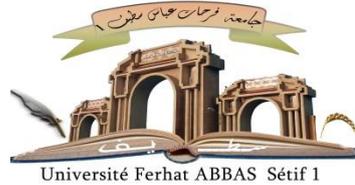


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

THÈSE

Présentée au Département d'Électrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Domaine : Sciences et Technologie

Filière: Automatique

Option: Automatique

Par

BOULEMZAOU D Lokmane

THÈME

Intégration de nouvelles technologies en vue de la surveillance d'un système photovoltaïque

Soutenue le/...../..... devant le Jury:

NOURI Hamou	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Président
KHEMLICHE Mabrouk	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de thèse
BOUDEN Toufik	Professeur	Uni. Mohamed Seddik Benyahia Jijel	Examineur
ZEGHLACHE Samir	Professeur	Univ. Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur
MOKEDDEM Diab	Professeur	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Examineur
LATRECHE Samia	M.C.A	Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Invitée

** Remerciements **

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné l'envie, la force et la patience d'accomplir ce travail.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi à mon directeur de thèse le Professeur KHEMLICHE Mabrouk, qui me font le grand honneur d'accepter mon travail et qui a su m'apporter tout au long de ce travail un soutien constant, une disponibilité permanente, une écoute, une confiance et des conseils précieux et avisés à la hauteur de ses compétences et de ses réelles qualités humaines.

Mes vifs remerciements très sincères à l'ensemble des membres du jury qui me font le grand honneur d'accepté examiner ce travail à savoir Professeur NOURI Hamou comme Président de jury, Professeur BOUDEN Toufik, Professeur ZEGHLACHE Samir et Professeur MOKEDDEM Diab comme examinateurs.

Ces remerciements s'adressent également au Docteur LATRECHE Samia, Maître de Conférence Classe A à l'université de Setif, qui a également encadré ce travail de recherche, son écoute, ses connaissances, ses critiques et ses conseils constructifs m'ont guidé tout au long de cette thèse.

Merci ma très chère mère, puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

Merci mon très cher Père, qui grâce à ses sacrifices, je suis devenu ce que je suis aujourd'hui.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont accordé du temps et m'ont témoigné un soutien constant dans ce travail et surtout mon frère Taleb.

Merci à tous.

Table des matières

Table des figures	viii
Liste des tableaux	ix
Nomenclature	x
Introduction générale	1
1 Notions préliminaires sur les systèmes photovoltaïques	4
1.1 Introduction	4
1.2 Statistiques sur l'énergie photovoltaïque	6
1.3 L'effet photovoltaïque	7
1.4 Composition de panneau solaire	9
1.5 Installations Photovoltaïques	10
1.6 Modélisation de la cellule PV	11
1.7 Facteurs affectant les performances des installations PV	15
1.7.1 Facteurs liés au système	15
1.7.1.1 Température des cellules	15

TABLE DES MATIÈRES

1.7.1.2	Charge électrique	15
1.7.1.3	Positionnement des panneaux	17
1.7.2	Facteurs liés à l'environnement	19
1.8	État de l'art sur la surveillance des systèmes PV	20
1.8.1	Systèmes de surveillance filaires classiques	21
1.8.2	Systèmes de surveillance sans fil	26
1.8.2.1	WiFi	26
1.8.2.2	Bluetooth	27
1.8.2.3	Réseau GSM	29
1.8.2.4	ZigBee	30
1.8.2.5	Autres	33
1.9	Conclusion	33
2	Réseaux de capteurs sans fil et réseaux étendus de faible puissance	35
2.1	Introduction	35
2.2	Réseaux de capteurs sans fil (WSN)	37
2.2.1	Composition d'un WSN	39
2.2.1.1	Nœud de capteur sans fil	40
2.2.1.2	Station de base	42
2.2.2	Topologies utilisées dans les WSN	43
2.2.2.1	Réseau en étoile (point unique à multipoint)	44

2.2.2.2	Réseau maillé	45
2.2.2.3	Réseau maillé hybride en étoile	47
2.3	Réseaux étendus à faible puissance (LPWANs)	48
2.3.1	Techniques de communication utilisées dans les LPWANs	49
2.3.1.1	Technique de bande ultra étroite (UNB)	49
2.3.1.2	Technique de spectre étalé (SS)	51
2.3.2	Technologies LPWAN	52
2.3.2.1	SigFox	53
2.3.2.2	NB-IoT	53
2.3.2.3	LoRa	54
2.3.3	Comparaison des technologies LPWANs	54
2.4	LoRa et surveillance des installations PV	57
2.5	Conclusion	59
3	Conception d'un système d'acquisition pour les installations PV à la base de la technologie LoRa	61
3.1	Introduction	61
3.2	Architecture des capteurs	62
3.3	Principe de Fonctionnement	63
3.4	Conception du matériel	65
3.4.1	Capteur de tension/courant	70
3.4.2	Capteur de radiation solaire	74

3.4.3	Capteur de position du panneau solaire	76
3.4.4	Capteur de température ambiante et d'humidité	79
3.5	Conclusion	82
4	Implémentation du système de surveillance	83
4.1	Introduction	83
4.2	Configuration des modules LoRa	84
4.3	Capteur de tension/courant	85
4.4	Capteur de radiation/position	86
4.5	Capteur de température/humidité	88
4.6	Dispositif de surveillance mobile	89
4.7	Mise en service du système	91
4.8	Conclusion	97
	Conclusion générale et perspectives	99
	Annexe	114
	A Schémas de conception des capteurs	114
	B Brochage des cartes MCU utilisées	119

Table des figures

1.1	Jonction P-N.	7
1.2	Représentation de l'effet photovoltaïque	8
1.3	Cellule polycristalline (a) et Cellule monocristalline (b).	8
1.4	Composition du panneau solaire photovoltaïque.	9
1.5	Composants basiques d'un système solaire.	10
1.6	Schéma d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau	11
1.7	Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque.	12
1.8	Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque (Modèle à une diode).	12
1.9	Courbe caractéristique courant-tension de la cellule PV	14
1.10	Comparaison entre système rigide et système de suivi de soleil.	18
1.11	Différents suiveurs solaires utilisés à la fois dans le PV	18
2.1	Applications des réseaux de capteurs sans fil (WSN).	38
2.2	Aspects à considérer dans la conception d'un réseau WSN.	39
2.3	Schéma fonctionnel d'un nœud de capteur sans fil.	40

TABLE DES FIGURES

2.4	Schéma fonctionnel d'une station de base WSN.	42
2.5	Topologie réseau en étoile typique pour WSN.	45
2.6	Topologie maillé en étoile typique pour WSN.	46
2.7	Topologie d'un réseau maillé hybride en étoile pour WSN.	47
2.8	Technologies sans fil en terme de portée et de bande passante.	48
2.9	Signaux à bande ultra étroite (UNB).	50
2.10	Impact des interférences sur les signaux UNB.	50
2.11	Signaux à spectre étalé SS.	51
2.12	Impact des interférences sur les signaux SS.	52
2.13	Avantages respectifs de Sigfox, LoRa et NB-IoT.	55
2.14	Schéma général des capteurs et connexions Arduino présenté par Paredes et al 2019	57
2.15	Schéma du système proposé par Melo et al 2021	58
2.16	Schéma général des capteurs et connexions Arduino présenté par Kim, Min-Soo, et al. 2022	59
3.1	Architecture d'émetteur basée sur LoRa.	63
3.2	Organigramme de fonctionnement du capteur.	64
3.3	Module émetteur-récepteur sans fil LoRa E32-433T20D.	67
3.4	Schéma générique du capteur LoRa.	69
3.5	Circuit de diviseur de tension pour la mesure de tension.	70
3.6	Schéma de détection de tension.	71

TABLE DES FIGURES

3.7	Circuit de détection de courant de l'INA219.	72
3.8	Conception du circuit imprimé du capteur LoRa de tension et de courant.	73
3.9	Circuit imprimé du capteur de Tension/Courant LoRa.	73
3.10	Capteur de lumière ambiante BH1750FVI.	74
3.11	Conception du circuit imprimé du capteur LoRa de radiation solaire.	75
3.12	Circuit imprimé du capteur de radiation solaire LoRa.	75
3.13	Unités de mesure inertielle 9 axes GY-80	77
3.14	Conception du circuit imprimé du capteur LoRa de la position du panneau.	78
3.15	Circuit imprimé du capteur de position du panneau LoRa.	79
3.16	Capteur de température et d'humidité AM2301 (DHT21).	80
3.17	Conception du circuit imprimé du capteur de température et d'humidité.	81
3.18	Circuit imprimé du capteur de de température et d'humidité LoRa.	81
4.1	Implémentation du capteur LoRa de Tension/Courant.	86
4.2	Implémentation du capteur LoRa de radiation/position du panneau.	87
4.3	Implémentation du capteur de température/humidité LoRa.	88
4.4	Topologie de communication du système de surveillance	89
4.5	Algorithme de fonctionnement du dispositif de surveillance.	90
4.6	Implémentation du système de surveillance LoRa.	91
4.7	La portée du système de surveillance.	91
4.8	Affichage du système de surveillance mobile LoRa.	93

TABLE DES FIGURES

4.9	Interface logicielle série AccessPort.	93
4.10	Courbe de tension et de courant du test.	94
4.11	Courbe de puissance du test.	94
4.12	Mesures de radiation solaire obtenues à partir du test.	95
4.13	Données obtenues de température et d'humidité du test.	95
4.14	Données de mesure d'azimut provenant du test.	96
4.15	Données de mesure d'elevation provenant du test.	96
4.16	Déviatiion absolue des mesures d'azimut et d'élévation.	97
A.1	Schéma de conception du capteur LoRa sans fil de tension/courant. . . .	115
A.2	Schéma de conception du capteur LoRa sans fil de radiation solaire. . . .	116
A.3	Schéma de conception du capteur LoRa sans fil de position du panneau solaire.	117
A.4	Schéma de conception du capteur LoRa sans fil de température ambiante et d'humidité.	118
B.1	Diagramme de de l'Arduino Nano	119
B.2	Diagramme de brochage de l'Arduino Uno	120
B.3	Diagramme de brochage de carte MCU STM32F103	121

Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques électriques d'un panneau solaire	14
2.1	Comparaison des LPWANs	55
3.1	Structure du paquet de requête de données	65
3.2	Structure du paquet de données de mesure	65
3.3	Spécifications du MCU STM32l031x6	66
3.4	Spécifications du module LoRa e32-433t20d	68
4.1	Liste de configuration des périphériques LoRa	84
4.2	Caractéristiques électriques du panneau solaire utilisé dans le test.	92

Nomenclature

α	Cap de la boussole
δ	Angle de déclinaison magnétique du magnétomètre
θ	Angle d'élévation du panneau solaire
a	Facteur d'idéalité de la diode
ADC_{res}	Résolution du CAN
E_v	l'éclairement lumineux (lux)
G	Radiation solaire
G_n	Radiation solaire nominale
I_0	Courant de saturation inverse de la diode
I_d	Courant traversant la diode de la cellule PV
I_{MPP}	Courant au point de puissance maximale
I_{ph}	Photo-courant générée de la cellule PV
I_{sc}	Courant de court-circuit
I_{sh}	Courant traversant la résistance shunt de la cellule PV
K_i	Coefficient de température de court-circuit
K_v	Coefficient de température en circuit ouvert
P_{max}	Puissance maximale de la cellule PV
R_1	Résistance du diviseur de tension
R_2	Résistance du diviseur de tension

NOMENCLATURE

R_s	Résistance série
R_{sh}	Résistance shunt
RH	Humidité relative
T	Température de la cellule
T_A	Température ambiante
V_t	Tension thermique de la cellule PV
V_{in}	Tension d'entrée de CAN
V_{MPP}	Tension au point de puissance maximale
V_{oc}	Tension en circuit ouvert
V_{ref}	Tension de référence du CAN
X_a	Axe X de l'accéléromètre
X_m	Axe X du magnétomètre
Y_a	Axe Y de l'accéléromètre
Y_m	Axe Y du magnétomètre
Z_a	Axe Z de l'accéléromètre

Acronymes

3GPP 3rd Generation Partnership Project. [53](#), [55](#)

AIE Agence Internationale de l’Energie. [6](#)

BPSK Binary Phase-shift keying. [53](#), [55](#)

CDER Centre de Développement des Energies Renouvelables. [6](#), [24](#)

CSS Chirp Spread Spectrum. [1](#), [52](#), [54](#), [55](#), [62](#)

DAQ Data Acquisition. [23](#)

DOF Degree Of Freedom. [76](#)

DSSS Direct-Sequence Spread Spectrum. [52](#)

FHSS Frequency-Hopping Spread Spectrum. [52](#)

I²C Inter Integrated Circuits. [72](#), [74](#), [77](#), [80](#), [87](#)

IoT Internet of Things. [27](#), [50](#), [53](#), [60](#), [61](#)

ISM Industrial, Scientific and Medical band. [27](#), [53](#), [55](#)

LoRa Long Range. [3](#), [60](#)

LPWAN Low Power Wide Area Network. [2](#), [3](#), [36](#), [37](#), [48–50](#), [53–55](#), [57](#), [60](#)

M2M Machine To Machine. [50](#), [53](#)

MEMS micro-ElectroMechanical System. [76](#)

ML Machine Learning. [100](#), [101](#)

MPP Maximum Power Point. [13](#), [17](#)

- MPPT** Maximum Power Point Tracker. [16](#)
- NB-IoT** NarrowBand Internet of Things. [52](#)
- PAN** Personal Area Network. [27](#)
- PV** Photovoltaïque. [3](#), [6](#), [37](#), [60](#)
- QoS** Quality of Service. [54](#), [56](#)
- SS** Spread Spectrum. [vi](#), [49](#), [51](#), [52](#), [56](#)
- TCAC** Taux de Croissance Annuel Composé. [6](#)
- UART** Universal Asynchronous Receiver Transmitter. [67](#)
- UMI** Unités de Mesure Inertielle. [76](#)
- UNB** Ultra Narrow Band. [49](#), [51](#), [53](#), [56](#)
- WPAN** Wireless Personal Area Network. [37](#)
- WSN** Wireless Sensor Network. [1–3](#), [31](#), [35](#), [37](#), [39](#), [59](#), [60](#)

Introduction générale

Les systèmes solaires photovoltaïques (PV) promettent un grand avenir et sont de plus en plus populaires en raison de leur simplicité d'installation, de leur faible coût de maintenance, de leur robustesse et de leur coût de carburant nul. La surveillance des systèmes de production d'énergie est indispensable et elle est devenue l'une des exigences dans les systèmes de production PV. Elle fait l'objet de notre travail de recherche qui est lié à l'intégration de nouvelles technologies en vue de la surveillance des systèmes PV. La surveillance est le processus d'observation et d'enregistrement de l'évolution des paramètres de l'installation solaire photovoltaïque en temps réel. Un système de surveillance PV vise à mesurer les principaux paramètres et caractéristiques des installations PV et ainsi les facteurs environnementaux tels que la température ambiante, l'humidité relative et la radiation solaire qui affectent fortement les performances des modules PV.

Dans ce stade, la conception et l'implémentation d'un système de surveillance sans fil pour les installations PV sont présentées. La conception de ce système est basée sur la technologie sans fil longue portée LoRa et les microcontrôleurs STM32L031C6 à ultra faible consommation d'énergie. LoRa est une technique de modulation à spectre étalé, dérivée de la technologie [Chirp Spread Spectrum \(CSS\)](#). Elle offre une plate-forme sans fil longue portée à faible consommation d'énergie, adaptée aux applications professionnelles des réseaux de capteurs sans fil connus sous le nom de [Wireless Sensor Network \(WSN\)](#). L'intégration de cette technologie dans les installations PV fournit un système étendu, peu coûteux, économique en énergie et facile à entretenir.

Le système proposé est composé d'un ensemble de capteurs sans fil autonomes connectés avec un ou plusieurs systèmes de surveillance. Il s'agit d'un capteur de ten-

sion/courant, d'un capteur de radiation solaire basée sur un capteur de luminosité, d'un capteur de position de panneau basé sur un accéléromètre et un magnétomètre pour les installations équipées par suiveur solaire, d'un capteur de température et d'humidité et d'un système de surveillance mobile équipé par un afficheur. Tant que LoRa est une implémentation physique, le protocole de communication des couches supérieures est également conçu. La gestion du réseau est effectuée par le dispositif de surveillance mobile. L'implémentation du système proposé est basée sur des microcontrôleurs STM32F103 qui ont quasiment la même architecture et le même brochage que le STM32L031 en collaboration avec des cartes Arduino en raison de difficulté d'acquisition des microcontrôleurs STM32L031. L'acquisition de données est effectuée sur un ordinateur équipé d'un module LoRa. Les résultats présentés après avoir fait fonctionner le système, sont le fruit de plus de 30750 échantillons de données. Cette thèse est composée de quatre chapitres répartis comme suit :

- Le premier chapitre présente les notions préliminaires sur les systèmes photovoltaïques et aussi une représentation des systèmes de surveillance des installations PV cités dans la littérature. Il commence par l'introduction des statistiques qui montrent l'état actuel du photovoltaïque dans le domaine de l'énergie et son importance dans le présent et dans l'avenir. Puis, une présentation des principes de base de l'effet photovoltaïque et la composition d'un panneau solaire, les différents types d'installation PV seront discutés brièvement. La modélisation de la cellule PV sera effectuée afin d'expliquer les différents paramètres d'un système PV. Ensuite, les facteurs affectant les performances des installations PV seront détaillés dans le but d'extraire les paramètres nécessaires au système de surveillance. Finalement, les travaux cités dans la littérature sur le domaine de la surveillance des systèmes PV à l'aide de différentes technologies seront mentionnés.
- Le deuxième chapitre sert à la description des différentes technologies sans fil tels que les réseaux de capteurs sans fil ([WSN](#)) et leur intégration avec les réseaux longue-portée à faible puissance ([LPWAN](#)). Il commence par l'introduction des réseaux [WSN](#) tout en citant leurs avantages par rapport aux technologies conventionnelles et décrivant leur structure, ces différents com-

posants et ces topologies de communication. Ensuite, les réseaux étendus de faible puissance seront présentés mettant en évidence leur supériorité par rapport aux réseaux sans fil classiques en termes d'utilisation dans les réseaux [WSN](#). Puis, les principales techniques de communication utilisées dans les [LPWAN](#) seront décrites soulignant les avantages et les inconvénients de chaque technique. Après, les technologies [LPWAN](#) les plus répandues et les plus populaires seront comparées sous plusieurs aspects. La comparaison détaillée entre ces derniers mettant en évidence l'avantage de la technologie LoRa par rapport aux autres technologies, en particulier dans la supervision des installations PV. Finalement, des travaux de la littérature dans le cadre de la surveillance des systèmes [PV](#) utilisant la technologie [LoRa](#) seront mentionnés.

- Le troisième chapitre discute la conception d'un système de surveillance à la base de la technologies LoRa. Il commence par une introduction de l'architecture générale des capteurs à base du microcontrôleur et émetteur-récepteur LoRa. Après, le principe de fonctionnement des capteurs sera présenté en décrivant l'algorithme de traitement et transmission de données. Ainsi, la structure des paquets de données relative au récepteur et à l'émetteur sera décrite. Finalement, la conception matérielle de chaque capteur sera détaillée en présentant les différents composants, les méthodes et les équations utilisés pour la mesure des paramètres de l'installation PV. Les schémas électriques et les circuits imprimés conçus de chaque capteur seront également présentés.
- Le quatrième sert à présenter l'implémentation du système de surveillance conçu dans le troisième chapitre. Il commence par la description de la configuration automatique des modules LoRa pour chaque capteur. Après, l'implémentation de chaque capteur sera présentée. Ensuite, l'implémentation d'un dispositif de surveillance mobile équipé d'un afficheur LCD sera décrite en tenant compte de la présentation de son algorithme de fonctionnement et aussi la topologie de communication qui est gérée par celui-ci. Finalement, les résultats obtenus après la mise en service du système seront présentés est discutés.

Chapitre 1

Notions préliminaires sur les systèmes photovoltaïques

1.1 Introduction

L'énergie est le moteur de la vie humaine et est extrêmement cruciale pour la poursuite de son développement. La demande mondiale d'énergie augmente rapidement avec l'augmentation de la population humaine, l'urbanisation et la modernisation. La croissance de la demande mondiale d'énergie devrait augmenter fortement au cours des prochaines années sachant que le monde actuellement dépend fortement des combustibles fossiles pour répondre à ses besoins énergétiques [1]. Dans les premières décennies du 21e siècle, les principales ressources énergétiques restent le pétrole et le gaz naturel utilisés pour la production de carburant, l'approvisionnement en énergie et en chaleur, ainsi que l'énergie électrique générée dans les centrales électriques, y compris nucléaires [2, 3, 4]. L'approvisionnement énergétique mondial est confronté à une série de défis graves en termes de durabilité à long terme, d'épuisement des réserves de combustibles fossiles, de réchauffement climatique et d'autres préoccupations environnementales liées à l'énergie, de conflits géopolitiques et militaires entourant les pays riches en pétrole, de sécurité de l'approvisionnement en énergie et d'augmentation des prix du carburant [5, 6, 7]. Les problèmes de changement climatique impliquent que la demande croissante d'énergie

doit répondre à la réduction des polluants et des émissions de gaz à effet de serre dans le respect de l'environnement [8].

En raison des problèmes cités ci-dessus, les sources d'énergie naturelles sont devenues très importantes en tant qu'alternatives aux sources d'énergie conventionnelles. Le soleil est la principale source d'énergie de toute les formes d'énergie renouvelable et propre sur cette planète [9]. En un an, cette énergie renouvelable est environ deux fois plus que ce qui ne sera jamais obtenu de toutes les ressources non renouvelables de la terre combinées [10]. Les technologies de l'énergie solaire comprennent le chauffage solaire, l'énergie solaire photovoltaïque, l'électricité solaire thermique et l'architecture solaire peuvent apporter des contributions significatives à la résolution de certains des problèmes énergétiques les plus urgents auxquels le monde est actuellement confronté [11]. Par conséquent, pour les besoins énergétiques mondiaux, l'énergie solaire pourrait être l'option la plus durable. Pour la durabilité de l'état stable, les énergies renouvelables seront essentielles, et le principal contributeur sera l'énergie solaire directe [12]. L'effet photovoltaïque est sans doute le moyen le plus direct de profiter de l'énergie solaire et est considérée comme le moyen le plus prometteur d'exploiter cette énergie [13].

Ce chapitre sert pour discuter les notions de base du photovoltaïque. Il commence par des statistiques afin de montrer la position de l'énergie photovoltaïque dans le domaine de l'énergie dans le présent et l'avenir et l'étendue de son importance aux niveaux mondial et national. Ensuite, les concepts de base de l'énergie photovoltaïque seront abordés à partir de la présentation du principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, la composition des panneaux solaires, les composants de base d'un système photovoltaïque, et donc la modélisation des cellules solaires photovoltaïques. Ensuite, les facteurs qui affectent les performances du système photovoltaïque seront discutés, qu'ils soient liés au système lui-même ou à l'environnement, dans le but d'extraire les facteurs les plus importants qui affectent les performances des systèmes photovoltaïques. Finalement, le chapitre s'attachera à démontrer l'importance des systèmes de surveillance photovoltaïques et à mettre en évidence les recherches dans ce domaine, qu'il s'agisse des méthodes filaires classiques ou des méthodes sans fil.

1.2 Statistiques sur l'énergie photovoltaïque

En raison des avantages de la technologie photovoltaïque qui convertit la lumière en électricité directement sans émission de gaz ni bruit, le monde a commencé à s'orienter progressivement vers cette technologie. La production d'électricité solaire photovoltaïque, augmente à un rythme beaucoup plus rapide que le reste de l'économie mondiale. En 2016, la puissance solaire photovoltaïque mondiale nouvellement installée d'environ 75 GW était supérieure à toute la capacité mondiale installée jusqu'à la fin de 2011 [14]. Le [Taux de Croissance Annuel Composé \(TCAC\)](#) au cours des 15 dernières années était supérieur à 40%, ce qui fait du [PV](#) l'une des industries à la croissance la plus rapide [15]. En 2018, plus de 100 GW de nouvelle capacité d'énergie photovoltaïque ont été ajoutées sachant que les rapports sur la production mondiale de cellules solaires varient entre 110 GW et 120 GW [16]. La capacité totale de production d'électricité photovoltaïque installée dans le monde dépassait 635 GW à la fin de 2019 [17]. Selon le rapport sur le marché des énergies renouvelables de l'année 2018 de l'[Agence Internationale de l'Energie \(AIE\)](#), il y aura une croissance globale de la capacité de production des systèmes solaires photovoltaïques de 572 GW à 720 GW entre 2018 et 2023 [18]. En outre, les estimations montrent qu'il est prévu que la capacité mondiale d'énergie solaire photovoltaïque installée sera de 2,84 TW d'ici 2030, et elle sera plus de 8,5 TW d'ici 2050 [19].

A l'échelle nationale, l'énergie photovoltaïque est devenue une priorité majeure puisque 4/5 du pays est le désert saharien, recevant environ 6 KWh/m²/jour, ce qui est plus que toutes les énergies fossiles réunies [20]. En 2011, le ministère algérien de l'énergie et des mines a publié son programme d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique qui vise à augmenter la part des énergies renouvelables utilisées pour produire de l'électricité à 40% de la demande intérieure d'ici 2030, et selon le [Centre de Développement des Energies Renouvelables \(CDER\)](#), le programme national des énergies renouvelables pour l'Algérie (2015-2030) a désormais un objectif de 22 GW d'énergie renouvelable avec une part de 13,5 GW d'énergie PV d'ici 2030 [15].

1.3 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus qui génère une tension ou un courant électrique dans une cellule photovoltaïque lorsqu'elle est exposée au rayonnement solaire. Il peut être défini comme la génération d'un potentiel lorsque le rayonnement ionise la région dans ou à proximité de la barrière de potentiel intégrée d'un semi-conducteur [21]. Il a été découvert pour la première fois en 1839 par Edmond Becquerel lors d'expériences impliquant des cellules humides où il a noté que la tension de la cellule augmentait lorsque ses plaques d'argent étaient exposées à la lumière du soleil [22]. Les cellules photovoltaïques sont composées de deux types différents de semi-conducteurs (un type P et un type N) qui sont reliés entre eux pour créer une jonction P-N. En joignant ces deux types de semi-conducteurs, un champ électrique se forme dans la région de la jonction lorsque les électrons se déplacent vers le côté P positif et que les trous se déplacent vers le côté N négatif comme il est montré dans la figure 1.1.

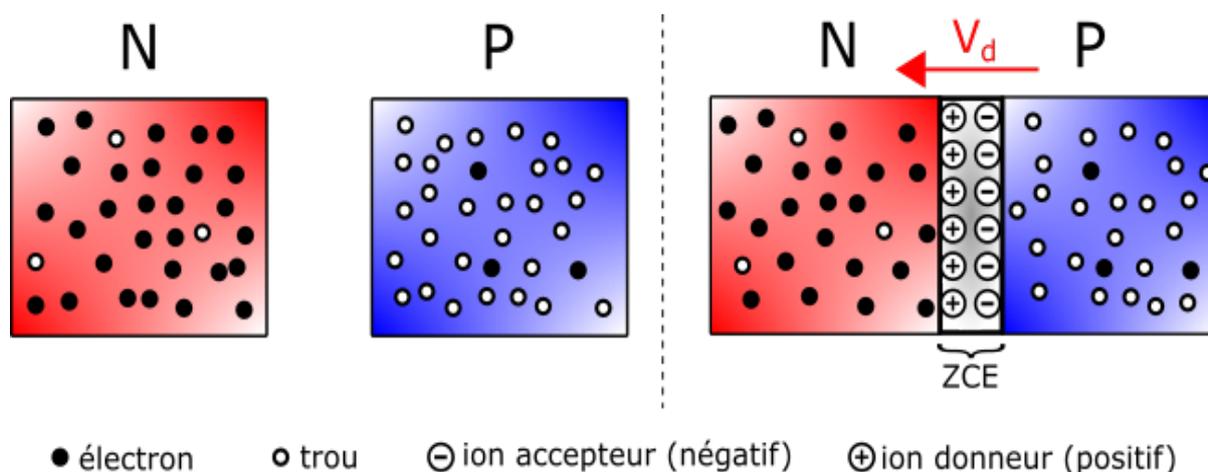


FIGURE 1.1 – Jonction P-N.

Lorsque la lumière tombe sur ces cellules, l'énergie du photon est transférée aux électrons d'un atome du matériau semi-conducteur dans la jonction P-N. Cela fait sauter les électrons à un état d'énergie plus élevé connu sous le nom de bande de conduction. Ce qui laisse un "trou" dans la bande de valence d'où l'électron a bondi. Ce mouvement de l'électron résultant de l'énergie ajoutée crée deux porteurs de charge une paire électron-trou [22]. La figure 1.2 montre une représentation graphique de l'effet photovoltaïque.

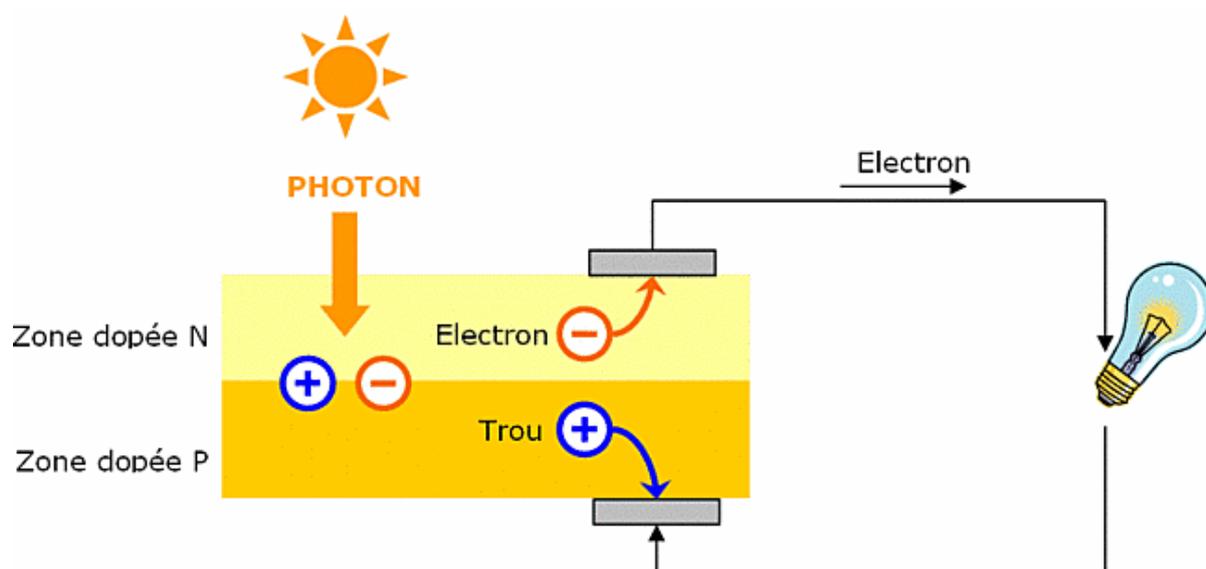


FIGURE 1.2 – Représentation de l'effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium, et celles-ci peuvent être monocristallines (cellules constituées de fines tranches découpées dans un monocristal de silicium) ou polycristallines (cellules constituées d'un bloc de cristaux de silicium) [23]. Les cellules monocristallines sont plus chères que les cellules polycristallines en raison de leur efficacité d'environ 12 à 20% par rapport aux 11 à 15% que donnent les cellules polycristallines. La figure 1.3 montre les formes extérieures de chacune des deux cellules.



FIGURE 1.3 – Cellule polycristalline (a) et Cellule monocristalline (b).

1.4 Composition de panneau solaire

Un panneau solaire (photovoltaïque) est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques disposées en forme de grille, connectées électriquement (en série et en parallèle) et montées sur une structure porteuse avec une boîte de jonction. Ces cellules prises en sandwich entre deux pellicules en plastique polymère adhésives. Ces dernières prises en sandwich entre une plaque de verre avant et une feuille arrière en plastique polyéthylène soutenues dans un cadre en aluminium comme il est illustré dans la figure 1.4. La durée de vie utile des modules photovoltaïques varie entre 20 et 30 ans selon la technologie, les matières et la qualité de leur construction [24].

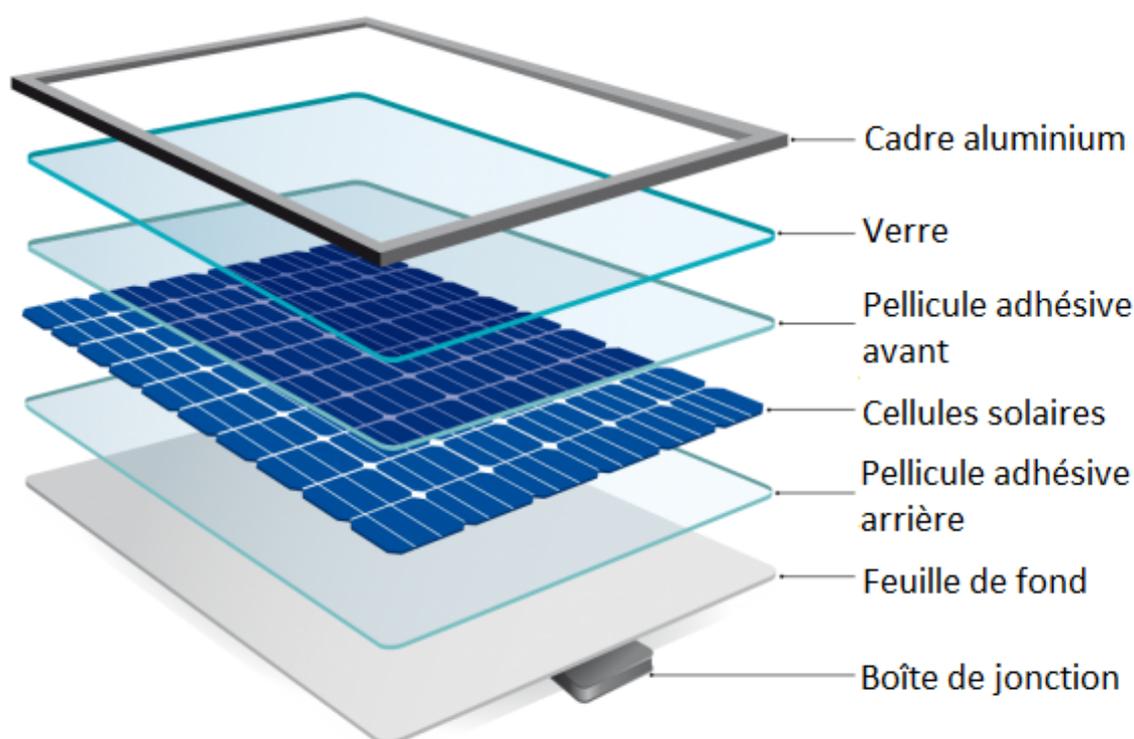


FIGURE 1.4 – Composition du panneau solaire photovoltaïque.

1.5 Installations Photovoltaïques

Il existe généralement deux types d'installations solaires photovoltaïques :

1. Installation photovoltaïque isolée (autonome) : on l'appelle installation photovoltaïque isolée car c'est une installation qui n'est pas reliée au réseau électrique publique. L'énergie captée par les panneaux est soit utilisée directement, soit stockée dans des batteries pour qu'elle soit utilisable ultérieurement lorsque l'ensoleillement est insuffisant. Ces systèmes photovoltaïques se composent généralement d'un ensemble de panneaux solaires accompagnés d'un contrôleur de charge, d'un banc de batteries et d'un onduleur. Le rôle du contrôleur de charge est de réguler la charge et la décharge des batteries dans des conditions optimales. Le rôle de l'onduleur est d'assurer la conversion continue-alternative. Cela permet d'alimenter les récepteurs en courant alternatif à partir du courant continu. Les composants de base du module solaire photovoltaïque isolé sont illustrés à la figure 1.5

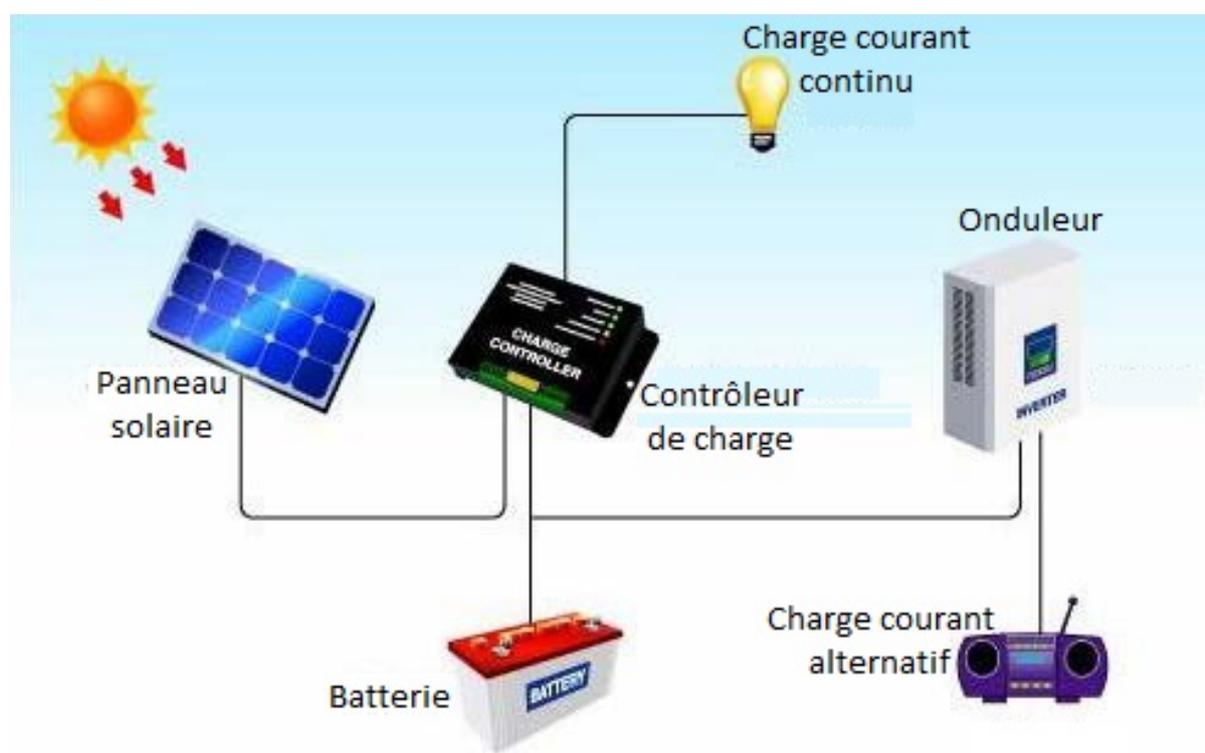


FIGURE 1.5 – Composants basiques d'un système solaire [25].

2. Installation photovoltaïque raccordée au réseau : Un système photovoltaïque raccordé au réseau est un système de production d'énergie électrique interconnecté à un réseau public de distribution d'électricité. Il est composé de panneaux solaires photovoltaïques reliés entre eux (en série ou en parallèle), un onduleur qui sert pour injecter l'énergie dans le réseau et deux compteurs, l'un sert pour la production et l'autre pour la consommation. Le schéma d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau est montré dans la figure 1.6.

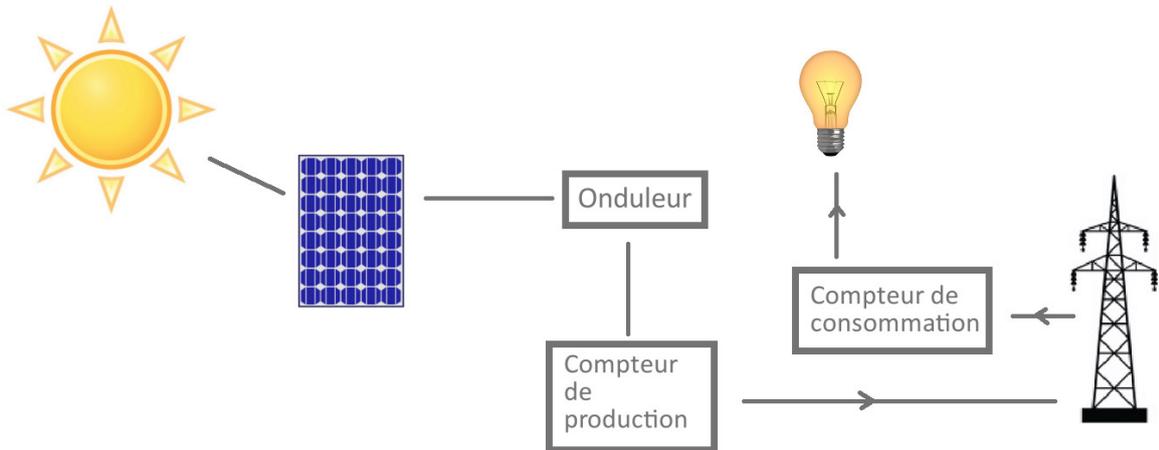


FIGURE 1.6 – Schéma d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau

1.6 Modélisation de la cellule PV

Le panneau solaire est constitué de modules interconnectés en série et en parallèle afin d'obtenir la puissance souhaitée. L'utilisation des circuits équivalents est convenable pour simuler les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque [26]. Ils existent dans la littérature plusieurs modèles électriques de la cellule photovoltaïque [27]. La représentation à une diode est généralement la plus utilisée. Le modèle idéal d'une cellule photovoltaïque est une source de courant en parallèle avec une diode comme il est montré dans la figure 1.7. I_{ph} est désigné par une source du courant c'est le photo-courant généré et la branche de diode a un courant I_d .

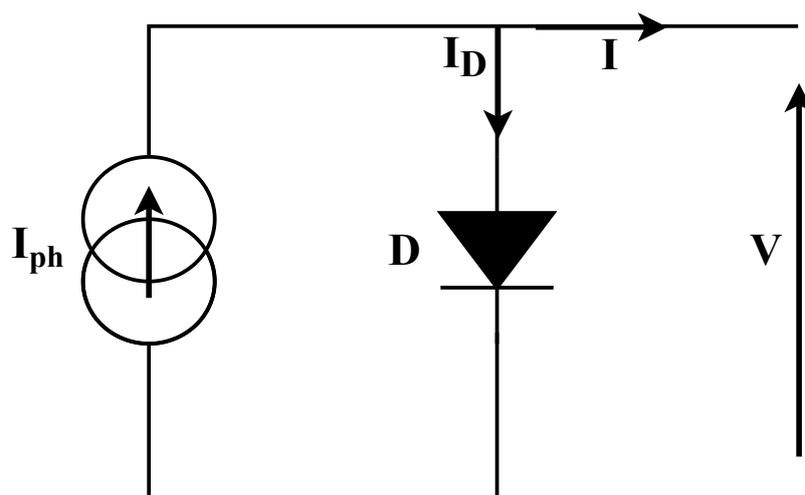


FIGURE 1.7 – Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque.

Dans le cas de cellules photovoltaïques réelles, d'autres paramètres tels que l'effet de résistance, la recombinaison et la fuite de bord doivent être pris en compte. Le modèle à diode unique est basé sur l'hypothèse que les pertes de recombinaison des porteurs de charge dans la région de déplétion sont absentes. Pour tenir compte des effets dissipatifs, deux résistances ont été introduites qui sont la résistance série et la résistance shunt [28, 29]. La résistance série (R_s) est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction [30]. Le circuit est généré par une source de courant I_{ph} , deux résistances R_s et R_{sh} et une diode en parallèle comme il est montré dans la figure 1.8. Ce circuit peut être utilisé pour une seule cellule, de même que pour un module constitué de plusieurs cellules.

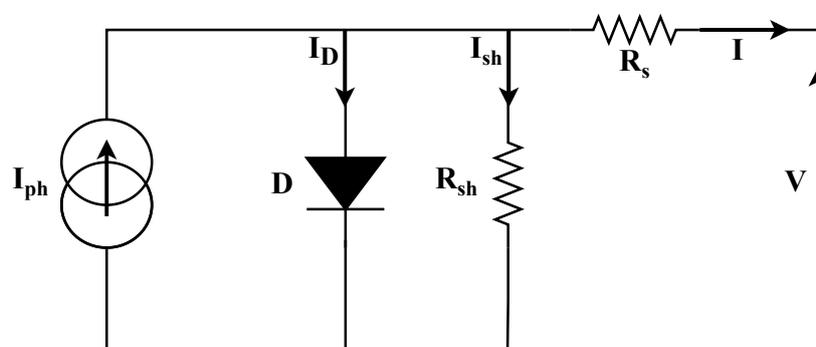


FIGURE 1.8 – Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque (Modèle à une diode).

Le modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque est basé sur un circuit équivalent. L'équation de la caractéristique tension-courant de la cellule solaire est donnée par la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t a} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

où I est le courant qui donne la cellule, I_0 est le courant de saturation inverse de la diode, a est le facteur d'idéalité de la diode et V_t est la tension thermique de la cellule.

Les expressions du photo-courant et du courant de saturation sont données par les équations suivantes :

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i dT) \frac{G}{G_n} \quad (1.2)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} + K_i dT}{\exp \left[\frac{V_{oc} + K_v dT}{V_t a} \right] - 1} \quad (1.3)$$

où I_{sc} est le courant de court-circuit, K_i est le coefficient de température de court-circuit, K_v est le coefficient de température en circuit ouvert, T est la température, V_{oc} est la tension en circuit ouvert, G est la radiation solaire et G_n est la radiation solaire nominale.

L'équation de la caractéristique tension-courant du champ PV est donnée par l'équation suivante :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{V + \left(\frac{R_s N_s}{N_p} \right) I}{V_t a} \right) - 1 \right] - \frac{V + \left(\frac{R_s N_s}{N_p} \right) I}{\frac{R_{sh} N_s}{N_p}} \quad (1.4)$$

où N_p et N_s sont respectivement le nombre de module en parallèle et en série. Le courant de court-circuit (I_{sc}) est le courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit et la tension en circuit ouvert (V_{oc}) est la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert.

Sachant que tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, le comportement d'une cellule peut être synthétisé par sa courbe caractéristique courant-tension comme il est montré dans la figure 1.9. Le point de puissance maximale (**Maximum Power Point (MPP)**) représente le point de fonctionnement pour lequel la puissance délivrée est maximale.

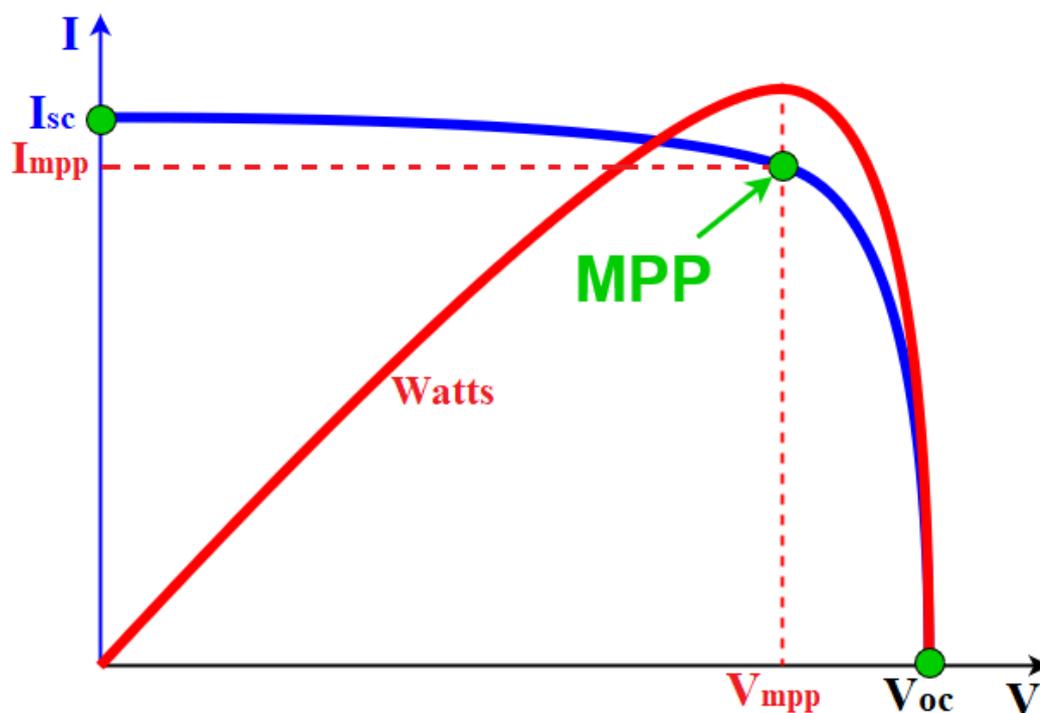


FIGURE 1.9 – Courbe caractéristique courant-tension de la cellule PV

Un panneau solaire est caractérisé par les facteurs mentionnés dans la table 1.1.

TABLE 1.1 – Caractéristiques électriques d'un panneau solaire

PARAMÈTRE	DESCRIPTION
P_{max}	Puissance maximale (W)
V_{oc}	Tension en circuit ouvert (V)
I_{sc}	Courant de court-circuit (A)
V_{max}	Tension à puissance maximale (V)
I_{max}	Courant à puissance maximale (A)
η	Rendement du panneau à 25°C
L*I*H	Dimensions (mm)

1.7 Facteurs affectant les performances des installations PV

Plusieurs facteurs affectent la production et l'efficacité d'un panneau solaire. Il y a des facteurs liés à l'installation elle-même comme la température de fonctionnement, le positionnement des panneaux et le charge...etc. Ils existent d'autres facteurs relatifs à l'environnement tels que la température ambiante, l'humidité relative, la poussière, la radiation et l'ombrage des cellules. Tous ces facteurs doivent être pris en compte.

1.7.1 Facteurs liés au système

1.7.1.1 Température des cellules

Comme tous les autres dispositifs à semi-conducteurs, les cellules solaires sont sensibles à la température. Une limitation principale liée à la fiabilité des installations photovoltaïques est la forte dépendance du rendement électrique à la température de fonctionnement, qui diminue nettement avec un rayonnement solaire élevé. C'est le premier paramètre qui affecte la courbe caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie radiante en énergie électrique avec un rendement compris entre 11% et 20%. La majeure partie du rayonnement restant va se convertir en chaleur et le reste sera réfléchi. Par conséquent, la température des cellules photovoltaïques mal ventilées augmente très rapidement. La température de la cellule photovoltaïque a un effet significatif sur la tension. Par contre, son impact sur le courant délivré par une cellule photovoltaïque est très petit.

1.7.1.2 Charge électrique

Lors de la connexion directe d'une charge à une cellule, le point de fonctionnement du panneau est rarement à la puissance maximale. L'énergie délivrée par les cellules photovoltaïques dépend d'une équation mettant en relation le rayonnement solaire, la température, et la résistance totale du circuit, ce qui conduit à une puissance

de sortie non linéaire. Alors, la courbe caractéristique courant-tension de la cellule peut être considérablement affectée par les conditions atmosphériques telles que la radiation et la température. On dit que le système est optimisé lorsque la caractéristique de charge change pour maintenir le transfert de puissance au plus haut rendement. L'objectif est d'obtenir la puissance maximale (P_{max}) possible depuis un ou plusieurs panneaux photovoltaïques. Pour cette raison, La poursuite du **Maximum Power Point Tracker (MPPT)** est introduite dans le but de suivre le point maximal de puissance de l'installation photovoltaïque comme son nom l'indique.

MPPT est le processus d'ajustement de la caractéristique de charge lorsque les conditions changent. Le principe de fonctionnement de ce système est d'analyser en permanence la sortie du panneau solaire, afin d'appliquer la résistance la plus appropriée pour un environnement et des conditions données. Le **MPPT** échantillonne la sortie de la cellule et applique la résistance (charge) appropriée pour obtenir une puissance maximale (P_{max}) [31].

Les dispositifs **MPPT** sont généralement intégrés dans un système de convertisseur de puissance électrique qui fournit une conversion, un filtrage et une régulation de tension ou de courant pour piloter diverses charges. Le **MPPT** peut suivre plusieurs stratégies pour optimiser la puissance de sortie et basculer entre plusieurs algorithmes selon les conditions. Les algorithmes les plus répandus sont :

- **Méthode de Perturber & Observer (P&O)** : Dans cette méthode, le contrôleur ajuste légèrement la tension du réseau et mesure la puissance. Si cette dernière augmente, d'autres ajustements dans cette direction sont essayés jusqu'à ce que la puissance n'augmente plus. On parle également de méthode d'escalade, car elle dépend de la montée de la courbe de puissance par rapport à la tension en dessous du point de puissance maximale et de la chute au-dessus de ce point [32]. Cette méthode est la plus commune bien que cette méthode puisse faire osciller la puissance de sortie.
- **Méthode de Conductance incrémentale** : Dans cette méthode, le contrôleur mesure les variations incrémentielles de courant et de tension pour prédire l'effet d'une variation de tension. Cette méthode peut suivre les conditions changeantes plus rapidement que P&O et la puissance de sortie n'oscille

pas, malgré qu'elle nécessite plus de calculs [33]. Elle utilise la conductance incrémentielle (dI/dV) du réseau photovoltaïque pour calculer le signe du changement de puissance par rapport à la tension (dP/dV). La méthode de conductance incrémentielle calcule le **MPP** en comparant la conductance incrémentielle (I_{Δ}/V_{Δ}) à la conductance du tableau (I/V).

- **Méthode de balayage de courant** : Cette méthode utilise une forme d'onde de balayage pour le courant du réseau de sorte que la caractéristique I-V du réseau PV soit obtenue et mise à jour à des intervalles de temps fixes. La tension **MPP** peut alors être calculée à partir de la courbe caractéristique aux mêmes intervalles [34].
- **Méthode de température** : Cette méthode estime la tension V_{MPP} en mesurant la température du module solaire et en la comparant à une référence [35]. Étant donné que les changements dans les niveaux de la radiation ont un effet négligeable sur V_{MPP} , ses influences peuvent être ignorées et la tension est supposée varier linéairement avec la température.

1.7.1.3 Positionnement des panneaux

Le placement et l'orientation des panneaux solaires sont tout aussi importants que le type de panneau solaire utilisé dans une situation donnée. S'assurer que les panneaux solaires sont orientés dans la bonne direction et ont une inclinaison appropriée aidera à garantir qu'ils produisent un maximum d'énergie car ils sont exposés à la plus haute intensité de lumière solaire pendant la plus longue période de temps. Un panneau solaire exploitera le plus de puissance lorsque les rayons du soleil frappent sa surface perpendiculairement [36].

Certains panneaux solaires suivent le soleil en utilisant des systèmes de suivi solaire qui augmentent considérablement la production d'énergie. Dans des conditions idéales le rendement du système peut être amélioré jusqu'à 40% par rapport à un système stationnaire comme il est montré dans la figure 1.10. Ils sont des systèmes de montage conçus pour maximiser la production d'énergie de votre module solaire en suivant la position du soleil.

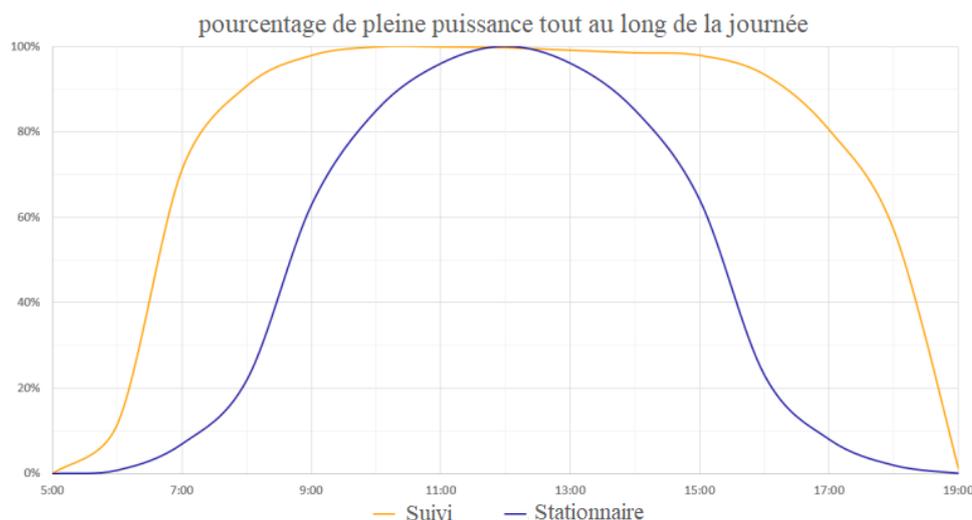


FIGURE 1.10 – Comparaison entre système rigide et système de suivi de soleil.

Ils existent deux types de suivi solaire, un axe unique qui suit le mouvement horizontal du soleil dans le ciel et un axe double, qui suit à la fois le mouvement horizontal et vertical. Les suiveurs à axe unique sont conçus pour tourner autour d'un seul axe, en suivant le soleil lorsqu'il se déplace d'est en ouest pendant la journée. Cela permet d'augmenter la collecte d'énergie solaire de votre panneau jusqu'à 25 % par rapport à l'utilisation d'un système de rayonnement fixe. Les suiveurs à deux axes suivent la position du soleil pendant la journée en déplaçant votre panneau solaire dans la direction est-ouest ou nord-sud. Ils sont plus efficaces que les types à axe unique car ils permettent de suivre le soleil même avec les changements saisonniers de positions. Ces suiveurs peuvent augmenter la collecte d'énergie solaire de près de 38%. Les suiveurs à deux axes aident à augmenter la production d'énergie jusqu'à 45% par rapport aux systèmes de rayonnages fixes. La figure 1.11 montre une représentation de types de suiveurs solaires [37].

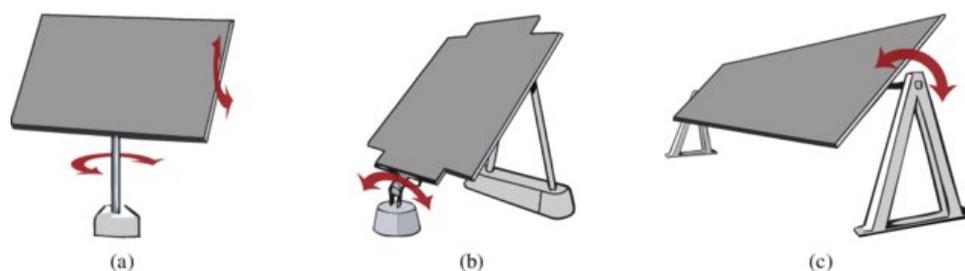


FIGURE 1.11 – Différents suiveurs solaires utilisés à la fois dans le PV ; (a) tracker à deux axes, (b) tracker à axe unique aligné polaire et (c) tracker à axe unique horizontal.

Ils existent deux types de systèmes de suivi du soleil, actif et passif. La plupart des systèmes de suivi sont actifs, ce qui signifie que le système de suivi est entraîné par un moteur, pour alimenter un dispositif mécanique qui incline les panneaux solaires attachés dans le bon sens. Les suiveurs solaires passifs suivent également les rayons solaires mais ils se déplacent en utilisant la chaleur du soleil pour réchauffer un gaz qui se dilate provoquant un mouvement mécanique des panneaux solaires. Lorsque le soleil se déplace et que le gaz se refroidit, il se comprime à nouveau et les panneaux reculent.

1.7.2 Facteurs liés à l'environnement

Les conditions climatiques influent fortement sur la production d'énergie dans les installations photovoltaïques. Les facteurs environnementaux tels que la température ambiante, l'humidité relative et la radiation solaire affectent fortement les performances des modules photovoltaïques. Donc, une connaissance détaillée sur les données météorologiques du site où le système sera installé est nécessaire. Les données météorologiques comprennent la température ambiante, la pression atmosphérique, l'humidité relative et la radiation du soleil. La relation entre les variables météorologiques et la sortie de l'installation PV est explorée en termes d'évaluation des performances et d'estimation de la production. L'énergie de sortie des installations PV peut être estimée à n'importe quel endroit en tenant compte des facteurs environnementaux si les données météorologiques sont disponibles, en tenant compte des effets de la température du module et de la radiation solaire [38]. L'évaluation des performances a montré une forte relation entre les variables météorologiques, en particulier l'éclairement et la température, et le comportement de la sortie de l'installation PV [39]. L'augmentation du rayonnement solaire incident sur le module PV augmente la plupart des paramètres affectant les performances du module, en particulier le courant de court-circuit, la puissance maximale et l'efficacité du module [40].

Aussi, une cellule ombragée, même partiellement, suffit pour faire chuter le rendement de l'ensemble du panneau. Les cellules étant en série ce n'est pas tant le nombre de cellules ombragées que la surface de l'ombre qui a une importance majeure dans le rendement de conversion. Un effet qui peut être plus dévastateur pour le module qu'une

inadéquation de cellules lors de l'assemblage est l'ombrage partiel. Il peut en résulter des phénomènes de points chauds (hot spot). Dans le cas où le module n'est pas exposé de manière uniforme à la lumière, il peut se produire soit un I_{sc} supérieur à celui des diodes non ombragées et dans ce cas la puissance délivrée par le module est uniquement dictée par la cellule de plus faible puissance, soit un I_{sc} inférieur à celui des diodes non ombragées, alors la cellule ombragée deviendra réceptrice et devra dissiper l'énergie fournie par les autres cellules non ombragées. Pour éviter ces problèmes d'ombrage partiel, les cellules PV sont protégées par une (ou des) diodes de "by-pass". Si une cellule ou un groupe de cellule est ombragé, le courant passera par la diode de by-pass et on évite ainsi un échauffement trop intense de ces cellules.

D'autre part, l'humidité (RH) joue un rôle important dans l'analyse des performances de cellules solaires car elle affecte facilement l'efficacité des cellules solaires et crée une couche d'eau minimale à sa surface [41]. Aussi, le dépôt de poussière joue un rôle crucial en empêchant la radiation solaire d'atteindre les cellules solaires et réduit par conséquent la génération de courant. La tension générée par les modules n'a pas été modifiée à des niveaux significatifs.

1.8 État de l'art sur la surveillance des systèmes PV

La surveillance des systèmes de production d'énergie solaire est cruciale et elle est devenue l'une des exigences dans les systèmes de production photovoltaïque [42] suite au besoin d'énergie solaire qui a considérablement augmenté au cours des dernières décennies. Ils sont importants pour maintenir l'opérabilité soutenue d'un système et pour qu'un utilisateur comprenne les problèmes qui se produisent pendant le fonctionnement du système [43]. Elle permettra une analyse des performances, de la dégradation et des défaillances des systèmes photovoltaïques [44]. Ainsi, la précision et les performances du système solaire PV peuvent être améliorées en utilisant un système de surveillance solaire PV efficace [45].

La surveillance est le processus d'observation et d'enregistrement des paramètres de la centrale solaire photovoltaïque en temps réel. Alors, l'acquisition de données est

la base de tout système de surveillance. Son rôle est de mesurer différents paramètres du système afin d'assurer une bonne conduite. Elle représente le processus de capture de signaux qui mesurent des grandeurs physiques et de la conversion de ces mesures résultantes en valeurs numériques qui peuvent être manipulées par d'autres systèmes. Un système d'acquisition de données est composé de tous les éléments nécessaires à la capture des données et leur transmission au récepteurs (homme/machine) et aux systèmes qui exploitent ces données. Ces mesures conditionnées sont nécessaires pour des systèmes de surveillance et de contrôle sains et efficaces.

La tension et le courant sont les paramètres les plus importants à surveiller dans une installation photovoltaïque. Cependant, les panneaux solaires sont soumis à des conditions sévères au cours de leur fonctionnement. Les variations extrêmes de température, d'humidité et de rayonnement UV peuvent exercer une pression énorme sur un panneau solaire. Sachant que la plupart des panneaux sont bien conçus pour résister aux conditions météorologiques extrêmes, le fonctionnement et la fonctionnalité des systèmes solaires photovoltaïques peuvent être affectés. Les systèmes de surveillance photovoltaïques nécessitent généralement l'enregistrement d'un grand nombre de paramètres : températures, radiation, tensions, courants, etc [46]. La dégradation des performances induite par le climat représente un inconvénient majeur pour le solaire, ce qui le rend peu fiable pour les installations sans surveillance ou éloignées [47].

1.8.1 Systèmes de surveillance filaires classiques

Dans le cadre de la surveillance des systèmes photovoltaïques, plusieurs travaux peuvent être trouvés dans la littérature au cours des deux dernières décennies proposant différents systèmes de surveillance et de communication. Les auteurs de [48, 49] ont proposé un système d'acquisition de données informatisé pour surveiller à la fois les données météorologiques et les paramètres opérationnels d'un système de sources d'énergie renouvelables. Le système proposé consiste en un ensemble de capteurs permettant de mesurer à la fois des paramètres météorologiques (température, humidité, etc.) et électriques (tension et courant photovoltaïques, etc.). Les données collectées sont d'abord conditionnées à l'aide de circuits électroniques de précision puis interfacées à un PC à l'aide d'une carte

d'acquisition de données. Le programme LABVIEW est utilisé pour traiter, afficher et stocker les données collectées sur le disque du PC. Le deuxième article sert pour améliorer ce système pour qu'il soit basé sur l'architecture Client/Serveur.

Dans [44], les auteurs ont présenté et discuté la conception et la mise en œuvre d'un système de séquenceur I-V capable de surveiller jusqu'à sept modules PV. Ce système a été utilisé pour surveiller les caractéristiques I-V des modules PV dans des conditions extérieures réalistes. Il est composé de deux cartes informatiques enfichables, une carte de thermocouples ISA PC-73C pour la détection de température et une carte d'entrée/sortie PCI-30G A/D pour les signaux analogiques des capteurs et pour la sortie numérique du programme logiciel pour contrôler les relais.

Un système d'acquisition de données automatique et à faible coût pour la surveillance des centrales solaires PV a été développé en utilisant une nouvelle procédure basée sur l'instrumentation virtuelle est présentée dans [50]. Ce système mesure et affiche des graphiques du rayonnement solaire, de la température ambiante et des valeurs numériques des variables les plus courantes du système PV.

Dans [51], un contrôle des performances à distance comprenant une routine de détection automatisée des pannes pour les systèmes PV a été développé dans le cadre du projet PVSAT-2. La procédure est basée sur des données de la radiation dérivées de satellites qui sont utilisées pour simuler le rendement énergétique d'un système PV.

Les auteurs de [52] ont également construit un système d'acquisition de données pour la surveillance solaire et environnementale. Le système est basé sur un microcontrôleur ATmega 16, qui scanne huit capteurs ensemble à n'importe quel intervalle programmable. L'article a présenté une étude du projet mentionné, des applications et quelques caractéristiques principales du système prototype et de ses programmes.

L'article de [53] a présenté un système d'instrumentation informatisé est également développé pour la caractérisation des modules PV qui permet de dessiner les caractéristiques I-V d'un module PV dans des conditions de test météorologiques réelles. Ce système a été conçu pour être l'élément de base du laboratoire pour la caractérisation des générateurs photovoltaïques. Il est basé sur le microcontrôleur PIC 16F876A

de MICROCHIP. Un diviseur de tension et amplificateur opérationnel a été utilisé pour la mesure de la tension. Pour la mesure du courant un capteur de courant à effet de Hall (LA55p) a été utilisé. En ce qui concerne la température, un capteur numérique (DS18B20) a été impliqué. La mesure de la radiation solaire en a été obtenue par un circuit à base d'une cellule de référence. Le contrôle de la collecte de données dans la mémoire du système d'acquisition se fait via une connexion d'interface USB ou RS-232 du système avec un ordinateur compatible avec le logiciel de communication spécifié.

Les auteurs de [54] ont proposé un simple système de surveillance PV. Ce dernier est composé d'un ordinateur portable connecté à une carte microcontrôleur peu coûteux (ATMEL ATMEGA16) via un câble série. Les capteurs sont émuloés dans une carte prototype qui s'interface avec le système de microcontrôleur. Un programme d'interface utilisateur graphique est développé dans LabVIEW pour surveiller les données collectées sur le moniteur de l'ordinateur.

Dans [55], la conception et le développement d'un système d'acquisition de données basé sur un microcontrôleur à faible coût (PIC 16F877) pour les systèmes de pompage d'eau PV à distance est proposé. Les communications sont basées sur le réseau GSM et, en particulier, sur le service de messages texte courts (SMS). La température ambiante a été mesurée à l'aide d'un capteur analogique (LM35). La tension et le courant générés ont été mesurés à l'aide de transducteurs à effet Hall. La mesure de la radiation solaire en W/m^2 est obtenue par le courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque.

Dans [56], le développement d'un système de surveillance photovoltaïque à petite échelle donne à l'utilisateur des informations vitales sur le retour sur investissement de l'installation a été présenté. Cette conception est basée sur un microcontrôleur PIC16F877a et LabVIEW. Le système d'acquisition de données est composé d'un capteur de tension, un capteur de courant, un capteur de température ambiante. La radiation solaire est observée à la base de mesures électriques des panneaux.

Les auteurs de [42] ont réalisé la surveillance d'un système de production d'énergie photovoltaïque connecté au réseau. Le flux d'énergie entre la charge et le secteur est également surveillé avec le programme développé Labview. La carte d'acquisition de données ([Data Acquisition \(DAQ\)](#)) NI USB-6221 et les circuits de mesure électriques

développés ont été utilisés pour la surveillance.

Dans [43], un système de surveillance du réseau photovoltaïque a été conçu sur un microcontrôleur ATmega8535 et appliqué pour les caractéristiques de ce système. Les caractéristiques surveillées sont la radiation solaire, la température, le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, la puissance maximale, la tension et le courant à la puissance maximale, et également l'efficacité du générateur photovoltaïque. Le système utilise un pyranomètre LI-200 comme capteur de radiation solaire, un LM35 comme capteur de température, un simple diviseur de tension pour le capteur de tension et une résistance shunt pour le capteur de courant.

Dans [57], les auteurs ont présenté une plate-forme LabVIEW intégrale de surveillance, de modélisation et de simulation de systèmes photovoltaïques connectés au réseau. La méthode proposée est également appliquée à un système PV connecté au réseau dans le CDER en Algérie. L'acquisition des données est réalisée à l'aide d'un Agilent 34970A et d'un module multiplexeur dédié Agilent 34902A à 16 voies. La communication de données entre le PC et LabVIEW où les données entrantes sont traitées, est effectuée par bus GPIB. Deux pyranomètres (type Kipp & Zonen CM 11) et une cellule solaire de référence sont utilisés pour mesurer la radiation. Des thermocouples ont été utilisés pour mesurer la température ambiante à proximité de l'installation PV afin de prédire la température effective des modules PV. La tension de sortie du système PV est mesurée au moyen d'un diviseur de tension, tandis que la tension de sortie alternative est mesurée au secondaire du transformateur utilisé pour l'alimentation en tension des capteurs Hall. Ces derniers sont dédiés pour la mesure du courant.

Dans [46], un enregistreur de données utilisant la plate-forme électronique open source Arduino a été développé dans le but de faire la surveillance des systèmes photovoltaïques à faible coût, en particulier dans les zones reculées ou les régions des pays en développement. Ils ont utilisé le capteur de température numérique DS18B20 pour la détection de température, des cellules solaires pour la mesure de la radiation solaire, et des capteurs à effet de hall pour la surveillance du courant.

Les auteurs de [58] ont proposé un automate programmable industriel compatible avec le software HomePlug pour la gestion et la surveillance des systèmes photovol-

taïques pour la maison intelligente.

L'auteur de [59] a proposé un système de surveillance et de contrôle à courte portée utilisé pour la surveillance et le refroidissement afin d'éliminer le problème de chauffage par panneau solaire en utilisant le module BeagleBone.

Dans [60], les auteurs ont développé un système d'enregistrement de données à faible coût pour surveiller les systèmes PV à distance via Arduino Uno. Ce système permet la surveillance dans des zones dépourvues de réseaux de télécommunications, stockant les données sur carte SD. Le capteur de température (DS18B20) ainsi que le capteur de courant et le capteur de tension ont été placés pour extraire les données et les envoyer à un enregistreur.

Dans [61], les auteurs ont introduit une approche hybride avec PLC et Arduino pour surveiller la température des panneaux solaires dans les applications Smart Grids/Micro-Grids. L'acquisition et l'affichage des données ont été effectués en combinaison avec PLC et SCADA tandis que l'extraction et la transmission des données ont été réalisées par la plate-forme Arduino MEGA 2560 R3.

Les auteurs de [62] ont présenté un système de surveillance des performances basé sur Arduino pour les systèmes solaires photovoltaïques flottants. Dans cette approche, le contrôleur principal était considéré comme Arduino Nano. De plus, les paramètres électriques tels que la tension, le courant et la puissance de sortie des modules solaires photovoltaïques de 10 W ont été surveillés.

Récemment, les auteurs de [63] ont présenté un système de surveillance matériel et logiciel open-source pour les installations photovoltaïques basé sur la carte Arduino Yun. Un transformateur de courant (SCT-013-000) a été choisi comme capteur de courant. Pour la température, le capteur numérique type DS18B20 a été choisi. La tension est détectée à l'aide d'un transformateur de tension.

1.8.2 Systèmes de surveillance sans fil

Depuis que les besoins en énergie solaire ont été augmentés dans le monde entier, le développement d'une méthode de surveillance avancée est devenu une nécessité urgente et les technologies de surveillance ont reçu une attention considérable en ce qui concerne l'amélioration des performances [64]. Désormais, de nombreuses méthodes de surveillance ont été introduites au cours des dernières décennies. Dans le passé, le système de surveillance filaire était couramment utilisé pour transmettre des données. Mais avec le développement du système solaire photovoltaïque, la surveillance en temps réel à l'aide de câbles filaires traditionnels a entraîné des coûts élevés. Par conséquent, Il y a eu un changement de tendance des systèmes de surveillance filaires aux systèmes de surveillance sans fil au cours de la dernière décennie [65]. Les chercheurs s'intéressent de plus en plus à l'amélioration des performances des systèmes de surveillance solaire photovoltaïque à l'aide de diverses technologies. En conséquence, le nombre d'articles publiés au cours des dernières années a augmenté à un rythme plus rapide [64].

Les systèmes de surveillance sans fil sont moins soumis aux conditions environnementales. De plus, les technologies de surveillance sans fil augmentent non seulement la mobilité et la sécurité du réseau en mettant en œuvre des protocoles de sécurité associés, mais elles ont également une portée plus longue, un temps de réponse élevé et de faibles coûts de maintenance. Dans ce stade, plusieurs recherches sur la surveillance des systèmes PV à base de différentes technologies des réseaux sans fil sont trouvées dans la littérature.

1.8.2.1 WiFi

La technologie Wi-Fi est basée sur la norme de la famille 802.11 qui est mise en œuvre pour développer un réseau local sans fil (WLAN) [66]. L'avantage de cette technologie est le débit de transmission élevé et sa popularité. Il s'agit des réseaux informatiques les plus utilisés au monde. La portée du module Wi-Fi peut atteindre jusqu'à 100 m avec un débit compris entre 11 Mb/s et 54 Mb/s. Cependant, cette technologie possède plusieurs inconvénients tels que la portée faible et les problèmes liés à la sécurité du réseau. Les systèmes de surveillance basés sur le Wi-Fi dépendent d'un module Wi-Fi

utilisé généralement pour la transmission de données. Ci-dessous quelques travaux basés sur cette technologie dans la surveillance des installations photovoltaïques.

Dans [67], les auteurs ont proposé une méthode basée sur un module Wi-Fi ESP32 et un lecteur de carte SD pour surveiller les paramètres électriques du panneau solaire et de la batterie. Les capteurs de tension ont été installés dans un circuit électrique pour mesurer la tension du PV et de la batterie, agissant comme un diviseur de tension. Aussi, le capteur de courant à effet de Hall ACS712 a également été installé dans le système.

Les auteurs de [68] ont introduit une méthode pour surveiller et protéger le système solaire PV avec une communication à faible puissance à l'aide d'un module Wifi ESP8266 combiné avec un Arduino Uno qui est utilisé comme processeur de données. Le capteur de courant du circuit est conçu pour mesurer le courant circulant vers la charge en fonction du capteur de courant ACS750. Le circuit du capteur de tension est conçu sur la base du principe du diviseur de tension pour mesurer la source de tension. Un afficheur LCD est utilisé pour afficher les données obtenues à partir de capteurs.

Dans [69], les auteurs ont proposé une architecture SCADA open source pour développer un système de surveillance PV. La structure développée se composait de divers composants tels que les capteurs de courant à effet de Hall ACS712, un microcontrôleur ESP32 Thing, un Raspberry Pi et un routeur Wi-Fi local. Le microcontrôleur ESP32 Thing est utilisé pour collecter les données électriques de divers capteurs, puis transférer les données de capteur obtenues à la plate-forme **IoT** (**Internet of Things**) via un réseau Wi-Fi pour le stockage de données.

1.8.2.2 Bluetooth

Bluetooth est une norme de technologie sans fil à courte portée basée sur la norme IEEE 802.15.1 et des réseaux personnels sans fil. Elle est utilisée généralement pour échanger des données entre des appareils fixes et mobiles sur de courtes distances à l'aide d'ondes radio UHF dans les bandes **ISM** (**Industrial, Scientific and Medical band**), de 2,402 GHz à 2,48 GHz, et pour créer des réseaux personnels (**PAN**). C'est une plate-forme

émergente et l'un des modes de transmission les plus populaires pour envoyer des données d'un appareil à un autre [70]. La puissance d'émission peut être augmentée pour envoyer les données jusqu'à 100 m. Bluetooth offre divers avantages mais présente également plusieurs inconvénients, notamment des facteurs tels que l'autorisation, le cryptage et l'authentification [71]. L'une des principales préoccupations concernant la sécurité de Bluetooth est le processus d'appariement. De plus, il a une portée opérationnelle limitée jusqu'à 100 m. Aussi, il souffre de besoins élevés en énergie et présente une transmission de données lente par rapport aux autres technologies de surveillance. Certains travaux qui font la surveillance des installations photovoltaïques via Bluetooth sont mentionnés ci-dessous.

Les auteurs de [72] ont proposé un système de surveillance, d'évaluation et de détection de défauts de visualisation photovoltaïque (PV) sans fil basé sur la carte STM32F4DISCOVERY avec transmission de données Bluetooth dans la plate-forme MATLAB/Simulink. L'ensemble de la radiation, la température, la tension et le courant est acquis via la carte d'acquisition de données basée sur la carte STM32F4DISCOVERY. La radiation solaire est mesurée à l'aide d'un pyranomètre Si JSP-215. La température de surface arrière du panneau PV est mesurée à l'aide du capteur de température LM35. Un diviseur de tension est conçu pour la lecture de la tension de fonctionnement PV. Un capteur de courant HCS-20-SC-A-2.5 est directement utilisé pour mesurer le courant de sortie. Ces données de mesure sont transférées vers un ordinateur hôte par le module esclave Bluetooth HC-05 et le module maître Bluetooth intégré à un ordinateur portable. Ces données de mesure sont affichées visuellement sous forme de tableau de bord dans l'environnement MATLAB/Simulink et sont simultanément entrées dans le modèle PV pour la simulation théorique.

Dans [73], les auteurs ont établi un système avec une carte Raspberry Pi3 pour la surveillance d'un système solaire PV à distance à l'aide de modules Bluetooth et Wi-Fi. Le protocole Bluetooth a été implémenté en transférant les données des capteurs vers le module Raspberry Pi. Le protocole Wi-Fi a été utilisé pour transférer les données de la passerelle vers les dispositifs de supervision.

Les auteurs de [74] ont conçu un système de surveillance de l'énergie photovol-

taïque sans fil et en temps réel, pour mesurer les données de la puissance PV générée à l'aide de protocoles de communication Bluetooth. Une plateforme embarquée basée sur Arduino se charge de l'acquisition des données, qui sont diffusées sans fil par la communication Bluetooth. Le capteur chargé d'effectuer les mesures de tension et de courant, est le capteur INA219. Une interface basée sur LabVIEW affiche la surveillance en temps réel des courants, des tensions et de la puissance générée.

Dans [75], les auteurs ont introduit un système de surveillance solaire PV utilisant le module Bluetooth HC-05 pour transmettre des données. Les données ont été surveillées par l'utilisateur via l'application Bluetooth Terminal. Le système contient plusieurs grilles de panneaux solaires où chaque grille est connectée à divers capteurs pour mesurer les paramètres afin de surveiller le système. Le document s'est également concentré sur la distribution de puissance à l'aide d'un relais. Le relais a été activé/désactivé par le signal de commande de l'Arduino Uno pour distribuer correctement l'alimentation.

1.8.2.3 Réseau GSM

Global System for Mobile Communications (GSM) est un standard numérique de seconde génération pour la téléphonie utilisé pour le cadre de correspondance mobile. Le cadre GSM est construit en utilisant l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) [76]. Il est portable avec une large zone de couverture et a une cohérence élevée. La technologie GSM a fait un bond en avant en termes d'avancées technologiques avec un plus grand nombre d'antennes, de faibles taux d'erreur, de faibles coûts, une couverture étendue. Malgré les progrès réalisés, le GSM accuse un retard sur certains problèmes liés à l'envoi du message, comme l'interruption des données et les problèmes de connexion avec les e-mails lorsque plusieurs personnes utilisent la même bande passante [77].

Un système de surveillance de l'énergie en temps réel pour les installations PV raccordées au réseau a été développé et déployé par [78]. La conception de ce système se composait d'un capteur INA219 interfacé à un Arduino qui sert pour la mesure du courant, d'un circuit intégré Cirrus Logic CS5463 est utilisé pour mesurer la consommation de courant alternatif et d'un module BeagleBone Black qui sert pour la transmission de données par SMS à travers le module GSM SIM900D. Les données sont transmises par

SMS à un serveur qui stocke les données et héberge l'application Web qui les agrège, et à l'appareil Android dont une application affiche le graphique en temps réel.

Les auteurs de [79] ont conçu des systèmes de surveillance et de contrôle à distance solaire PV avec la technologie GSM et LABVIEW pour surveiller les paramètres et d'autres facteurs. Le système était composé de capteurs connectés dans une topologie en étoile et d'une carte PIC16F877. Le champ réseau d'acquisition et de transmission de données est construit sur un réseau de capteurs câblés et connectés par la topologie en étoile, l'unité de traitement basée sur le protocole MCU RS232 et le module de transmission. Le réseau de capteurs disposé dans le système PV est composé de la température, de la radiation, de la tension de fonctionnement, du courant et de l'état de la batterie. Le courant de fonctionnement est mesuré avec un capteur à effet Hall. La tension du générateur photovoltaïque est mesurée avec des diviseurs de tension connectés à un amplificateur d'instrumentation de précision. La radiation est mesurée avec le capteur LDR et la température est mesurée avec le capteur LM35. Les principales tâches de la station PV intelligente sont de collecter les informations des capteurs et de les convertir en numérique avant de les envoyer via le module GSM sous forme de SMS à la station centrale de surveillance et de contrôle.

1.8.2.4 ZigBee

La technologie ZigBee a été développée en alliance avec l'IEEE et ZigBee sur la base des normes 802.15.4. La norme Zigbee fonctionne sur la spécification radio physique IEEE 802.15.4 et fonctionne dans des bandes sans licence, notamment 2,4 GHz, 900 MHz et 868 MHz. L'IEEE est responsable du développement de la couche physique, la couche de contrôle de stockage multimédia et de la couche de liaison de données, tandis que l'alliance ZigBee a pris en charge le développement du réseau logique et du mécanisme de cryptage de transmission de données et la spécification de l'interface d'application et l'interface de communication entre les protocoles du système. Les modules ZigBee sont alimentés par une faible puissance et peuvent être utilisés pour la surveillance à courte portée dans un réseau de capteurs sans fil. La portée de transmission de ZigBee peut varier de 40 m à l'intérieur à 120 m à l'extérieur. Le module ZigBee reçoit les données

transmises puis répond par un message de confirmation qui augmente considérablement la fiabilité de la transmission des données dans un système [80]. Bien que les modules ZigBee possèdent plusieurs avantages et un nombre important d'applications pratiques, ils présentent certains inconvénients en raison de la conception non conventionnelle du protocole, de la complexité, des contraintes de bande passante du canal de communication et des techniques de traitement du signal [81]. En plus de la faible portée et la perte de signal, ils existent certains autres problèmes liés à ZigBee comme les interférences de signal et la communication discrète. De nombreux travaux dans la bibliographie basés sur ZigBee dans le suivi des installations photovoltaïques, quelques-uns sont mentionnés ci-dessous.

Les auteurs dans [82] ont présenté un aperçu des appareils et modules ZigBee en ce qui concerne l'infrastructure de réseau intelligent et l'importance du comptage intelligent. Ils ont fourni des tests complets sur le terrain à l'aide d'outils open source avec les technologies ZigBee pour la surveillance des systèmes d'énergie photovoltaïque et éolienne. Quatre études de cas sont fournies pour aborder les méthodologies expérimentales les plus appropriées pour la mise en œuvre de la technologie ZigBee.

Dans [83], les auteurs ont développé un système de surveillance solaire PV basé sur ZigBee pour un bus de réseau local interconnecté (LIN) à un seul fil. La technologie de communication Zigbee intégrée dans le travail est basée sur un modem RF Zigbee ZL01 disponible auprès d'ATMEL. Le coordinateur de parc PV est basé sur la plateforme Arduino qui réalise un coordinateur WSN pour la communication sans fil. Dans la réalisation, les paramètres de performance I_{sc} et V_{oc} sont mesurés dans des conditions spécifiques d'insolation. Les mesures de température et d'humidité du panneau PV sont basées sur un capteur intelligent (SHT11) fabriqué par Sensirion Co. Une photodiode est également utilisée pour la mesure de la radiation.

La technologie sans fil basée sur ZigBee est également proposée dans [80] pour fournir des systèmes de surveillance en ligne pour les centrales photovoltaïques connectées au réseau. Les auteurs ont conçu un système d'acquisition de données basé sur ZigBee et le microcontrôleur PIC18F4553 pour la surveillance en ligne d'un système photovoltaïque connecté au réseau en utilisant une topologie point à point pour la transmission

de données. Le système proposé utilisant les modules ZigBee a été mis en œuvre avec une fonction Web. Les tensions de sortie du module PV sont mesurées à l'aide du transducteur de tension LV25-P de LEM. Le transducteur de courant LA25-NP est utilisé comme pour la mesure du courant. Deux unités de capteur de température LM35 sont utilisées pour mesurer l'ambiance et la température du panneau. Un pyranomètre de Li-Cor est placé sur la surface du panneau PV pour obtenir des données sur la radiation solaire.

Les auteurs de [84] ont suggéré une méthode utilisant un module ZigBee pour la surveillance en ligne des panneaux solaires photovoltaïques et le diagnostic des pannes. Le système comprend l'acquisition de données, la passerelle de données et le site Web du centre de surveillance PV. Le système acquiert la température, la radiation, la tension et le courant du groupe photovoltaïque. Un capteur à effet de Hall est utilisé pour collecter la tension et le courant. Le capteur de température DS18B20 est appliqué pour détecter la température dans le générateur photovoltaïque. Le capteur de radiation FZD-V1-2000 est utilisé pour mesurer la radiation. Le DSPTMS320F28335 est appliqué pour collecter des indicateurs de générateur photovoltaïque à l'aide de capteurs, puis les données sont transmises à la passerelle de données via le réseau ZigBee. La passerelle de données utilise le Raspberry Pi 3 comme processeur. Elle reçoit les données PV via le réseau ZigBee et utilise le module GPS pour obtenir l'emplacement géographique du générateur PV.

Dans [85], les auteurs ont proposé une conception de système de surveillance PV sans fil simple à faible coût, basé sur ZigBee, amélioré par un logiciel de pilotage pour enregistrer les paramètres du système PV. Un module XBee Pro S1 à faible coût avec un diviseur de tension est utilisé comme capteur de tension. Le capteur de courant ACS712 est utilisé comme module de courant pour mesurer le courant de sortie PV. Une résistance dépendante de la lumière (LDR) est utilisée pour la détection de la radiation. Le capteur LM35 a été utilisé comme capteur de température.

Dans [86], un circuit électronique avec microcontrôleur ATmega328P a été conçu pour surveiller la production d'énergie. Afin de transmettre les valeurs mesurées, des modules Xbee ZB basés sur un réseau de capteurs sans fil ont été utilisés. La détection de la tension a été faite à travers un diviseur de tension. Le capteur de température LM35 est également utilisé.

1.8.2.5 Autres

Un réseau de capteurs sans fil pour la surveillance solaire PV avec microcontrôleur PIC181F4620 et des modules MiWi de Microship a été conçu dans [87]. Ils ont présenté une méthode de surveillance des performances et du rendement de panneaux photovoltaïques (PV) individuels dans une centrale photovoltaïque à l'aide de réseaux de capteurs sans fil en utilisant des modules MiWi de Microship qui sont basés sur la norme IEEE 802.15.4.

Les auteurs dans [88] ont proposé un système qui pourrait réaliser la communication en réseau de plusieurs nœuds basés sur ZigBee et télécharger les données opérationnelles sur le serveur cloud via un réseau de communication 4G. Ils ont présenté la conception matérielle de ZigBee et du module 4G et le logiciel utilisateur au niveau de la couche application. De plus, la technologie de surveillance a été intégrée à un serveur cloud pour l'affichage et la surveillance des données extraites.

1.9 Conclusion

Les sources d'énergie naturelles sont devenues très importantes en tant qu'alternative aux sources d'énergie conventionnelles suite aux problèmes relatifs de ces derniers et aux besoins énergétiques. Le photovoltaïque est le principal contributeur des énergies renouvelables et il représente le futur de l'énergie dans le monde. Les notions de base des installations photovoltaïques ont été discutées et détaillées. Les facteurs affectant les performances de ces installations ont été extraits, qu'il s'agisse de facteurs liés au système lui-même ou de ceux liés à l'environnement. La tension et le courant sont les paramètres les plus importants. La température des cellules photovoltaïques a une influence directe sur les performances du système. Elle est directement liée à la radiation solaire. De plus, les facteurs météorologiques tels que la température ambiante, la radiation solaire et l'humidité relative ont une influence sur le rendement des panneaux solaires photovoltaïques. Aussi, le positionnement des panneaux solaires joue un rôle important dans le rendement des systèmes photovoltaïques. Les installations photovoltaïques à suivi solaire ont été

discutées. Ils améliorent considérablement le rendement du système. La détection de la position d'azimut et d'élévation des panneaux solaires est essentielle dans le système suivi par le soleil car elle est utilisée comme retour d'état pour le système de commande.

L'importance de la surveillance des installations photovoltaïques, devenue indispensable, est démontrée. Les recherches trouvées dans la littérature dans le domaine de la surveillance des systèmes PV à l'aide de différentes technologies ont été décrites. Il s'agit de technologies filaires classiques ou de technologies sans fil telles que Bluetooth, Wi-Fi, GSM et ZigBee. Les technologies sans fil à longue portée et à faible puissance seront abordées au chapitre 2.

Chapitre 2

Réseaux de capteurs sans fil et réseaux étendus de faible puissance

2.1 Introduction

Suite à la révolution des technologies de communication et l'évolution continue de la technologie sans fil, le sans-fil est devenu aujourd'hui l'une des technologies de communication les plus dominants, ouvrant une gamme de capacités à d'autres domaines [89]. D'autre part, les progrès des circuits intégrés de communication font du sans fil une alternative intéressante dans les applications de surveillance[90]. Grâce aux réseaux de capteurs sans fil (WSN) évoluant dans nos jours, les applications de surveillance à distance dans de vastes zones géographiques deviennent rentables et possibles [91]. Ils ont attiré l'attention du monde entier ces dernières années. Ils ont gagné une grande popularité au sein de la communauté de recherche car ils fournissent une infrastructure prometteuse pour de nombreuses applications de contrôle et de surveillance. Ils ont généralement peu ou pas d'infrastructures. Ces réseaux simples à faible coût permettent aux processus de surveillance d'être menés à distance, en temps réel et avec une intervention humaine minimale. De plus, ce type de capteurs se caractérise par leur petite taille, avec des ressources de traitement et de calcul limitées, et ils sont peu coûteux par rapport aux capteurs traditionnels. Un réseau de capteurs sans fil (WSN) offre de nombreux avantages

par rapport aux réseaux classiques câblés :

- C'est rentable, le coût de mise en œuvre d'un réseau sans fil est relativement moins cher que celui d'un réseau filaire [92].
- Il est facile à installer et facile à entretenir car la mise en place d'un réseau sans fil est plus rapide, plus facile et nécessite moins d'équipements.
- Il offre la mobilité et la flexibilité par rapport à un réseau filaire.
- Il peut être déployé à grande échelle [93].
- Il peut être surveillé et accessible à partir d'un emplacement distant.
- Il a généralement une topologie logicielle (étoile, arbre, anneau, maille), tandis que les réseaux câblés ont une topologie matérielle.
- Il se caractérise par une faible consommation d'énergie, qui est l'un des facteurs les plus importants dans une installation PV [94, 95].

Parmi les technologies les plus populaires qui sont couramment associées aux réseaux des capteurs sans fil, on peut citer les technologies de communication sans fil à courte portée mentionnées dans le chapitre 1 tels que le Bluetooth, ZigBee et le WIFI. La plupart de ces technologies se caractérisent par des capacités de communication à courte portée et à faible puissance, ce qui limite leur application à des scénarios avec des zones de couverture limitées. Dans ce cas également, une communication multi-sauts est souvent nécessaire pour garantir une bonne couverture tout en limitant le coût de déploiement. Aussi, les réseaux cellulaires (GSM) mentionnés dans le chapitre 1 ont en effet une empreinte établie dans le monde entier et sont capables de relever le défi d'une couverture omniprésente et transparente. D'autre part, les réseaux cellulaires n'ont pas été initialement conçus pour fournir des services de type machine à un nombre massif d'appareils.

Ces dernières années ont vu la diffusion rapide à grande échelle de nouvelles technologies basées sur un autre paradigme de réseau appelé réseau étendu de faible puissance (LPWAN), qui ont gagné une popularité massive et reçu beaucoup d'attention. Ces technologies se situent entre les technologies multi-sauts à courte portée et les systèmes cellulaires à large bande appropriés. Ils ont permis de nouveaux types de services tout en simplifiant les structures, le déploiement, la gestion et la maintenance du réseau [93]. De plus, leur architecture permet une couverture étendue, qui peut s'étendre à toute une

nation. Enfin, les modulations robustes utilisées par ces technologies les rendent adaptées pour connecter des terminaux situés dans des environnements difficiles où les technologies cellulaires peuvent échouer. Sigfox, LoRa et NB-IoT sont les trois principales technologies **LPWAN** qui se font concurrence pour le déploiement à grande échelle.

Ce chapitre sert à présenter les différentes technologies **LPWAN** les plus répandues afin de nous permettre de choisir la technologie la plus convenable pour la surveillance des systèmes **PV**. Il commence par une introduction de la composition des réseaux de capteurs sans fil (**WSN**) en discutant les différents composants et ainsi les techniques et les topologies utilisées dans ce domaine. Après, les principales **LPWANs** (Sigfox, LoRa et NB-IoT) vont être détaillées en discutant leurs principes de fonctionnement et en citant leurs avantages et inconvénients. Puis, une comparaison détaillée de ces **LPWAN** va être présentée en discutant les différents facteurs tels que la fiabilité, la portée, le débit et l'interférence des signaux. Finalement, une présentation des travaux trouvés dans la littérature concernant l'utilisation des **LPWAN** dans la surveillance des installations **PV**.

2.2 Réseaux de capteurs sans fil (WSN)

Les réseaux de capteurs sans fil (**WSN**) ont acquis une popularité considérable en raison de leur flexibilité dans la résolution de problèmes dans différents domaines d'application et ont le potentiel de changer nos vies de différentes manières. Ils ont été appliqués avec succès dans divers domaines d'application [96]. Ils peuvent être définis comme des réseaux sans fil autoconfigurés et sans infrastructure pour surveiller les conditions physiques ou environnementales, telles que la température, le son, les vibrations, la pression...etc. et pour transmettre en coopération leurs données via le réseau vers un emplacement principal où les données peuvent être observées et analysées.

Les **WSN** comprendront un grand nombre de petits capteurs sans fil alimentés par batterie. Ils utilisent normalement les normes **Wireless Personal Area Network (WPAN)** ou **Low Power Wide Area Network (LPWAN)** pour relayer les données de mesure à la station de base. Ces capteurs déployés de manière ad hoc, se coordonneront pour

surveiller les environnements physiques à des échelles temporelles et spatiales fines. Les dispositifs de détection sans fil répondent également aux requêtes envoyées par un site de contrôle pour exécuter des instructions spécifiques ou bien pour fournir des échantillons de détection.

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) permettent de nouvelles applications et nécessitent des paradigmes non conventionnels pour la conception de protocoles en raison de plusieurs contraintes. Les WSN ont de nombreuses applications allant de la surveillance militaire, à la surveillance industrielle, à la télémétrie médicale et à la surveillance environnementale [97]. La figure 2.1 présente les applications des WSNs.

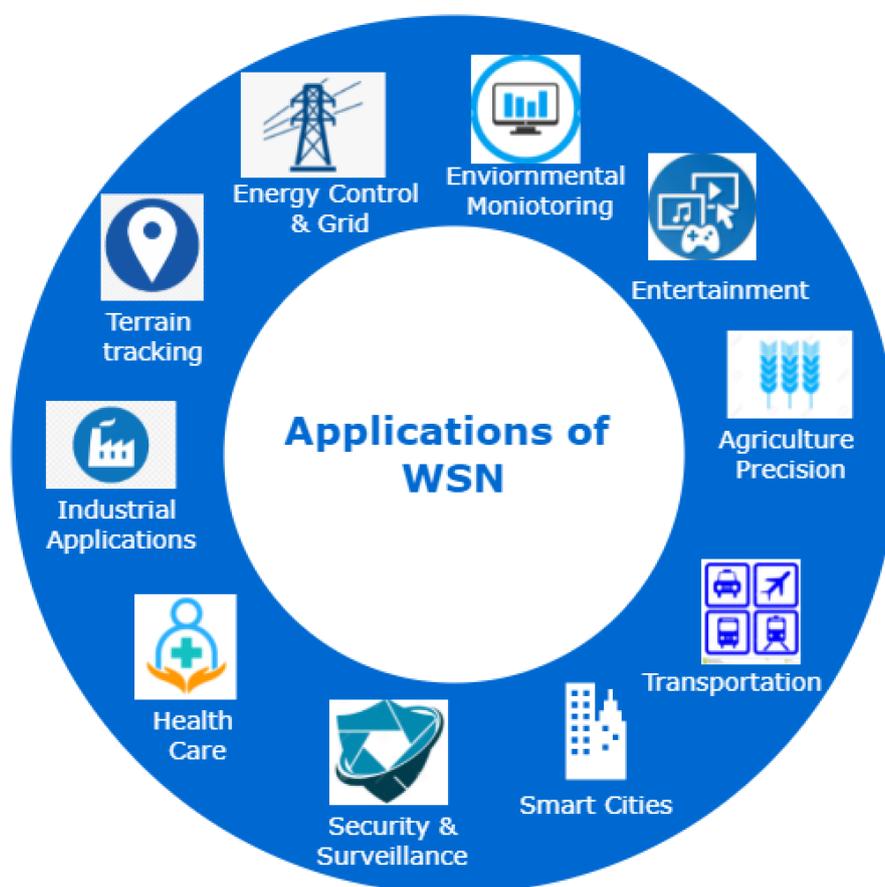


FIGURE 2.1 – Applications des réseaux de capteurs sans fil (WSN) [98].

Néanmoins, l'utilisation de capteurs WSN pour des applications industrielles nécessite l'accomplissement d'un ensemble de contraintes strictes. Par exemple, la surveillance et le contrôle d'un processus spécifique exigent le développement d'architectures, de mécanismes et d'algorithmes particuliers de réseau qui garantissent une qualité

de communication élevée et la fiabilité du système. Dans le domaine de recherche, il existe différents défis à relever en fonction de la localisation, de l'accès aux canaux, de la connectivité, de la programmation, de la sécurité, de l'efficacité énergétique, de la qualité de service, des problèmes de couverture, de la modélisation théorique, etc. Parmi ceux-ci, les problèmes d'efficacité énergétique et de couverture sont considérés comme les tâches les plus difficiles des WSN [99]. On peut dire que la conception d'un WSN est basée sur trois aspects principaux : Le choix de la technologie de capteur, le choix de la technologie sans fil et le choix de l'unité de traitement et de calcul (microcontrôleur, microprocesseur, etc.) comme il est illustré dans la figure 2.2.



FIGURE 2.2 – Aspects à considérer dans la conception d'un réseau WSN.

2.2.1 Composition d'un WSN

Un réseau [WSN](#) typique se compose de deux composants principaux, d'un certain nombre de nœuds de capteurs et d'une ou plusieurs stations de base travaillant

ensemble pour surveiller une région afin d'obtenir des données sur l'environnement. Ces nœuds de capteurs peuvent détecter, mesurer et collecter des informations de l'environnement et transmettre les données détectées à l'utilisateur. Les nœuds de capteurs sont des dispositifs basse consommation équipés d'un ou plusieurs capteurs, d'un processeur (microcontrôleur), d'une mémoire, d'une alimentation, d'une radio et d'un actionneur[100]. Une station de base est responsable de la capture et de l'accès à toutes les données de mesure des nœuds, et peut parfois fournir des services de passerelle pour permettre la gestion à distance des données [97].

2.2.1.1 Nœud de capteur sans fil

Un nœud est un dispositif qui est normalement équipé de capacités de détection, de traitement et de communication, et qui est chargé de mesurer les paramètres associés à une application particulière. Les nœuds de capteurs sont conçus pour construire une solution flexible et éviter un câblage complexe. Un nœud de capteur est composé de quatre composants de base tels qu'une unité de détection, une unité de traitement, une unité d'émetteur-récepteur et une unité d'alimentation. Il a également des composants supplémentaires dépendants de l'application. Un schéma fonctionnel d'un nœud de capteur sans fil est montré dans la figure 2.3.

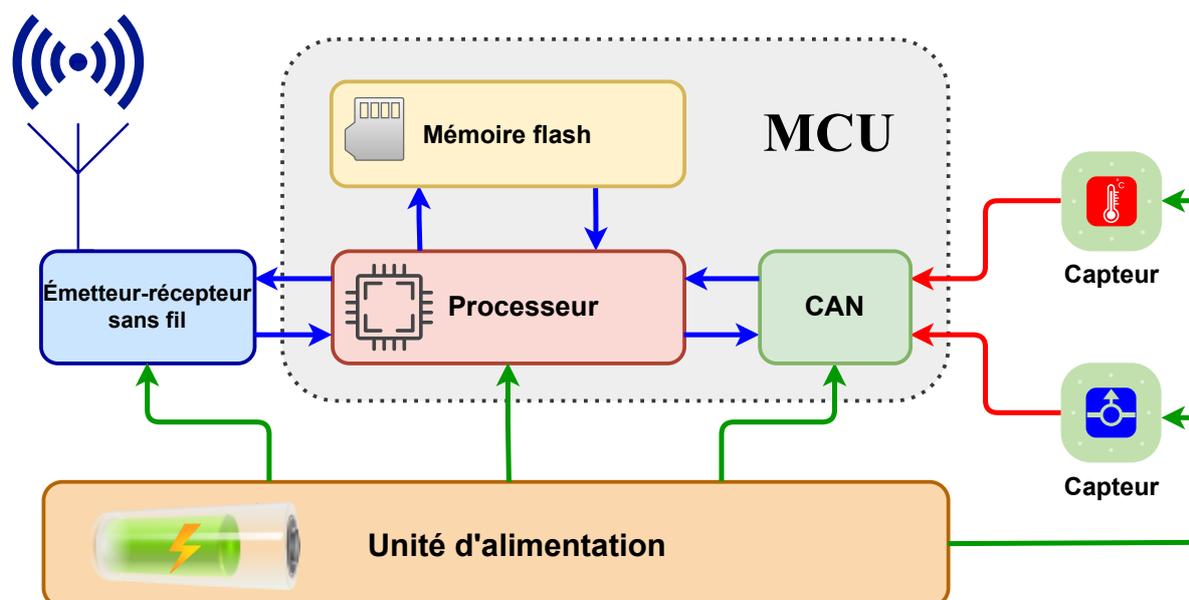


FIGURE 2.3 – Schéma fonctionnel d'un nœud de capteur sans fil.

Le capteur génère un signal analogique et il est converti en un signal numérique par ADC, puis transmis à l'unité de traitement. L'unité de traitement est généralement associée à une petite unité de stockage et elle peut gérer les procédures qui font collaborer le nœud capteur avec les autres nœuds pour réaliser les tâches de détection assignées. Le microprocesseur a plusieurs fonctions dont :

- La gestion de la collecte de données à partir des capteurs.
- L'élaboration des fonctions de gestion de l'alimentation.
- Interfacer les données du capteur avec la couche radio physique.
- Gérer le protocole du réseau radio.

L'unité d'émission-réception est l'un des composants les plus importants d'un nœud de capteurs. Son rôle est de connecter le nœud au réseau sachant que le travail principal du nœud de capteur est de détecter les événements, de terminer le traitement des données et de transmettre les informations [101]. Les unités de puissance peuvent être supportées par une unité de récupération de puissance telle que des cellules solaires.

L'approche de conception modulaire fournit une plate-forme flexible et polyvalente pour répondre aux besoins d'une grande variété d'applications. Par exemple, selon les capteurs à déployer, le bloc de conditionnement du signal peut être reprogrammé ou remplacé. Cela permet d'utiliser une grande variété de capteurs différents avec le nœud de détection sans fil. De même, la liaison radio peut être permutée en fonction des exigences de portée sans fil d'une application donnée et du besoin de communications bidirectionnelles.

Plusieurs questions ont été abordées dans la conception des nœuds capteurs, concernant l'efficacité énergétique, la fiabilité et la réduction de la latence. De plus, la définition d'un mode de fonctionnement économique en énergie est essentielle pour l'application cible. La minimisation de la puissance consommée par le système est l'aspect clé de tout nœud de détection sans fil. Habituellement, le sous-système radio nécessite la plus grande quantité d'énergie.

Pour cela, les nœuds capteurs collectent les données périodiquement mais ils alternent entre des cycles de travail (lorsque le nœud est éveillé) et des cycles de faible consommation d'énergie (lorsque le nœud est en veille). Par conséquent, les données

sont envoyées sur le réseau radio uniquement lorsque cela est nécessaire. Cela permet aux nœuds de capteurs de maintenir la consommation d'énergie au minimum, en étendant leur fonctionnalité pendant une période de temps raisonnable. Un algorithme doit être chargé dans le nœud pour déterminer quand envoyer des données sur la base de l'événement détecté. De plus, c'est important de minimiser la puissance consommée par le capteur lui-même. Par conséquent, le matériel doit être conçu pour permettre au microprocesseur de contrôler judicieusement l'alimentation de la radio, du capteur et du conditionneur de signal du capteur [102].

2.2.1.2 Station de base

La station de base est au niveau supérieur du WSN hiérarchique. Son rôle est d'assurer le lien de communication entre le réseau de capteurs et l'utilisateur final. Elle contient les antennes et autres équipements nécessaires pour permettre aux appareils de communication sans fil de se connecter au réseau. Les stations de base sont un ou plusieurs composants des WSNs avec plus de ressources énergétiques, de calcul et de communication. La station de base agit comme une passerelle entre les nœuds capteurs et l'utilisateur final où ils transmettent les informations du WSN à un serveur. A titre d'exemple, un schéma fonctionnel d'une station de base est montré dans la figure 2.3.

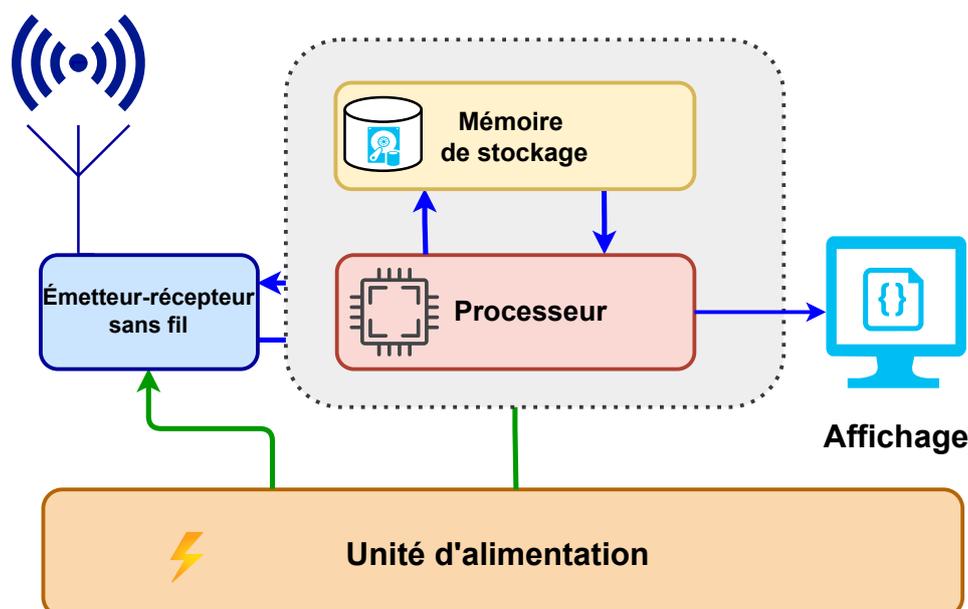


FIGURE 2.4 – Schéma fonctionnel d'une station de base WSN.

La station de base est la partie la plus critique d'un réseau de capteurs car toutes les données pertinentes collectées par les nœuds de capteurs lui sont dirigées où elles sont agrégées et traitées. Contrairement aux nœuds de capteurs, la station de base possède beaucoup plus de puissance de calcul, une plus grande mémoire et est souvent connectée à une meilleure source d'énergie que les batteries. On peut considérer la station de base comme un point d'entrée vers le WSN où l'objectif principal de la station de base est de collecter les données détectées à partir des nœuds de capteurs dans le WSN. D'autres objectifs importants que la station de base doit accomplir peuvent être la visualisation et l'analyse de données. Dans certains cas, la station de base gère également le routage du réseau de capteurs ou la configuration des nœuds. En outre, la station de base peut transmettre les données collectées à une application serveur distante où une analyse beaucoup plus large des données provenant de nombreux WSN peut être effectuée [103].

2.2.2 Topologies utilisées dans les WSN

Avant que WSN ne soit véritablement établi en tant qu'infrastructure réseau, il est essentiel que ces capteurs intelligents et leur communication offrent des performances et une fiabilité acceptable. Dans les WSNs, la topologie joue un rôle essentiel dans la minimisation de diverses contraintes, telles que l'énergie limitée, la latence, la crise des ressources de calcul et la qualité de la communication. Par exemple, la consommation d'énergie est proportionnelle au nombre de paquets envoyés ou reçus. Le coût de réception dépend de la taille des paquets, tandis que l'énergie de transmission dépend de la distance entre les nœuds. D'autre part la topologie définit intrinsèquement le type de chemins de routage, indique s'il faut utiliser la diffusion ou la mono-diffusion, détermine les tailles et les types de paquets et autres frais généraux, le choix de la bonne topologie permet de réduire la quantité de communication nécessaire pour un problème particulier et donc d'économiser de l'énergie. Aussi, la topologie peut également réduire les interférences radio, réduisant ainsi le temps d'attente des capteurs pour transmettre les données. De plus, la topologie facilite l'agrégation de données, ce qui réduit considérablement la quantité de cycles de traitement et d'énergie, donnant ainsi une durée de vie plus longue au réseau [104].

Avec un nombre considérable de nœuds de capteurs, leur déploiement sans surveillance et leur environnement hostile excluent très souvent le recours à la configuration physique ou à la topologie physique. Il est donc souvent nécessaire de dépendre de la topologie logique. Les topologies logiques régissent la façon dont un nœud de capteurs communique avec d'autres nœuds du réseau. De cette façon, les topologies logiques jouent un rôle vital pour les réseaux de capteurs à ressources limitées. La structure d'un réseau de capteurs sans fil comprend différentes topologies pour les réseaux de communication radio. Chaque topologie a ses propres avantages et inconvénients dans des conditions opérationnelles spécifiques tels que les besoins énergétiques, l'évolutivité du réseau, la fiabilité des communications et les contraintes environnementales [105]. Une brève discussion des topologies de réseaux qui s'appliquent aux réseaux de capteurs sans fil est présentée ci-dessous.

2.2.2.1 Réseau en étoile (point unique à multipoint)

Les réseaux en étoile sont l'une des formes de topologies de communication les plus simples et les plus courantes. La topologie en étoile organise l'ensemble des nœuds périphériques autour du hub central, qui est logiquement au centre du réseau, via des liens sans fil directs. Le hub central peut être soit la station de base elle-même, soit un nœud passerelle qui est en communication directe avec la station de base. C'est une topologie de communication où une seule station de base peut envoyer et/ou recevoir un message à un certain nombre de nœuds distants. Les nœuds distants ne sont pas autorisés à s'envoyer des messages. L'avantage de ce type de réseau pour les réseaux de capteurs sans fil comprend la simplicité, la capacité à maintenir la consommation d'énergie du nœud distant au minimum. Il permet également des communications à faible latence entre le nœud distant et la station de base. L'inconvénient d'un tel réseau est que la station de base doit être à portée de transmission radio de tous les nœuds individuels et n'est pas aussi robuste que d'autres réseaux en raison de sa dépendance à un seul nœud pour gérer le réseau. La topologie du réseau en étoile typique pour un WSN est montrée dans la figure 2.5.

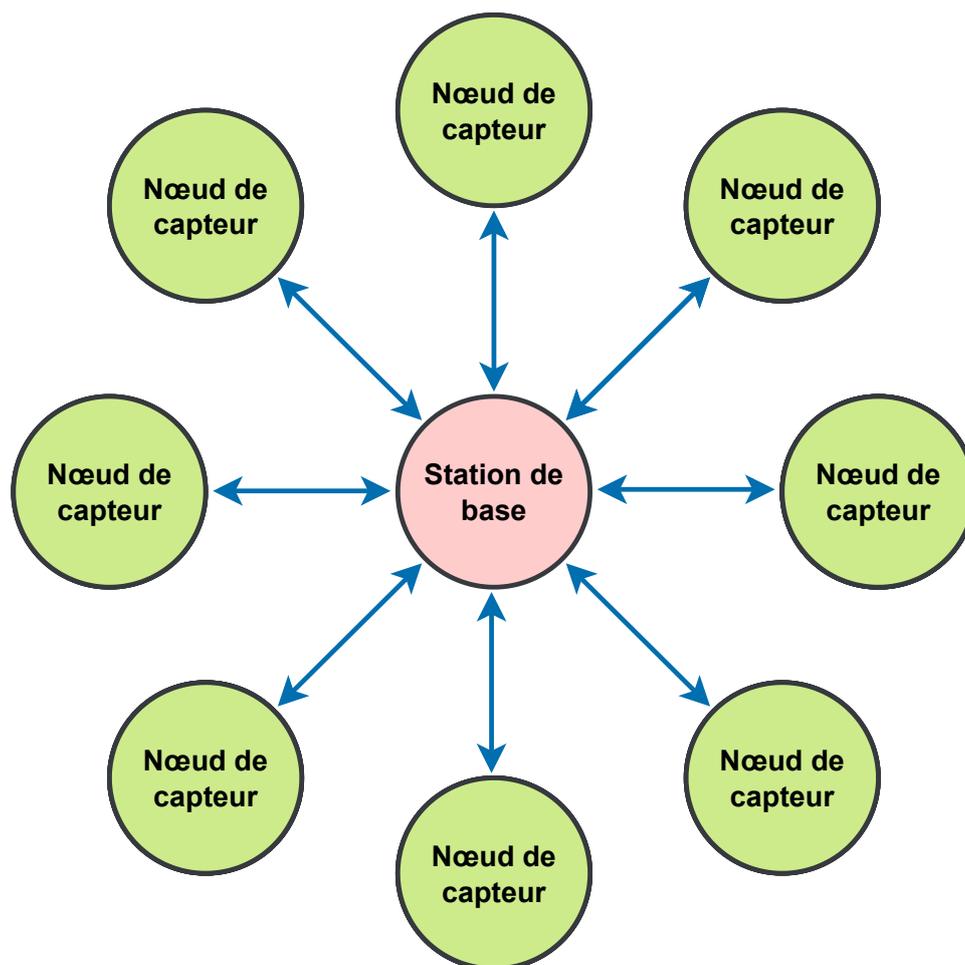


FIGURE 2.5 – Topologie réseau en étoile typique pour WSN.

2.2.2.2 Réseau maillé

Un réseau maillé permet de transmettre des données d'un nœud à un autre nœud du réseau qui se trouve dans sa portée de transmission radio. Les réseaux maillés sont des réseaux multi-sauts dans lesquels chaque nœud de capteur non seulement envoie et reçoit son propre message, mais fonctionne également comme un routeur pour relayer les messages pour ses voisins via le réseau. C'est-à-dire que si un nœud veut envoyer un message à un autre nœud qui est hors de portée des communications radio, il peut utiliser un nœud intermédiaire pour transmettre le message au nœud souhaité. La topologie maillée facilite plusieurs voies de communication entre les nœuds de capteurs et la station de base. En outre, elle présente l'avantage de la redondance et de l'évolutivité. Si un nœud individuel tombe en panne, un nœud distant peut toujours communiquer avec n'importe

quel autre nœud de sa portée, qui à son tour peut transmettre le message à l'emplacement souhaité. De plus, la portée du réseau n'est pas nécessairement limitée par la portée entre les nœuds uniques ; il peut simplement être étendu en ajoutant plus de nœuds au système. L'inconvénient de ce type de réseau réside dans la consommation d'énergie pour les nœuds qui implémentent les communications multi-sauts sont généralement plus élevées que pour les nœuds qui n'ont pas cette capacité, limitant souvent la durée de vie de la batterie. De plus, à mesure que le nombre de sauts de communication vers une destination augmente, le temps de livraison du message augmente également, en particulier si un fonctionnement à faible puissance des nœuds est une exigence. La topologie d'un réseau maillé typique pour un WSN est montrée dans la figure 2.6.

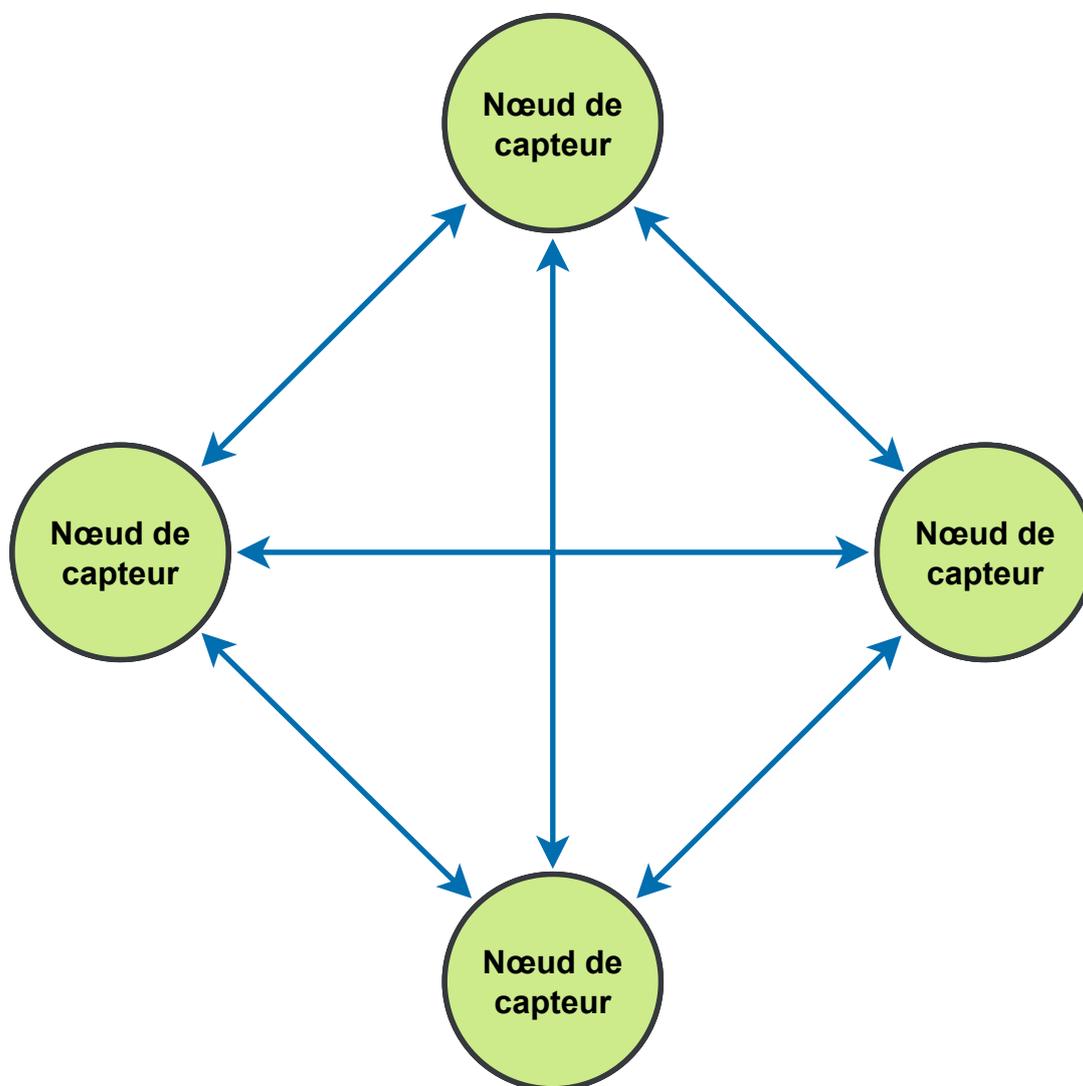


FIGURE 2.6 – Topologie maillé en étoile typique pour WSN.

2.2.2.3 Réseau maillé hybride en étoile

Un hybride entre le réseau en étoile et le réseau maillé, fournit un réseau de communication robuste et polyvalent, tout en maintenant la capacité de maintenir la consommation d'énergie des nœuds de capteurs sans fil à un minimum. Dans cette topologie de réseau, les nœuds de capteur avec la plus faible puissance ne sont pas activés avec la capacité de transférer des messages. Cela permet de maintenir une consommation électrique minimale. Cependant, d'autres nœuds du réseau sont activés avec une capacité multi-sauts, ce qui leur permet de transférer des messages des nœuds à faible puissance vers d'autres nœuds du réseau. En règle générale, les nœuds dotés de la capacité multi-sauts sont de plus grande puissance et, si possible, sont souvent branchés sur la ligne d'alimentation électrique. La topologie d'un réseau maillé hybride en étoile pour un WSN est montrée dans la figure 2.7.

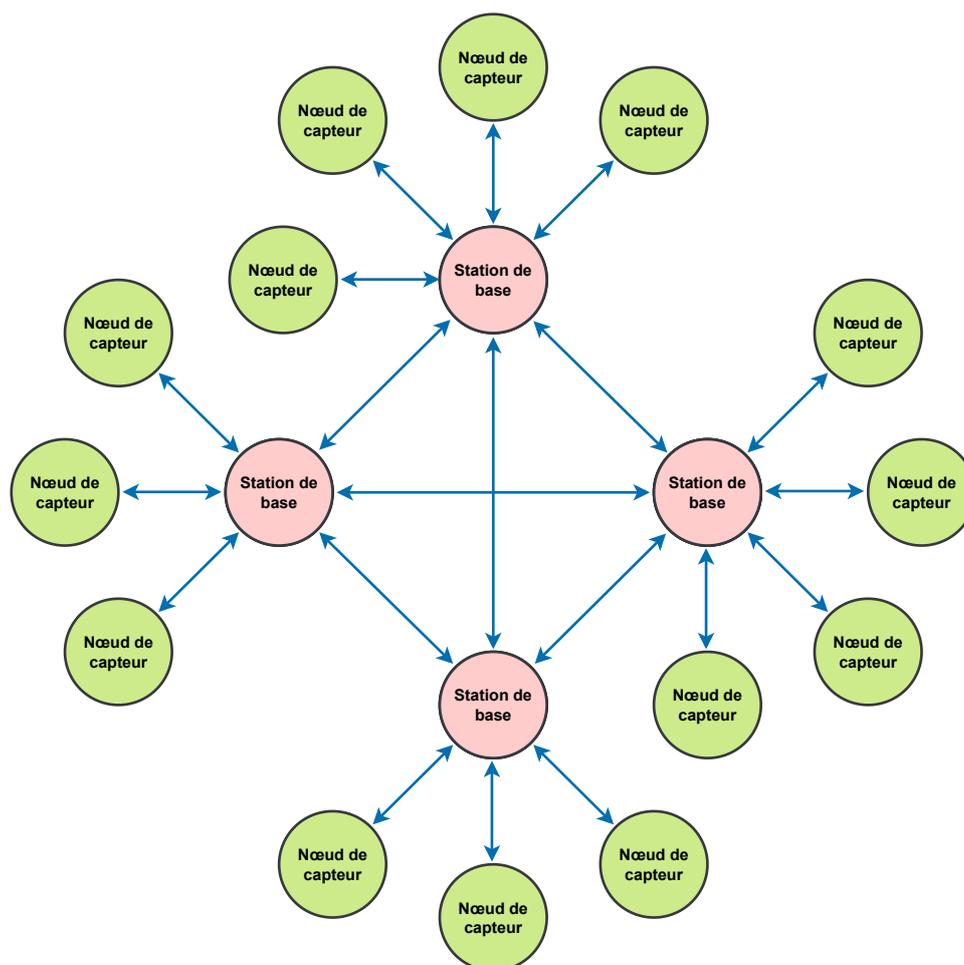


FIGURE 2.7 – Topologie d'un réseau maillé hybride en étoile pour WSN.

2.3 Réseaux étendus à faible puissance (LPWANs)

Précédemment, deux approches principales étaient utilisées dans les réseaux de capteurs sans fil. L'une basée sur des réseaux maillés multi-sauts, utilisant des technologies à courte portée et un spectre sans licence (WiFi, Bluetooth, ZigBee), et l'autre basée sur des technologies de réseau cellulaire à longue portée en utilisant les bandes de fréquences sous licence correspondantes. Les technologies radio à courte portée largement utilisées ne sont pas adaptées aux scénarios qui nécessitent une transmission à longue portée. D'autre part, les solutions basées sur les communications cellulaires (2G, 3G et 4G) peuvent fournir une plus grande couverture, mais elles consomment une énergie excessive de l'appareil.

Récemment, un nouveau type de réseaux est impliqué dans les applications de réseaux de capteurs sans fil connus sous le nom de réseaux étendus à faible puissance (LPWAN) fournissant une solution très appropriée pour ce type de couverture. Ces réseaux utilisent une technologie de couche physique qui échange le débit contre la portée, offrant une large couverture avec une efficacité énergétique au prix d'un faible débit de données. Plusieurs technologies LPWAN sont déjà présentes sur le marché, mais le SigFox, NB-IoT et LoRa sont les plus répandus. la place de la technologie LPWAN en termes de portée et de bande passante au sein des technologies sans fil est illustrée sur la figure 2.8.

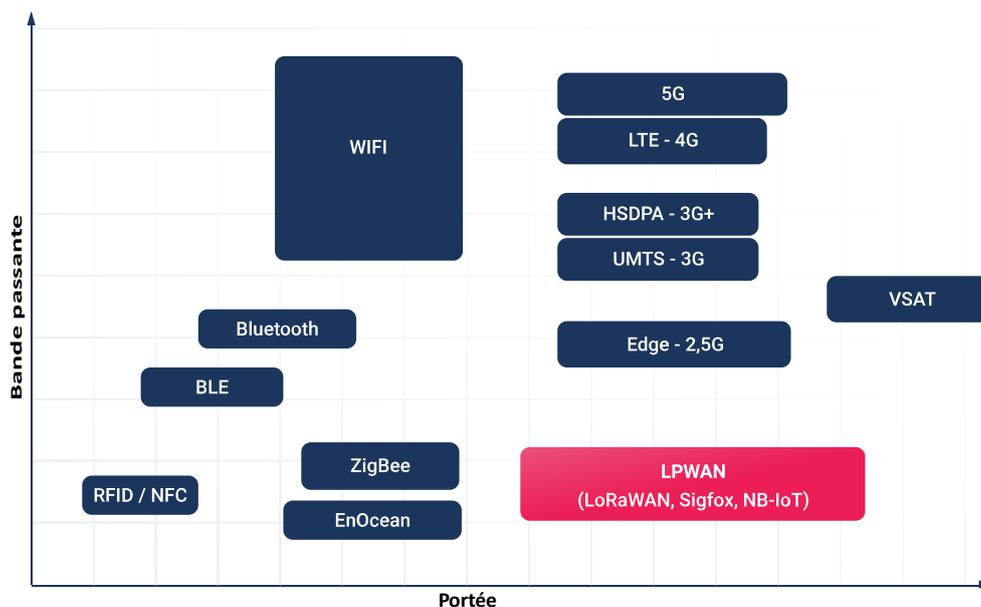


FIGURE 2.8 – Technologies sans fil en terme de portée et de bande passante.

Les principales caractéristiques des technologies **LPWAN** requises pour soutenir avec succès le déploiement des réseaux de capteurs sans fil sont :

- Longue portée de communication.
- Faible consommation d'énergie.
- Faible débit de données.
- Faible coût de l'appareil et du déploiement.
- Topologie et déploiement de réseaux simplifiés.
- Couverture complète.
- Évolutivité du réseau pour la mise à niveau de capacité.

Dans la plupart des technologies **LPWAN**, deux principales techniques alternatives de communication, la bande ultra étroite connue par le nom **UNB** (**Ultra Narrow Band**) et le spectre étalé connu par **SS** (**Spread Spectrum**) sont utilisées au niveau de la couche physique. Cependant, le plus grand dilemme est la sélection de la technique la plus appropriée parmi eux pour le **LPWAN**. Elles répondent tous deux aux exigences de la couverture longue portée avec une faible consommation d'énergie pour les systèmes industriels. Cependant, Elles sont des techniques assez différentes, y compris la différence la plus évidente de l'utilisation de la bande ultra étroite et de la bande large respectivement. Les deux ont leurs propres avantages et limitations pour la connectivité IoT/M2M. Ci-dessous une description brève de chacune de ces techniques de communication.

2.3.1 Techniques de communication utilisées dans les LPWANs

2.3.1.1 Technique de bande ultra étroite (UNB)

La technique **UNB** est utilisée pour transmettre un signal avec une très petite bande passante et principalement adaptée au petit trafic de liaison montante. La bande ultra étroite utilise un canal à spectre ultra étroit (<1 KHz) pour établir une liaison ultra longue distance entre l'émetteur et le récepteur. Elle offre un excellent bilan de liaison en raison de la concentration de puissance dans une bande de fréquences étroite et d'un faible bruit de réception dans la bande (les filtres de réception étroits éliminent la majeure partie du bruit) [106]. La figure 2.9 montre une présentation de signaux **UNB**.

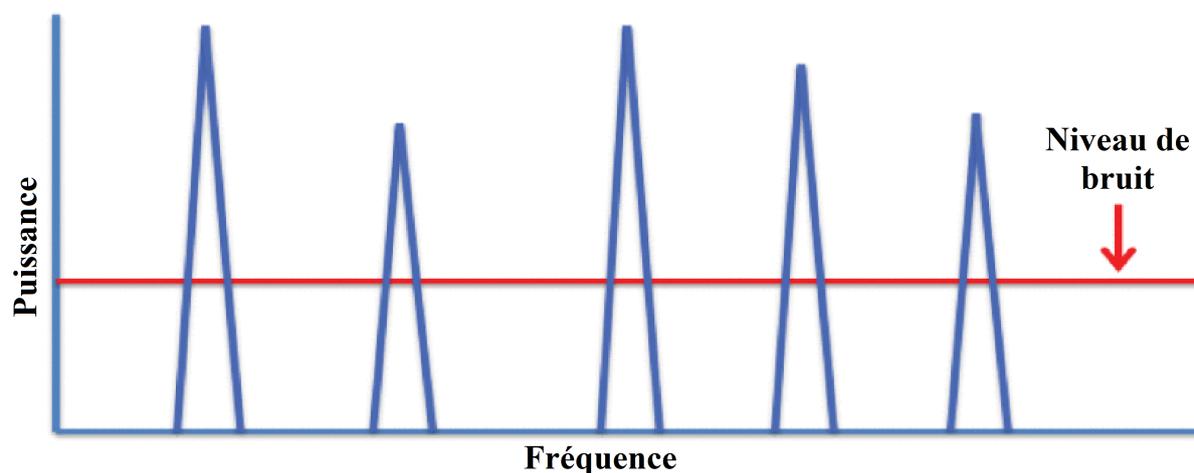


FIGURE 2.9 – Signaux à bande ultra étroite (UNB) [107].

Par conséquent, la technique UNB permet une couverture longue portée avec une longue durée de vie de la batterie, ce qui en fait l'une des techniques LPWAN la plus appropriée pour les WSNs. De plus, sa densité spectrale de puissance ultra-élevée (DSP) crée une endurance contre les interférences et le brouillage, ce qui permet une coexistence amicale de l'UNB sur des bandes de fréquences partagées [106, 108]. La figure 2.10 montre l'impact des interférences sur les signaux UNB.

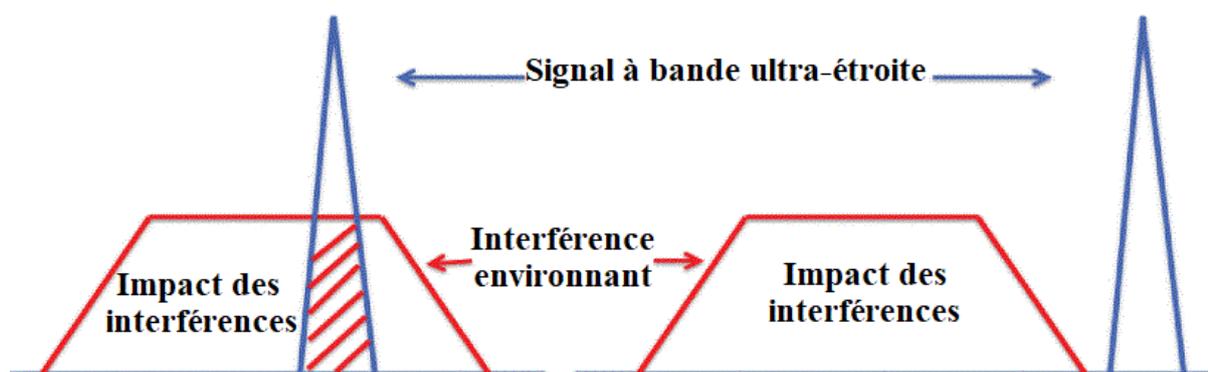


FIGURE 2.10 – Impact des interférences sur les signaux UNB [107].

Nombreuses approches de modulation traditionnelles nécessitent la prise en compte des bandes latérales supérieure et inférieure sur toute la fréquence porteuse. UNB est une approche modifiée pour la transmission de données sans trop compter sur ses bandes latérales [109]. Cette ancienne technique UNB a été relancée pour les communications IoT et Machine To Machine (M2M) en raison des progrès de la technologie

de traitement du signal. Dans UNB, un signal est modulé à l'aide d'une modulation de déphasage abrupte.

2.3.1.2 Technique de spectre étalé (SS)

Spread Spectrum (SS) est une technique alternative à UNB pour les systèmes industriels, qui utilise une large bande (signaux de type bruit) pour transmettre les données et étaler le signal de données sur une bande passante beaucoup plus grande que la bande passante d'un signal réel de données. Elle utilise une bande passante supplémentaire par rapport au signal réel, bien qu'elle préserve la même puissance de signal. Elle n'a pas de pic perceptible dans le spectre, qui ressemble à du bruit, et par conséquent, il est difficile à brouiller ou à intercepter [89]. La figure 2.11 montre une présentation de signaux SS.

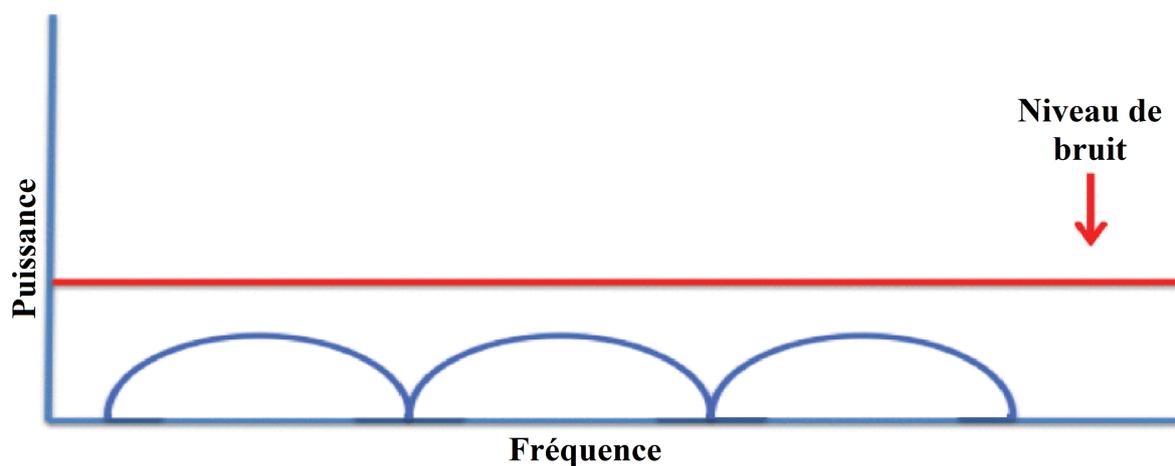


FIGURE 2.11 – Signaux à spectre étalé SS [107].

Contrairement à la bande étroite, où les données sont transmises via une seule bande RF, les données sont transmises en changeant leurs fréquences porteuses alternativement ou le modèle de données en continu dans la technique SS. Les émetteurs SS fonctionnent au même niveau de puissance d'émission que les émetteurs à bande étroite. Cela est dû au fait que les signaux SS sont larges. Par conséquent, ils peuvent transmettre à une densité de puissance spectrale inférieure (W/Hz) par rapport aux émetteurs à bande étroite. C'est l'un des plus grands avantages de SS et de sa popularité pour

les appareils à faible consommation. De plus, les signaux SS sont difficiles à détecter, à capter, à démoduler et à bloquer.

De plus, la technique SS offre plusieurs avantages dont la résistance aux interférences et au brouillage. La plupart des signaux d'interférence (bande étroite ou large bande) et de brouillage sont rejetés car ils n'ont pas la clé SS utilisée dans le processus de désétalement au niveau du récepteur [110]. Tous les SS ont un seuil/limite de tolérance aux interférences et les arrêts de communication au-delà de cette limite. Cette limite de seuil est déterminée par le gain de traitement SS qui est le rapport de la bande passante RF à la bande passante d'information [111]. La figure 2.12 montre l'impact des interférences sur les signaux SS.

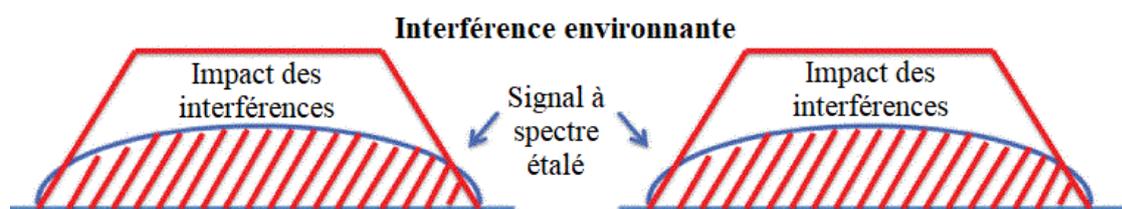


FIGURE 2.12 – Impact des interférences sur les signaux SS [107].

La technique SS est l'une des plus anciennes techniques de communication utilisées dans les applications militaires pour les communications sécurisées en étalant le signal d'origine sur une large bande de fréquences. Elle peut être classée en plusieurs catégories telles que [Direct-Sequence Spread Spectrum \(DSSS\)](#), [Frequency-Hopping Spread Spectrum \(FHSS\)](#) et [CSS](#).

2.3.2 Technologies LPWAN

Les réseaux étendus à faible puissance peuvent être réalisés en mettant en œuvre des technologies émergentes telles que Sigfox, LoRa, NB-IoT ([NarrowBand Internet of Things](#)) qui sont les LPWANs les plus répandus. NB-IoT est émergé dans la bande passante des fréquences sous licence. Par ailleurs, Sigfox et LoRa sont émergés dans la bande

passante des fréquences sans licence [112]. Cette section possède une description de chacune des technologies mentionnées ci-dessus.

2.3.2.1 SigFox

SigFox est le premier réseau WSN et IoT au monde dédié aux applications M2M et IoT à faible bande passante [113]. Sa technologie brevetée UNB utilise des bandes de fréquences sans licence pour transmettre des données sur un spectre très étroit [97]. SigFox offre une couverture mondiale (depuis septembre 2018, 45 pays et régions couverts) au moyen d'un réseau d'opérateur unique, avec des déploiements dans différents pays effectués par un certain nombre de sociétés membres [114]. Cette technologie utilise la modulation BPSK (Binary Phase-shift keying) dans une bande ultra-étroite (UNB) de 100 Hz à un débit de données maximal de 100 bps pour que les terminaux soient connectés aux stations de base [112].

Sigfox a également abordé un système de communication basé sur un programme où toute la complexité du réseau et de l'informatique est supervisée dans le cloud, plutôt que sur les appareils. Dans l'ensemble, il réduit radicalement la consommation d'énergie et les coûts des appareils associés à un faible niveau de commotion. Sigfox s'étend au sein des groupes ISM (Industrial, Scientific and Medical band) sous-GHz sans licence (par exemple, 868 MHz en Europe, 915 MHz en Amérique du Nord et 433 MHz en Asie) [115].

2.3.2.2 NB-IoT

Le NB-IoT est proposé par les entreprises de télécommunications comme une alternative de communication IoT aux technologies LPWAN sous-GHz. Il a été présenté par 3GPP dans le but d'observer et d'acquérir des données ciblant des applications de débits de données limités et fonctionne de manière transparente dans les fréquences autorisées sur les réseaux GSM et LTE. Il ne fonctionne pas dans le cadre de la construction LTE autorisée, mais peut à la place fonctionner dans une bande passante de 200 kHz, dans le spectre qui utilise le GSM ou en utilisant les ressources fournies par les stations de base LTE [116]. Le réseau NB-IoT se compose d'un terminal, d'une station de base, d'un ré-

seau central, d'une plate-forme cloud et d'un centre d'affaires[116]. Il offre de nombreuses fonctionnalités attrayantes telles qu'une faible consommation d'énergie et une qualité de service (QoS). Et comme NB-IoT fonctionne dans un spectre sous licence, il offre une plus grande fiabilité du trafic par rapport aux autres technologies inférieures au GHz [114].

2.3.2.3 LoRa

LoRa (Long Range) est une technique de modulation à spectre étalé dérivée de la technologie CSS [117]. Cette technologie brevetée de communication numérique sans fil de données, développée par Cycleo de Grenoble en France, puis acquise par une société appelée Semtech en 2012. La technologie LoRa est une plate-forme sans fil à longue portée et à faible consommation d'énergie[117]. Il permet des applications intelligentes qui résolvent des défis telle que la gestion de l'énergie [118]. Il s'agit d'une implémentation de la couche physique et est indépendante des implémentations des couches supérieures. Cela permet à LoRa de coexister et d'interopérer avec les architectures réseau existantes [119].

LoRa est l'ADN de l'IoT, interfaçant les capteurs et permettant la communication en temps réel d'informations et d'analyses qui seront utilisées pour améliorer l'efficacité et la productivité [120]. Plusieurs systèmes sans fil traditionnels utilisent la modulation FSK comme couche physique car il s'agit d'une modulation efficace pour obtenir une faible puissance, bien qu'elle augmente considérablement la portée de communication [121]. Par rapport aux technologies concurrentes, LoRa est la technologie la plus largement utilisée dans les applications M2M/IoT [113].

2.3.3 Comparaison des technologies LPWANs

Selon le type de système à surveiller, la construction d'un bon système de surveillance sans fil nécessite une bonne sélection de la technologie la plus appropriée. Cette section présente une comparaison entre les trois technologies LPWAN les plus populaires et les plus courantes, SigFox, NB-IoT et LoRa. Nombreuses comparaisons de ces technologies publiées à ce jour reposent donc sur des aspects théoriques tels que des documents

de spécification, pratique ou des mesures en laboratoire. Le résumé montré dans la table 2.1 présente une comparaison entre ces trois technologies.

TABLE 2.1 – Comparaison des LPWANs

Caractéristique	SigFox	LoRa	NB-IoT
Modulation	BPSK	CSS	QPSK
Bande passante	100 Hz	125 kHz et plus	200 kHz
Spectre	ISM Sub GHz	ISM Sub GHz	In-Band GSM
Débit de données	100 bps	0.29-50 kbps	20-250 kbps
Bidirectionnel	Half-Duplex	Half-duplex	Half/Full-duplex
Longueur de charge utile maximale	12 octets (UL), 8 octets (DL)	243 octets	1600 octets
Portée	10 km urbain, 40 km rurale	5 km urbain, 20km rurale	1km urbain, 10 km rurale
Immunité aux interférences	Très haute	Très haut	Faible
Consommation de courant Rx	20 ma	10 ma	46 ma
Consommation de courant Tx	45 ma	22 ma	80 ma
Autonomie de batterie	10 ans	10 ans	5 ans
Cryptage	Non	AES128	3GPP (128-256)
Débit de données adaptatif	Non	Oui	Non
Autoriser les réseaux privés	/	Oui	Non
Licence	Non	Non	Oui

En outre, les auteurs de [112] font une étude comparative des technologies LPWAN pour le déploiement à grande échelle de l'IoT. La figure 2.13 montre les avantages respectifs de ces technologies.

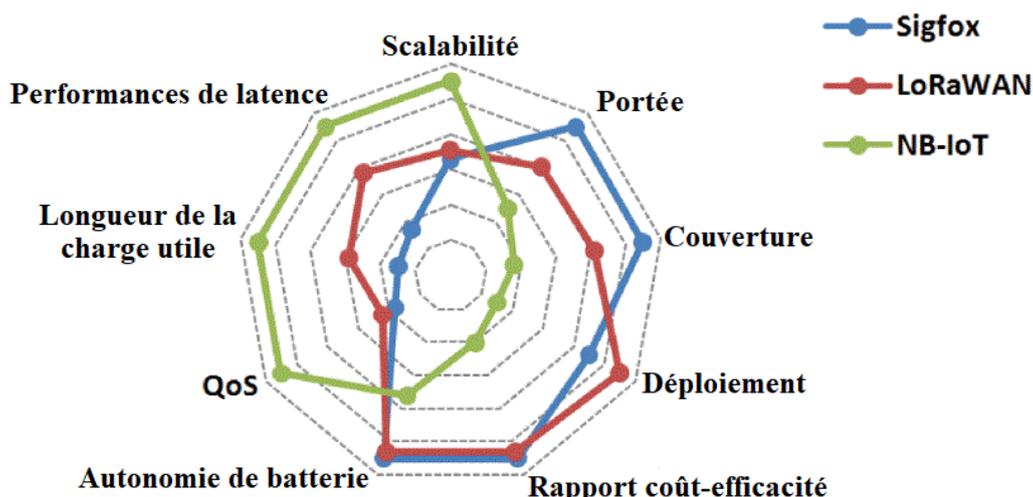


FIGURE 2.13 – Avantages respectifs de Sigfox, LoRa et NB-IoT [112].

En suivant les comparaisons données dans le tableau 2.1 et la figure 2.13 respec-

tivement, voir que LoRa bat le SigFox dans tous les aspects sauf la portée et la couverture réseau où la différence n'est pas assez grande. Malgré que l'évaluation de la capacité a montré que l'UNB offre une capacité légèrement meilleure que SS en raison de l'exigence de données redondantes ajoutées dans le codage SS. Ce dernier peut offrir de meilleures fonctionnalités de sécurité, de vitesse et de précision.

NB-IoT est une norme industrielle 5G ouverte basée sur LTE, tandis que LoRa et SigFox sont des technologies propriétaires développées par des entreprises individuelles. En outre, NB-IoT utilise des bandes de fréquences LTE sous licence et, contrairement SigFox qui est toujours exploitée par des fournisseurs de réseaux sans fil. Dans la bande ISM sans licence, le bruit et les interférences réduisent la portée, en particulier dans les environnements urbains [113]. Cela justifie les avantages de NB-IoT en termes de qualité de service (QoS), de performances de latence et d'évolutivité. De plus, aucun investissement dans l'infrastructure réseau, ni frais de fonctionnement pour l'exploitation et la maintenance sont requis sur le NB-IoT, car cette technologie est fournie à travers le réseau cellulaire LTE.

D'autre part, la relation de NB-IoT avec les réseaux LTE représente des inconvénients majeurs en termes de :

- Couverture surtout pour les sites éloignés (couverture complète ou pas de couverture).
- Frais d'abonnement pour l'utilisation du réseau.
- Difficultés de déploiement.
- Perte de qualité suite au nombre élevé d'utilisateurs dans le même réseau.
- Problèmes relatifs à la sécurité et la protection de données.

Par conséquent, on peut conclure que LoRa combine à peu près les avantages de SigFox et de NB-IoT avec certaines limitations bien sûr. C'est ce qui, à notre avis, en fait l'une des options les plus appropriées pour la surveillance des systèmes PV. De plus, LoRa permet la mise en réseau privée et c'est un gros avantage par rapport à SigFox et NB-IoT en termes de sécurité et de facilité de la gestion du réseau.

2.4 LoRa et surveillance des installations PV

Les LPWANs attirent beaucoup d'attention principalement en raison de leur capacité à offrir une connectivité abordable aux appareils à faible puissance répartis sur de très vastes zones géographiques. Ils gagnent de plus en plus en popularité auprès des communautés industrielles et de recherche en raison de ses caractéristiques de communication à faible consommation d'énergie, à longue portée et à faible coût. En ce qui concerne la surveillance des systèmes PV en utilisant la technologie LoRa, quelques travaux de recherche sont présentés ci-dessous.

Dans [122], les auteurs ont proposé LoRa comme une solution efficace pour le développement d'une surveillance de niveau de module PV à faible coût et d'un diagnostic de pannes en citant les avantages pour lesquels LoRa a été choisie pour cette application. Ils prévoient de détecter les paramètres de chaque module PV du système solaire.

Dans [123], les auteurs ont présenté un système basé sur LoRa pour la surveillance des centrales photovoltaïques. Dans ce système, les mesures des capteurs sont traitées par une carte Arduino Uno. Les données sont envoyées à travers le module LoRa envers une carte Raspberry PI qui joue le rôle d'une station de base. L'architecture du système proposé est illustrée dans la figure 2.14.

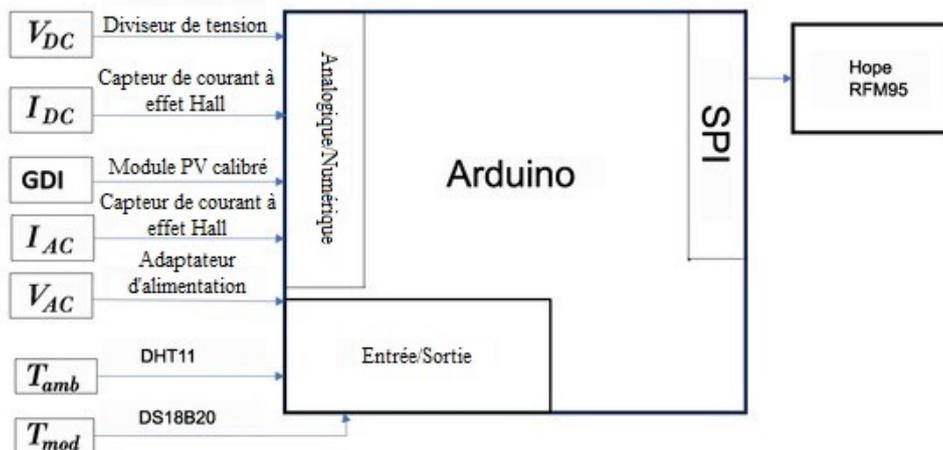


FIGURE 2.14 – Schéma général des capteurs et connexions Arduino présenté par [123].

Les auteurs de [124] ont présenté un système de surveillance de l'énergie so-

laire utilisant la technologie LoRa pour surveiller le flux global d'énergie des panneaux solaires. Les informations sur les paramètres électriques tels que la tension, le courant sont collectées et stockées à l'aide de LoRa. Ils ont utilisé un microcontrôleur PIC comme unité de traitement avec un module LoRa (Node MCU) comme unité de transmission. La réception de données est effectuée à travers un microcontrôleur Node MCU connecté au PC via une porte série.

Dans [125], les auteurs ont proposé un système en temps réel à faible coût pour les systèmes de production micro et mini photovoltaïques qui peuvent surveiller la tension continue, le courant continu, la puissance alternative et sept variables météorologiques. Le système proposé mesure toutes les variables météorologiques pertinentes et acquiert directement les données de production photovoltaïque de l'installation. Ce système est composé de deux enregistreurs de données. Le premier est chargé de collecter les données météorologiques des capteurs de la station solarimétrique. Le second est un enregistreur de données pour surveiller la génération PV. Les enregistreurs de données utilisent la communication sans fil LoRa pour envoyer les données obtenues à une passerelle LoRa qui est l'intermédiaire entre les appareils et le système cloud. Le composant principal de ces appareils est la carte de développement Heltec Wi-Fi LoRa, qui comprend le microcontrôleur ESP32 et intègre Wi-Fi et LoRa. Le schéma du système proposé est montré dans la figure 2.15

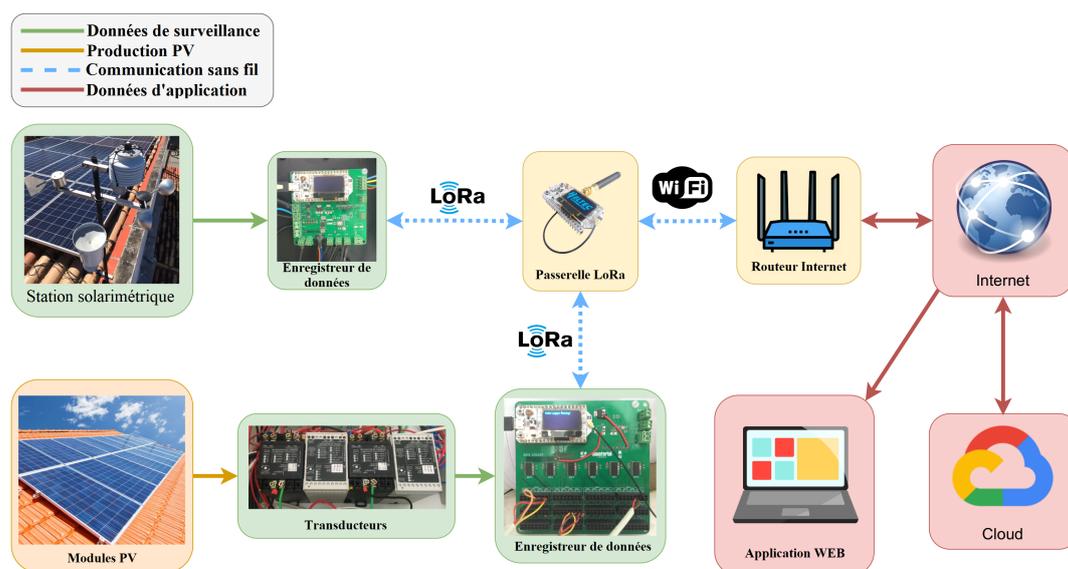


FIGURE 2.15 – Schéma du système proposé par [125].

Récemment, les auteurs de [126] ont proposé une stratégie de surveillance des boîtes de jonction PV basée sur LoRa, en changeant une boîte de jonction classique par une boîte dotée par un module LoRa. Le module TTGO LoRa32 V2.0 avec LoRa et divers ports d'entrée et de sortie est utilisé. Le module de transmission sans fil transmet diverses données collectées à partir de la boîte de jonction PV au module de réception et ce dernier affiche les données reçues sur un écran LCD. L'architecture du système proposé est illustrée dans la figure 2.16.

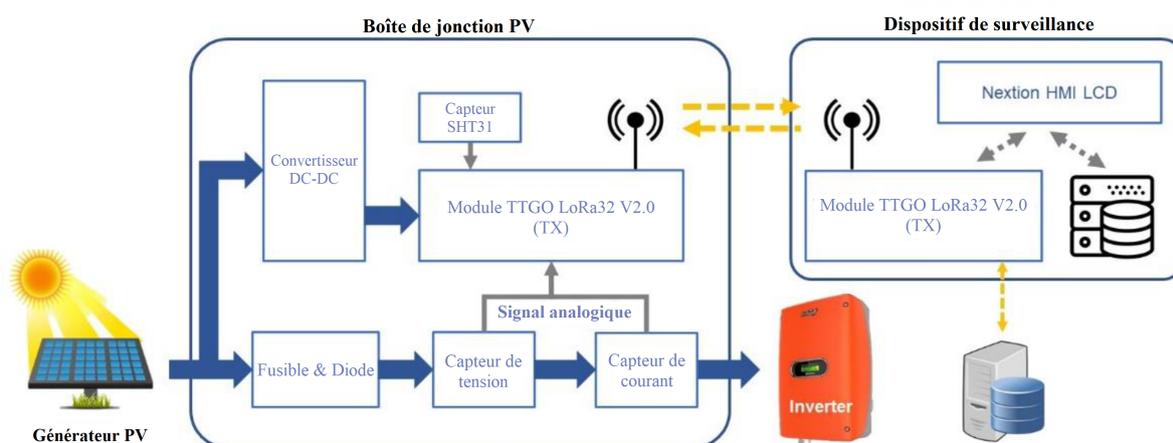


FIGURE 2.16 – Schéma général des capteurs et connexions Arduino présenté par [126]

2.5 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil (**WSN**) ont été décrits en commençant par la présentation de leur définition et de leurs applications dans différents domaines ainsi que leurs avantages par rapport aux technologies conventionnelles. Ils ont des applications importantes telles que la surveillance à distance et le suivi des cibles. Ensuite, leur structure d'un **WSN** a été présentée en citant ses différents composants de base, la structure de chaque composant et son rôle dans le réseau. En outre, les topologies qui s'appliquent aux réseaux **WSN** sont discutées avec la présentation des avantages et des inconvénients de chaque topologie. La topologie du réseau **WSN** affecte la connectivité et l'organisation du réseau, et donc diverses mesures de performance telles que la fiabilité des communications, l'évolutivité du réseau, l'efficacité énergétique, la durée de vie du réseau et la latence des données. Les **WSN** sont apparus comme des alternatives de pointe, innovantes

et rentables aux technologies conventionnelles dans divers domaines d'application.

D'autre part, les réseaux étendus de faible puissance ([LPWAN](#)) ont été introduits en commençant par une comparaison avec les réseaux sans fil traditionnels, qui a mis en évidence leur supériorité sur ces derniers en termes d'utilisation dans les WSN. Ensuite, les principales techniques de communication utilisées dans [LPWAN](#) sont décrites, en soulignant les avantages et les inconvénients de chaque technique. Après, les trois technologies [LPWAN](#) les plus répandues et les plus populaires (SigFox, LoRa et NB-IoT) ont été comparées sous plusieurs aspects. L'intégration des [LPWAN](#) avec les [WSN](#) est considérée comme la future norme de communication sans fil pour l'[IoT](#) et les systèmes de surveillance sans fil, en raison de leur capacité de communication à faible coût et de leur longue portée.

Équilibrant ses avantages et ses inconvénients, la technologie [LoRa](#) apparaît comme une excellente solution pour la surveillance des systèmes [PV](#) car elle semble être supérieure aux autres technologies particulièrement dans cette application. Certains travaux de la littérature dans le cadre de la surveillance des systèmes [PV](#) utilisant la technologie [LoRa](#) ont été mentionnés. Le chapitre suivant traite de la conception d'une plate-forme de surveillance basée sur [LoRa](#) pour les systèmes [PV](#).

Chapitre 3

Conception d'un système d'acquisition pour les installations PV à la base de la technologie LoRa

3.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil représentent la tendance du futur grâce à leurs nombreux avantages par rapport aux réseaux classiques câblés. Malgré l'existence d'autres technologies sans fil telles que GSM, Zigbee, Bluetooth et Wi-Fi, les LPWANs représentent la tendance de l'avenir de l'IoT et des applications industrielles [127]. Ceux-ci sont conçus pour une communication à longue portée avec une faible consommation d'énergie et des coûts réduits [128]. Parmi les LPWANs existants, LoRa et SigFox sont les technologies LPWANs les plus populaires déployées actuellement [128, 129, 130].

Ce chapitre discute l'intégration de la technologie sans fil dans les installations photovoltaïques à travers la conception d'un système d'acquisition de données sans fil longue portée à faible consommation d'énergie à la base de la technologie LoRa. Cette technologie permet des applications intelligentes qui résolvent des défis tels que la gestion de l'énergie [118]. Il s'agit d'une implémentation de la couche physique indépendante des implémentations des couches supérieures. Cela permet à LoRa de coexister et d'inter-

opérer avec les architectures réseau existantes [119]. Les avantages de cette technologie par rapport aux autres technologies sans fil en font l'un des meilleurs choix pour la surveillance des installations photovoltaïques. Bien que LoRa présente certaines limitations telles que la latence et le faible débit de données par rapport au Wi-Fi et au GSM, elle fournit une solution prometteuse pour les utilisations industrielles [131]. Par ailleurs, la modulation de type CSS utilisée dans LoRa peut envoyer six fois plus de paquets de données que SigFox [132]. En outre, LoRa présente de bonnes performances sous l'impact de différentes conditions météorologiques [133], ce qui la rend idéale pour les installations PV.

Dans ce contexte, l'architecture générale des capteurs à base de microcontrôleur et émetteur-récepteur LoRa sera discutée. Ensuite, le principe et l'algorithme de fonctionnement de ce système seront détaillés. Finalement, la conception matérielle de l'ensemble de capteurs nécessaires pour la surveillance d'une installation photovoltaïque sera décrite en détail. Le système proposé se compose d'un capteur de tension/courant en utilisant la méthode classique de diviseur de tension pour la mesure de la tension et un moniteur de puissance pour la mesure du courant, un capteur de radiation solaire à la base d'un capteur photométrique, un capteur de position des panneaux solaires (élévation et azimut) basé sur une combinaison de magnétomètre et accéléromètre triaxial, et finalement un capteur de température ambiante et d'humidité.

3.2 Architecture des capteurs

Le système d'acquisition sans fil proposé consiste en un ensemble de transmetteurs intégrés à des émetteurs-récepteurs LoRa et connectés sans fil à un ou plusieurs systèmes de surveillance/contrôle. L'architecture générale est montrée dans la figure 3.1.

Le microcontrôleur sert au traitement et au conditionnement de la mesure du capteur, à la configuration et au réglage du module LoRa, à la réception des requêtes de données via le module LoRa et à l'envoi des données traitées. Le module LoRa sert à recevoir les requêtes de données d'autres appareils, à transmettre les données traitées du microcontrôleur et à sortir le microcontrôleur du mode d'économie d'énergie lorsque des

requêtes sont reçues.

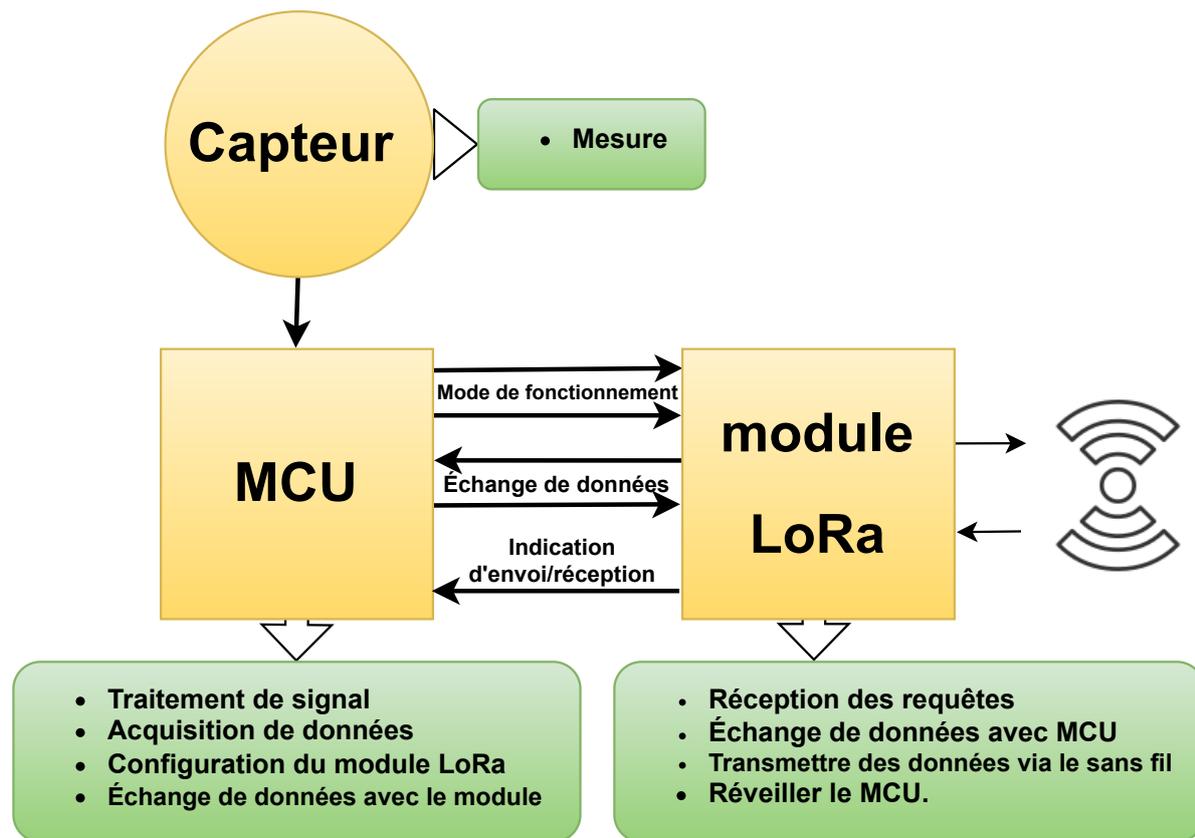


FIGURE 3.1 – Architecture d'émetteur basée sur LoRa.

3.3 Principe de Fonctionnement

LoRa est une implémentation de la couche physique. Le protocole de communication de couches supérieures du système sont décrit dans cette section. Chaque périphérique du système possède sa propre adresse unique. Pour les installations PV à grande échelle où peuvent exister plusieurs systèmes d'acquisition identiques, chaque système peut être configuré pour fonctionner dans un canal différent. Les capteurs identiques peuvent être configurés avec la même adresse dans des canaux différents.

Lorsqu'un dispositif de surveillance ou de contrôle a besoin de données provenant d'un capteur, il envoie une requête de données contenant son adresse et son canal au capteur concerné. Le capteur obtient l'adresse et le canal du demandeur, puis envoie un paquet de mesure demandée via le module LoRa sans fil. L'organigramme de

fonctionnement du capteur est illustré à la figure 3.2.

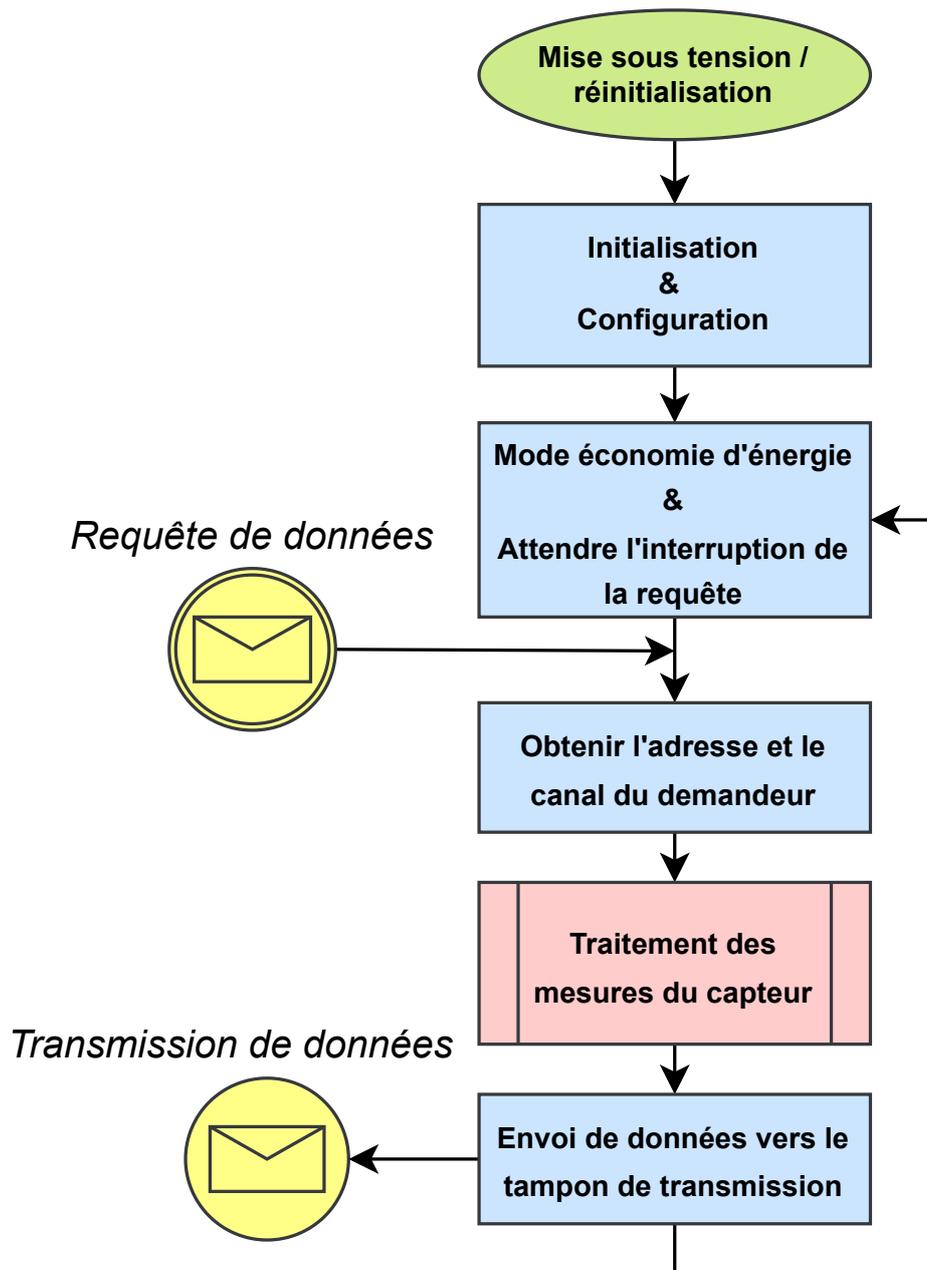


FIGURE 3.2 – Organigramme de fonctionnement du capteur.

Comme il est montré sur la figure 3.2, le transmetteur commence par l'initialisation et la configuration. La première chose à faire est de définir l'adresse et le canal sans fil du module LoRa. Ensuite, il initialise les configurations et les ports des capteurs. Après cette étape, le capteur entre en mode économie d'énergie. Une requête de données reçue par le module LoRa réveille le MCU qui commence à traiter directement les mesures

des capteurs puis les envoie au buffer du module LoRa. Après cela, le capteur revient au mode d'attente (économie d'énergie). Ceci permet une économie maximale d'énergie.

Le signal de demande de données est un paquet de données qui contient l'adresse du capteur, le canal du capteur, l'adresse du destinataire (demandeur de données) et le canal du destinataire comme il est montré dans la table 3.1.

TABLE 3.1 – Structure du paquet de requête de données

ADRESSE DU CAPTEUR	CANAL DU CAPTEUR	ADRESSE DU DESTINATAIRE	CANAL DU DESTINATAIRE
--------------------	------------------	-------------------------	-----------------------

Après qu'un signal de demande de données soit reçu par le capteur, ce dernier répond au demandeur par l'envoi d'un paquet de données de mesure qui contient l'adresse et le canal reçus puis les données de mesure traitées comme il est montré dans la table 3.2.

TABLE 3.2 – Structure du paquet de données de mesure

ADRESSE DU DEMANDEUR	CANAL DU DEMANDEUR	IDENTIFIANT DE MESURE	" : "	Temps	","	DONNÉES DE MESURE
----------------------	--------------------	-----------------------	-------	-------	-----	-------------------

Le système de surveillance/contrôle doit disposer d'un module sans fil LoRa afin de communiquer avec les capteurs. De plus, il peut être connecté à une passerelle qui convertit le protocole LoRa en d'autres protocoles. La communication est gérée par le système de surveillance/contrôle et la topologie du réseau peut être modifiée en fonction de l'utilisation.

3.4 Conception du matériel

La conception du matériel du système d'acquisition proposé est discutée dans cette section. Un ensemble de capteurs sans fil nécessaire dans les installations PV a été conçu. Les capteurs ont été conçus sur la base du microcontrôleur STM32L031C6 de ST Microelectronics. Ce dernier convient à une large gamme d'applications telles que

les capteurs filaires et sans fil. Il appartient à la gamme de lignes d'accès ultrabasse consommation d'énergie (ULP). Il est basé sur l'architecture CPU ARM Cortex-M0+ fonctionnant à une fréquence de 32 MHz. Il possède des mémoires embarquées à haut débit (jusqu'à 32 Ko de mémoire programme Flash, 1 Ko de données EEPROM et 8 Ko de RAM) plus une vaste gamme d'E/S et de périphériques améliorés. En outre, il offre plusieurs fonctionnalités analogiques, un CAN 12 bits avec suréchantillonnage matériel, deux comparateurs ultra-basse consommation et trois temporisateurs 16 bits à usage général. De plus, ce dispositif intègre des interfaces de communication standards et avancées [134]. Ces spécifications sont suffisantes pour les applications de capteurs alimentés par batterie. Certaines spécifications clés du MCU sont illustrées dans la table 3.3.

TABLE 3.3 – Spécifications du MCU STM32L031X6 [134]

STM32L031x6	
CPU	ARM Cortex M0+ (NVIC, MPU, SW debug)
Fréquence	Oscillateurs Xtal : 32KHz + 1 to 32MHz Oscillateurs RC internes : 38KHz + 16MHz Oscillateur ULP multi vitesse interne : 64KHz à 4MHz
Mémoire	32 Ko Flash, 8 Ko SRAM, 1 Ko EEPROM, 20 octets de données de sauvegarde
Contrôle	1 minuterie ULP 16 bits, minuterie 3 × 16 bits
Analogique	2 × comparateurs ULP, 1 × 10 canaux CAN 12 bits
Connectivité	1×ULP UART, 1×SPI, 1×I2C, 1×USART
Alimentation	Régulateur 1,8 V (), mise à l'échelle de la tension à 3 modes
Autres spécifications	RTC/AWU, contrôle d'horloge, DMA 7 canaux, 2x chiens de garde, CRC, etc

En outre, des modules émetteurs-récepteurs sans fil LoRa E32-433T20D ont été impliqués dans la conception. Ces modules sont des ports série sans fil (UART) basés sur la puce SX1278 de SEMTECH. L'émetteur-récepteur SX1278 est équipé du modem long portée LoRa qui fournit une communication à spectre étalé ultra longue portée et une immunité élevée aux interférences tout en minimisant la consommation de courant. Aussi, il présente les avantages d'une densité de puissance concentrée, tout en garantissant une confidentialité très élevée [135]. Les modules E32-433T20D disposent de plusieurs modes de transmission et fonctionnent avec la technologie de spectre étalé LoRa dans la gamme

de 410 MHz à 441 MHz [136]. Ils sont conçus pour les capteurs industriels intelligents, les systèmes de sécurité d'alarme sans fil, les solutions d'automatisation des bâtiments, les télécommandes sans fil de qualité industrielle et les applications de l'industrie automobile, ce qui les rend adaptés à notre application.

Le module utilisé dans la conception est illustré dans la figure 3.3. Ces modules communiquent avec le microcontrôleur par deux broches d'interface (Rx et Tx) à travers le protocole **UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)**. UART est un protocole de communication entrée/sortie asynchrone de haute fiabilité qui traduit les données d'un flux parallèle en un flux série qui est transmis sur la liaison de communication entre les périphériques de l'ordinateur [137]. Ce protocole permet une communication en full-duplex en liaison série et a donc été largement utilisé dans les communications de données et le système de contrôle [138]. De plus, les modules E32-433T20D (figure 3.3) fournissent une broche de sortie pour réveiller le MCU du mode veille lorsque des données sans fil sont disponibles (broche Aux), deux broches pour définir le mode de fonctionnement (M0 et M1) et les broches d'alimentation. Les spécifications techniques du module sont indiquées dans la table 3.4.



FIGURE 3.3 – Module émetteur-récepteur sans fil LoRa E32-433T20D.

TABLE 3.4 – Spécifications du module LoRa E32-433T20D [136]

Paramètre RF	Valeur
Fréquence de fonctionnement	410 - 441MHZ
Puissance de transmission	10 - 20dBm
Sensibilité de réception	-146dBm
Débit de données aériennes	0.3k - 19.2Kbps
Distance d'essai	3000m
Paramètre matériel	Valeur
Dimensions	21×36mm
Type d'antenne	SMA-K
Interface de Communication	UART
Package	DIP
Tampon	Tampon de 512 octets

Le paramétrage des modules s'est effectué via l'interface UART. Pour configurer un module, il doit être mis en mode de paramétrage (M0 et M1 sont mise sur le niveau haut), puis un message de configuration doit être envoyé au module. Le message de configuration se compose d'un paquet de données de 06 octets :

- HEAD : 0×C0 ou bien 0×C2
- ADDH : l'octet d'adresse de poids fort du module.
- ADDL : l'octet d'adresse de poids faible du module.
- SPED : pour configurer le bit de parité UART, le débit en bauds et le débit de données aériennes.
- CHAN : canal de communication.
- OPTION : pour configurer les autres options telles que le mode de transmission, la puissance de transmission, le temps de réveil, etc.

Afin de faciliter l'installation et la maintenance, l'adresse, le canal de communication, le paramétrage et le mode de fonctionnement sont programmés pour être effectuer automatiquement par le microcontrôleur pendant la phase d'initialisation et de configuration décrite dans la section précédente. Cette fonctionnalité rend les modules interchangeables

entre les capteurs (plug-and-play).

Les schémas et les circuits imprimés sont conçus en utilisant le logiciel AUTODESK EAGLE qui est un logiciel d'automatisation de la conception électronique, qui permet aux concepteurs de cartes de circuits imprimés (PCB) de connecter de manière transparente les schémas de principe, le placement des composants et le routage des PCB [139].

Le schéma général du capteur de la combinaison du MCU et du module LoRa, y compris la section d'alimentation et l'interface de programmation, est présenté à la figure 3.4. Ce schéma est ensuite personnalisé pour chaque type de capteur tel que requis pour un fonctionnement correct.

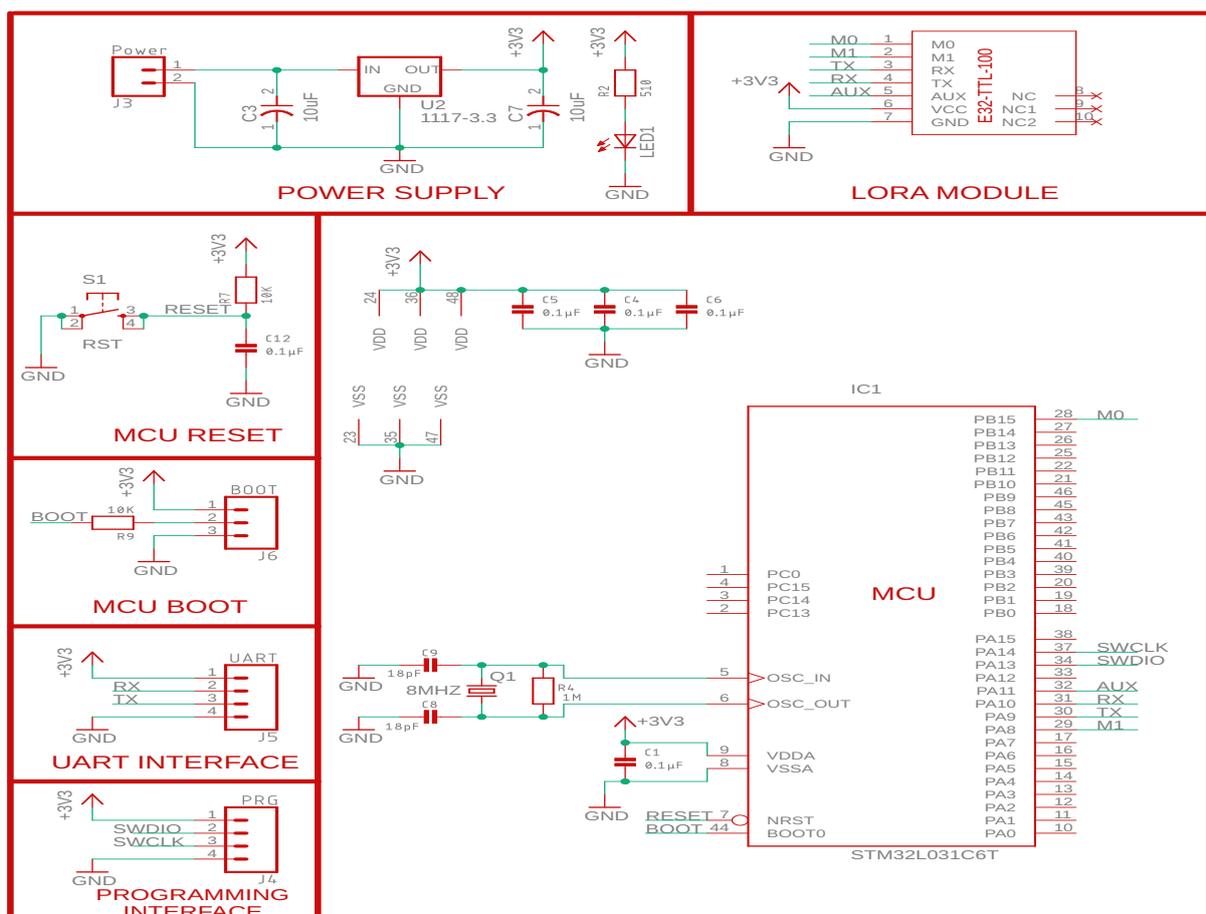


FIGURE 3.4 – Schéma générique du capteur LoRa.

3.4.1 Capteur de tension/courant

La tension et le courant sont les mesures les plus importantes dans une installation PV. Pour garantir un bon contrôle et une bonne surveillance de la puissance, une détection précise du courant et de la tension est nécessaire. Par exemple, ces mesures peuvent être utilisées par un MPPT (Maximum Power Point Tracker) pour extraire la puissance maximale disponible des panneaux PV [140].

A cet effet, un capteur de tension/courant intégré à un émetteur-récepteur LoRa est conçu. Pour la mesure de tension, la méthode classique du diviseur de tension est utilisée pour adapter la tension avec le CAN du MCU. Le signal analogique mesuré est ensuite multiplié par le rapport de division de tension afin d'obtenir la valeur de tension mesurée :

$$V = V_{in} \cdot \frac{V_{ref}}{2^{ADC_{res}}} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (3.1)$$

Où V_{in} est la tension d'entrée du CAN, V_{ref} est la tension de référence du CAN, ADC_{res} est la résolution du CAN, et R_1 et R_2 sont les résistances du diviseur de tension.

Pour minimiser l'impact dans lequel le processus de mesure affecte la tension mesurée, un suiveur de tension est placé pour obtenir une impédance d'entrée élevée. Cela garantit que la lecture n'est pas altérée par des composants ultérieurs dans le circuit de mesure. Un circuit simplifié de mesure de tension est illustré à la figure 3.5. Le schéma du circuit de détection de tension est illustré à la figure 3.6. V_SENS est connecté à la broche 19 du MCU (PB1).

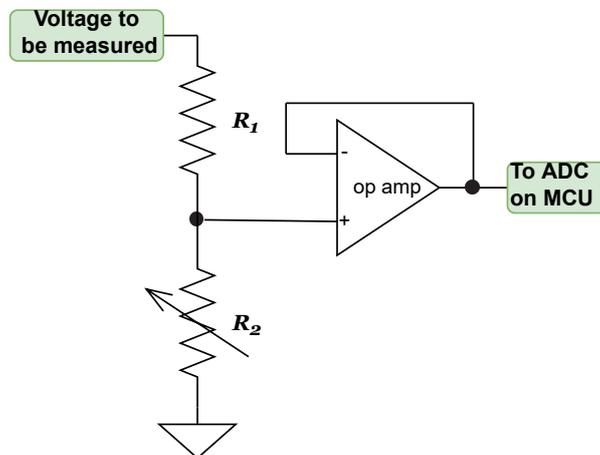


FIGURE 3.5 – Circuit de diviseur de tension pour la mesure de tension.

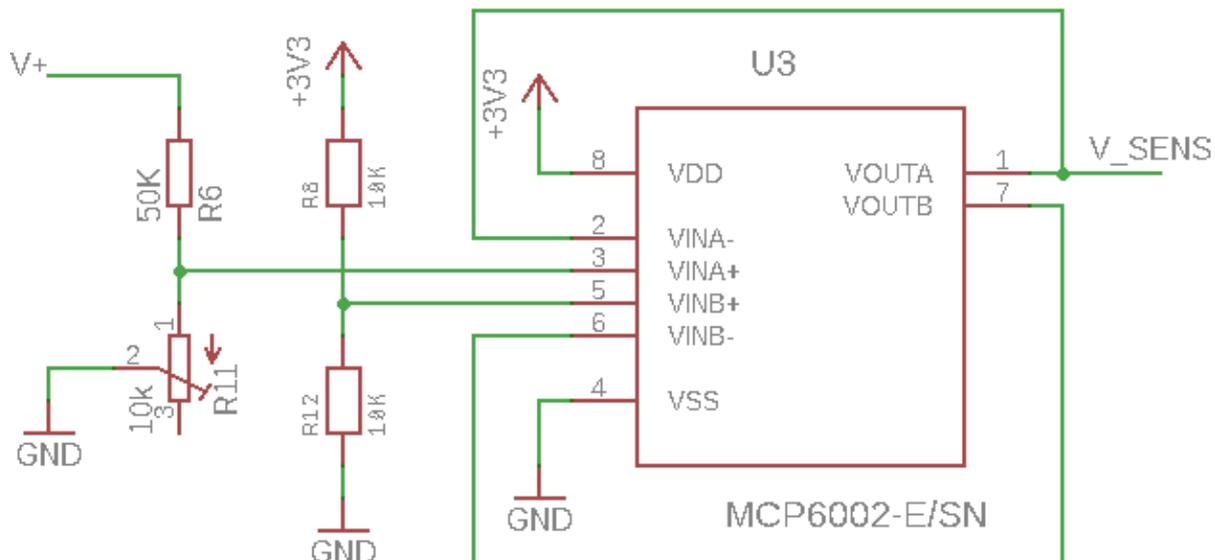


FIGURE 3.6 – Schéma de détection de tension.

L'approche la plus courante et la plus précise en matière de détection de courant est l'approche résistive [141]. Une résistance shunt de précision de petite valeur est placée dans le chemin de courant avec un amplificateur différentiel pour mesurer la chute de tension à travers celui-ci. La chute de tension mesurée est proportionnelle au courant traversant la résistance [142].

Pour maximiser la précision, des amplificateurs spécialisés de détection de courant sont impliqués. Ils disposent d'un étage d'entrée unique qui permet une tension de mode commun considérablement élevée. De plus, ils intègrent une haute précision et un faible gain de dérive qui maximisent la précision de la mesure. À cet effet, le shunt de courant intégré et le moniteur de puissance INA219 de Texas Instruments sont utilisés. L'INA219 est un moniteur de puissance qui surveille à la fois la chute de tension du shunt et la tension d'alimentation du bus, avec des temps de conversion et un filtrage programmable. Il détecte à travers les shunts sur les bus qui peuvent varier de 0 à 26 V [143]. Cette puce est couramment utilisée sur les équipements de télécommunication, les systèmes de gestion de l'énergie, les différents types de chargeurs de batteries, les alimentations électriques et les équipements de test, ce qui la rend compatible pour les installations photovoltaïques.

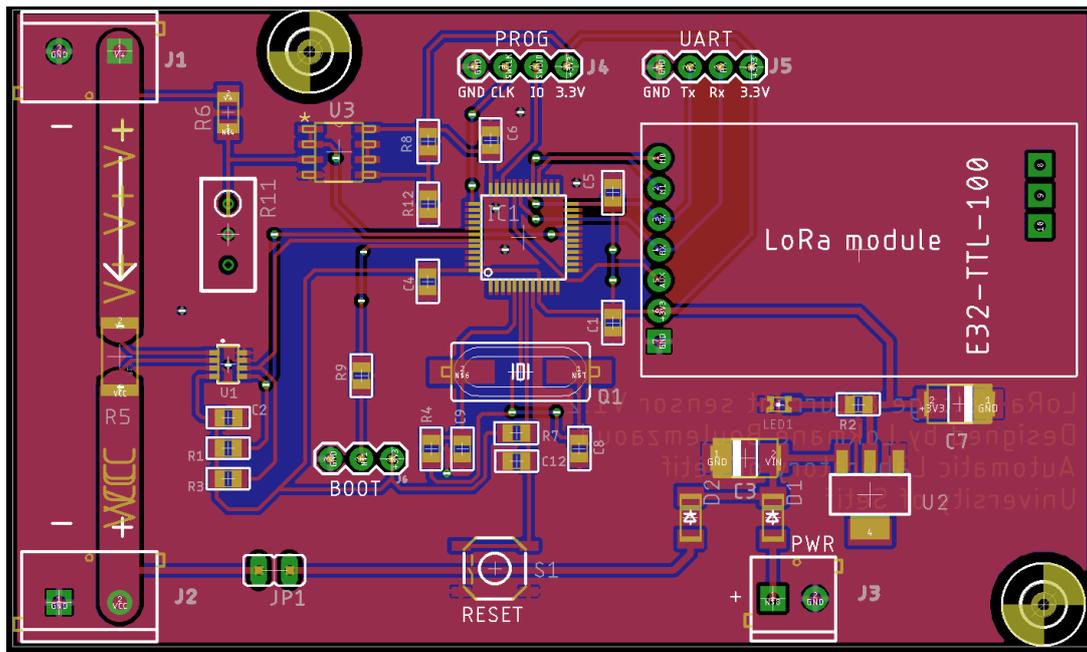
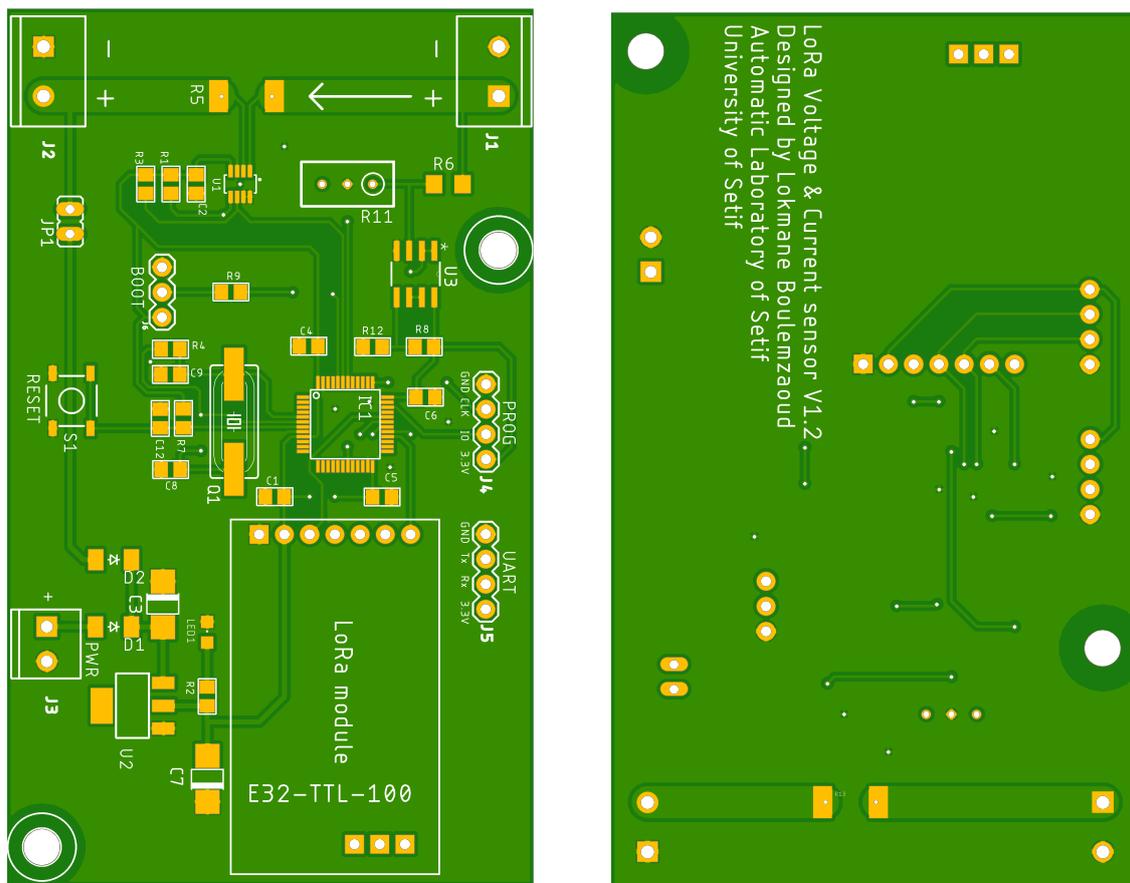


FIGURE 3.8 – Conception du circuit imprimé du capteur LoRa de tension et de courant.



(a) Face supérieure

(b) Face inférieure

FIGURE 3.9 – Circuit imprimé du capteur de Tension/Courant LoRa.

3.4.2 Capteur de radiation solaire

La quantité de flux radiant incident sur une surface connue est appelée radiation. La radiation solaire est la mesure radiométrique du spectre solaire qui est observée en tant que puissance par unité de surface (W/m^2). La surveillance de la radiation solaire dans les systèmes de production d'énergie solaire est importante pour connaître la quantité d'énergie qu'un projet pourrait potentiellement récolter du soleil. Alors que le spectre photométrique est mesuré en lux ($lumen/m^2$), le rapport "0,0079W/m² par lux" peut être utilisé pour trouver la radiation solaire approximatif à l'aide de capteurs photométriques [146]. Donc, la radiation solaire (G) peut être calculée par :

$$G = 0,0079.E_v \quad (3.2)$$

Où E_v représente l'éclairement lumineux en $lumen/m^2$. Dans ce contexte, le capteur de lux BH1750 est utilisé comme capteur de radiation. BH1750FVI est un capteur d'intensité lumineuse numérique. Il est couramment utilisé comme capteur de lumière ambiante [147]. Il a la possibilité de détecter une large gamme d'intensité lumineuse avec précision à haute résolution [148]. Ce capteur utilise le protocole de communication I²C pour communiquer avec le microcontrôleur. Une image du capteur BH1750FVI utilisé dans notre conception est montrée dans la figure 3.10. Le circuit imprimé du capteur de radiation est illustré à la figure 3.11. Une simulation de la version finale du capteur de radiation à base de LoRa est illustrée dans la figure 3.12. Le schéma de conception du capteur peut être consulté sur la figure A.2 de l'annexe.

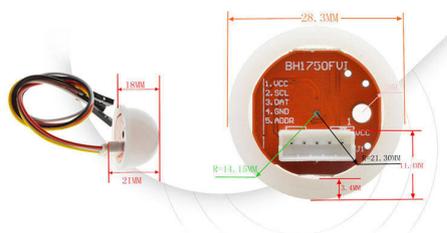


FIGURE 3.10 – Capteur de lumière ambiante BH1750FVI.

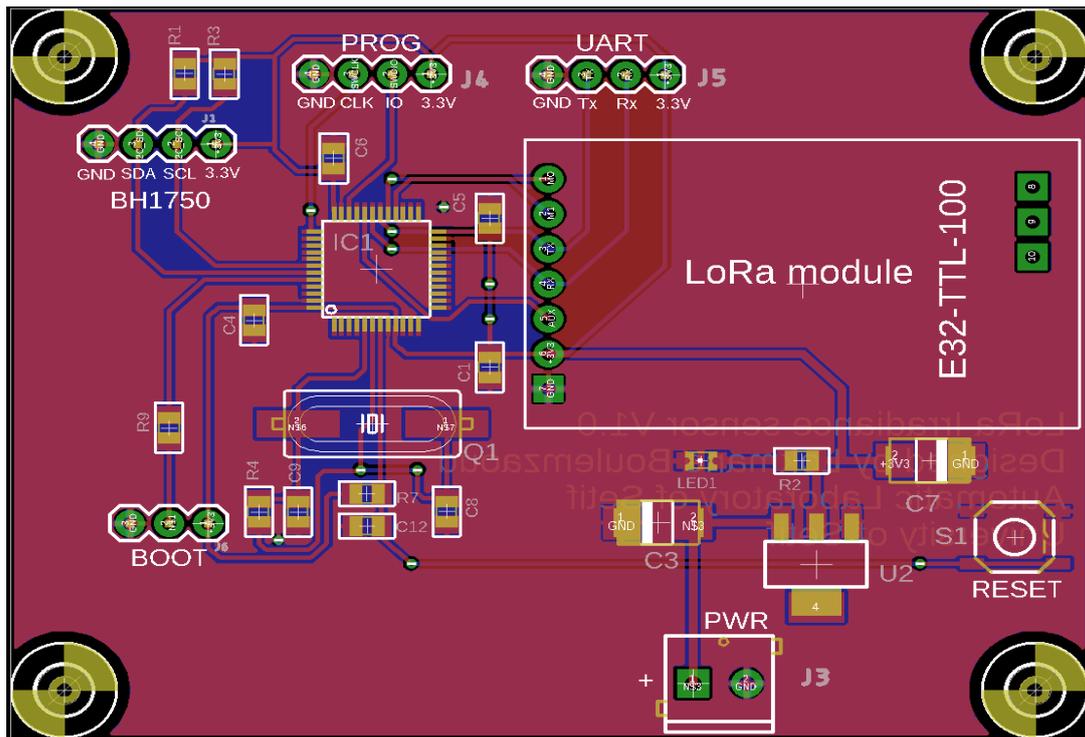
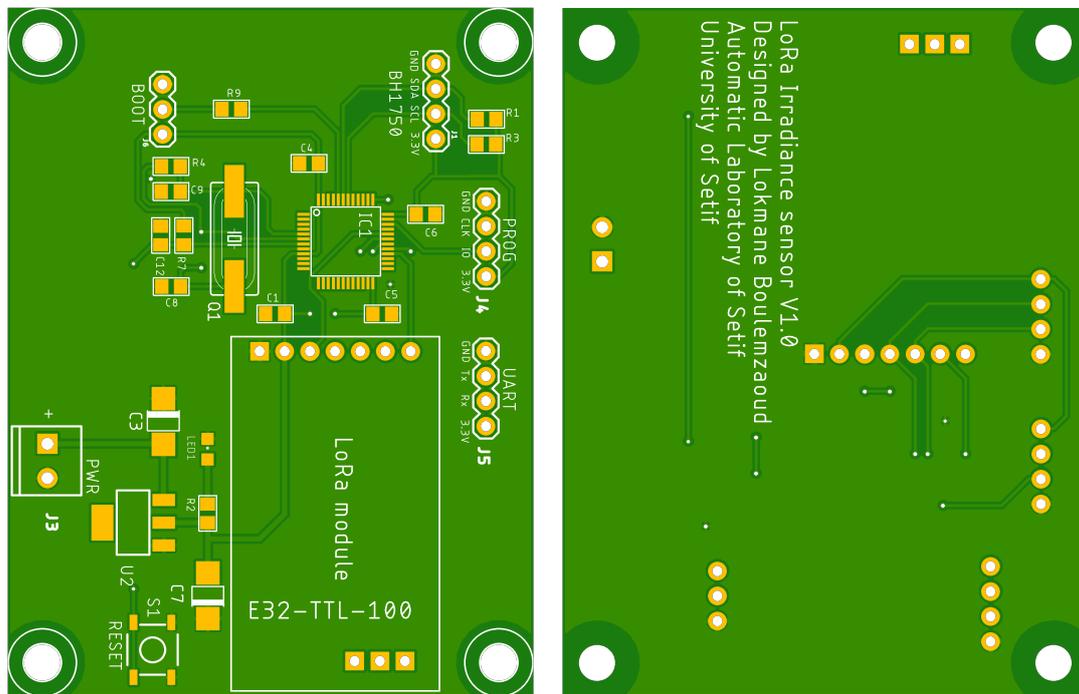


FIGURE 3.11 – Conception du circuit imprimé du capteur LoRa de radiation solaire.



(a) Face supérieure

(b) Face inférieure

FIGURE 3.12 – Circuit imprimé du capteur de radiation solaire LoRa.

3.4.3 Capteur de position du panneau solaire

Dans le cas d'installations PV de suivi solaire, la mesure des angles d'azimut et d'élévation des panneaux solaires est importante. Ces mesures peuvent être utilisées par le système de contrôle de positionnement pour le retour de position et pour la surveillance.

A cet effet, des capteurs inertiels sont insérés dans la conception du capteur de position pour panneaux solaires. Ces derniers sont basés sur le système micro-électromécanique (MEMS) et ils sont introduits avec une caractéristique très intéressante de faible coût, compact et faible puissance de traitement [149]. Les capteurs inertiels, également connus sous le nom d'unités de mesure inertielle (UMI), mesurent l'accélération, la vitesse angulaire et le vecteur de champ magnétique dans leur propre système de coordonnées local tridimensionnel [150]. Une unité de mesure inertielle est généralement constituée d'un ensemble d'accéléromètre, gyroscope et magnétomètre, tous tri-axiaux pour obtenir des mesures dans trois axes différents, soit un total de 9 DOF (Degree Of Freedom). Ce dernier détermine le nombre de paramètres indépendants dans un système. L'utilisation de l'IMU a été largement appliquée pour déterminer leurs mouvements en termes d'accélération, de vitesse angulaire et de rotation [151]. Le magnétomètre est utilisé pour mesurer la rotation de l'angle de lacet et les valeurs d'accélération obtenues de l'accéléromètre peuvent être utilisées pour mesurer la rotation angulaire [152].

Le magnétomètre du module peut être utilisé comme boussole numérique pour mesurer l'azimut. Le cap de la boussole numérique est calculé par :

$$\alpha = \left(\arctan \left(\frac{Y_m}{X_m} \right) + \delta \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (3.3)$$

Où α est le cap de la boussole, X_m et Y_m sont respectivement l'axe X et l'axe Y du magnétomètre, et δ représente l'angle de déclinaison magnétique. Le cap est alors décalé vers le sud et échelonné pour mesurer l'azimut (degrés à l'est et degrés à l'ouest).

L'accéléromètre à 3-axes peut être utilisé pour calculer l'angle d'élévation des panneaux. L'angle d'élévation θ peut être calculé par :

$$\theta = \arctan \left(\frac{X_a}{\sqrt{Y_a^2 + Z_a^2}} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (3.4)$$

Où X_a , Y_a et Z_a sont respectivement les axes X, Y et Z de l'accéléromètre. L'angle

d'élévation est également mis à l'échelle pour être égal à 0 lorsque le panneau est en position verticale. Lorsque les panneaux se déplacent vers le haut, θ sera supérieur à 0 et inversement lorsque le panneau se déplace vers le bas.

Dans ce stade, le module UMI 9-Axes (9-DOF) GY-80 est utilisé. Ce module combine 5 capteurs en un seul paquet. Il se compose d'un gyroscope 3-axes L3G4200D, d'un accéléromètre 3-axes ADXL345, d'un magnétomètre 3-axes MC5883L et d'un baromètre-thermomètre BMP085. L'ensemble des capteurs est accessible via l'interface I²C. Le gyroscope et le baromètre-thermomètre sont réservés pour d'éventuelle future exploitation afin d'améliorer les performances du système. Le module GY-80 est montré dans la figure 3.13.

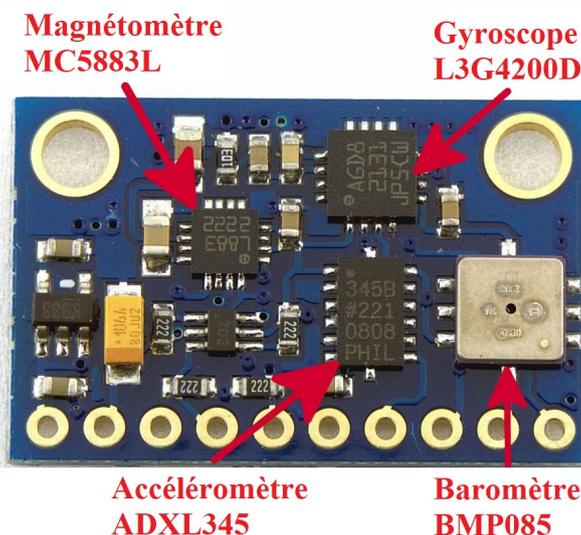


FIGURE 3.13 – Unités de mesure inertielle 9 axes GY-80

L'ADXL345 introduit par Analog Devices est un accéléromètre 3-axes ultra-basse consommation avec une mesure haute résolution (13 bits). Il est bien adapté aux applications d'appareils mobiles, instrumentation industrielle et médicale et les dispositifs personnels de navigation et de pointage. Cette puce mesure l'accélération statique de la gravité dans les applications de détection d'inclinaison, ainsi que l'accélération dynamique résultant d'un mouvement ou d'un choc [153]. Elle est utilisée dans notre conception comme capteur d'angle d'élévation des panneaux car elle permet de mesurer des changements d'inclinaison. Honeywell HMC5883L est un module multipuce conçu pour la

détection magnétique à faible champ avec une interface numérique pour des applications telles que la boussole et la magnétométrie. Les applications du HMC5883L incluent les téléphones portables, les netbooks, l'électronique grand public, les systèmes de navigation automatique et les appareils de navigation personnels [154]. Elle est utilisée comme boussole numérique pour mesurer l'angle d'azimut des panneaux solaires. Le circuit imprimé du capteur LoRa de position du panneau basé sur le module accéléromètre-magnétomètre est illustré à la figure 3.14. Une simulation de la version finale de ce capteur est illustrée dans la figure 3.15. Le schéma de conception du capteur peut être consulté sur la figure A.3 de l'annexe.

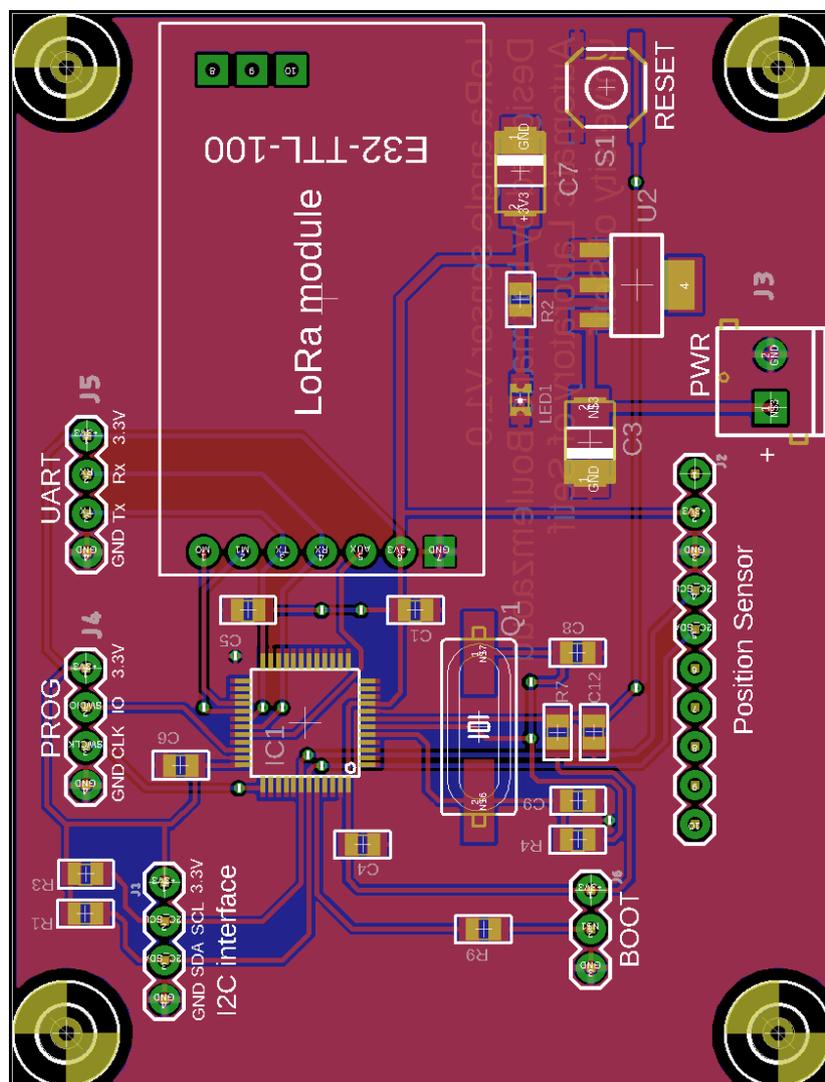
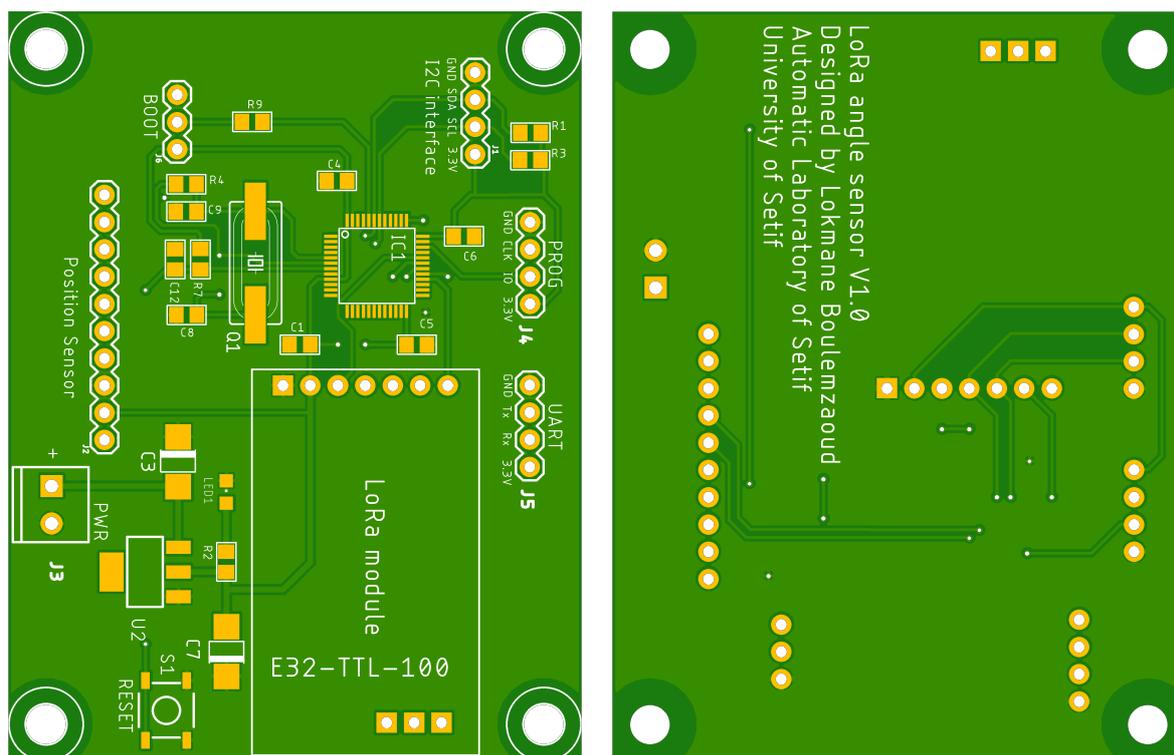


FIGURE 3.14 – Conception du circuit imprimé du capteur LoRa de la position du panneau.



(a) Face supérieure

(b) Face inférieure

FIGURE 3.15 – Circuit imprimé du capteur de position du panneau LoRa.

3.4.4 Capteur de température ambiante et d'humidité

Les cellules solaires sont sensibles à la température [155]. La température ambiante (T_a) a une corrélation positive avec l'efficacité du système photovoltaïque, ce qui indique que la température ambiante joue un rôle important dans l'analyse des performances. On peut conclure que la température ambiante peut être préférée pour prédire la performance du module photovoltaïque [156]. D'autre part, l'humidité (RH) joue un rôle important dans l'analyse des performances de cellules solaires. Elle affecte facilement l'efficacité des cellules solaires et crée une couche d'eau minimale à sa surface [41].

Le capteur LoRa de température ambiante et d'humidité est basé sur le capteur numérique capacitif de température et d'humidité AM2301 (DHT21). Ce dernier possède

une sortie calibrée de signal numérique du capteur de température et d'humidité. Il communique avec le microcontrôleur via l'interface 1-Wire [157]. 1-Wire est un système de bus de communication de nature similaire à I²C conçu par Dallas Semiconductor Corp [158]. Il est généralement utilisé en domotique pour des thermomètres ou autres instruments de mesure météorologiques [159]. Le capteur de température et d'humidité AM2301 est illustré dans la figure 3.16. Le circuit imprimé du capteur LoRa de température et d'humidité basé sur le capteur AM2301 est illustré à la figure 4.3. Une simulation de la version finale de ce capteur illustrée dans la figure 4.13. Le schéma de conception du capteur peut être consulté sur la figure A.4 de l'annexe.

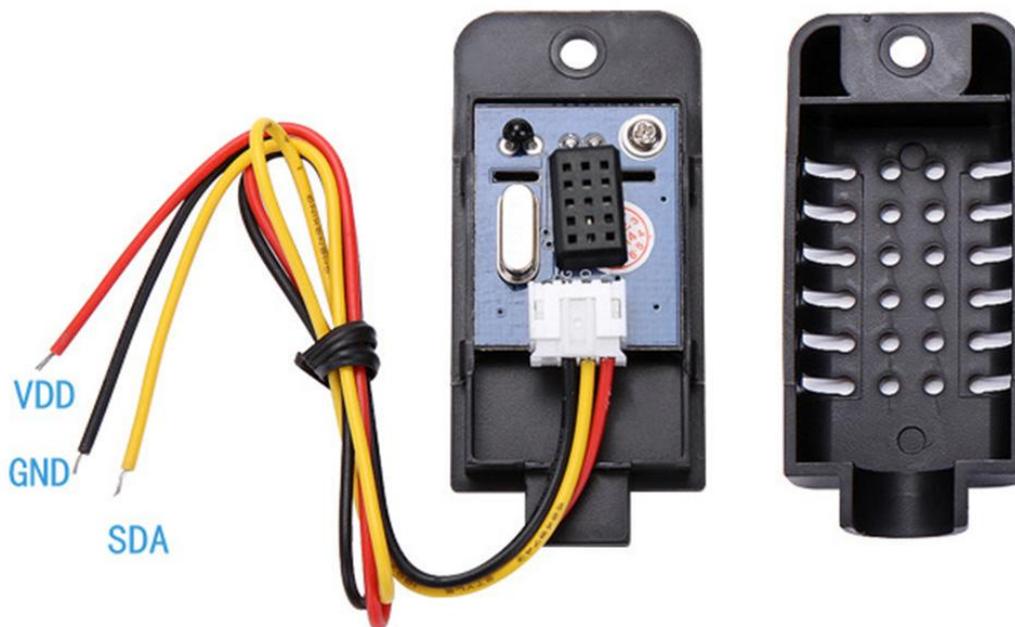


FIGURE 3.16 – Capteur de température et d'humidité AM2301 (DHT21).

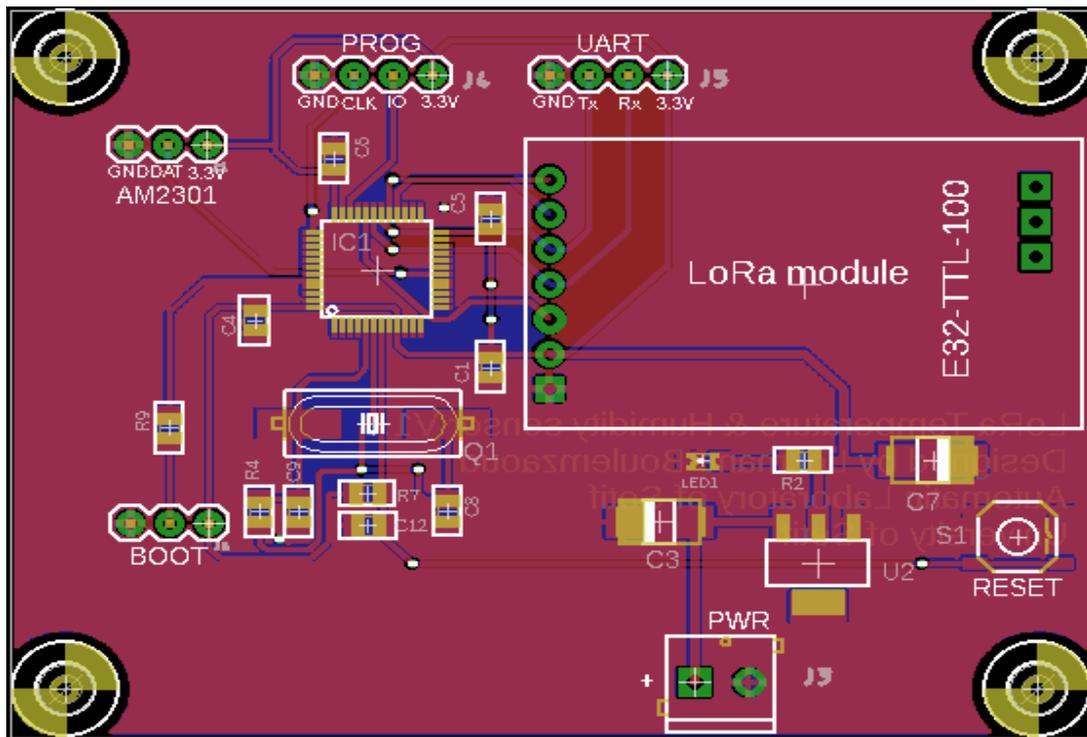
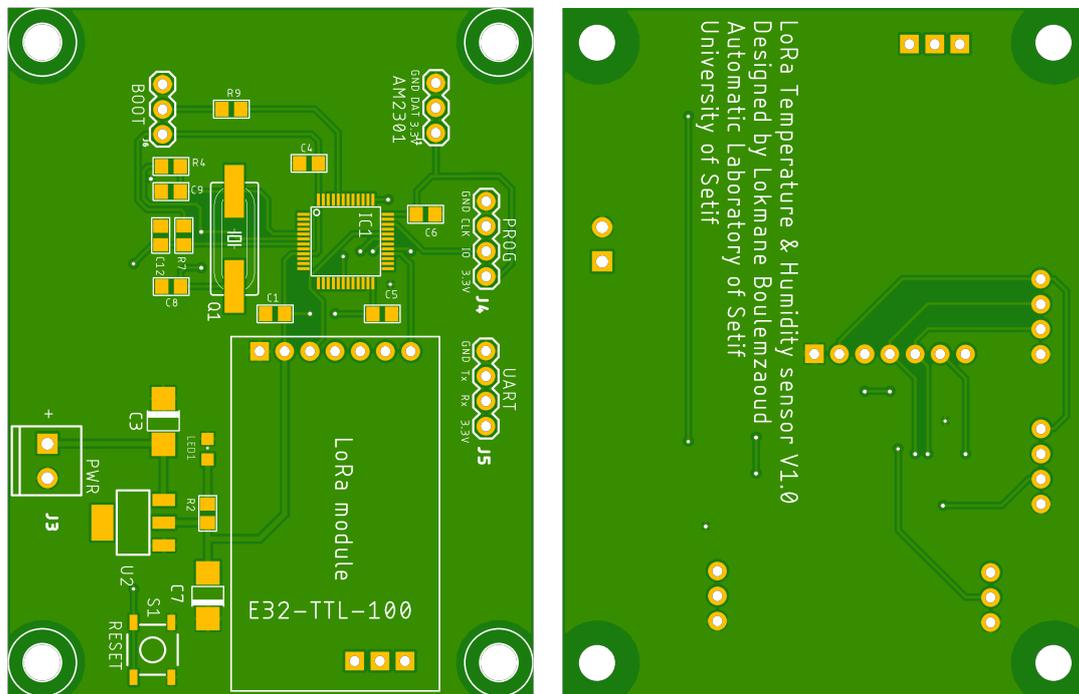


FIGURE 3.17 – Conception du circuit imprimé du capteur de température et d'humidité.



(a) Face supérieure

(b) Face inférieure

FIGURE 3.18 – Circuit imprimé du capteur de de température et d'humidité LoRa.

3.5 Conclusion

Un système d'acquisition de données sans fil à longue portée à basse consommation d'énergie pour les installations photovoltaïques basé sur la technologie LoRa a été conçu. Le principe de fonctionnement, l'architecture des capteurs, le protocole de communication et la conception matérielle ont été détaillés. Un capteur de tension/courant, un capteur de radiation solaire basé sur un capteur de flux lumineux, un capteur de position de panneau basé sur un magnétomètre 3-axes et un accéléromètre 3-axes, et un capteur de température ambiante et d'humidité ont été conçus et leurs circuits imprimés sont montrés. Ces capteurs communiquent sans fil avec le système de surveillance grâce à la technologie LoRa. L'intégration de cette technologie dans les installations photovoltaïques fournit un système étendu, peu coûteux, économique en énergie et facile à entretenir. Le prochain chapitre discute l'implémentation et le test du système de surveillance proposé.

Chapitre 4

Implémentation du système de surveillance

4.1 Introduction

La validation de la conception du système d'acquisition de données sans fil à base de la technologie LoRa a été discutée dans le chapitre 3. Ce chapitre sert pour l'implémentation du système proposé. On commence par la description de la configuration des modules LoRa. Pour cela, le microcontrôleur de chaque capteur est programmé de manière à effectuer automatiquement la configuration du son module LoRa. En raison du nombre limité de modules LoRa (E32-433T20D), le capteur de radiation solaire et le capteur de position du panneau solaire discutés précédemment ont été combinés sur la même carte d'acquisition. Ensuite, l'implémentation de chaque capteur dans le système est détaillée. L'implémentation est effectuée sur des plaques d'expérimentation. En raison de la difficulté d'acquisition des microcontrôleur STM32L031 au moment de la réalisation de ce projet, l'implémentation a été effectuée à l'aide de cartes STM32F103, et des cartes Arduino Uno et Arduino Nano. Les microcontrôleur STM32F103 possèdent presque le même brochage et la même architecture que le STM32L031, sauf que l'aspect d'ultra basse consommation d'énergie [134, 160]. Arduino est une plate-forme de calcul physique open source basée sur une carte à microcontrôleur et un environnement de développement

qui implémente le langage de traitement [161, 162]. Le motif derrière son développement était de fournir une plate-forme aux professionnels des systèmes embarqués afin de réaliser facilement leurs projets électroniques expérimentaux [163]. Arduino Uno et Arduino Nano sont des cartes microcontrôleur basées sur l'ATmega328, qui est un microcontrôleur Atmel 8 bits AVR RISC hautes performances avec une fréquence de 16 Mhz. [164]. Même que la consommation électrique de ces cartes est considérée comme élevée [163] par rapport au microcontrôleur de conception, elles restent convenables pour le test expérimental de notre projet.

Afin de tester la fonctionnalité et la portée du système d'acquisition proposé, un système de surveillance mobile a été implémenté. Il se compose d'une carte MCU STM32F103 intégrée avec un module LoRa et un écran LCD à caractères. Finalement, le système complet a été mis en fonctionnement et les résultats obtenus sont analysés et discutés.

4.2 Configuration des modules LoRa

Cette section sert à montrer la configuration des modules LoRa utilisés dans le projet. Pour faciliter la programmation, on a construit une bibliothèque qui contient l'ensemble de fonctions de configuration, d'adressage et d'initialisation des modules liés aux capteurs ou bien aux systèmes de surveillance. Elle contient également la table d'adresses et ainsi les fonctions qui permettent de basculer entre les modes de fonctionnement des modules LoRa [136] selon la topologie du système. La liste de configuration et d'adressage des modules utilisés dans le projet est illustrée dans la table 4.1 :

TABLE 4.1 – Liste de configuration des périphériques LoRa

Périphérique	Configuration (HEX)
Capteur de tension/courant	00 01 1A 17 C4
Capteur de radiation/position	00 02 1A 17 C4
Capteur de température/humidité	00 06 1A 17 C4
Dispositif de surveillance	01 02 1A 17 C4

Selon la fiche technique des modules LoRa [136], les deux premiers octets présentent les adresses de l'appareil. Le troisième octet ("1A") signifie :

- Débit UART = 9 600 bits/s.
- Parité = 8N1 (8 bits de données, N : pas de bit de parité, 1 bit d'arrêt).
- Débit aérien = 2,4 Kbps.

Le quatrième octet ("17") signifie que les modules fonctionnent sur le canal 23 (433MHz).

Le cinquième octet ("C4") signifie :

- Puissance de sortie RF = 20 dBm.
- Correction d'erreur directe (FEC) = activé.
- Transmission en mode fixe = activé.
- Temps de réveil par radio (WOR) = 250 ms.
- Mode E/S = PushPull.

Conformément à l'organigramme du capteur illustré à la figure 3.2, les modules LoRa sont configurés automatiquement après la mise sous tension ou la réinitialisation du périphérique. Cela rend également les modules remplaçables et interchangeables entre les périphériques. Les sections suivantes servent pour discuter l'implémentation de chaque capteur et ainsi le système de surveillance.

4.3 Capteur de tension/courant

Pour la détection de tension et de courant, l'implémentation se compose d'une carte Arduino Nano, d'une carte de dérivation sous forme d'un diviseur de tension pour la détection de tension avec un amplificateur opérationnel qui joue le rôle d'un suiveur de tension comme il est mentionné dans 3.4.1. La sortie de l'amplificateur opérationnel est connectée à la broche d'entrée analogique "A6", et celle de la carte de dérivation INA219 pour la détection de courant est connecté à l'interface I2C de l'Arduino. Le module LoRa est connecté à l'Arduino de la manière suivante :

- M0 est connecté à la broche digitale 8
- M1 est connecté à la broche digitale 7.
- Rx est connecté à la broche Tx de l'Arduino.
- Tx est connecté à la broche Rx de l'Arduino.

- Aux est connecté à la broche digitale 6.

Le diagramme de brochage de l'Arduino Nano est illustré dans la figure B.1 de l'annexe.

L'implémentation du capteur de tension et de courant est illustrée à la figure 4.1.

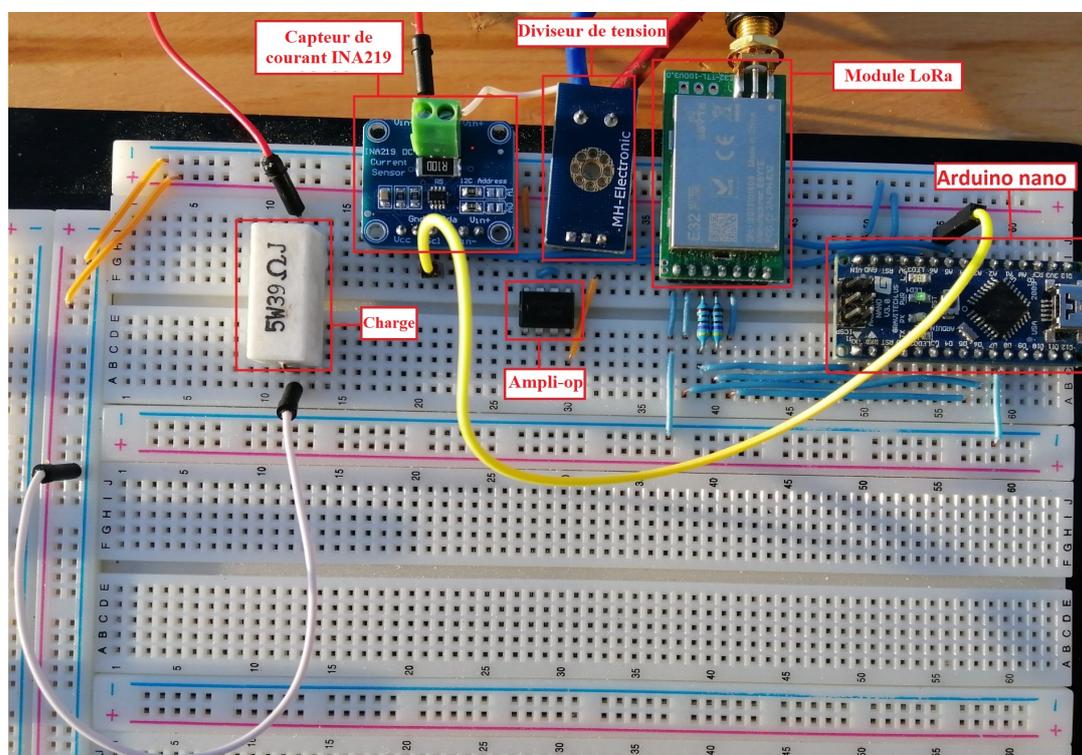


FIGURE 4.1 – Implémentation du capteur LoRa de Tension/Courant.

L'Arduino Nano dispose d'un CAN 10 bits et fonctionne à 5V et sa tension de référence est 5 V. Les résistances du diviseur de tension R_1 et R_2 ont respectivement des valeurs de $30k\Omega$ et $7.5k\Omega$. La tension est calculée selon l'équation 3.1. La mesure du courant est transmise au MCU par le capteur de courant INA219 via l'interface I2C. Pour des fins de test de ce capteur, on a placé une charge constante de 39Ω .

4.4 Capteur de radiation/position

Pour le capteur de radiation et de position, une carte Arduino Uno est utilisée. Aussi, l'implémentation se compose d'un capteur de lux BH1750 pour la mesure de la radiation et du module GY-80 IMU qui contient le magnétomètre à 3 axes HMC5883L et l'accéléromètre à 3 axes ADXL345 pour la mesure d'azimut et d'élévation. Le capteur

de radiation est placé sur la partie supérieure avant du panneau solaire. Le capteur de la position est placé au milieu et en bas du panneau. Le module LoRa est connecté à l'Arduino UNO de la manière suivante :

- M0 est connecté à la broche digitale 11.
- M1 est connecté à la broche digitale 12.
- Rx est connecté à la broche Tx d'Arduino.
- Tx est connecté à la broche Rx d'Arduino.
- Aux est connecté à la broche digitale 13.

Le diagramme de brochage de l'Arduino Uno est illustré dans la figure B.2 de l'annexe. L'implémentation du capteur de position du panneau et de radiation solaire est montré dans la figure 4.2.

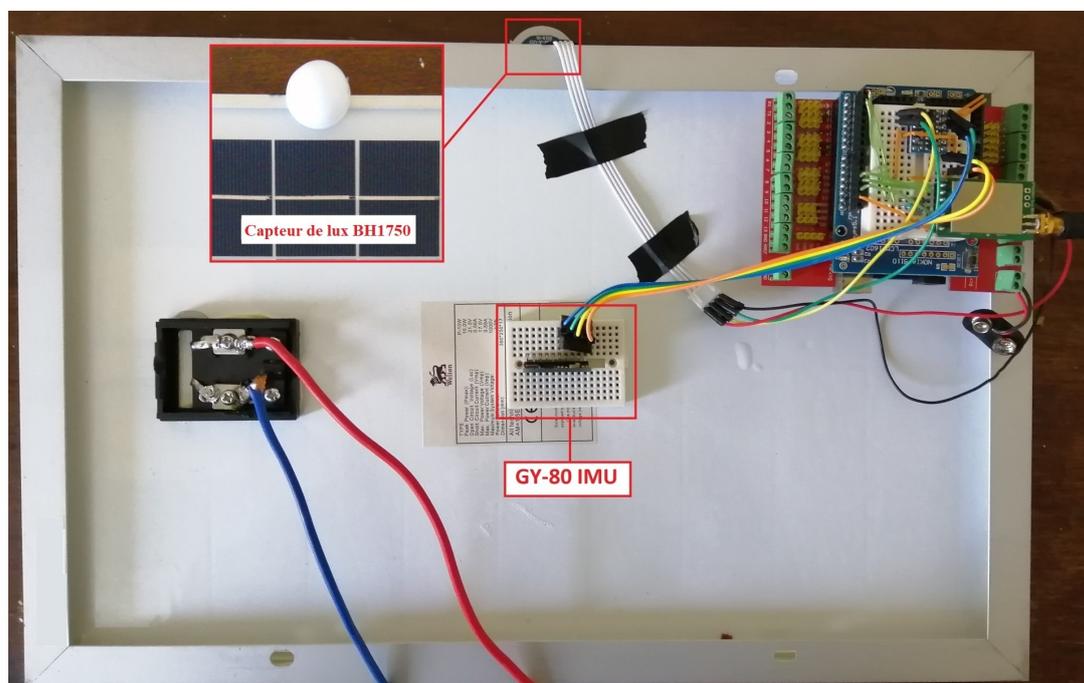


FIGURE 4.2 – Implémentation du capteur LoRa de radiation/position du panneau.

Les modules BH1750 et GY-80 sont connectés à l'Arduino via l'interface I²C et que le module LoRa est connecté à l'interface UART de l'Arduino. Les calculs d'azimut et d'élévation du panneau sont effectués par les équations 3.3 et 3.4. Les données extraites sont ensuite adaptées à l'application proposée. L'angle de déclinaison magnétique en 3.3 est défini selon notre position de 1,6° Est. Dans la phase d'initialisation, le MCU calibre à la fois le magnétomètre et l'accéléromètre afin de supprimer l'erreur de décalage.

4.5 Capteur de température/humidité

Pour le capteur de température et d'humidité, une carte MCU STM32F103 est utilisée avec le capteur numérique de température et d'humidité AM2301 et le module LoRa. Le STM32F103 a presque le même schéma de brochage avec le MCU STM32L031. Le fil de données de l'AM2301 est connecté à la broche PB0. Le module LoRa est connecté à la carte de la manière suivante :

- M0 est connecté à la broche PB15.
- M1 est connecté à la broche PA8.
- Rx est connecté à la broche PA9.
- Tx est connecté à la broche PA10.
- Aux est connecté à la broche PA11.

Le diagramme de brochage de la carte MCU STM32F103 est illustré dans la figure B.3 de l'annexe. L'implémentation du capteur de température et d'humidité est illustrée à la figure 4.3.

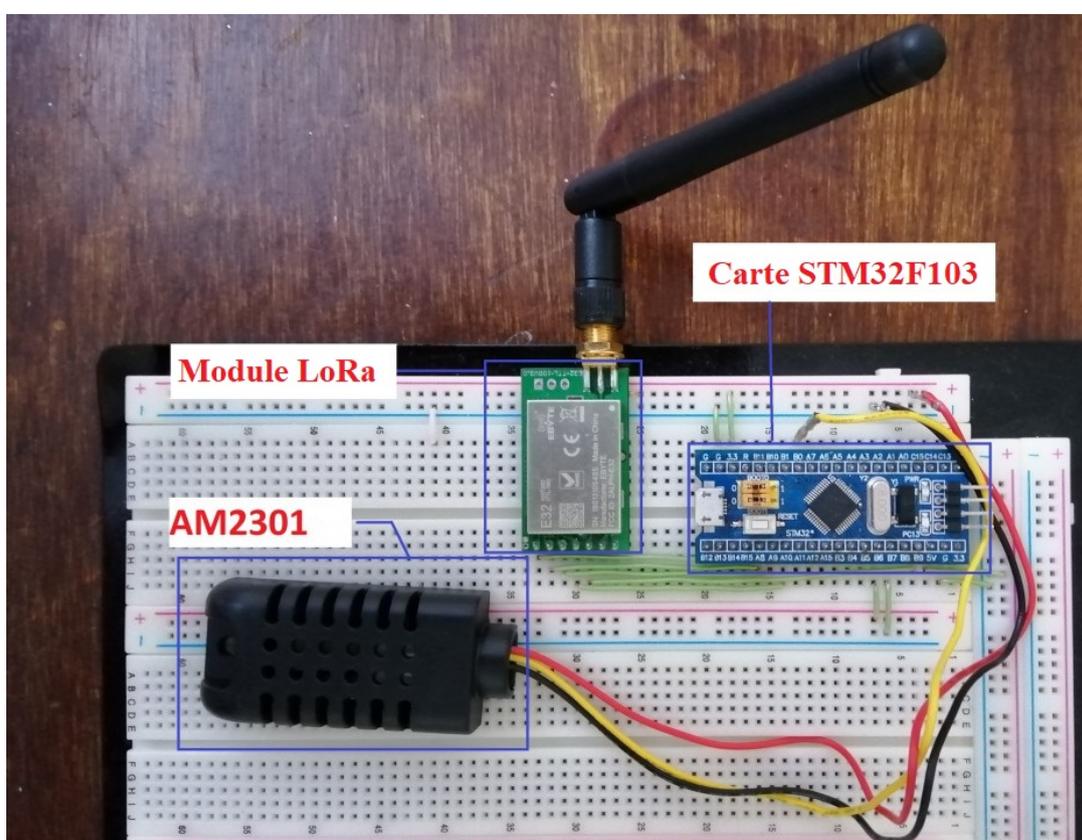


FIGURE 4.3 – Implémentation du capteur de température/humidité LoRa.

4.6 Dispositif de surveillance mobile

Le dispositif de surveillance mobile utilisé pour tester le fonctionnement du système d'acquisition, se compose d'une carte MCU STM32F103, d'un module de communication LoRa et d'un écran LCD à caractères. Il est alimenté par une pile 9V. Le rôle de ce dispositif est la gestion de communication et l'affichage des données reçues à partir des capteurs. Le dispositif de surveillance communique avec les capteurs LoRa à l'aide d'une topologie sans fil en anneau à jeton comme il est montré dans la figure 4.4. Il boucle à travers les capteurs installés en envoyant des requêtes de données. Pour chaque capteur, il envoie une requête de données et attend une réponse pendant une durée prédéterminée. Si le temps d'attente se termine sans obtenir les données du capteur (timeout), le dispositif de surveillance renvoie une deuxième requête. S'il n'y a pas de réponse pour la deuxième fois, le système de surveillance contourne le capteur vers le capteur suivant dans la boucle en anneau. La figure 4.5 montre l'organigramme de l'algorithme de fonctionnement du dispositif de surveillance.

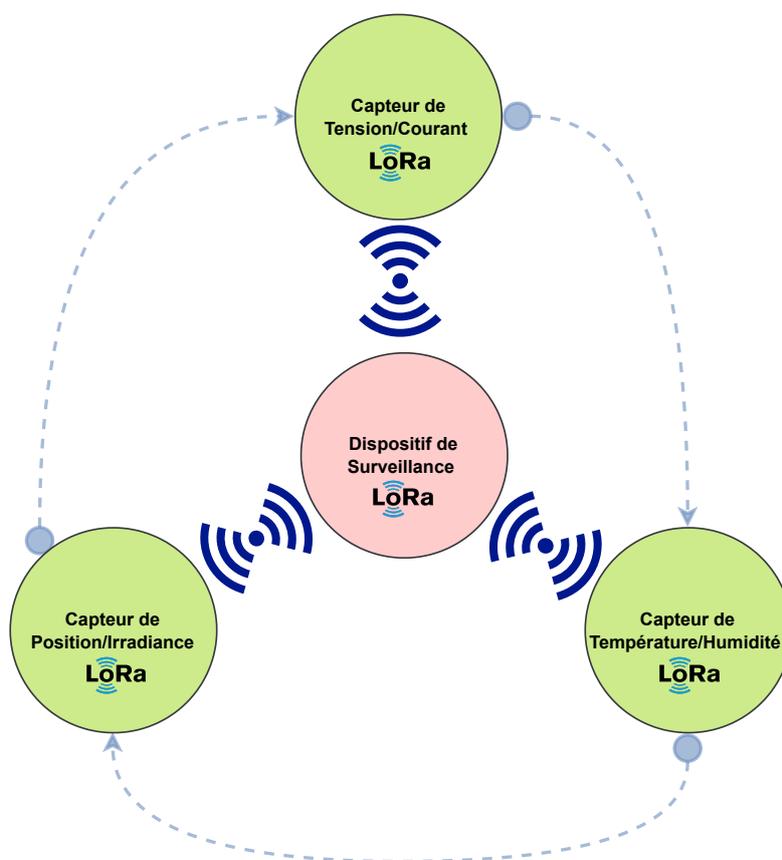


FIGURE 4.4 – Topologie de communication du système de surveillance

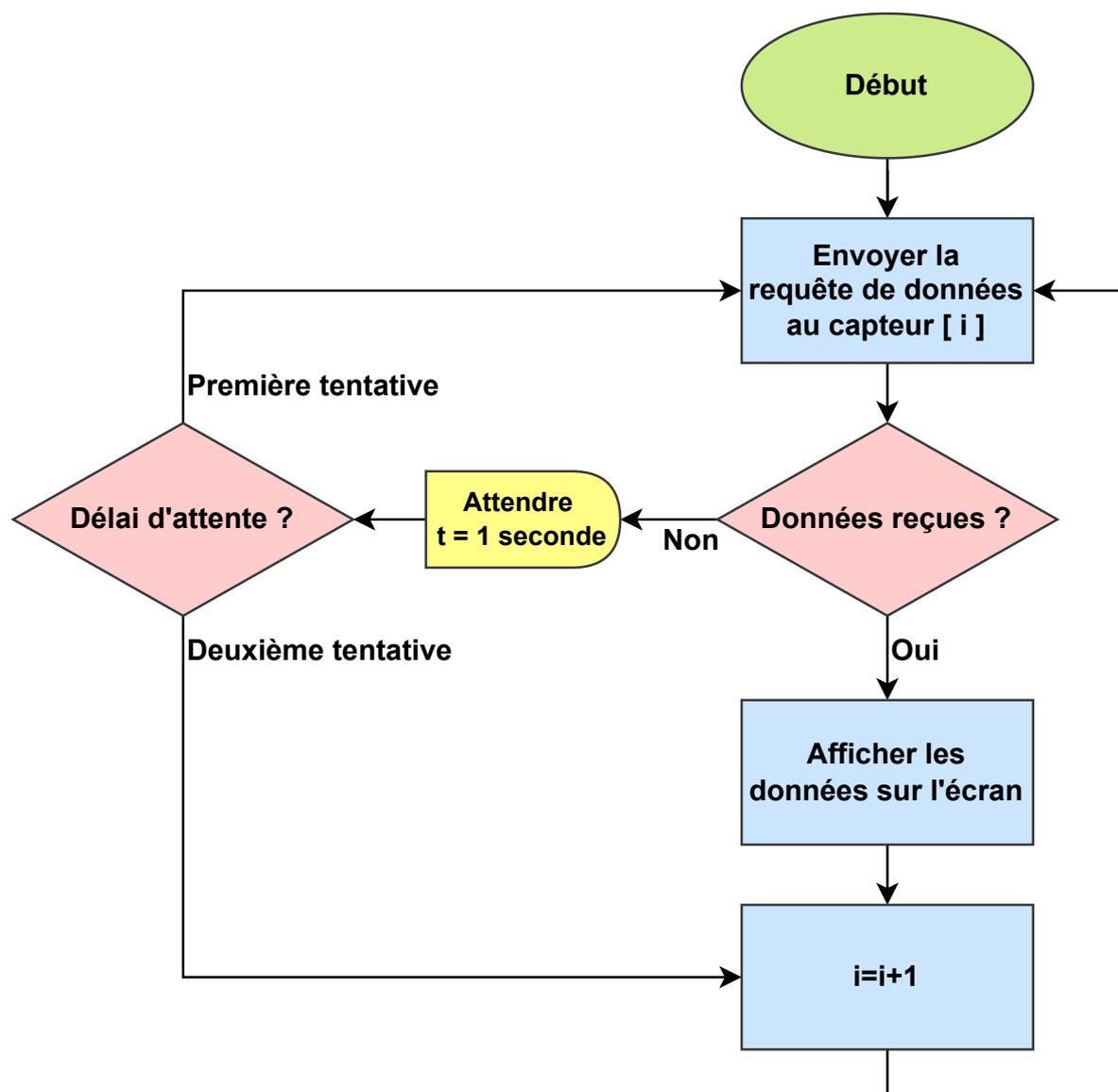


FIGURE 4.5 – Algorithme de fonctionnement du dispositif de surveillance.

Le délai d'attente est défini pour cette application à 1 seconde et peut être redéfini selon le besoin. Le rôle de l'afficheur est l'affichage des mesures reçues à partir des capteurs en temps réel. L'implémentation du système de surveillance mobile est présentée dans la figure 4.6.

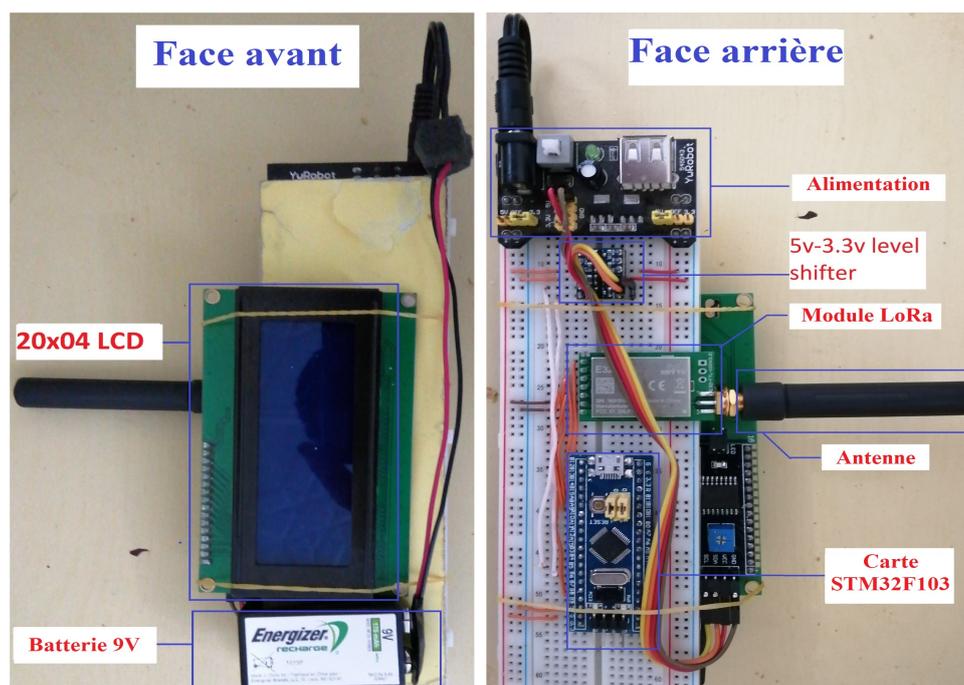


FIGURE 4.6 – Implémentation du système de surveillance LoRa.

4.7 Mise en service du système

Avant la mise en service du système, un test de portée a été effectué. Un émetteur LoRa est configuré pour envoyer en continu un message à l'appareil mobile mis en œuvre auparavant. Le système atteint une portée d'environ 1200m en espace ouvert et d'environ 400m en zone urbaine avec des antennes de 3dBi comme est illustrée dans la figure 4.7.



FIGURE 4.7 – La portée du système de surveillance.

Après le test de la portée, le système complet a été installé avec une position de panneau solaire fixe (azimut = 10°E, élévation = 45°) et une charge constante de 39Ω. Les caractéristiques électriques du panneau solaire utilisé dans le test selon sa plaque signalétique sont montrées dans la table 4.2.

TABLE 4.2 – Caractéristiques électriques du panneau solaire utilisé dans le test.

Paramètre	Valeur
Puissance maximale (P_{max})	10.0W
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	21.5V
Courant de court-circuit (I_{sc})	0.59A
Tension d'alimentation maximale (V_{mp})	17.5V
Courant d'alimentation maximale (I_{mp})	0.56A
Tolérance de puissance	±3%
Dimensions	390*250*17 mm

Afin de tester davantage les performances du système, un module d'enregistrement de données LoRa a été installé sur un ordinateur via un convertisseur USB vers UART. Le module LoRa installé a été configuré avec la même adresse que le dispositif de surveillance mobile. Alors, lorsqu'un capteur transmet les mesures demandées au dispositif de surveillance, les données seront également reçues par le module LoRa installé sur ordinateur. Les données reçues sont acquises par un logiciel de débogage série s'appelle « AccessPort ». AccessPort est un outil de surveillance de port série destiné aux techniciens, ingénieurs et développeurs de logiciels qui conçoivent ou déboguent des projets liés au port série [165]. Le système est mis en service pendant une journée complète, du lever au coucher du soleil pendant environ 15 heures (05h15 à 20h45). Un exemple des résultats obtenus dans le système de surveillance mobile à affichage, après l'installation du système, est présenté à la figure 4.8. Les données reçues sont également acquises par l'ordinateur via le logiciel AccessPort, comme est illustré à la figure 4.9.



FIGURE 4.8 – Affichage du système de surveillance mobile LoRa.

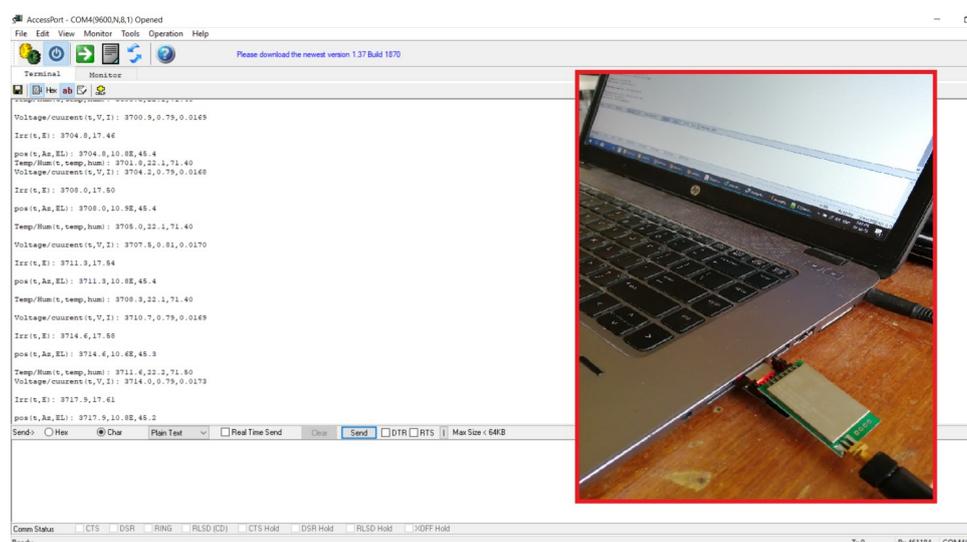


FIGURE 4.9 – Interface logicielle série AccessPort.

Les mesures de tension et de courant obtenues sont présentées à la figure 4.10. La courbe de puissance est illustrée à la figure 4.11. Les données d'éclairément acquises sont présentées à la figure 4.12. La température et l'humidité sont indiquées à la figure 4.13. Les mesures de la position du panneau (azimut et élévation) sont illustrées respectivement dans la figure 4.14 et la figure 4.15.

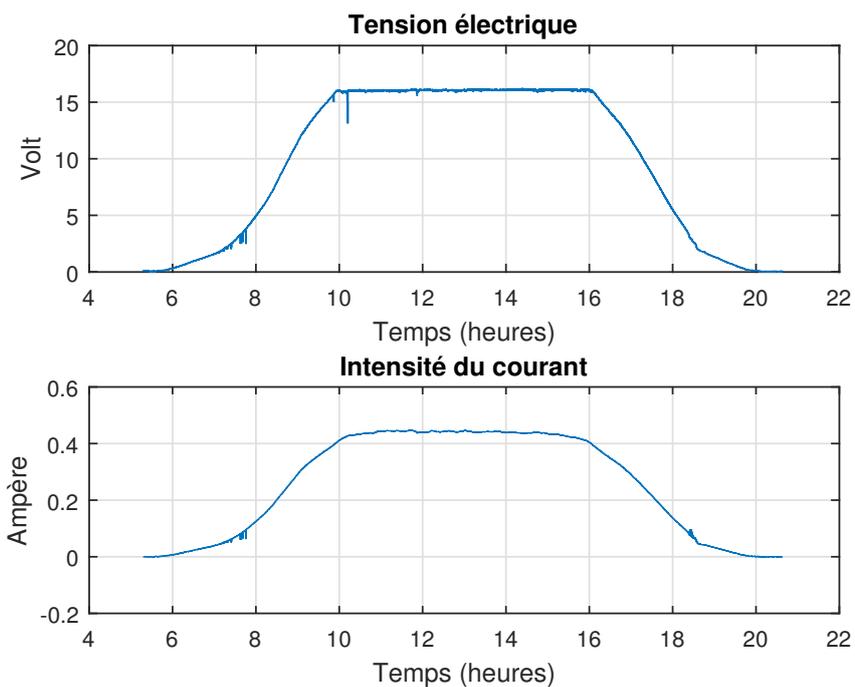


FIGURE 4.10 – Courbe de tension et de courant du test.

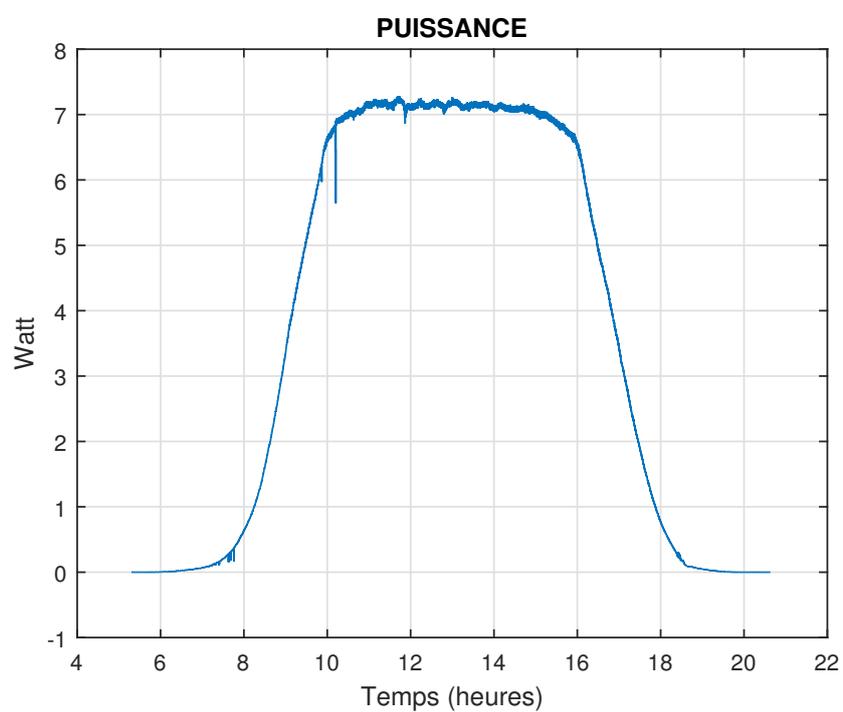


FIGURE 4.11 – Courbe de puissance du test.

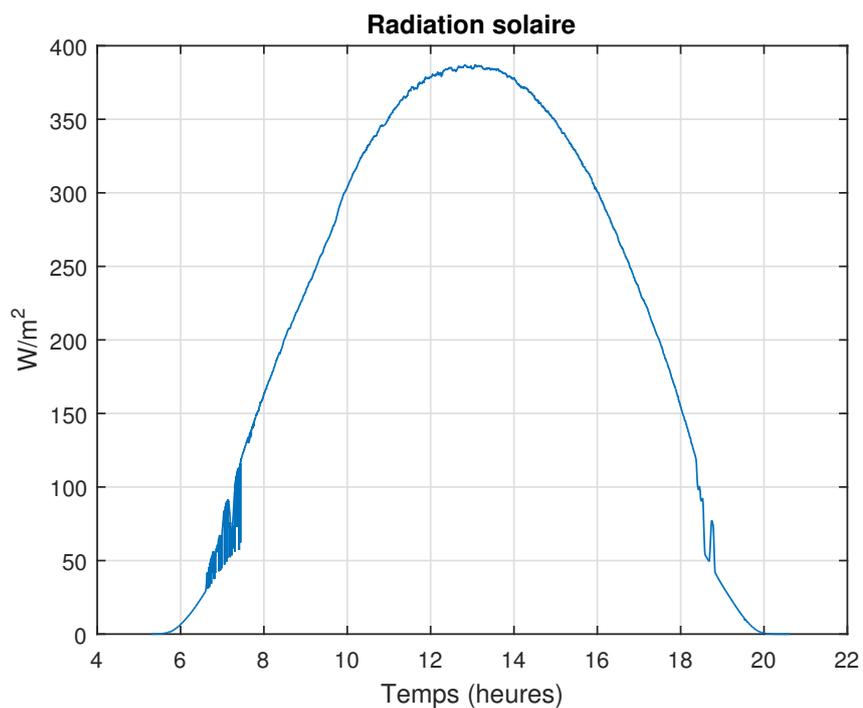


FIGURE 4.12 – Mesures de radiation solaire obtenues à partir du test.

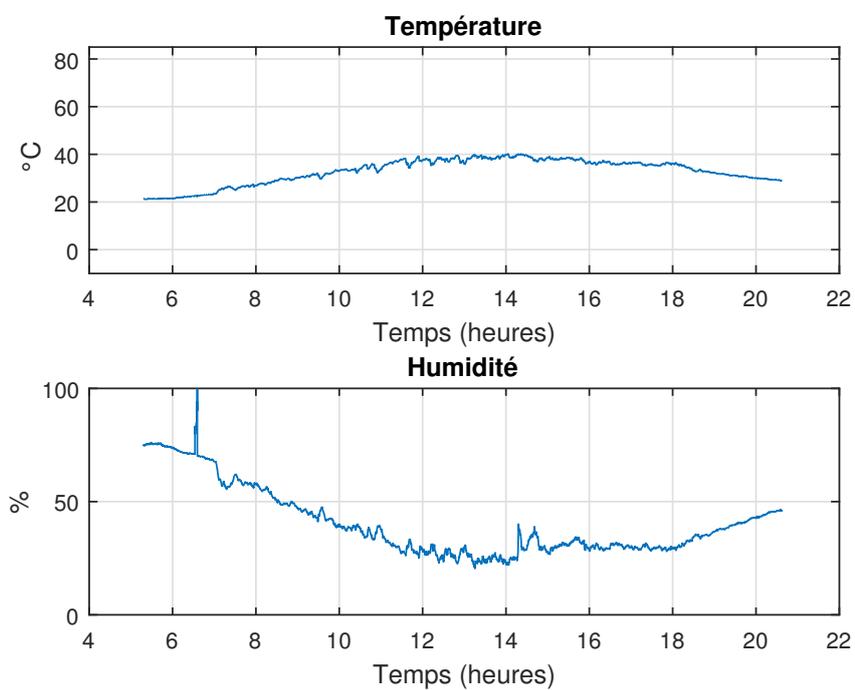


FIGURE 4.13 – Données obtenues de température et d'humidité du test.

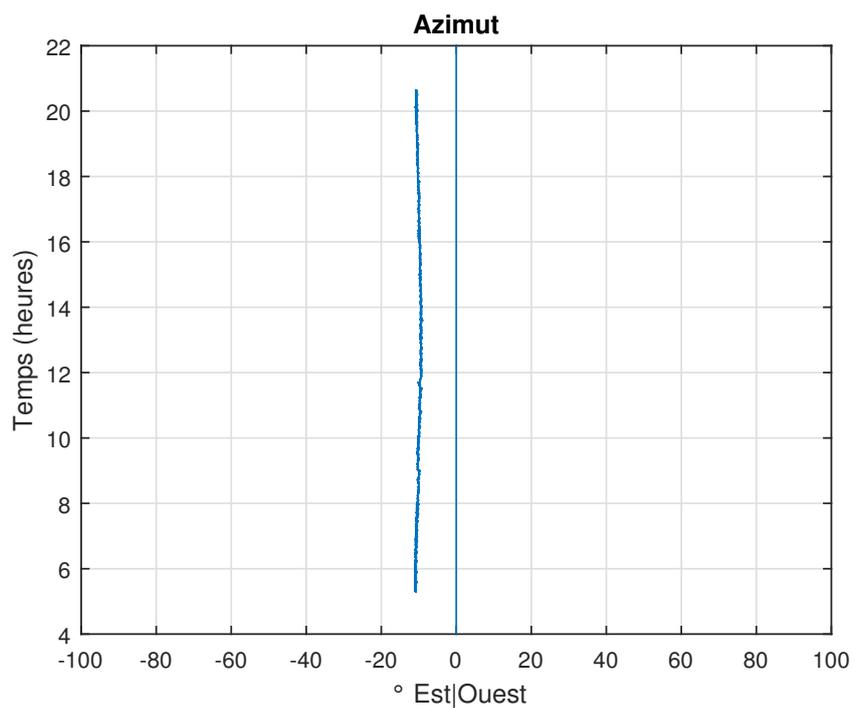


FIGURE 4.14 – Données de mesure d'azimut provenant du test.

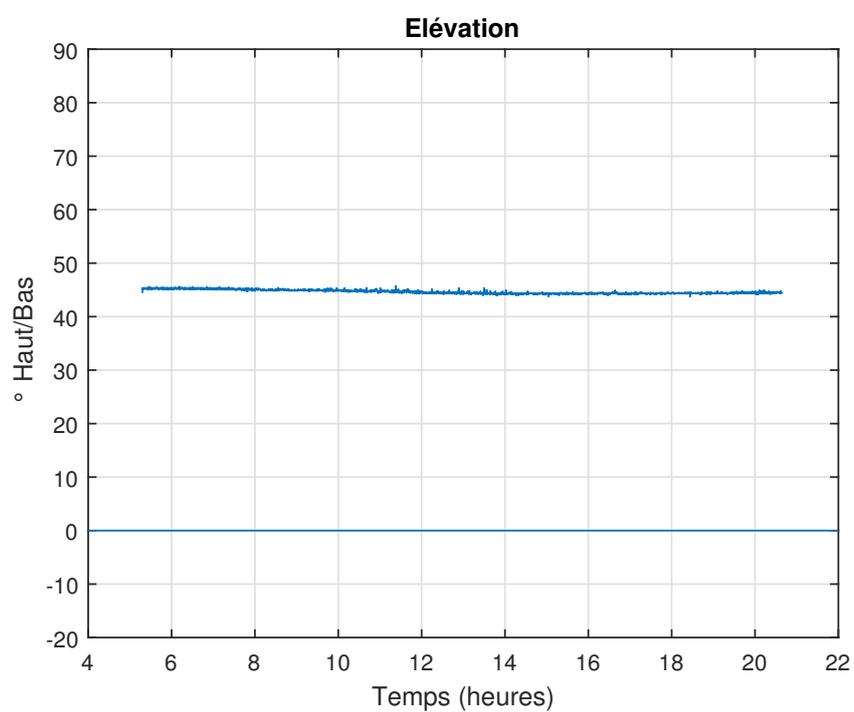


FIGURE 4.15 – Données de mesure d'elevation provenant du test.

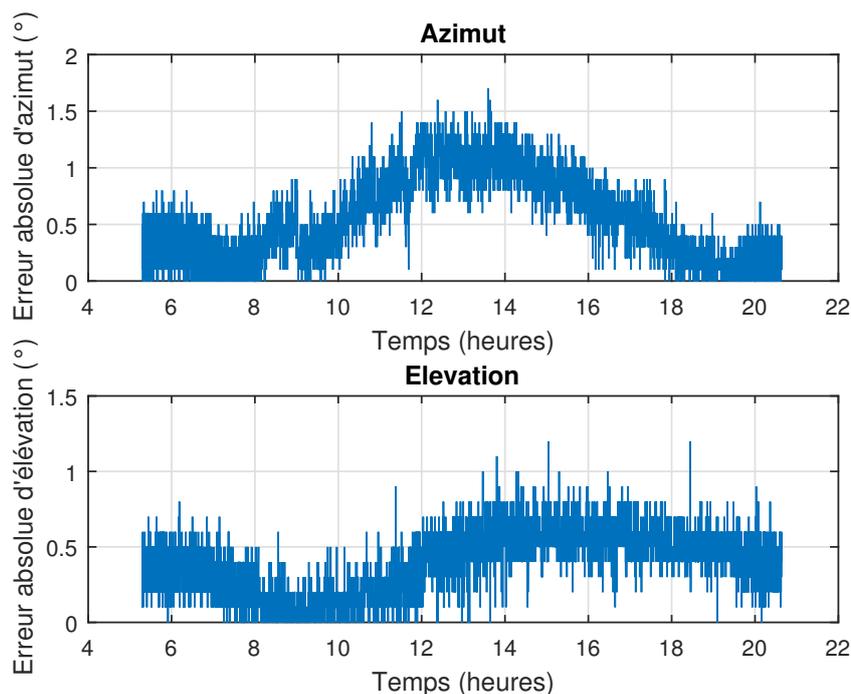


FIGURE 4.16 – Déviation absolue des mesures d’azimut et d’élévation.

Comme le montrent les figures 4.11 et 4.12, la puissance de sortie du panneau est proportionnelle à la radiation solaire. Elle augmente lorsque la radiation augmente jusqu’à $\simeq 11\text{h}00$. À ce stade, le panneau atteint sa puissance maximale qui cesse d’augmenter jusqu’à $\simeq 15\text{h}00$. À partir de ce point, la puissance de sortie du panneau diminue en même temps que la radiation jusqu’au coucher du soleil. Comme le montrent les figures 4.14 et 4.15, un petit décalage de 0,5 degré dû à l’incertitude de l’installation est remarqué. En plus de cela, les mesures d’azimut et d’élévation semblent être relativement stables. La déviation absolue des mesures d’azimut et d’élévation est illustrée à la figure 4.16.

4.8 Conclusion

Un système d’acquisition de données sans fil à longue portée pour les installations photovoltaïques basé sur la technologie LoRa a été implémenté. En premier lieu, La configuration des modules LoRa relatives au capteurs et au système de surveillance a été détaillé. Ensuite, l’implémentation de chaque capteur sans fil LoRa dans le système a

été exposée. Il s'agit d'un capteur de tension/courant, d'un capteur de radiation solaire basé sur un capteur de flux lumineux, d'un capteur de position de panneau basé sur un magnétomètre et un accéléromètre et d'un capteur de température et d'humidité. Puis, Un dispositif de surveillance mobile LoRa a été mis en place afin de tester le système proposé. Il sert à la gestion de communication, à l'affichage des mesures issues des capteurs, et à l'acquisition des données. La topologie et l'algorithme de gestion de communication et ainsi l'implémentation du dispositif ont été discutés. Finalement, le système complet est mis en test pendant une journée complète du lever au coucher du soleil et les résultats obtenus sont affichés et ils sont très acceptables. Ce système ouvre un éventail de capacités pour de nouvelles applications dans le domaine des énergies renouvelables et qui fait l'objet des travaux futurs.

Conclusion générale et perspectives

La surveillance des systèmes de production d'énergie photovoltaïque (PV) est indispensable et est devenue l'une des exigences. L'objectif de cette thèse est l'intégration de nouvelles technologies en vue de la surveillance des systèmes PV. Dans ce contexte, la conception et l'implémentation d'un système de surveillance sans fil longue portée à basse consommation d'énergie pour les installations PV sont présentées. La conception de ce système est basée sur la technologie sans fil longue portée LoRa et les microcontrôleurs STM32L031C6 à ultra faible consommation d'énergie. Ce système est composé d'un ensemble de capteurs sans fil autonomes connectés avec un ou plusieurs systèmes de surveillance. Il s'agit d'un capteur de tension/courant, d'un capteur de radiation solaire basé sur un capteur de luminosité, d'un capteur de position de panneau basé sur un accéléromètre et un magnétomètre pour les installations équipées d'un suiveur solaire, d'un capteur de température et d'humidité et d'un système de surveillance mobile équipé d'un afficheur. Le protocole de gestion de la communication entre les capteurs est également conçu. Afin de nous permettre de mener à bien ce travail, plusieurs aspects ont été abordés dans cette thèse en quatre chapitres concernant la surveillance des installations PV.

Le premier chapitre a servi pour souligner l'importance de la surveillance dans les installations photovoltaïques, et nous avons également fait la modélisation de cellule PV afin d'extraire les paramètres du système qui nécessitent la surveillance. En outre, l'impact des facteurs météorologiques sur le système a été décrit. Ce chapitre comprend aussi une large étude bibliographique sur la surveillance des systèmes PV en utilisant les technologies classiques filaires et sans fil.

Dans le deuxième chapitre, les réseaux de capteurs sans fil (WSN) et les réseaux longue portée (LPWAN) et leur intégration sont décrits et détaillés, soulignant leur grande supériorité à tous les niveaux dans la surveillance des systèmes industriels par rapport aux techniques classiques. Ces nouvelles technologies sont considérées comme la future norme de communication sans fil pour les systèmes de surveillance. De plus, ce chapitre a fourni une comparaison des technologies LPWAN les plus courantes où nous avons conclu que LoRa est la technologie optimale à utiliser pour la surveillance des systèmes PV. Finalement, un état de l'art sur l'utilisation de la technologie LoRa dans les systèmes de surveillance des installations PV a été présenté.

Le troisième chapitre a présenté la conception du système proposé en décrivant le principe de fonctionnement de chaque nœud de capteurs et les algorithmes responsables du traitement et de la transmission de données. En outre, la conception matérielle de chaque capteur, les méthodes de mesures, les schémas électriques et les circuits imprimés conçus ont été présentés.

Le quatrième chapitre a présenté l'implémentation et la mise en service du système conçu dans le troisième chapitre. L'implémentation de chaque capteur et ainsi la configuration des modules de communication ont été décrites. La topologie de communication du réseau, gérée par un dispositif de surveillance mobile implémenté, a été décrite. Finalement, les résultats obtenus après la mise en service du système ont été présentés. Ces derniers sont le fruit de plus de 30750 échantillons de données.

Les résultats obtenus représentent un ensemble de données de mesures en série chronologique, permettant l'utilisation future de l'apprentissage automatique ([Machine Learning \(ML\)](#)) pour créer des systèmes photovoltaïques intelligents, ce qui ouvre une gamme de capacités pour de nouvelles applications dans les installations PV. Les travaux futurs se concentreront sur :

- La fabrication des cartes de circuits imprimés conçues pour la création d'une plate-forme de surveillance complète pour l'utiliser dans les travaux futurs.
- L'amélioration des performances du système de surveillance actuel en termes de fiabilité énergétique par le perfectionnement de protocole de communication et de la topologie du réseau.

- L'intégration d'un gyroscope au capteur de position pour améliorer la précision et la stabilité.
- La fabrication de circuits imprimés conçu du système pour la création d'une plateforme de surveillance d'une installation PV.
- L'extension du système en ajoutant d'autres nœuds de capteurs afin de nous permettre de mesurer plus de paramètres tels que la vitesse et l'orientation du vent et les températures de fonctionnement des panneaux solaires.
- L'intégration du système actuel avec un système de surveillance des parcs éoliens en tenant compte de la possibilité de créer un système de contrôle distribué sans fil.
- La conception d'un suiveur solaire intelligent qui prend en compte les changements climatiques sans perturber les performances de l'installation grâce à la conception d'un capteur d'écart par rapport au rayonnement solaire, l'intégration de données GPS et l'utilisation de systèmes de contrôle et de supervision avancés basés sur l'intelligence artificielle.
- La création d'une plateforme de prédiction de la production d'installations PV basée sur des données météorologiques et des algorithmes [ML](#).

Bibliographie

- [1] A. Cherp, V. Vinichenko, J. Jewell, E. Brutschin, and B. Sovacool, “Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions : A meta-theoretical framework,” *Energy Research & Social Science*, vol. 37, pp. 175–190, 2018.
- [2] N. Didenko, D. Skripnuk, and O. Mirolyubova, “Urbanization and greenhouse gas emissions from industry,” in *IOP conference series : earth and environmental science*, vol. 72, p. 012014, IOP Publishing, 2017.
- [3] K. Kikkas and S. Kulik, “Modelling the effect of human activity on fresh water extraction from the earth’s reserves,” in *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, vol. 180, p. 012017, IOP Publishing, 2018.
- [4] V. N. Kozlovsky, V. E. Lysov, D. V. Antipov, V. V. Ermakov, and D. F. Skripnuk, “Calculation and statistical experiment on the monte carlo method when assessing the stability of the technical characteristics of the automobile generator set in mass production,” in *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, pp. 565–568, IEEE, 2019.
- [5] M. Asif and T. Muneer, “Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 11, no. 7, pp. 1388–1413, 2007.
- [6] P. Pearson, *Energy policies in an uncertain world*. Springer, 2016.
- [7] S. Ghasemian, A. Faridzad, P. Abbaszadeh, A. Taklif, A. Ghasemi, and R. Hafezi, “An overview of global energy scenarios by 2040 : identifying the driving forces using cross-impact analysis method,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, pp. 1–24, 2020.
- [8] A. D. Kamble, V. K. Saxena, P. D. Chavan, and V. A. Mendhe, “Co-gasification of coal and biomass an emerging clean energy technology : Status and prospects of development in indian context,” *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 29, no. 2, pp. 171–186, 2019.
- [9] T. R. Karl, J. M. Melillo, T. C. Peterson, and S. J. Hassol, *Global climate change impacts in the United States*. Cambridge University Press, 2009.
- [10] K. Kuruvinashetti, H. K. Tanneru, P. Pillay, and M. Packirisamy, “Review on microphotosynthetic power cells—a low-power energy-harvesting bioelectrochemical cell : From fundamentals to applications,” *Energy Technology*, vol. 9, no. 7, p. 2001002, 2021.

- [11] C. Philibert, P. Frankl, R. Jones, D. Houssin, and R. Gaghen, “Solar energy perspectives : executive summary. international energy agency,” 2011.
- [12] P. Ray, “Renewable energy and sustainability,” *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 21, no. 8, pp. 1517–1533, 2019.
- [13] T. Zhang and H. Yang, “High efficiency plants and building integrated renewable energy systems : Building-integrated photovoltaics (bipv),” *Handbook of Energy Efficiency in Buildings ; Elsevier : Amsterdam, The Netherlands*, 2018.
- [14] A. Jäger-Waldau, “Snapshot of photovoltaics—march 2017,” *Sustainability*, vol. 9, no. 5, p. 783, 2017.
- [15] A. Jäger-Waldau, “Pv status report 2018,” *Publications Office of the European Union*, 2019.
- [16] A. Jäger-Waldau, “Snapshot of photovoltaics—february 2019,” *Energies*, vol. 12, no. 5, p. 769, 2019.
- [17] A. Jäger-Waldau, “Snapshot of photovoltaics—february 2020,” *Energies*, vol. 13, no. 4, p. 930, 2020.
- [18] I. E. Agency, “Market report series : Renewables 2018,” 2018.
- [19] I. IRENA, “Future of wind : Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects,” *Abu Dhabi*, 2019.
- [20] A. Benatiallah, R. Mostefaoui, M. Boubekri, and N. Boubekri, “A simulation model for sizing pv installations,” *Desalination*, vol. 209, no. 1-3, pp. 97–101, 2007.
- [21] P. Rappaport, “The photovoltaic effect and its utilization,” *Solar Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 8–18, 1959.
- [22] G. Boyle *et al.*, *Renewable energy : power for a sustainable future*, vol. 2. OXFORD university press Oxford, 2004.
- [23] J. Mundo-Hernández, B. de Celis Alonso, J. Hernández-Álvarez, and B. de Celis-Carrillo, “An overview of solar photovoltaic energy in mexico and germany,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 31, pp. 639–649, 2014.
- [24] O. Malandrino, D. Sica, M. Testa, and S. Supino, “Policies and measures for sustainable management of solar panel end-of-life in italy,” *Sustainability*, vol. 9, no. 4, p. 481, 2017.
- [25] C. Nna, A. Gbadegesin, and K. Lawal, “A decentralized, renewable-energy-powered business hub for rural areas : A case study of ilakan community, nigeria,” in *2016 Clemson University Power Systems Conference (PSC)*, pp. 1–7, IEEE, 2016.
- [26] K. Kety, K. Amou, K. Sagna, K. Tepe, Y. Lare, and K. Napo, “Modélisation et simulation d’un générateur photovoltaïque : Cas du module polycristallin ecoline lx-260p installé au dispensaire de sévagan (togo),” *Journal of Renewable Energies*, vol. 19, no. 4, pp. 633–645, 2016.
- [27] N. Agarwal, “Design and simulink of intelligent solar energy improvement with pv module,” *International Journal of Information and Computation Technology, ISSN*, pp. 0974–2239, 2014.
- [28] S. Liu and R. A. Dougal, “Dynamic multiphysics model for solar array,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 2, pp. 285–294, 2002.

- [29] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "Pv panel model based on datasheet values," in *2007 IEEE international symposium on industrial electronics*, pp. 2392–2396, IEEE, 2007.
- [30] A. O. M. Yahya, A. O. Mahmoud, and I. Youm, "Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque," *Journal of Renewable Energies*, vol. 11, no. 3, pp. 473–483, 2008.
- [31] S. Surawdhaniwar and M. R. Diwan, "Study of maximum power point tracking using perturb and observe method," *Int. J. Adv. Res. Comput. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 5, pp. 106–110, 2012.
- [32] D. Hohm and M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms," *Progress in photovoltaics : Research and Applications*, vol. 11, no. 1, pp. 47–62, 2003.
- [33] J. Barbot, R. Boukenoui, M. Gaikwad, and M. Abido, "Evaluation of micro controller based maximum power point tracking methods using dspace platform," *Australian University Power Engineering Conference*, 2006.
- [34] T. Esram and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [35] R. F. Coelho, F. M. Concer, and D. C. Martins, "A mppt approach based on temperature measurements applied in pv systems," in *2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, pp. 1–6, IEEE, 2010.
- [36] R. Foster, M. Ghassemi, and A. Cota, *Solar energy : renewable energy and the environment*. CRC press, 2009.
- [37] F. Duerr, Y. Meuret, and H. Thienpont, "Tailored free-form optics with movement to integrate tracking in concentrating photovoltaics," *Optics Express*, vol. 21, no. 103, pp. A401–A411, 2013.
- [38] S. Yoshida, S. Ueno, N. Kataoka, H. Takakura, and T. Minemoto, "Estimation of global tilted irradiance and output energy using meteorological data and performance of photovoltaic modules," *Solar Energy*, vol. 93, pp. 90–99, 2013.
- [39] A. Ziane, A. Necaibia, N. Sahouane, R. Dabou, M. Mostefaoui, A. Bouraiou, S. Khelifi, A. Rouabhia, and M. Blal, "Photovoltaic output power performance assessment and forecasting : impact of meteorological variables," *Solar Energy*, vol. 220, pp. 745–757, 2021.
- [40] S. Kandil, M. Mohamad, and G. Ahmad, "Effect of local meteorological conditions on the pv module performance," in *2nd World Renewable Energy Conference. Reading, UK*, pp. 467–72, 1992.
- [41] S. Mekhilef, R. Saidur, and M. Kamalisarvestani, "Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 2920–2925, 2012.
- [42] G. Bayrak and M. Cebeci, "Monitoring a grid connected pv power generation system with labview," in *2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 562–567, IEEE, 2013.
- [43] A. Rivai and N. A. Rahim, "A low-cost photovoltaic (pv) array monitoring system," in *2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT)*, pp. 169–174, IEEE, 2013.

- [44] E. Van Dyk, A. Gxasheka, and E. Meyer, "Monitoring current–voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules," *Renewable Energy*, vol. 30, no. 3, pp. 399–411, 2005.
- [45] A. Ghosh, "Soiling losses : A barrier for india's energy security dependency from photovoltaic power," *Challenges*, vol. 11, no. 1, p. 9, 2020.
- [46] M. Fuentes, M. Vivar, J. Burgos, J. Aguilera, and J. Vacas, "Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for pv system monitoring using arduino™ that complies with iec standards," *Solar Energy materials and solar cells*, vol. 130, pp. 529–543, 2014.
- [47] F. Touati, M. Al-Hitmi, N. A. Chowdhury, J. A. Hamad, and A. J. S. P. Gonzales, "Investigation of solar pv performance under doha weather using a customized measurement and monitoring system," *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 564–577, 2016.
- [48] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Development of an integrated data-acquisition system for renewable energy sources systems monitoring," *Renewable Energy*, vol. 28, no. 1, pp. 139–152, 2003.
- [49] K. Kalaitzakis, E. Koutroulis, and V. Vlachos, "Development of a data acquisition system for remote monitoring of renewable energy systems," *Measurement*, vol. 34, no. 2, pp. 75–83, 2003.
- [50] N. Forero, J. Hernández, and G. Gordillo, "Development of a monitoring system for a pv solar plant," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 15-16, pp. 2329–2336, 2006.
- [51] A. Drews, A. De Keizer, H. G. Beyer, E. Lorenz, J. Betcke, W. Van Sark, W. Heydenreich, E. Wiemken, S. Stettler, P. Toggweiler, *et al.*, "Monitoring and remote failure detection of grid-connected pv systems based on satellite observations," *Solar energy*, vol. 81, no. 4, pp. 548–564, 2007.
- [52] S. Rosiek and F. Batlles, "A microcontroller-based data-acquisition system for meteorological station monitoring," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 12, pp. 3746–3754, 2008.
- [53] H. Belmili, S. M. A. Cheikh, M. Haddadi, and C. Larbes, "Design and development of a data acquisition system for photovoltaic modules characterization," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 1484–1492, 2010.
- [54] M. Zahran, Y. Atia, A. Al-Hussain, and I. El-Sayed, "Labview based monitoring system applied for pv power station," in *Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation (ACMOS'10)*, pp. 65–70, 2010.
- [55] A. Mahjoubi, R. Fethi Mechlouch, and A. Ben Brahim, "A low cost wireless data acquisition system for a remote photovoltaic (pv) water pumping system," *Energies*, vol. 4, no. 1, pp. 68–89, 2011.
- [56] M. Anwari, M. M. Dom, and M. Rashid, "Small scale pv monitoring system software design," *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 586–592, 2011.
- [57] A. Chouder, S. Silvestre, B. Taghezouit, and E. Karatepe, "Monitoring, modelling and simulation of pv systems using labview," *Solar Energy*, vol. 91, pp. 337–349, 2013.
- [58] J. Han, C.-S. Choi, W.-K. Park, I. Lee, and S.-H. Kim, "Plc-based photovoltaic system management for smart home energy management system," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 60, no. 2, pp. 184–189, 2014.

- [59] A. Okhorzina, A. Bikbulatov, A. V. Yurchenko, N. Bernhard, and O. Aldoshina, "The development of monitoring and control system of the low pv/t solar system," in *MATEC Web of Conferences. Vol. 79 : Information-Measuring Equipment and Technologies (IME&T 2016).—Les Ulis, 2016.*, vol. 792016, p. 1010, [sn], 2016.
- [60] A. López-Vargas, M. Fuentes, M. V. García, and F. J. Muñoz-Rodríguez, "Low-cost datalogger intended for remote monitoring of solar photovoltaic standalone systems based on arduino™," *IEEE Sensors journal*, vol. 19, no. 11, pp. 4308–4320, 2019.
- [61] I. González and A. J. Calderón, "Integration of open source hardware arduino platform in automation systems applied to smart grids/micro-grids," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 36, p. 100557, 2019.
- [62] N. A. A. Jamil, S. A. Jumaat, S. Salimin, M. N. Abdullah, and A. F. M. Nor, "Performance enhancement of solar powered floating photovoltaic system using arduino approach," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 11, no. 2, p. 651, 2020.
- [63] L. Charaabi, "Open monitoring system for photovoltaic solar installations," in *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, pp. 1068–1071, IEEE, 2020.
- [64] S. Ansari, A. Ayob, M. S. H. Lipu, M. H. M. Saad, and A. Hussain, "A review of monitoring technologies for solar pv systems using data processing modules and transmission protocols : Progress, challenges and prospects," *Sustainability*, vol. 13, no. 15, p. 8120, 2021.
- [65] R. Patel, "Techno-commercial analysis of wired and wireless monitoring in operational solar pv plants," in *2016 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon)*, pp. 104–111, IEEE, 2016.
- [66] B. Zhang, J. Zuo, and W. Mao, "Smartwaz : Design and implementation of a smart wifi access system assisted by zigbee," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 31002–31009, 2019.
- [67] I. Allafi and T. Iqbal, "Design and implementation of a low cost web server using esp32 for real-time photovoltaic system monitoring," in *2017 IEEE electrical power and energy conference (EPEC)*, pp. 1–5, IEEE, 2017.
- [68] S. H. Pramono, S. N. Sari, and E. Maulana, "Internet-based monitoring and protection on pv smart grid system," in *2017 International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology (SIET)*, pp. 448–453, IEEE, 2017.
- [69] L. O. Aghenta and M. T. Iqbal, "Low-cost, open source iot-based scada system design using thinger. io and esp32 thing," *Electronics*, vol. 8, no. 8, p. 822, 2019.
- [70] M. Boukhechba, A. Bouzouane, S. Gaboury, C. Gouin-Vallerand, S. Giroux, and B. Bouchard, "A novel bluetooth low energy based system for spatial exploration in smart cities," *Expert Systems with Applications*, vol. 77, pp. 71–82, 2017.
- [71] V. Tsira and G. Nandi, "Bluetooth technology : Security issues and its prevention," *A Survey. In International Journal of Computer Technology and Applications (IJCTA) Vol*, vol. 5, 2014.

- [72] P. T. Le, H.-L. Tsai, and T. H. Lam, "A wireless visualization monitoring, evaluation system for commercial photovoltaic modules solely in matlab/simulink environment," *Solar Energy*, vol. 140, pp. 1–11, 2016.
- [73] Y. Bikrat, D. Moussaid, A. Benali, and A. Benlghazi, "Electronic and computer system for monitoring a photovoltaic station," in *2018 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, pp. 1–6, IEEE, 2018.
- [74] S. Sarabia, C. Figueroa, A. Zamora, M. Paternina, *et al.*, "Wireless and real-time photovoltaic power monitoring system," in *2018 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1–6, IEEE, 2018.
- [75] S. Mohapatra, M. Aggarwal, and S. K. Jindal, "Remote power monitoring and distribution system of a solar based power plant," in *Proceedings of 3rd International Conference on Internet of Things and Connected Technologies (ICIoTCT)*, pp. 26–27, 2018.
- [76] I. Haq, Z. Rahman, S. Ali, and E. Faisal, "Gsm technology : architecture, security, and future challenges," *Int. J. Sci. Eng. Adv. Technol*, vol. 5, no. 1, pp. 70–74, 2017.
- [77] A. Poman, M. Gundras, and P. Pujari, "Gsm based lan monitoring system," *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 3848–3851, 2012.
- [78] G. C. Ngo, J. K. I. Floriza, C. M. C. Creayla, F. C. C. Garcia, and E. Q. B. Macabebe, "Real-time energy monitoring system for grid-tied photovoltaic installations," in *TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference*, pp. 1–4, IEEE, 2015.
- [79] O. B. Belghith and L. Sbita, "Remote gsm module monitoring and photovoltaic system control," in *2014 First International Conference on Green Energy ICGE 2014*, pp. 188–192, IEEE, 2014.
- [80] F. Shariff, N. Abd Rahim, and W. P. Hew, "Zigbee-based data acquisition system for online monitoring of grid-connected photovoltaic system," *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 3, pp. 1730–1742, 2015.
- [81] O. G. Aju, "A survey of zigbee wireless sensor network technology : Topology, applications and challenges," *International Journal of Computer Applications*, vol. 130, no. 9, pp. 47–55, 2015.
- [82] N. Batista, R. Melício, J. Matias, and J. Catalão, "Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building/home energy management using zigbee devices within a smart grid," *Energy*, vol. 49, pp. 306–315, 2013.
- [83] P. Papageorgas, D. Piromalis, K. Antonakoglou, G. Vokas, D. Tseles, and K. Arvanitis, "Smart solar panels : In-situ monitoring of photovoltaic panels based on wired and wireless sensor networks," *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 535–545, 2013.
- [84] Y. Li, P. Lin, H. Zhou, Z. Chen, L. Wu, S. Cheng, and F. Su, "On-line monitoring system of pv array based on internet of things technology," in *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, vol. 93, p. 012078, IOP Publishing, 2017.
- [85] A. Sabry, W. Hasan, M. Kadir, M. Radzi, and S. Shafie, "Wireless monitoring prototype for photovoltaic parameters," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci*, vol. 11, no. 1, 2018.

- [86] M. Cihan and M. Koseoglu, "Monitoring system for solar panel using xbee zb module based wireless sensor networks," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 290–295, 2019.
- [87] S. Ayesh, P. Ramesh, and S. Ramakrishnan, "Design of wireless sensor network for monitoring the performance of photovoltaic panel," in *2017 Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA)*, pp. 1–6, IEEE, 2017.
- [88] K. Xia, J. Ni, Y. Ye, P. Xu, and Y. Wang, "A real-time monitoring system based on zigbee and 4g communications for photovoltaic generation," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 52–63, 2020.
- [89] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area networks : An overview," *iee communications surveys & tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017.
- [90] A. Flammini, P. Ferrari, D. Marioli, E. Sisinni, and A. Taroni, "Wired and wireless sensor networks for industrial applications," *Microelectronics journal*, vol. 40, no. 9, pp. 1322–1336, 2009.
- [91] T. Wendt, F. Volk, and E. Mackensen, "A benchmark survey of long range (loratm) spread-spectrum-communication at 2.45 ghz for safety applications," in *2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, pp. 1–4, IEEE, 2015.
- [92] S. V. Kuznetsov, "Analysis of on-board wireless sensor network as an alternative to traditional wired network," *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, vol. 23, no. 1, pp. 49–58, 2020.
- [93] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, "Understanding the limits of lorawan," *IEEE Communications magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34–40, 2017.
- [94] H. E. Amara, S. Latreche, M. Sid, and M. Khemliche, "Sliding mode observer and event triggering mechanism co-design," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 10, no. 2, pp. 5487–5491, 2020.
- [95] S. P. Singh and S. C. Sharma, "A novel energy efficient clustering algorithm for wireless sensor networks," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 7, no. 4, pp. 1775–1780, 2017.
- [96] M. A. Matin and M. Islam, "Overview of wireless sensor network," *Wireless sensor networks-technology and protocols*, vol. 1, no. 3, 2012.
- [97] M. Pule, A. Yahya, and J. Chuma, "Wireless sensor networks : A survey on monitoring water quality," *Journal of applied research and technology*, vol. 15, no. 6, pp. 562–570, 2017.
- [98] M. Majid, S. Habib, A. R. Javed, M. Rizwan, G. Srivastava, T. R. Gadekallu, and J. C.-W. Lin, "Applications of wireless sensor networks and internet of things frameworks in the industry revolution 4.0 : A systematic literature review," *Sensors*, vol. 22, no. 6, p. 2087, 2022.
- [99] J. Amutha, S. Sharma, and J. Nagar, "Wsn strategies based on sensors, deployment, sensing models, coverage and energy efficiency : Review, approaches and open issues," *Wireless Personal Communications*, vol. 111, no. 2, pp. 1089–1115, 2020.

- [100] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008.
- [101] M. K. Singh, S. I. Amin, S. A. Imam, V. K. Sachan, and A. Choudhary, "A survey of wireless sensor network and its types," in *2018 International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*, pp. 326–330, IEEE, 2018.
- [102] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks : a survey," *Computer networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [103] D. Walteneagus and P. Christian, "Fundamentals of wireless sensor networks : theory and practice," *A John Wiley and Sons, Ltd*, vol. 7, no. 8, p. 46, 2010.
- [104] Q. Mamun, "A qualitative comparison of different logical topologies for wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 12, no. 11, pp. 14887–14913, 2012.
- [105] A. Shrestha and L. Xing, "A performance comparison of different topologies for wireless sensor networks," in *2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*, pp. 280–285, IEEE, 2007.
- [106] M. Anteur, V. Deslandes, N. Thomas, and A.-L. Beylot, "Ultra narrow band technique for low power wide area communications," in *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6, IEEE, 2015.
- [107] N. Naik, "Lpwan technologies for iot systems : choice between ultra narrow band and spread spectrum," in *2018 IEEE international systems engineering symposium (ISSE)*, pp. 1–8, IEEE, 2018.
- [108] T. Lassen, "Long-range rf communication : Why narrowband is the de facto standard," *White Paper*, 2014.
- [109] H. R. Walker, "Understanding ultra narrowband modulation.," *Microwaves & RF*, vol. 42, no. 12, pp. 53–54, 2003.
- [110] R. L. Peterson, D. E. Borth, and R. E. Ziemer, *An introduction to spread-spectrum communications*. Prentice-Hall, Inc., 1995.
- [111] P. Prabakaran, "Tutorial on spread spectrum technology," *EETimes-Designlines Wireless Netw.*, 2003.
- [112] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment," *ICT express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2019.
- [113] M. Iqbal, A. Y. M. Abdullah, and F. Shabnam, "An application based comparative study of lpwan technologies for iot environment," in *2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, pp. 1857–1860, IEEE, 2020.
- [114] J. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman, and J. Hoebeke, "A survey of lorawan for iot : From technology to application," *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3995, 2018.

- [115] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, “Long-range communications in unlicensed bands : The rising stars in the iot and smart city scenarios,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, 2016.
- [116] Y. D. Beyene, R. Jantti, O. Tirkkonen, K. Ruttik, S. Iraj, A. Larmo, T. Tirronen, and J. Torsner, “Nb-iot technology overview and experience from cloud-ran implementation,” *IEEE wireless communications*, vol. 24, no. 3, pp. 26–32, 2017.
- [117] A. Visvizi, M. Lytras, X. Zhang, and J. Zhao, *Foreign Business in China and Opportunities for Technological Innovation and Sustainable Economics*. IGI Global, 2019.
- [118] T. Bouguera, J.-F. Diouris, J.-J. Chaillout, R. Jaouadi, and G. Andrieux, “Energy consumption model for sensor nodes based on lora and lorawan,” *Sensors*, vol. 18, no. 7, p. 2104, 2018.
- [119] “An1200.22 lora modulation basics, revision 2, SEMTECH, CAMARILLO, CA, USA,” 2015.
- [120] F. A. Aoudia, M. Gautier, M. Magno, M. Le Gentil, O. Berder, and L. Benini, “Long-short range communication network leveraging lora™ and wake-up receiver,” *Microprocessors and Microsystems*, vol. 56, pp. 184–192, 2018.
- [121] A. J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadinia, and N. Strachan, “Evaluation of lora and lorawan for wireless sensor networks,” in *2016 IEEE SENSORS*, pp. 1–3, IEEE, 2016.
- [122] A. Okere and M. T. Iqbal, “A review of conventional fault detection techniques in solar pv systems and a proposal of long range (lora) wireless sensor network for module level monitoring and fault diagnosis in large solar pv farms,” *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 4, no. 6, 2020.
- [123] J. M. Paredes-Parra, A. J. García-Sánchez, A. Mateo-Aroca, and Á. Molina-García, “An alternative internet-of-things solution based on lora for pv power plants : Data monitoring and management,” *Energies*, vol. 12, no. 5, p. 881, 2019.
- [124] M. Alagumeenaakshi, S. Umamaheswari, A. A. Mevis, S. Seetha, and G. Hema, “Monitoring and controlling of solar photovoltaic cells using lora technology,” in *2021 International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*, pp. 1–6, IEEE, 2021.
- [125] G. C. G. d. Melo, I. C. Torres, Í. B. Q. d. Araújo, D. B. Brito, and E. d. A. Barboza, “A low-cost iot system for real-time monitoring of climatic variables and photovoltaic generation for smart grid application,” *Sensors*, vol. 21, no. 9, p. 3293, 2021.
- [126] M.-S. Kim, D.-H. Kim, H.-J. Kim, and K. Prabakar, “A novel strategy for monitoring a pv junction box based on lora in a 3 kw residential pv system,” *Electronics*, vol. 11, no. 5, p. 709, 2022.
- [127] C. Bouras, A. Gkamas, and S. A. K. Salgado, “Energy efficient mechanism for lora networks,” *Internet of Things*, vol. 13, p. 100360, 2021.
- [128] S.-Y. Wang, J.-E. Chang, H. Fan, and Y.-H. Sun, “Comparing the performance of nb-iot, lte cat-m1, sigfox, and lora for iot end devices moving at high speeds in the air,” *Journal of Signal Processing Systems*, vol. 94, no. 1, pp. 81–99, 2022.

- [129] M. C. Bueso, J. M. Paredes-Parra, A. Mateo-Aroca, and A. Molina-García, “Sensitive parameter analysis for solar irradiance short-term forecasting : Application to lora-based monitoring technology,” *Sensors*, vol. 22, no. 4, p. 1499, 2022.
- [130] M. Xhonneux, J. Louveaux, and D. Bol, “Implementing a lora software-defined radio on a general-purpose ulp microcontroller,” in *2021 IEEE Workshop on Signal Processing Systems (SiPS)*, pp. 105–110, IEEE, 2021.
- [131] M. H. M. Ghazali, K. Teoh, and W. Rahiman, “A systematic review of real-time deployments of uav-based lora communication network,” *IEEE Access*, vol. 9, 2021.
- [132] U. Alset, H. Mehta, and A. Kulkarni, “Evaluation of antenna dependent wireless communication based on lora for clear line of sight (clos) and non-clear line of sight (nc-clos) applications,” in *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 1964, p. 032001, IOP Publishing, 2021.
- [133] O. Elijah, S. K. A. Rahim, V. Sittakul, A. M. Al-Samman, M. Cheffena, J. B. Din, and A. R. Tharek, “Effect of weather condition on lora iot communication technology in a tropical region : Malaysia,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 72835–72843, 2021.
- [134] “Access line ultra-low-power 32-bit MCU Arm®-based Cortex®-M0+, up to 32KB FLASH, 8KB SRAM, 1KB EEPROM, ADC. ST,” 2018.
- [135] Semtech, “Sx1276/77/78/79—137 mhz to 1020 mhz low power long range transceiver,” 2019.
- [136] “E32-433t20dc user manual. chengdu ebyte electronic technology co,” 2019.
- [137] D. Bhadra, V. S. Vij, and K. S. Stevens, “A low power uart design based on asynchronous techniques,” in *2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWS-CAS)*, pp. 21–24, IEEE, 2013.
- [138] Y.-y. Fang and X.-j. Chen, “Design and simulation of uart serial communication module based on vhdl,” in *2011 3rd International Workshop on Intelligent Systems and Applications*, pp. 1–4, IEEE, 2011.
- [139] AUTODESK, “Eagle product overview, <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>.”
- [140] S. Latreche, A. E. Badoud, and M. Khemliche, “Implementation of mppt algorithm and supervision of shading on photovoltaic module,” *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 8, no. 6, pp. 3541–3544, 2018.
- [141] A. Patel and M. Ferdowsi, “Current sensing for automotive electronics—a survey,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 4108–4119, 2009.
- [142] D. T. Thayalan, H.-S. Lee, and J.-H. Park, “Low-cost high-efficiency discrete current sensing method using bypass switch for pv systems,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 4, pp. 769–780, 2013.
- [143] T. Instruments, “Ina219 zero-drift, bidirectional current/power monitor with i2c interface,” *Dallas, TX, USA : Texas Instruments*, 2019.
- [144] “The i2c-bus and how to use it, PHILIPS SEMICONDUCTORS,” 1995.

- [145] A. K. Benachinamardi and U. Wali, "Design of can transmitter with an i2c interface," *International Journal of Computer Applications*, vol. 975, p. 8887, 2011.
- [146] A. S. Nouman, A. Chokhachian, D. Santucci, and T. Auer, "Prototyping of environmental kit for georeferenced transient outdoor comfort assessment," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8, no. 2, p. 76, 2019.
- [147] R. Semiconductor, "Digital 16bit serial output type ambient light sensor ic bh1750fvi," *no*, vol. 9046, pp. 1–14, 2011.
- [148] J. Gao, J. Luo, A. Xu, and J. Yu, "Light intensity intelligent control system research and design based on automobile sun visor of bh1750," in *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, pp. 3957–3960, IEEE, 2017.
- [149] M. Tanenhaus, D. Carhoun, T. Geis, E. Wan, and A. Holland, "Miniature imu/ins with optimally fused low drift mems gyro and accelerometers for applications in gps-denied environments," in *Proceedings of IEEE/ION PLANS 2012*, pp. 259–264, 2012.
- [150] T. Seel and T. Schauer, "Imu-based joint angle measurement made practical," in *Proc. of the 4th European Conference on Technically Assisted Rehabilitation*, 2013.
- [151] R. Zhu and Z. Zhou, "A real-time articulated human motion tracking using tri-axis inertial/magnetic sensors package," *IEEE Transactions on Neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 295–302, 2004.
- [152] N. Ahmad, R. A. R. Ghazilla, N. M. Khairi, and V. Kasi, "Reviews on various inertial measurement unit (imu) sensor applications," *International Journal of Signal Processing Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 256–262, 2013.
- [153] "ANALOG DEVICES, ADXL345 3-axis ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g digital accelerometer data sheet."
- [154] "HONEYWELL, 3-Axis digital compass ic hmc5883l datasheet, <http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/sensors/magneto/hmc5883l-fds.pdf>."
- [155] S. Dubey, J. N. Sarvaiya, and B. Seshadri, "Temperature dependent photovoltaic (pv) efficiency and its effect on pv production in the world—a review," *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 311–321, 2013.
- [156] T. Bhattacharya, A. K. Chakraborty, and K. Pal, "Effects of ambient temperature and wind speed on performance of monocrystalline solar photovoltaic module in tripura, india," *Journal of Solar Energy*, vol. 2014, 2014.
- [157] AOSONG, "AM2301 temperature and humidity module product manual, <http://www.haoyuelectronics.com/attachment/am2301/am2301.pdf>."
- [158] D. Awtrey and D. Semiconductor, "Transmitting data and power over a one-wire bus," *Sensors-The Journal of Applied Sensing Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 48–51, 1997.
- [159] D. Stipanicev and J. Marasovic, "Networked embedded greenhouse monitoring and control," in *Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 2003. CCA 2003.*, vol. 2, pp. 1350–1355, IEEE, 2003.

- [160] “Stm32f101xx, stm32f102xx and stm32f103xx, stm32f105xx, stm32f107xx advanced arm®-based 32-bit mcus reference manual,” *STMicroelectronics, RM0008*, 2015.
- [161] D. O’Sullivan and T. Igoe, *Physical computing : sensing and controlling the physical world with computers*. Course Technology Press, 2004.
- [162] M. Banzi, “Getting started with arduino,” *O’Reilly Media Inc.*, vol. 10, pp. 978–1, 2009.
- [163] A. Nayyar and V. Puri, “A review of arduino board’s, lilypad’s & arduino shields,” in *2016 3rd international conference on computing for sustainable global development (INDIACom)*, pp. 1485–1492, IEEE, 2016.
- [164] A. A. Galadima, “Arduino as a learning tool,” in *2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, pp. 1–4, IEEE, 2014.
- [165] “Accessport serial port monitoring tool website, <http://www.sudt.com/en/ap/index.html>.”

Annexe A

Schémas de conception des capteurs

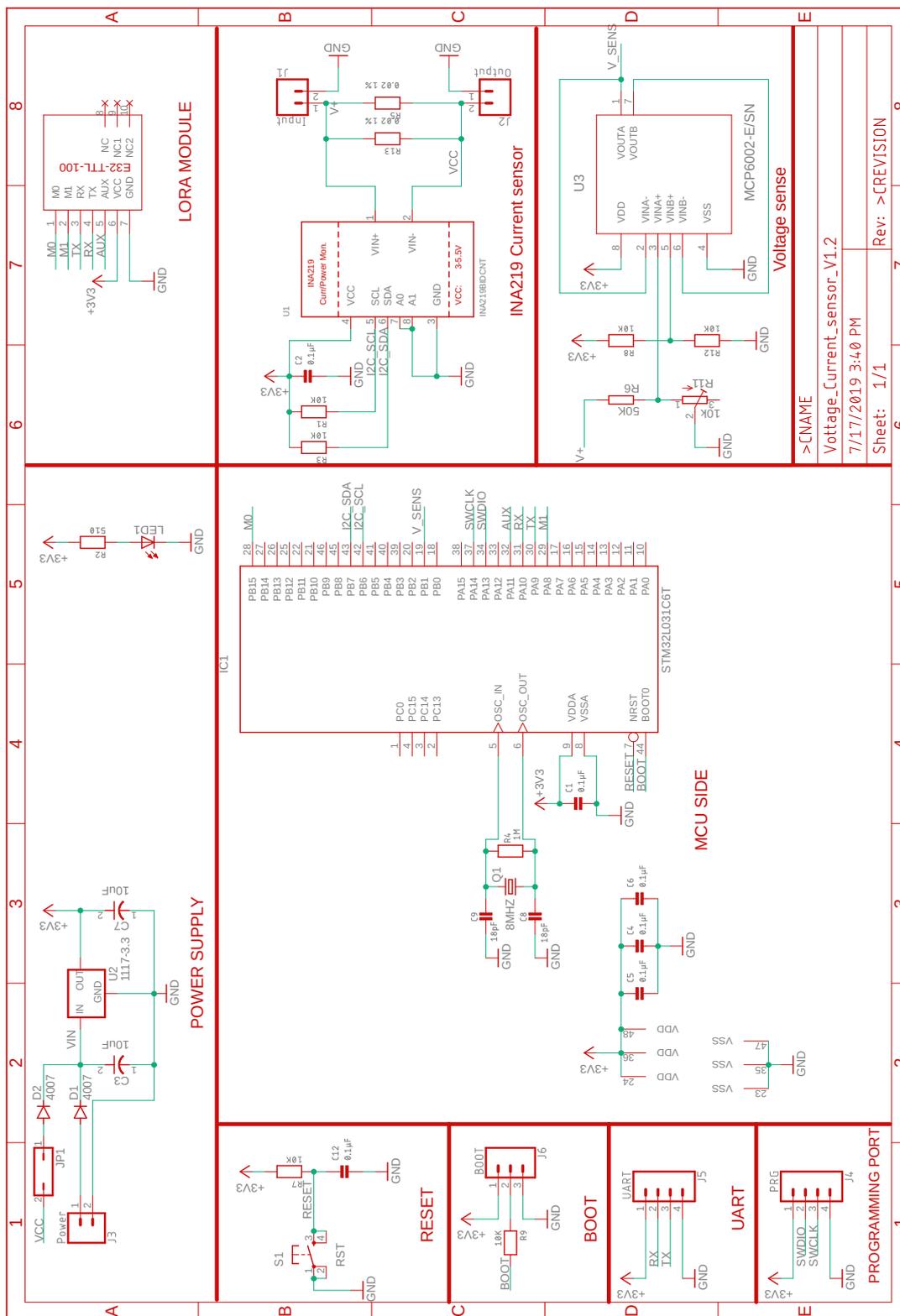


FIGURE A.1 – Schéma de conception du capteur LoRa sans fil de tension/courant.

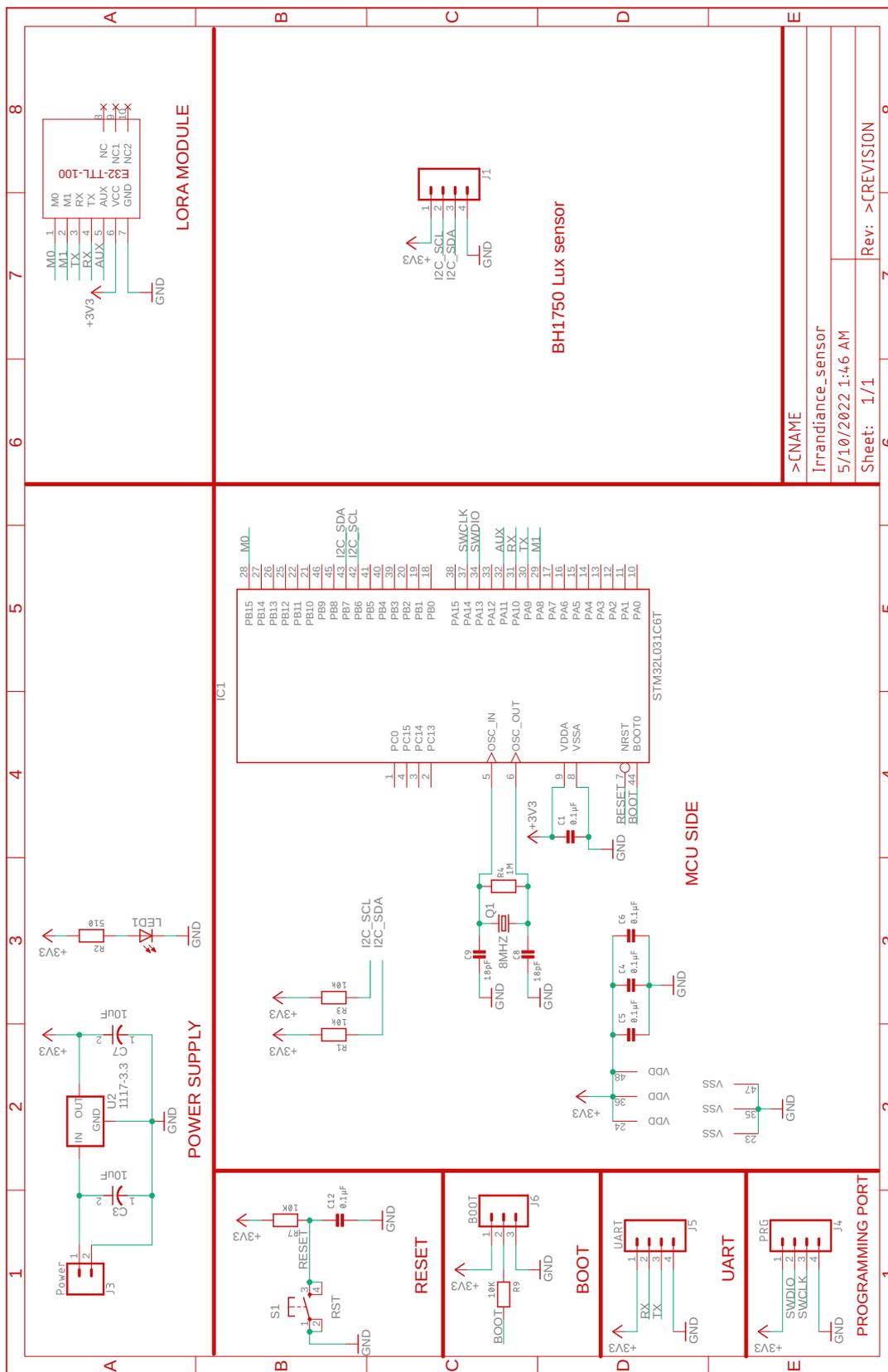


FIGURE A.2 – Schéma de conception du capteur LoRa sans fil de radiation solaire.

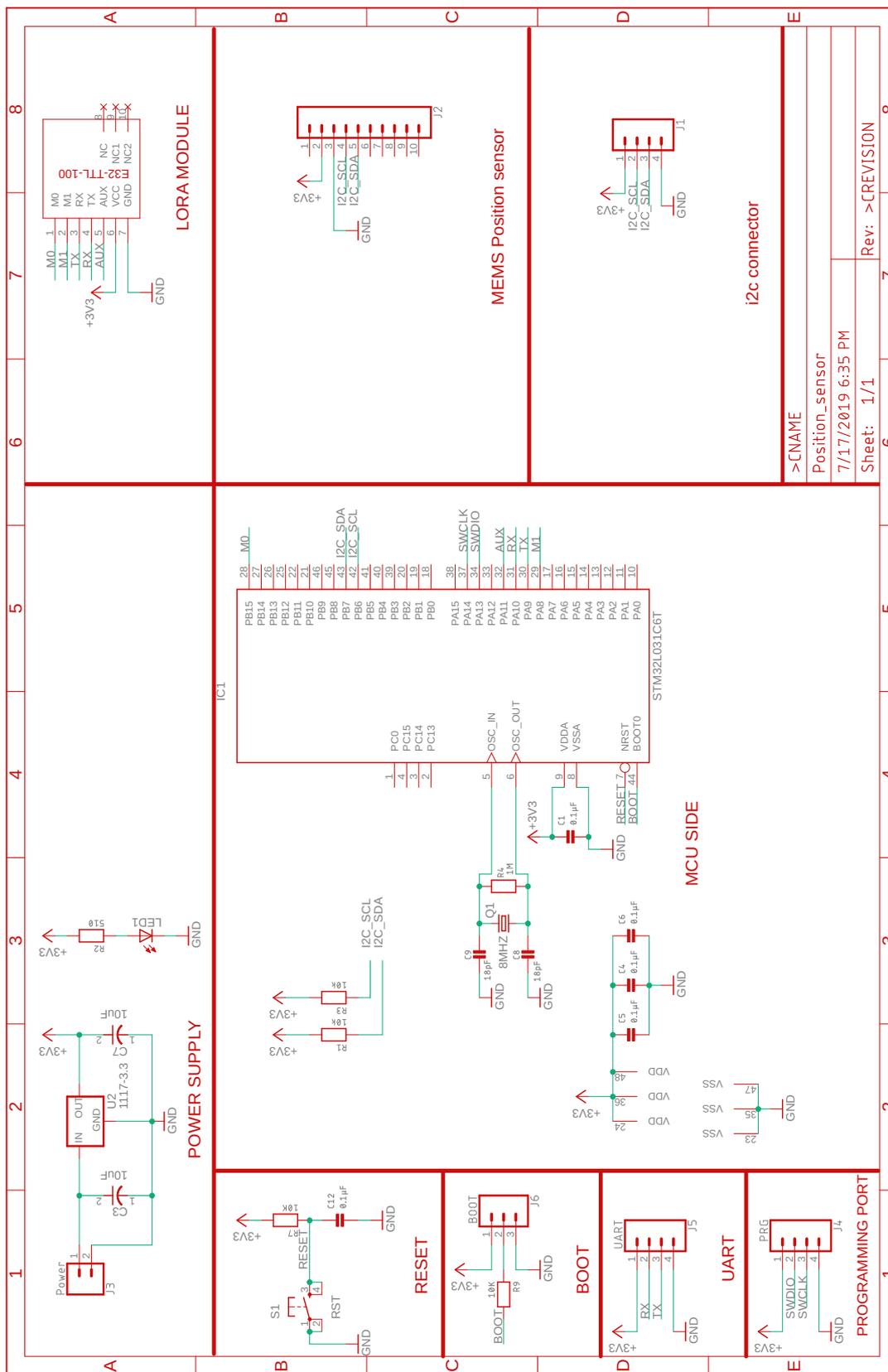


FIGURE A.3 – Schéma de conception du capteur LoRa sans fil de position du panneau solaire.

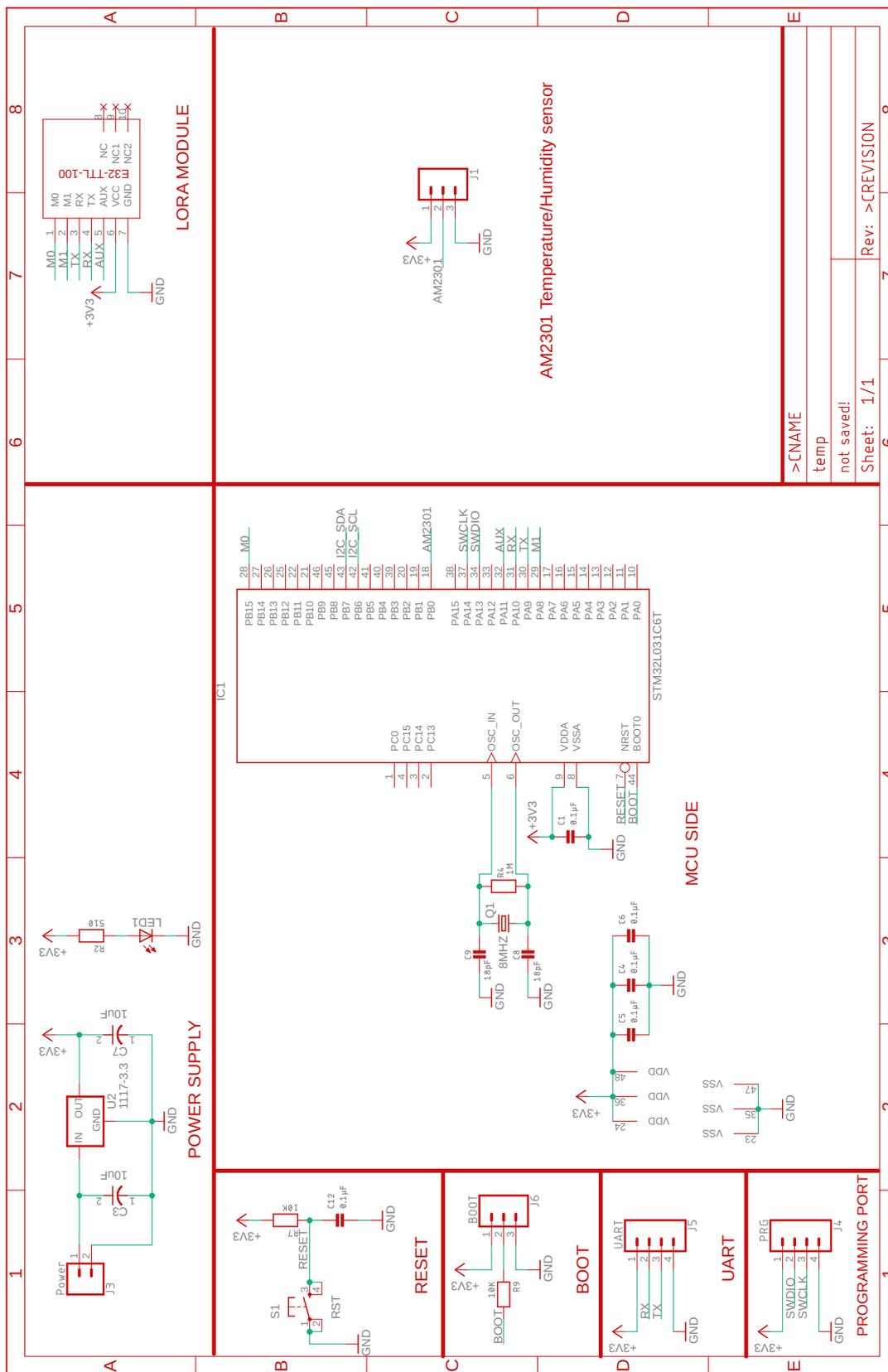


FIGURE A.4 – Schéma de conception du capteur LoRa sans fil de température ambiante et d’humidité.

Annexe B

Brochage des cartes MCU utilisées

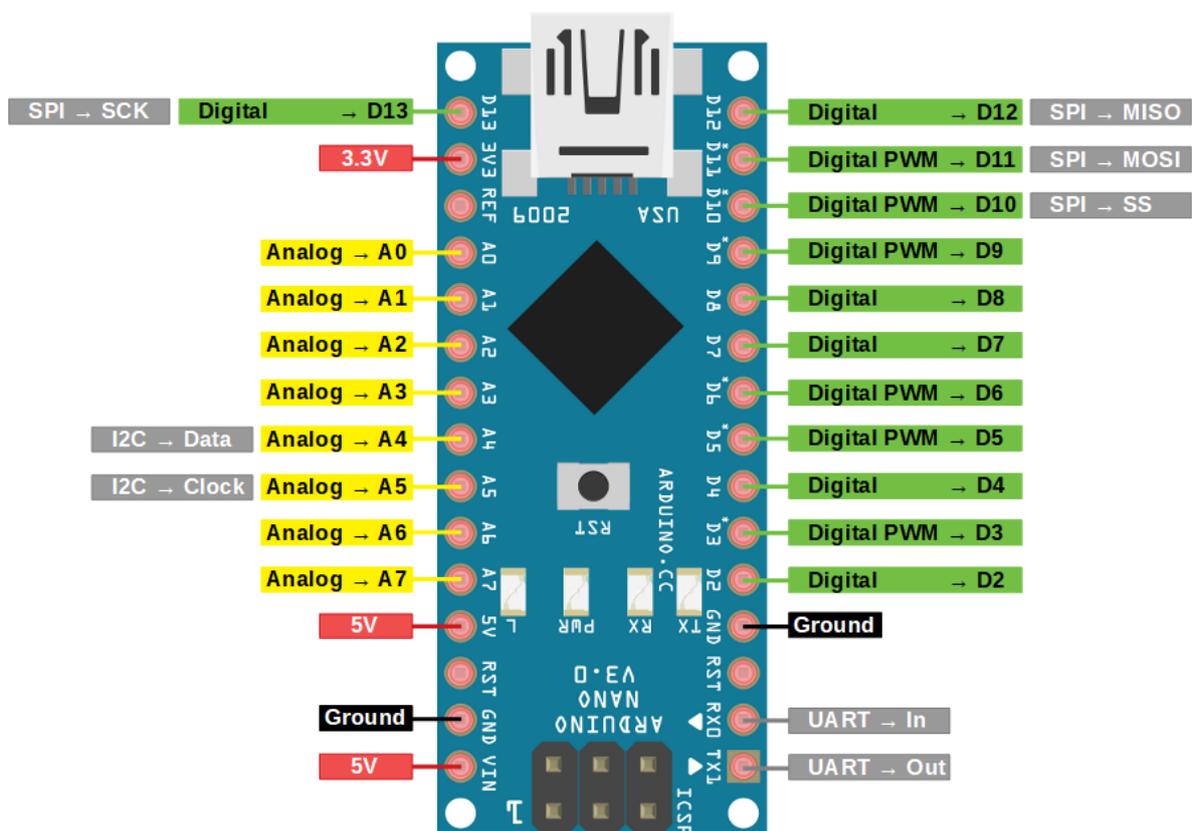


FIGURE B.1 – Diagramme de de l'Arduino Nano

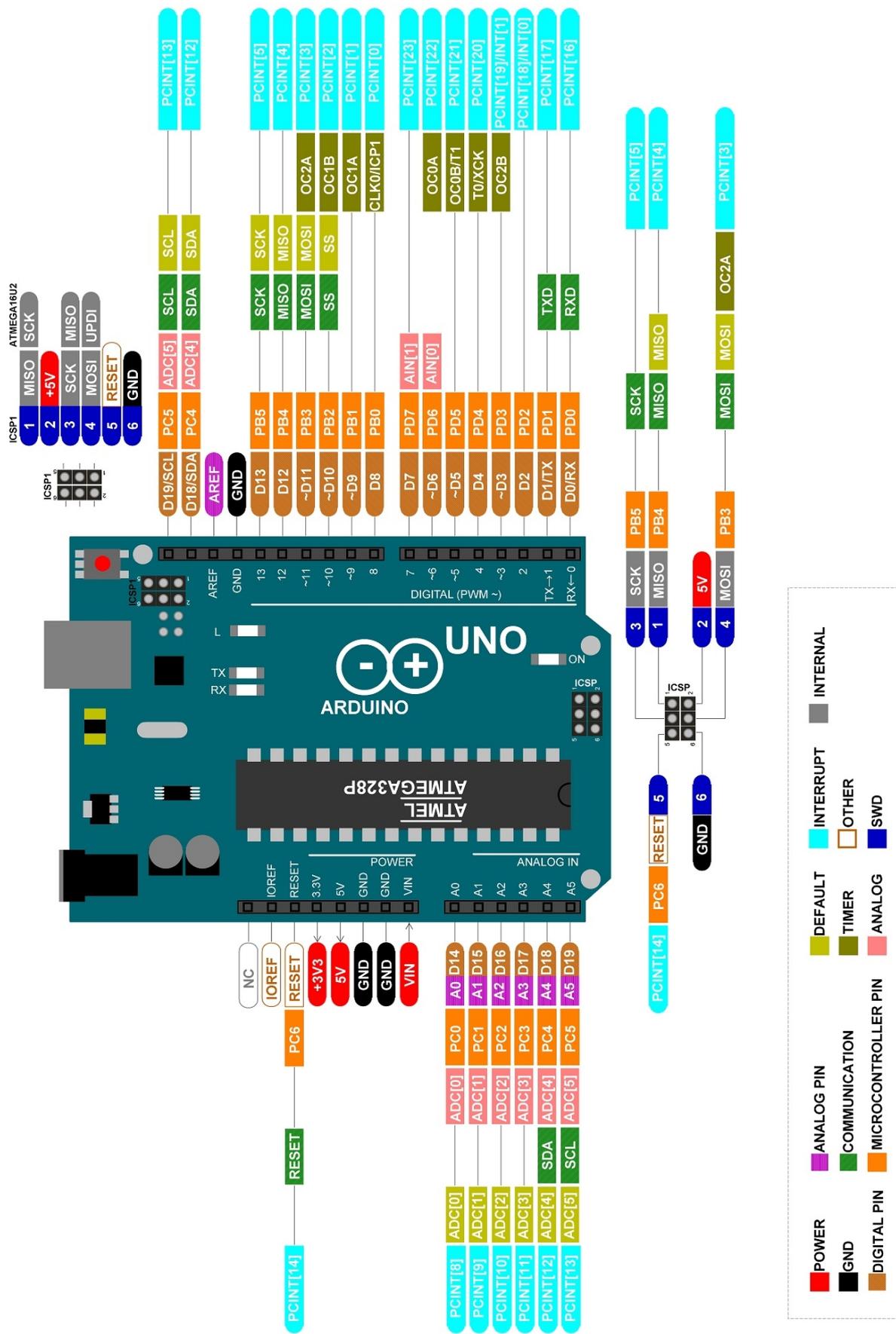


FIGURE B.2 – Diagramme de brochage de l'Arduino Uno

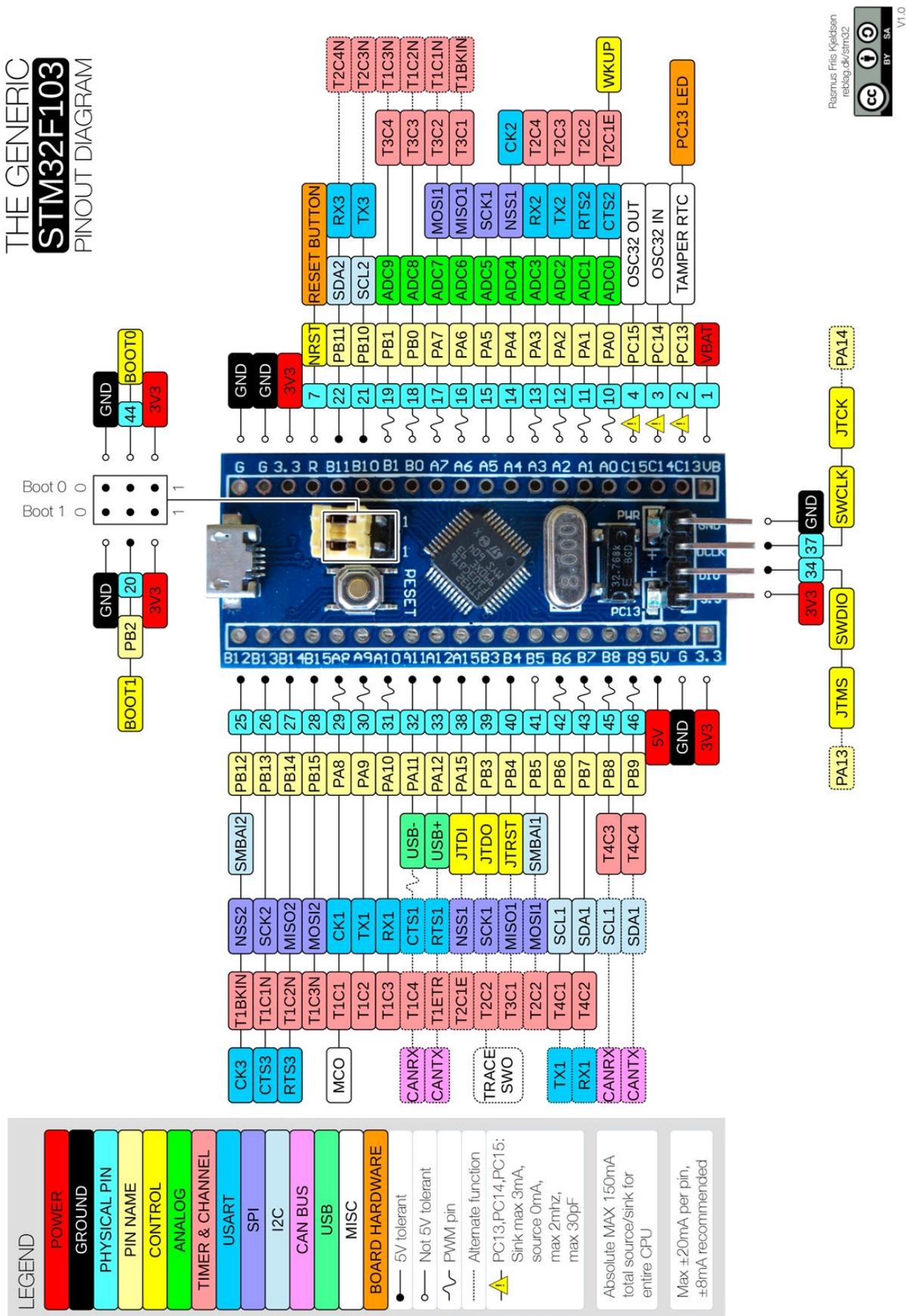


FIGURE B.3 – Diagramme de brochage de carte MCU STM32F103

ملخص مراقبة أنظمة توليد الطاقة أمر أساسي لا غنى عنه وهو من متطلبات أنظمة توليد الطاقة الكهروضوئية. يُعد عمل هذه الأطروحة جزءًا من سياق دمج التقنيات الحديثة من أجل مراقبة النظم الكهروضوئية. يعرض هذا العمل تصميمًا وتنفيذًا لنظام مراقبة لاسلكي للنظم الكهروضوئية إذ يهدف إلى قياس العوامل والخصائص الرئيسية للنظام ، والعوامل البيئية كذلك. يعتمد تصميم هذا النظام على تقنية LoRa اللاسلكية طويلة المدى مع متحكم STM32L031C6 الذي يتميز باستهلاك منخفض جدا للطاقة. LoRa هي تقنية تشكيل طيف منتشر مشتقة من Chirp Spread Spectrum (CSS). وهي جزء من نطاق الشبكات واسعة المدى منخفضة الطاقة. فهي توفر نظامًا لاسلكيًا طويل المدى ومنخفض الإستهلاك مناسب للتطبيقات الاحترافية لشبكات الاستشعار اللاسلكية المعروفة باسم Wireless Sensor Network (WSN) ..LoRa هي تطبيق شبكة فيزيائي ، لذلك يقَدَم هذا العمل أيضا بروتوكولات اتصال الطبقات العليا للشبكة. تتم إدارة الشبكة بواسطة جهاز المراقبة المحمول ويتم تحصيل البيانات على جهاز كمبيوتر مزود بوحدة LoRa. النتائج المقدمة بعد تشغيل النظام هي ثمرة أكثر من 30750 عينة بيانات. هذا العمل يوفر مرونة جيدة لنظام المراقبة ما يجعله قابلا للتوسع بسهولة مما يفتح المجال لتطبيقات أخرى على مستوى أنظمة الطاقة الكهروضوئية.

الكلمات مفتاحية : مراقبة ؛ نظام كهروضوئي ؛ شبكة استشعار لاسلكية ؛ شبكة واسعة النطاق منخفضة الطاقة ؛ مستشعر LoRa ؛ تحصيل البيانات ؛ متحكم STM32.

Résumé : La surveillance des systèmes de production d'énergie est indispensable et est devenue l'une des exigences des systèmes de production PV. Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le cadre de l'intégration des nouvelles technologies. Il présente la conception et la mise en œuvre d'un système de surveillance sans fil pour les installations PV. La conception de ce système est basée sur la technologie sans fil longue portée LoRa et les microcontrôleurs STM32L031C6 à ultra faible consommation d'énergie. Le système proposé est composé d'un ensemble de capteurs sans fil autonomes connectés avec un ou plusieurs systèmes de surveillance. LoRa est une implémentation physique, donc les protocoles de communication des couches réseau supérieures est également présenté. La gestion du réseau est effectuée par le dispositif de surveillance mobile et l'acquisition des données est effectuée sur un ordinateur équipé d'un module LoRa. Les résultats présentés après avoir fait fonctionner le système, sont le fruit de plus de 30750 échantillons de données. Ce travail offre une flexibilité et extensibilité faciles et ouvre un éventail pour d'autres applications au niveau des installation PV.

Mots-clés : Surveillance ; Système PV ; Réseau de capteurs sans fil ; Réseau étendu à faible consommation ; Capteur LoRa ; Acquisition de données ; Microcontrôleur STM32.

Abstract: Monitoring of power generation systems is indispensable and it has become one of the requirements in PV generation systems. The work of this thesis is a part of the context of integrating new technologies. It presents the design and the implementation of a wireless monitoring system for PV installations. The design of this system is based on LoRa long range wireless technology and ultra-low power consumption STM32L031C6 microcontrollers. The proposed system is composed of a set of autonomous wireless sensors connected with one or more monitoring systems. LoRa is a physical implementation, so higher network layer communication protocols are also presented. Network management is performed by the mobile monitoring device and data acquisition is performed on a computer equipped with a LoRa module. The results presented after running the system are the fruit of over than 30,750 data samples. This work offers easy system flexibility and scalability and it opens a range for other applications at PV plant level.

Keywords: Monitoring; PV system; Wireless sensor network (WSN); Low-power wide area network (LPWAN); LoRa sensor; Data acquisition; STM32.