Photovoltaics for Indoor Energy Harvesting in mm-Scale Wireless Sensor Nodes,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 62, no. 7, pp. 2170–2175, 2015.
- [33] F. De Rossi, T. Pontecorvo, and T. M. Brown, “Characterization of photovoltaic devices for indoor light harvesting and customization of flexible dye solar cells to deliver superior efficiency under artificial lighting,” *Appl. Energy*, vol. 156, pp. 413–422, 2015.
- [34] G. Apostolou, A. Reinders, and M. Verwaal, “Comparison of the indoor performance of

- 12 commercial PV products by a simple model,” *Energy Sci. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 69–85, 2016.
- [35] M. Masoudinejad, J. Emmerich, D. Kossmann, A. Riesner, M. Roidl, and M. Ten Hompel, “A measurement platform for photovoltaic performance analysis in environments with ultra-low energy harvesting potential,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 25, pp. 74–81, 2016.
- [36] “Characterization of photovoltaic devices for indoor light harvesting - 2015.pdf.” .
- [37] A. N. A. Ali, M. H. Saied, M. Z. Mostafa, and T. M. Abdel- Moneim, “A survey of maximum mppt techniques of pv systems,” *2012 IEEE Energytech*, pp. 1–17, 2012.
- [38] X. Liu, L. Huang, K. Ravichandran, and E. Sanchez-Sinencio, “A Highly Efficient Reconfigurable Charge Pump Energy Harvester with Wide Harvesting Range and Two-Dimensional MPPT for Internet of Things,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 51, no. 5, pp. 1302–1312, 2016.
- [39] G. Men, P. C. Chao, Y. Cheng, C. Yang, and E. F. Pribadi, “ISPS2016-9583 A CHARGE PUMP WITH MPPT CIRCUIT EMPLOYED IN BATTERYLESS,” pp. 2016–2018, 2017.
- [40] P. H. Chen, C. S. Wu, and K. C. Lin, “A 50 nW-to-10 mW Output Power Tri-Mode Digital Buck Converter With Self-Tracking Zero Current Detection for Photovoltaic Energy Harvesting,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 51, no. 2, pp. 523–532, 2016.
- [41] G. Yu, K. W. R. Chew, Z. C. Sun, H. Tang, and L. Siek, “A 400 nW Single-Inductor Dual-Input-Tri-Output DC-DC Buck-Boost Converter With Maximum Power Point Tracking for Indoor Photovoltaic Energy Harvesting,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 50, no. 11, pp. 2758–2772, 2015.
- [42] R. Hemalatha, R. Ramaprabha, and S. Radha, “A comprehensive analysis on sizing of solar energy harvester elements for wireless sensor motes,” *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.*, vol. 8, no. 1, pp. 291–315, 2015.
- [43] B. P. Lechène, M. Cowell, A. Pierre, J. W. Evans, P. K. Wright, and A. C. Arias, “Organic solar cells and fully printed super-capacitors optimized for indoor light energy harvesting,” *Nano Energy*, 2016.
- [44] A. Eltaliawy, H. Mostafa, and Y. Ismail, “Micro-scale variation-tolerant exponential tracking energy harvesting system for wireless sensor networks,” *Microelectronics J.*, vol. 46, no. 3, pp. 221–230, 2015.
- [45] H. Rajendran, R. Ramabadran, and R. Sankararajan, “Design and implementation of PV based energy Harvester for WSN Node with MAIC algorithm,” *Adv. Electr. Comput. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 109–116, 2015.
- [46] D. Brunelli, C. Moser, L. Thiele, and L. Benini, “Design of a Solar Harvesting Circuit for Battery-less Embedded Systems,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 56, no. 11, pp. 2519–2528, 2009.
- [47] M. Magno *et al.*, “InfiniTime: Multi-sensor wearable bracelet with human body harvesting,” *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, 2016.

- [48] C. Carrascal, I. Demirkol, and J. Paradells, “On-Demand Sensor Node Wake-Up Using Solar Panels and Visible Light Communication,” *Sensors*, vol. 16, no. 3, p. 418, 2016.
- [49] “Understand the Activity Lifecycle | Android Developers.” [Online]. Available: <https://developer.android.com/guide/components/activities/activity-lifecycle>. [Accessed: 04-May-2018].